XXVIII МНТК МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

2021

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции

2021 ДОНЕЦК

Министерство образования и науки ДНР
Министерство промышленности и торговли ДНР
Международный союз машиностроителей
Ассоциация технологов-машиностроителей России
Абхазский государственный университет
Брянский государственный технический университет
Воронежский государственный технический университет
Донбасский государственный технический университет
Донецкий национальный технический университет
Донской государственный технический университет
Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева
Камчатский государственный технический университет
Луганский национальный университет им. В. Даля
Национальный политехнический университет Армении
Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Севастопольский государственный университет
Усинский и Воркутинский филиалы Ухтинского государственного технического университета
Научно-исследовательский центр по проблемам отраслевого машиноведения при Ташкентском государственном техническом университете им. А.Р. Беруни
СПТК им. маршала инж. войск А.В. Геловани, ООО «Горловский энергомеханический завод», АО «Феодосийский оптический завод», ОАО НИИ «Изотерм», ЧП «Технополис»

Посвящается 100-летнему юбилею ДОННТУ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

Сборник трудов

XXVIII
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

13 - 19 сентября 2021 г. в городе Севастополе

Донецк-2021

ББК К5я54
УДК 621.01(06)

Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-19 сентября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – 615 с.

ISSN 2079-2670

В сборник включены материалы XXVIII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», отражающие научные и практические результаты в области обработки изделий прогрессивными методами, создания нетрадиционных технологий и оборудования. Представлены современные достижения и перспективные направления развития технологических систем, металлорежущего инструмента и оснастки. Освещены современные проблемы материаловедения в машиностроении. Рассмотрены вопросы механизации и автоматизации производственных процессов, управления качеством и диагностики технических систем. Приведены сведения об особенностях моделирования, экономических проблемах производства, вопросах инженерного образования и других актуальных проблемах техносферы.

Предназначен для научно-технических работников, ИТР и специалистов в области машиностроения и техносферы.

Сборник издается при содействии Международного союза машиностроителей.
Конференция проводится в рамках Международного форума «ТЕХНОСФЕРА - 2021»

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 5 от 04 июня 2021 г.)

Адрес международного организационного комитета:
ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема 58, ДонНТУ
Тел.: +38 (062) 301-08-40, +38 (062) 301-08-05
Моб. тел. +38 (071) 3060879
E-mail: *mntk21@mail.ru*
http://konf-sev.donntu.org

© Автори статей, 2021 г.
© ДонНТУ, 2021 г.

ISSN 2079-2670

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Сопредседатели: Ректор ДонНТУ, к.т.н., профессор **Аноприенко А.Я.** (ДНР); зам. министра МОН ДНР, д.ф.-м.н., проф. **Варюхин В.Н.;** ректор КамчатГТУ, д.соц.н., проф. **Левков С.А.** (Россия)**;** ректор ЛНУ им. В. Даля, д.т.н., профессор **Рябичев В.Д.** (ЛНР)**;** ректор БГТУ, д.т.н., проф. **Федонин О.Н.** (Россия).

Члены: зав. кафедрой КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, к.т.н., проф. **Альпеисов А.Т.;** зам. директора НГМК **Ан В.Ф.;** нач. отдела ИМАШ РАН, д.т.н., проф. **Базров Б.М.;** директор ООО «ГЭМЗ» **Байчоров А.А.;** профессор ГИУА, д.т.н. **Баласанян Б.С.;** профессор ИМ и СС АН РУ, д.т.н. **Бахадиров Г.А.;** директор ММИ УрФУ, д.т.н., проф. **Блинков О.Г.;** проректор по научной работе ДонНТУ, д.т.н., проф. **Борщевский С.В.;** профессор СевГУ, д.т.н. **Бохонский А.И.;** зав. кафедрой СевГУ, д.т.н., проф. **Братан С.М.;** ген. директор АО «ФОЗ» **Буряк В.Ю.;** профессор ИТА ЮФУ, д.т.н. **Бутенко В.И.;** зав. кафедрой, д.т.н., проф. **Буялич Г.Д.;** профессор ТГУ, д.т.н. **Вайнер Л.Г.;** зав. кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., проф. **Васильев А.С.;** проректор ЛНУ им. В. Даля, д.т.н., проф. **Витренко В.А.;** профессор БГТУ, д.т.н. **Горленко О.А.;** зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., профессор **Гусев В.В.;** профессор ОИФТПС ЯНЦ СО РАН, д.т.н. **Гусев Е.Л.;** зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Гутаревич В.О.;** секретарь Научно-технического союза машиностроения Болгарии **Дамянов Д.;** профессор КазАТУ, д.т.н **Данияров Н.А.**; проректор АГУ, д.т.н., проф. **Делба В.В.;** зав. кафедрой ЯТУ, д.т.н., проф. **Додун О.;** зав. кафедрой ДонНУЭТ, д.т.н., проф. **Заплетников И.Н.;** зав. кафедрой ДонГТУ, к.э.н., доц. **Зинченко А.М.;** вед. научн. сотр. ИМЕТ РАН, д.ф-м.н. **Ермишкин В.А.;** профессор Сирийского ТУ, д.т.н. **Избер Дж.**; проректор ДонНТУ, к.т.н, проф. **Каракозов А.А.;** профессор БВТА, д.т.н. **Керекеш Т.;** профессор УГТУ, д.т.н. **Киселев Е.С.;** зав. кафедрой КамчатГТУ, к.т.н., доц. **Костенко А.В.;** проф. Волгодонского филиала НИЯУ «МИФИ», д.т.н. **Кравченко П.Д.;** гл. научн. сотр. ОАО «НПО ЦКТИ», д.т.н. **Кругликов П.А.;** зав. кафедрой УГГУ, д.т.н., проф. **Лагунова Ю.А.;** профессор ДГТУ, д.т.н. **Лебедев В.А.;** профессор ЛТУ, д.т.н. **Ленник К.;** профессор Юнеско, д.т.н.h.c. **Либерман Я.Л.;** зав. кафедрой ТУМ, д.т.н. **Мазуру С.;** профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н. **Малышева Г.В.;** профессор ТУМ, д.т.н. **Марин А.З.**; ректор ДГТУ, д.т.н., проф. **Месхи Б.Ч.;** председатель Международного союза машиностроителей, зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Михайлов А.Н.;** профессор ЯТУ, д.т.н. **Мускy Г.;** поректор ДонНТУ, профессор **Навка И.П.;** инженер **Недашковский А.П.;** профессор ЯТУ, д.т.н. **Неделку Д.;** зав. кафедры РГАТУ им. П.А. Соловьева, д.т.н., проф. **Непомилуев В.В.;** профессор кафедры ТМ СевГУ, д.т.н. **Новоселов Ю.К.;** зам. директора ММИ УрФУ, д.т.н., проф. **Овчинникова В.А.;** профессор Портсмутского университета **Оливер Т.**; зав. кафедрой СНИУ им. Академика С.П. Королева, д.т.н., проф. **Павлов В.Ф.;** профессор Ясского технического университета, д.т.н. **Параскив Д.**; зав. кафедрой БГТУ, д.т.н., проф. **Петрешин Д.И.;** зав. кафедрой УФ УГТУ, д.ф.н., проф. **Пичко Н.С.;** проректор ППИ, д.т.н., профессор **Плохов И.В.;** профессор КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, д.т.н. **Поветкин В.В.;** директор ПИ СевГУ, д.т.н., проф. **Покинтелица Н.И.;** председатель НТО машиностроителей Болгарии, д.т.н., проф. **Попов Г.;** зав. кафедрой ТГУ, д.т.н., проф. **Прейс В.В.;** зав. кафедрой БГТУ, д.т.н., проф. **Прокофьев А.Н..;** профессор ЯТУ, д.т.н. **Прутяну О.В.;** зав. кафедрой СПбПУ, д.т.н., профессор **Радкевич М.М.;** профессор ОГУ им. И.И. Тургенева, д.т.н. **Савин Л.А.;** первый проректор ВГТУ, д.т.н., проф. **Сафонов С.В.;** директор ИТИС Политехники Любельской, д.т.н., проф. **Свиць А.**; декан ДонНТУ, к.т.н., доц. **Селивра С.А.;** декан РГАТУ им. П.А. Соловьева, д.т.н., проф. **Семенов А.Н.;** зав. кафедрой КубГАУим. И.Т. Трубилина, д.т.н., проф. **Серга Г.В.;** профес-

сор ВГУ, д.т.н. **Скворцов А.И.;** зав. кафедрой ЯТУ, д.т.н., профессор **Слэтиняну Л.;** лауреат премии Правительства РФ, профессор ВГТУ, д.т.н. **Смоленцев В.П.;** почетный работник ВО РФ, зав. кафедрой ВГТУ, д.т.н., проф. **Смоленцев Е.В.;** профессор БелГТУ, д.т.н. **Стрельников В.Н.;** засл. деятель науки и техники, почетный предс. Президиума Ассоциации технологов-машиностроителей России, д.т.н., проф. **Суслов А.Г.;** зав. кафедрой ДГТУ д.т.н., проф. **Тамаркин М.А.;** декан ТУМ, д.т.н., проф. **Тока А.**; профессор ГТУ, д.т.н. **Турманидзе Р.С.;** профессор Сызранского филиала СГТУ, д.т.н. **Усов В.П.;** директор УФ УГТУ **Филиппова О.В.;** профессор БГТУ, д.т.н. **Хандожко А.В.;** Президиум НАН Беларуси, профессор, д.т.н. **Хейфец М.Л.;** профессор НИУ «МЭИ», д.т.н. **Хроматов В.Е.;** зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Шабаев О.Е.;** НПО «Искра», д.т.н., проф. **Шайдурова Г.И.;** профессор Азербайджанского ТУ **Шарифов З.З.;** зав. кафедрой Силезского технического университета, д.т.н., проф. **Швидер Ю.;** зав. кафедрой ТГУ, д.т.н., проф. **Ямников А.С**.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ (редакционная коллегия)

Председатель – Председатель Международного союза машиностроителей, зав. кафедрой ТМ ДонНТУ, д.т.н., проф. **Михайлов А.Н.**

Заместитель председателя: доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Грубка Р.М.**

Ученый секретарь – доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Петряева И.А.**

Технический секретарь – ст. препод. кафедры ТМ ДонНТУ **Голубов Н.В.**

Члены: доктор Багдадского ТУ, к.т.н., доцент **Аль-Судани Т.Т.;** директор СПТК **Баранов Н.В.;** профессор кафедры ЮЗГУ, д.т.н. **Борзов Д.Б.;** доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Буленков Е.А.;** доктор Тунисского ТУ, к.т.н., доцент **Гитуни А.;** профессор кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Горобец И.А.;** зам. директора ОАО НИИ «Изотерм», к.т.н. **Добровольский Г.И.;** препод. КамчатГТУ **Игнаткина Е.Л.;** доцент кафедры БГТУ, к.т.н. **Карпушкин В.А.;** доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Коваленко В.И;** проректор АГЗ МЧС ДНР **Колодяжный А.А.;** зав. кафедрой КамчатГТУ, к.т.н., доц. **Костенко А.В.;** к.т.н. **Котляров Б.С.;** аспирант кафедры ТМ ДонНТУ **Котляров В.Б.;** аспирант кафедры ТМ ДонНТУ **Кравчук Ю.А.;** профессор СПбПУ, д.т.н. **Кудрявцев В.Н.;** доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Лахин А.М.;** доцент кафедры СМ ДонНТУ, к.т.н. **Лукичев А.В.;** инженер кафедры ТМ ДонНТУ **Макеева О.А.;** доцент кафедры ГЗТиЛ ДонНТУ, к.т.н. **Матвиенко С.А.;** доцент кафедры МД АГЗ МЧС ДНР, к.т.н. **Михайлов Д.А.;** доцент ДонНУЭТ, к.т.н. **Петрова Ю.Н.;** доцент кафедры ТУМ **Рушика И.Д.;** ст. преподаватель ДААТ **Стрельник Ю.Н.;** доцент кафедры ТМ, к.т.н. ДонНТУ **Чернышев Е.А.;** зав. кафедры ВОП ДАВД МВД ДНР, к.т.н. **Хавлин Т.В.;** доцент кафедры ЛА ТТИ ЮФУ, к.т.н. **Шаповалов Р.Г.;** доцент АГЗ МЧС ДНР, к.т.н. **Шейко Е.А.**

Уважаемые дамы и господа, дорогие друзья и коллеги!

Особенности научно-технического прогресса машиностроения и развития техносферы в условиях глобализации мировых отношений, всеобщего экономического и политического кризиса постоянно изменяют сложившийся мир техники и технологий. При этом происходящие изменения в техносфере настолько глубоки и значительны, что постоянно требуют всестороннего изучения и осмысления происходящих процессов, комплексного анализа всех особенностей и явлений. Поэтому проведение этой встречи обусловлено необходимостью получения ее участниками современной информации о последних достижениях науки и техники, а также потребностью ознакомления с основными изменениями, происходящими в техносфере.

В связи с этим, на этой встрече предусматривается особое внимание уделить вопросам создания и применения прогрессивных, специальных и нетрадиционных технологий. Нам необходимо рассмотреть насущные проблемы техники, связанные с механизацией и автоматизацией производственных процессов, а также с созданием прогрессивного оборудования. Здесь будут затронуты вопросы проектирования и применения прогрессивных инструментов, управления качеством промышленной продукцией, сертификации, метрологии, диагностики и эксплуатации технологических систем, создания информационных и наукоемких технологий. Приоритетными направлениями на нашей конференции будут также вопросы, нацеленные на развитие процесса профессионального образования в системе Евразийского образовательного пространства. А также множество других важнейших вопросов науки и техники нам предстоит обсудить, а именно связанных с развитием машиноведения, инженерии материалов, нанесения нетрадиционных покрытий, моделирования, расчетов сложных технических систем, специальной техники и технологий техносферы, горного и нефтегазового дела, экологии и экономики. Этих основных и других вопросов техносферы планируется коснуться участниками конференции здесь на нашей встрече.

Можно отметить, что опыт проведения предыдущих конференций убедительно показывает на важность и большую потребность личных контактов ученых, ведущих специалистов и представителей предприятий. Они позволяют плодотворно развивать живое творческое сотрудничество между учеными и специалистами предприятий и организаций. А это в перспективе будет способствовать повышению научного потенциала ученых и производства.

На этой встрече планируется активизировать процесс обмена и получения современной информации научно-технического характера, развития сотрудничества и личных творческих связей. Поэтому проведение этой конференции, на наш взгляд, позволит наметить основные ориентиры и определить вектор прогрессивного развития машиностроения и техносферы, а также подвести итого развития новой техники и технологий для выработки общих рекомендаций по их ориентированному и целенаправленному развитию в условиях мирового кризиса.

Особенно необходимо подчеркнуть то, что одновременно с работой этой конференции состоится очередной уже XXII съезд членов Международного союза машиностроителей. Основной и важнейшей задачей работы этой международной общественной организации является консолидация ученых, специалистов и руководителей промышленных предприятий для содействия процессу развития машиностроения и техносферы в условиях глобализации мировых отношений. Совместное проведение этих мероприятий будет способствовать активизации процессов развития техносферы и международного сотрудничества.

Организационный комитет конференции убежден, что эти встречи традиционно пройдут творчески и плодотворно, будут способствовать консолидации ученых и специалистов различных стран, широкому обмену информации научно-технической характера, а также дадут необходимый творческий импульс для дальнейшего развития машиностроения и техносферы.

С наилучшими пожеланиями

Председатель Международного организационного
комитета конференции **Михайлов А.Н.**

УДК 621: 004.915

СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН В СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА

Аверченков В.И., Надуваев В.В. *(БГТУ, г. Брянск, Россия)*
Тел/факс : (4832) 588-220; E-mail: aver@tu-bryansr.ru

Abstract: *The paper studies the generalized approach to designing the content of educational electronic resources on the basis of forming integrated methodology of instruction in special technical disciplines with the wide use of modern information technologies and educational resources.*

Keywords: *electronic educational resources, designing e-learning resources, the development of the content, rendering the content objects.*

В настоящее время существует множество методик разработки электронных образовательных ресурсов (ЭОР), которые, как правило, содержат общие рекомендации по построению структуры электронного курса, т.е. имеют рекомендательный характер. Под электронным образовательным ресурсом понимается образовательный ресурс, представленный в цифровой форме и включающий в себя структуру, предметное содержание и метаданные о них, а также данные, информацию, программное обеспечение, необходимые для его использования в учебном процессе. Выделяются следующие виды обучения: электронное, мобильное, сетевое, автономное, смешанное, совместное. При этом дополнительно вводится понятие «образовательный контент», под которым понимается структурированное предметное содержание, используемое в образовательном процессе. В электронном обучении образовательный контент является основой электронного образовательного ресурса.

Электронные учебные ресурсы различной направленности, комплектности и применимости в учебном процессе могут иметь следующие формы:

- конспект лекций;
- учебное пособие;
- руководство по лабораторному практикуму;
- учебное пособие по циклу практических и семинарских занятий;
- демонстрационные презентации (слайд-лекции, лекционные и практические презентации);
- методическое обеспечение и материалы для самостоятельной работы;
- организационно-методические указания по изучению дисциплины;
- контрольно-измерительные материалы, вопросы для самопроверки и др.

Совокупность всех перечисленных материалов и их реализация в одном стиле может быть преобразована в электронный учебно-методический комплекс.

Особенностью ЭОР для специальных технических дисциплин является построение учебного процесса с опорой на теоретические знания, полученные при изучении физико-математических и общетехнических дисциплин, а также на практический опыт работы с реальными техническими устройствами и системами. Сложность обучения в этой области обусловлена огромной номенклатурой реальных технических систем и устройств. В этих условиях необходимо обеспечение понимания сущности происходящих процессов на базе изученных ранее теоретических основ для успешного усвоения основ проектирования, производства и эксплуатации целых классов реальных технических устройств и систем. Сложность формирования профессиональных компетенций у обучаемых зависит также от стоимости и

уникальности требуемого лабораторного оборудования, сложности технологических процессов и их реализации в учебных заведениях.

Рассмотрим основной процесс разработки ЭОР. Так как электронный образовательный ресурс является информационной системой, то соответственно его жизненный цикл есть жизненный цикл информационной системы, представляющий собой непрерывный процесс, начинающийся с момента принятия решения о создании информационной системы и заканчивающийся в момент полного изъятия ее из эксплуатации (из процесса обучения).

С учетом необходимости постоянного обновления и совершенствования ЭОР может быть предложена спиралевидная модель жизненного цикла этого вида информационной системы (ИС) (рис.1).

Рис.1. Спиральная модель жизненного цикла ЭОР

Спецификой разработки ЭОР на этапе завершения цикла является тестирование, внедрение в учебный процесс, оценка его эффективности и последующая корректировка, а также рецензирование и регистрация.

Оценка эффективности образовательных ресурсов и их корректировка проводятся, как правило, при помощи анкетирования контрольных групп студентов, при котором учитывается усваиваемость материала. На уровень усвоения материала влияет качество его передачи, доступность, наглядность и эргономичность ресурса.

Достижение эффективности ЭОР можно спрогнозировать на этапе анализа и проектирования системы путем проведения системного анализа исходных требований и задач.

Основной задачей разработки ЭОР для специальных технических дисциплин является формирование профессиональных компетенций. Компетентностный подход предполагает технологичность учебного процесса, необходимую для достижения заданных целей при обучении. При технологическом способе достижения учебных целей выпускник представляется «продуктом», качество которого определяется качеством образования. Такой подход дает возможность на основе структуризации и параметризации критериев качества оценивать воздействие технологии обучения на подготовку инженеров.

Успешность процесса обучения во многом зависит от организации учебного материала. Если курс предназначен для обучения при интенсивном взаимодействии преподавателя и обучаемого, то и требования к организации курса, организации и структурирования материала, обеспечения контроля будут определяться особенностями этого взаимодействия.

К качеству подготовки инженеров можно отнести следующие базовые понятия:

– технические знания – знания, обеспечивающие выпускнику базовый квалификационный уровень знаний по специальности;

– функциональные знания – знания, дающие понимание политики, процедур, практики и функциональных взаимосвязей, оказывающих существенное влияние на эффективность работы производственных систем в целом;

– технические способности – способности, возникающие на фоне общечеловеческих (таких, как индивидуально-психологические характеристики), обеспечивающие успешность выполнения инженерных видов деятельности;

– инженерный тип мышления - разновидность конструктивного мышления с особенностями, обусловленными характером инженерной деятельности при присутствии продуктивного, логического, креативного типов мышления;

– инженерно-мыслящая личность – личность, обладающая инженерным типом мышления и сформированными в процессе подготовки личностными качествами, позволяющими ей профессионально реализовываться в производственной системе управления;

– профессионализм – способность реализовывать профессиональную готовность в конкретной специальности на уровне своей компетентности;

С учетом этих требований на этапе анализа должны решаться следующие задачи:

– систематизация основных недостающих знаний;

– оценка недостаточной глубины усвоения материалов вводных общетехнических дисциплин, недостаточной интегрированности знаний дисциплин цикла ОПД в цикл СД;

– учет разнообразия и сложности междисциплинарных связей;

– использование опыта других вузов в обучении дисциплин цикла СД.

Решение данных задач способно обеспечить создание ресурса на первом витке спирали жизненного цикла ИС [1].

Для развития ресурса на втором и последующих этапах, а также для разработки можно использовать данные системы менеджмента качества где на различных этапах проводится оценка качества подготовки специалистов (рис.2).

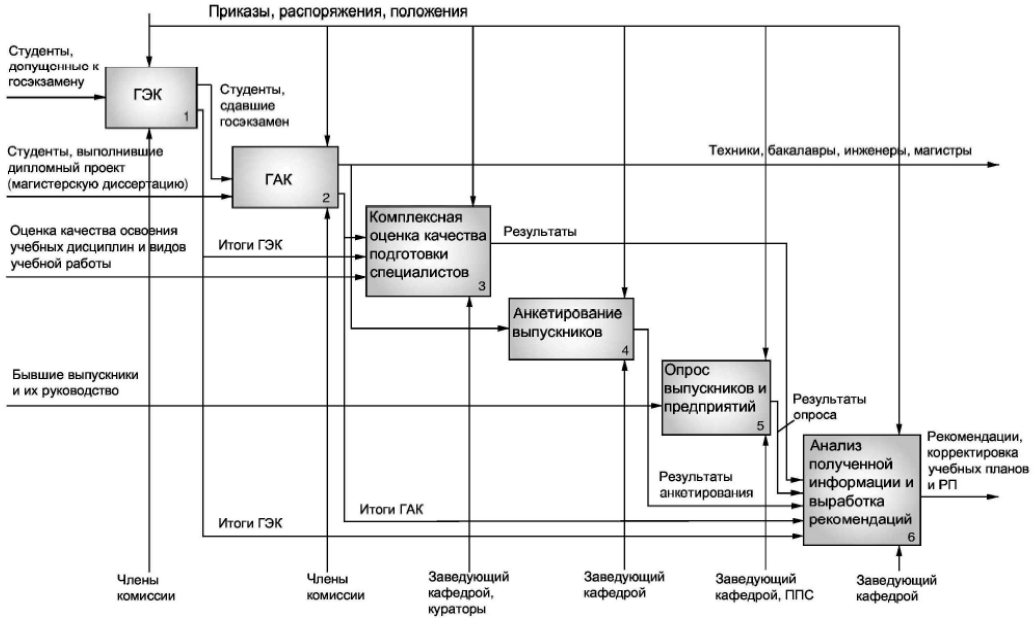


Рис.2. Процесс контроля качества подготовки специалистов

При контроле качества подготовки специалистов оценивается усвоение учебных дисциплин. Также проводится анкетирование выпускников и анализ отзывов предприятий об их работе, что позволяет осуществить комплексную оценку подготовки специалистов.

Для выполнения анализа и завершения предпроектных работ должны использоваться все перечисленные данные. Кроме того, необходимо проведение работ

по систематизации опыта преподавателей в данной области, что определит сложные для усвоения темы.

Поскольку, как уже было отмечено, дисциплинам цикла СД присуща интегративность знаний, то необходимо учитывать формирование научных понятий на междисциплинарной основе при обязательном рассмотрении следующих вопросов:

1. Согласованность во времени изучения отдельных учебных дисциплин, при которой каждая из них опирается на предшествующую понятийную базу.
2. Необходимость обеспечения преемственности и непрерывности в развитии понятий, являющиеся общими для ряда дисциплин
3. Единство в интерпретации общенаучных понятий.
4. Исключение дублирования одних и тех же понятий при изучении.
5. Осуществление единого подхода к раскрытию одинаковых классов понятий.

Широкое использование ЭОР создает возможности для применения новых информационных технологий при отображении различных моделей сложных объектов с учетом взаимосвязей законов и явлений междисциплинарного характера.

В блоке разработки необходимо особое внимание уделить процессу формирования образовательного контента в соответствии с образовательным стандартом. Как правило, в существующих методиках используется модульная система представления материала. Модуль имеет неопределенный объем и может быть приравнен к теме.

Темы могут быть разными по объему, сопровождаться различным числом графических интерпретаций, и для обновления приходится полностью изменять существующий материал, что создает проблемы при его последующей корректировке. В качестве примера можно привести разделы, посвященные современным достижениям науки и техники и перспективам их развития. Данные разделы наиболее быстро морально устаревают и могут подвергаться коррекции на этапах проектирования и отладки.

Посредством предлагаемого подхода к проектированию содержательной части учебного материала формируется методика отбора и унификации понятий, а также реализуется системный подход к используемой информации. В результате анализа, проведенного на предпроектном этапе, уменьшается время на тестирование и отладку уже готового образовательного ресурса [1].

На этапе предпроектной подготовки для новых курсов необходимо проводить предварительный анализ исходной информации, который включает: систематизацию опыта преподавателей, оценку достаточности глубины усвоения материалов вводных общетехнических дисциплин, достаточности интегрированности знаний дисциплин цикла ОПД в цикл СД, учет разнообразия и сложности междисциплинарных связей. При корректировке ресурса помимо перечисленных вопросов учитываются результаты контроля качества подготовки специалиста, получаемые в ходе работы системы менеджмента качества учебного заведения.

На этапе анализа распределенных источников информации выделяются основные группы источников, которые содержат необходимую для обучения информацию. К ним относятся: бумажные источники различного рода, такие, как учебные и учебно-методические пособия, методические указания, статьи, а также источники, имеющие и не имеющие бумажных аналогов, находящиеся в Интернете. Выборка из множества источников ведется с помощью экспертной оценки по указанным ранее ограничениям с учетом года издания, известности коллектива авторов и др. В таком случае выборка принимает следующий вид:

$$R = \sum w_i r_i \ , \qquad (1)$$

где r_i - оценка распределенного источника по i-му критерию; w_i - вес i-го критерия.

Отбор понятий ведется с учетом наибольшего соответствия целям учебного процесса, т.е. с учетом педагогических принципов и формирования профессиональной компетентности. В качестве основного принципа выделяется системность, требуемая обоими видами ограничений. Сравнивая попарно противоположные допущения, например научность и доступность, получим следующую систему уравнений:

$$П = \begin{cases} 0,\ n_i \notin AB; \\ 0{,}5,\ n_i \in AB; \\ 1,\ n_i = A,\ n_i = B, \end{cases} \qquad (2)$$

где $П$ – множество соответствующих выборке понятий; n_i- рассматриваемые понятия; AB – отрезок, ограничивающий рассматриваемые понятия.

После того как основные понятия выбраны, необходимо подобрать каждому из них соответствующую форму визуализации. Подготовка к формированию визуального ряда позволит создать исходный сценарий для реализации идеи в виде перечисленных форм, а также оценить рациональность создания сложных имитационных моделей и анимации.

При формировании базы знаний необходимо предусмотреть рекомендации по использованию включенных в нее объектов в учебном процессе с учетом его специфики, а также с учетом междисциплинарных связей. Основы формирования репозитария в виде базы знаний соответствуют существующим стандартам электронного обучения.

По предложенному алгоритму формирования контента разрабатываются отдельные программные модули, которые планируется объединить в программный комплекс для обеспечения поддержки проектирования ЭОР.

Разработка и использование ЭОР позволяет фиксировать и сохранять знания наиболее опытных преподавателей, а также создать предпосылки для повышения эффективности обучения за счет введения в образовательный процесс элементов интерактивности и мультимедиа. Электронные образовательные ресурсы потенциально позволяют сократить объем обязательных занятий, проводимых в аудиториях и лабораториях, без потери качества обучения. В то же время этот потенциал может реализовываться только в случае высокой мотивации обучающихся к приобретению знаний и их умения выполнять учебную работу самостоятельно.

Современные информационные технологии в ряде случаев позволяют сокращать время создания электронных образовательных ресурсов по сравнению с традиционными образовательными ресурсами, в то же время существенно удлиняя их жизненный цикл благодаря возможности оперативного внесения дополнений и изменений не только в процессе разработки ЭОР, но и при их применении в учебном процессе.

Рассмотренный подход не противоречит ранее разработанным концепциям, а лишь расширяет и дополняет методику работы с контентом и учитывает современные тенденции формирования компетентности, влияние международных и разрабатываемых стандартов электронного обучения [1].

Список литературы: 1. Аверченков, В.И. Методика проектирования содержательной части электронных образовательных ресурсов для специальных технических дисциплин/ В.И. Аверченков, В.В. Надуваев. – Брянск: Вестник БГТУ, 2019. Вып. 3, с. 125 – 134.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМА, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ РАБОТЕ ЛЕСОПИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

Азимова Н.Н., Ашихмин Д.В., Милев И.Ю., Фомич М.В.
(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)
Тел: +7 (928) 1119068; E-mail: nokia10110@mail.ru

Abstract: *A system of mathematical models of oscillations of a circular saw blade when cutting wood has been developed. It represents itself a hierarchy of models of oscillation of plates and rods with various degrees of detail. The parameters of the oscillatory process related to sawing wood with large diameter discs are estimated. Computer calculations of the sound spectrum for the sawing process with realistic equipment parameters are performed. The simulation results are summarized and explained. The development is purposed at calculating the noise level in the neighborhood of sawmill equipment as well as for training of different engineering staff.*

Key words*: circular saw, wood cutting, noise generation, vibrational spectrum, mathematical models.*

Улучшение условий труда является важной государственной задачей. В современном производстве широко распространен режущий инструмент: он применяется для механической обработки материалов. Резание сопровождается воздействием на оператора негативных факторов физико-химической природы, основными из которых являются шум, вибрация и пылевые частицы. Для деревообрабатывающих станков пильной группы сильное зашумление и запыление воздушной среды являются главными факторами вредности на рабочем месте. Эффективным способом защиты операторов, обеспечивающим одновременно нормализацию рабочей среды, как по шуму, так и по запыленности, являются т.н. комбинированные решения, удачным примером которых защитный кожух рельсорезного станка [1]. Однако подобные решения для круглопильных деревообрабатывающих станков не отработаны. Следовательно, их проектирование и реализация являются приоритетными направлениями защиты работников.

Математическое моделирование, макетирование и технический эксперимент являют собой триаду, на основе которой обеспечивается всесторонняя эффективность современной техники уже на этапе проектирования. В полной мере это касается и параметров обрабатывающего инструмента, связанных с производственной и экологической безопасностью.

Целью исследования ставится адекватно описать вынужденные колебания циркулярной пилы (ЦП) большого диаметра и соответствующее этим колебаниям шумовое загрязнение рабочей зоны, используя математические модели и опираясь на компьютерные эксперименты.

В промышленности используются различные станки пильной группы. Они делятся на 2 основных типа [2]: 1) с возвратно-поступательным движением и 2) с лезвием в форме круга (дисковые или циркулярные). При обработке древесины диаметр дисковых пил достигает 1.5 метров при толщине порядка 2 мм, а размеры зубьев составляют 2-3 см. резка сопровождается периодическим ударным воздействием на край диска, в котором возбуждаются колебания, обуславливающие технологический шум. Знание его параметров в связи с характером воздействия и особенностями конкретного режима необходимо для проектирования нормированных условий производственной среды в рамках установленных СН и СанПиН [3,4]. Общей моделью свободных колебаний диска является следующая:

$$\frac{\partial^2 F(r,\varphi,t)}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial F(r,\varphi,t)}{\partial t} + \frac{\varepsilon^2}{4} F(r,\varphi,t) + \frac{D}{\rho h}\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}\right]^2 F(r,\varphi,t) = 0, \quad (1)$$

где $F(r,\varphi,t)$ – смещение пластины; ε – коэффициент затухания; r – расстояние от центра ($0 \le r \le R$); φ – угол, отсчитываемые от положения равновесия ($0 \le \varphi \le 2\pi$); ρ – плотность материала (в нашем случае стали); t – время.$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – т.н. цилиндрическая жёсткость; где E - модуль Юнга; h - толщина пластины; $\mu \approx 0.25 \div 0.3$ – коэффициент Пуассона. В этой модели не учтены два в ряде случаев важных обстоятельства: 1) кольцевая геометрия реальных пильных дисков и 2) генерация звука с заготовкой в процессе резания, влияние которых рассмотрено в очень подробном исследовании [5].

Первое слагаемое в уравнении (1) отвечает ускорению всех точек пластины в каждый момент времени. Каждая точка пластины задается парой чисел (r, φ). Ускорение здесь результат действия изгибной силы на единицу массы пластины. Второе слагаемое отвечает силе вязкого терния, которая пропорциональна скорости движения пластины. Третье слагаемое введено искусственно, чтобы разделить переменные, используя замену

$$F(r,\varphi,t) = G(r,\varphi,t)e^{-\frac{\varepsilon}{2}t}. \quad (2)$$

Подстановкой (2) в (1) получаем:

$$\frac{\partial^2 G(r,\varphi,t)}{\partial t^2} + \frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}\right]^2 G(r,\varphi,t) = 0. \quad (3)$$

Физические оценки параметров колебания диска показывают, что величина ε мала и

$$F(r,\varphi,t) = G(r,\varphi,t). \quad (4)$$

Модель (3) описывает свободные колебания пильного диска, а описание реального процесса резания требует добавить в нее источник *f*(*r*, *t*) ударного возбуждения со стороны режущей поверхности (зубьев).

Чтобы найти общее решение уравнения (3) представим $G(r,\varphi,t)$в виде:

$$G(r,\varphi,t) = \mathbb{R}(r)\cdot\Phi(\varphi)\cdot T(t). \quad (5)$$

Считая колебания гармоническими

$$T(t) = \cos\omega t, \quad (6)$$

понизим число переменных:

$$\left\{\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}\right]^2 - \frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2}\cdot\omega^2\right\}\left(\mathbb{R}(r)\Phi(\varphi)\right) = 0. \quad (7)$$

Известно, что бигармонический оператор факторизуем, т. е. (7) можно “расщепить” на два уравнения:

$$\begin{bmatrix}\left(\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}\right]-\sqrt{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2}}\omega\right)\left(\mathbb{R}(r)\Phi(\varphi)\right)=0 \\ \left(\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}\right]+\sqrt{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2}}\omega\right)\left(\mathbb{R}(r)\Phi(\varphi)\right)=0\end{bmatrix}. \quad (8)$$

Можно показать, что общее решение задачи (8) имеет вид:

$$\mathbb{R}(r) = \sum_{n=0}^{\infty} \mathbb{R}_n(r), \tag{9}$$

где

$$\mathbb{R}_n(r) = \mathbb{R}_n^+(r) + \mathbb{R}_n^-(r) = C_{1n} I_n\left(\sqrt[4]{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2}} \cdot \sqrt{\omega} \cdot r\right) + C_{2n} J_n\left(\sqrt[4]{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2}} \cdot \sqrt{\omega} \cdot r\right). \tag{10}$$

где $J_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}}\cos(x - \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}n)$ – функция Бесселя первого рода; $I_n(x) \sim \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}$ – модифицированная функция Бесселя первого рода (функция Инфельда) [6].

Интересующие нас частные решения отвечают жесткой заделке пильного диска на шпиндель, что соответствует исключению угловых колебательных мод. В этом случае свободные колебания диска подобны колебаниям жестко заделанного с одной стороны упругого стержня и описываются уравнением

$$\left\{\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\right]^2 - \frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2} \cdot \omega^2\right\}\left(\mathbb{R}(r)\right) = 0, \tag{11}$$

а вынужденные – уравнением

$$\left\{\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\right]^2 - \frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2} \cdot \omega^2\right\}\left(\mathbb{R}(r)\right) = f(r)\,. \tag{12}$$

Рассматривая установившийся в результате внешнего воздействия на пильный диск режим в виде

$$f(r) = \delta(r - R), \tag{13}$$

получаем частное решение (12)

$$G(r,t) = \frac{1}{4\pi^2}\left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mathbb{R}_n(R)}{\omega_n^2 - \omega^2}\right] e^{-2\pi i \omega t}. \tag{14}$$

где ω - частота ударного воздействия на зубья.

При возмущении (13) спектр технологического шума описывается зависимостью

$$\left(\frac{\mathbb{R}_n(R)}{\omega_n^2 - \omega^2}\right)^2 (\omega_n). \tag{15}$$

Если привязаться к типичным параметрам оборудования и процесса

$$R \approx 0.7\text{м}, h \approx 2\text{мм}, E = 200 \cdot 10^9 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot c^2}, \rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \mu = 0.25$$

$$\omega = \frac{\lambda^2}{R^2}\sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} = \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}}\,\frac{h\lambda^2}{R^2} = \left\{\begin{array}{c} R \approx 0.7\text{м} \\ h \approx 2\text{мм} \\ E = 200 \cdot 10^9 \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{м}^2\cdot c^2} \\ \rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \\ \mu = 0.25 \end{array}\right\} = \underbrace{\sqrt{\frac{200\cdot 10^9 \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{м}^2\cdot c^2}}{12\cdot 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\cdot(1-0.25^2)}} \cdot \frac{0.002}{0.7}}_{\omega_0} \lambda^2, \tag{16}$$

$$\omega_0 \approx 4{,}3\,\frac{1}{c} = 2\pi f_0 \quad f_0 = \frac{4{,}3}{2\pi} = 0{,}69\text{Гц}$$

и ограничиться нормируемым СанПиН диапазоном частот получаем: $31{,}25\ \text{Гц} \le f < 8000\ \text{Гц},\ \ 31{,}25\ \text{Гц} \le f_0\lambda^2 < 8000\ \text{Гц},\ \ 43 \le \lambda^2 < 11600\ \Rightarrow 6{,}5 < \lambda < 108$. Т.е. практически достаточно ограничиться учетом сотни радиальных колебательных мод.

Результаты соответствующего компьютерного моделирования при возбуждающей частоте ω = 1000, 2000, …, 5000 Гц показаны на рис. Как свидетельствуют результаты расчетов, спектр технологического шума в данном случае является сравнительно узкополосным и определяется частотой ударного воздействия на диск пилы. При этом с увеличением скорости резания (частоты вращения) шум становится более высокочастотным, чем усугубляет негативную санитарную обстановку на рабочем месте.

Сконструирована простая математическая модель свободных колебаний диска циркулярной пилы в форме дифференциального уравнения четвертого порядка. В модели учтены основные механизмы колебаний и затухания. Модель исследована с использованием аналитических и численных методов при различных краевых условиях. Оценены числовые параметры модели и показано, что для расчета шума от пильного диска необходимо учитывать 100 колебательных мод. Синтезирован спектр шума циркулярной пилы при различных режимах резания и дано его рациональное объяснение.

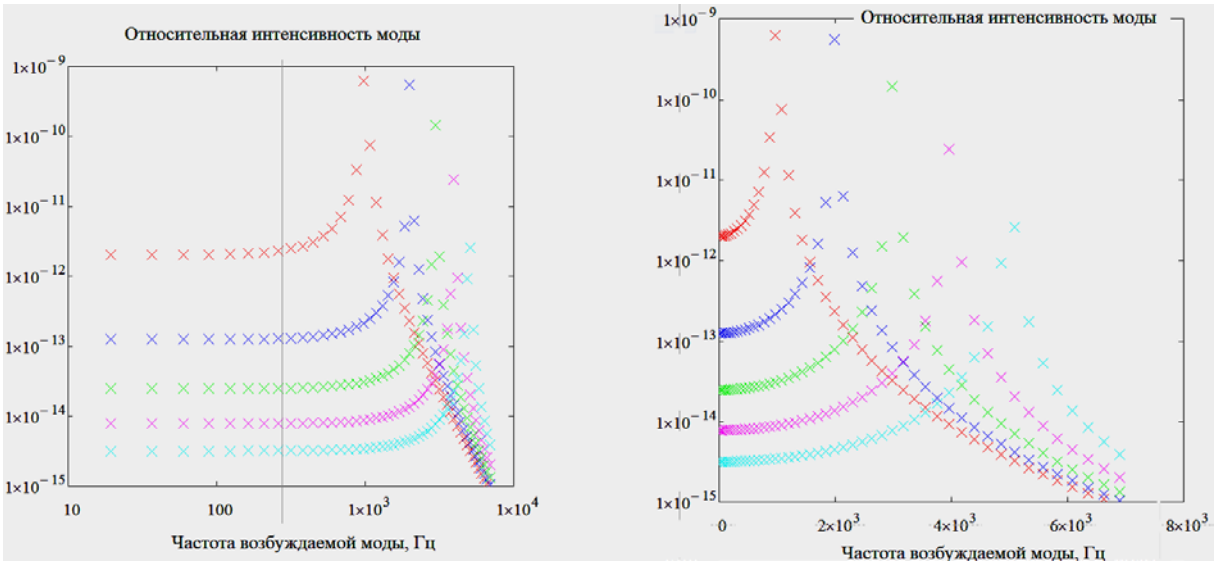


Рис.1. Влияние частоты вращения циркулярной пилы на спектр шума

Список литературы: 1. Азимова Н.Н. Снижение концентрации пыли и уровней шума в рабочей зоне при абразивной резке / дисс. канд. технич. Наук. Ростов н/Д., 2020. 165 с. **2.** Мельников И.В. Круглопильные и ленточнопильные станки, 2012. 31 с. **3.** СН2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы СН от 31.10.1996 N2.2.4/2.1.8.562-96. **4.** СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1) **5.** Старжинский В.Н., Завьялов А.Ю., Совина С.В. теоретические положения излучения шума пильным диском при резании древесины // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. **6.** Морз Ф. Колебания и звук. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. 495 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫИНИЕ И ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ АБРАЗИВНО-МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЫЛИ В ЦИКЛОНЕ С ОБРАТНЫМ КОНУСОМ

Азимова Н.Н., Купцова И.С., Милев И.Ю., Фомич М.В.
(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)
Тел: +7 (918) 5621485; E-mail: ilya.milev@mail.ru

Abstract: *The study of aerodynamically characteristics of cyclones and its' parametric optimization is performed. The efficiency of mathematical models designed is tested succesfully. The results are purposed to provide labor safety with respect to dusting.*

Key words*: Aspiration systems, air flow, mathematical models, optimization*.

Знание внутренней аэродинамики циклонов с обратным конусом (ЦОК) необходимо для правильного выбора их конструктивных параметров, а также режимов течения с целью эффективного улавливания пыли с заданными физико-механическими свойствами. Для экспериментального определения аэродинамических характеристик циклонов авторами выполнены сравнительные испытания [1], удовлетворяющие требованиям [2]. В частности, сконструирована и реализована полупромышленная установка.

Пылеуловители типа Циклон «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300 с равными рабочими объемами устанавливались параллельно. Чтобы интенсифицировать эксперименты с циклонами различной конструкции без нарушения герметичности воздуховода использовано поочередное закрытие перегородок. Сначала измерения проводились с циклонами без бункера, причем отверстия герметично закрывались. Измерения давления и скорости воздушного потока осуществлялись при помощи трубок Пито и дифференциальных манометров Testo-521 на входе и выходе аппаратов [1,2].

Модель Testo 521-1 характеризуется погрешностью 0,2 % относительно полной шкалы. При скорости потока 5 м/с приборная погрешность составляет 0,32 м/с, при 20 м/с – 0.09 м/с и при 50 м/с около 0,05 м/с. Зависимость результатов измерений от расположения зондирующего элемента устранена посредством двойной мембраны.

Исследование аэродинамических параметров циклонных аппаратов выполнено путем более чем 1260 непосредственных измерений, в результате которых получено ~ 4000 значений. Число и положение точек измерения давления и скорости определялись геометрией сечения воздуховода в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 (рис. 1).

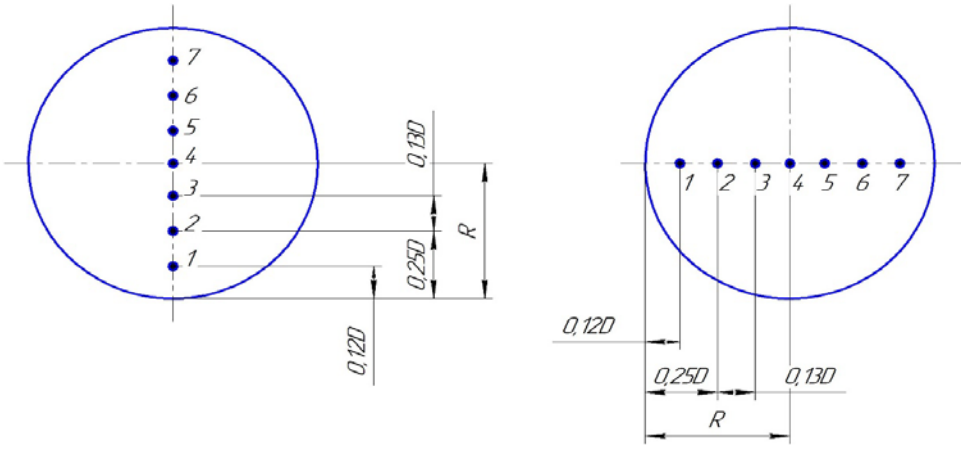


Рис. 1. Схема расположения точек измерения давлений и скоростей входного (слева) и выходного (справа) патрубка циклонов

Поскольку патрубки исследуемых аппаратов имеют диаметр 200 мм, основные точки измерения выбраны на расстоянии 0,12*D* (1) и на расстоянии 0,5*D* (4) от стенки патрубка. Повышение точности в экспериментах достигнуто благодаря использованию 4-х дополнительных точек, расположенных на расстоянии 0, 25 *D* (2-я и 6-я) и 0,38 *D* (3-я и 7-я) от стенки. Движение воздуха инициировалось радиальным вентилятором РОВЕН VCZpl-250, подключенным на вытяжку. Режим работы вентилятора задавался посредством электронного блока управления. После формирования ламинарного течения во входном и выходном патрубках измерялись следующие параметры: полное, статическое и динамическое давление, расход и скорость потока. Чтобы обеспечить достоверность экспериментальных данных, измерения выполнялись 30 раз в 3-х режимах вентилятора (n_1 = 1710 об/мин, n_2 = 2250 об/мин, n_3 = 2850 об/мин). Выбранные режимы вентилятора соответствуют следующим объемным расходам: на входе в аппарат «ЦН-15у-300» (n_1 = 424 м^3/ч, n_2 = 558 м^3/ч, n_3 = 685 м^3/ч); на входе в «ЦОК-200-300» (n^1 = 516 м^3/ч, n_2 = 660 м^3/ч, n_3 = 814 м^3/ч). Полученные результаты обработаны и представлены в виде графиков (рис. 2-3). На рис. 2 показано скоростное поле потока во входном патрубке циклонов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» при разной производительности вентилятора.

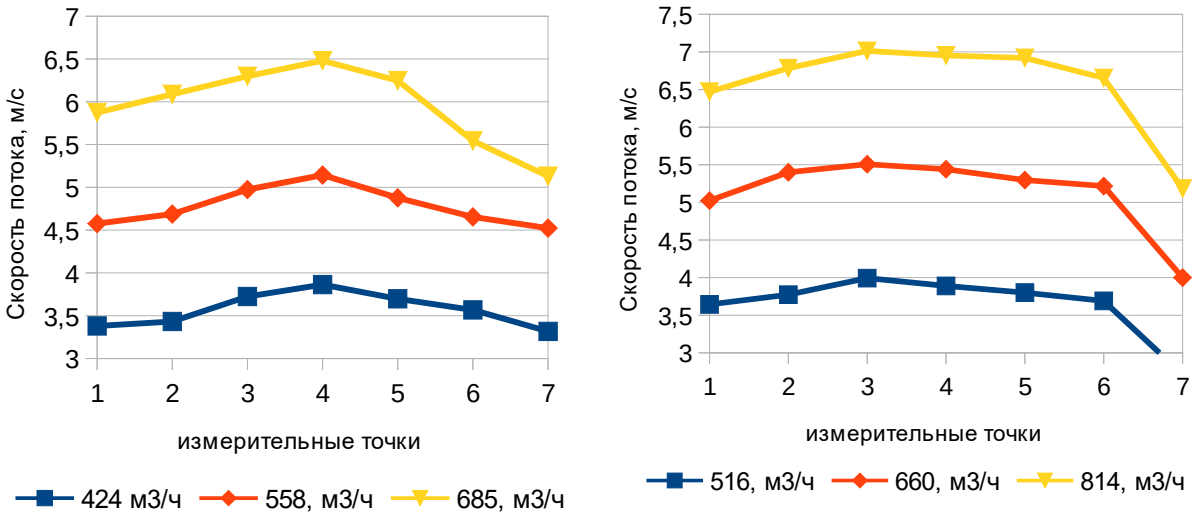


Рис. 2. Скорость воздушного потока во входном патрубке циклона «ЦН15у-300» (слева) и циклона «ЦОК-200-300» (справа) при различных режимах работы вентилятора

Структура турбулентного потока во входном патрубке циклонов «ЦН-15у-300» хорошо описывается степенной моделью [3]. Согласно этой модели, в трубе круглого сечения осредненная скорость турбулентного потока в точке, удаленной на расстояние r от оси равна:

$$v(r) = v_{max}\cdot(1 - r/R)^m \,, \qquad (1)$$

где v_{max} – максимальная скорость течения; R – радиус трубы; m – эмпирический параметр модели. Из (1) следует, что средняя скорость потока в такой трубе равна

$$\langle v\rangle = \int v_{max}\cdot(1 - r/R)^m \, r\, dr \,/\, \int r\, dr = 2\cdot v_{max}/(2 + 3\cdot m + m^2) \,. \qquad (2)$$

Инициализированная методами математического программирования [4] по данным рис. 2-а модель (1) имеет вид:

$$v(r) = v_{max}\cdot(1 - r/R)^{0.1037} \,, \quad 3.9 \le v_{max} \le 6.5 \text{ м/с} \,. \qquad (3)$$

Величина погрешности этой модели (рис. 3, слева) свидетельствует, что во входном патрубке циклона данного типа течение является высокосимметричным, т.е. соответствует (1)-(2).

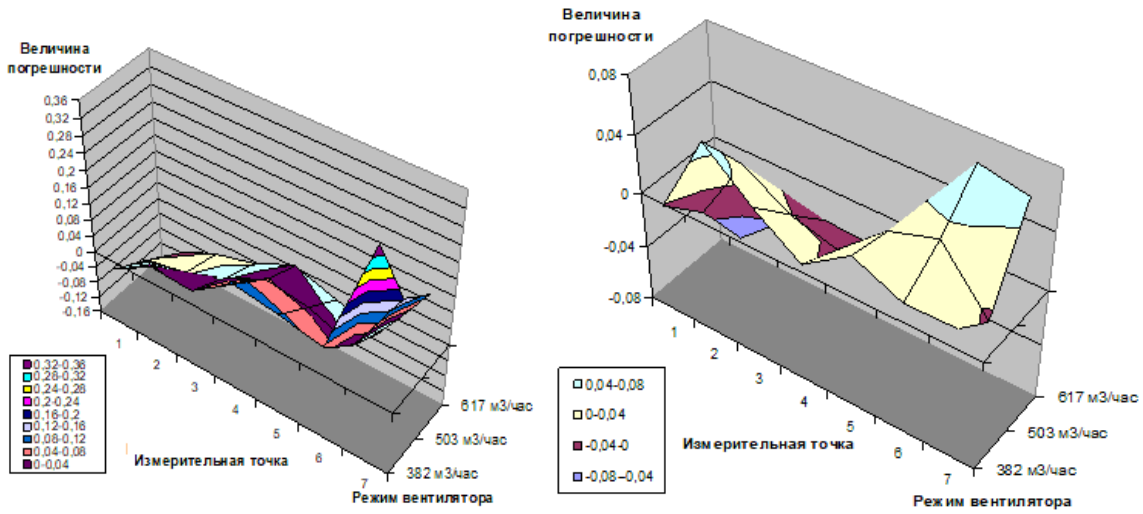


Рис. 3. Погрешность описания течения во входном патрубке циклонов «ЦН15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа) посредством классической степенной модели для скоростного поля

Аналогичный анализ входного течения в аппарате «ЦОК-200-300» показывает, что течение во входном патрубке не является столь симметричным как в прямой цилиндрической трубе. В то же время эмпирический параметр m модели (1) для этой конструкции равен 0.145, а отношение $v_{max}/\langle v\rangle = 1.227$, чем подтверждается сходство турбулентной микроструктуры течения в циклонах обоих типов.

Коэффициент гидравлического сопротивления для аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» вычисляется на основании закона сохранения энергии

$$\xi_{вх} = \frac{2\Delta P_{ц}}{\rho \cdot V_{вх}^2}, \tag{4}$$

где: $\xi_{вх}$ – коэффициент гидравлического сопротивления циклона; $V_{вх}$ – скорость потока во входном патрубке, м/с; ΔРц – падение полного давления, Па; ρ – плотность воздушного потока. Зависимость (4) для циклонов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» показана на рис. 4.

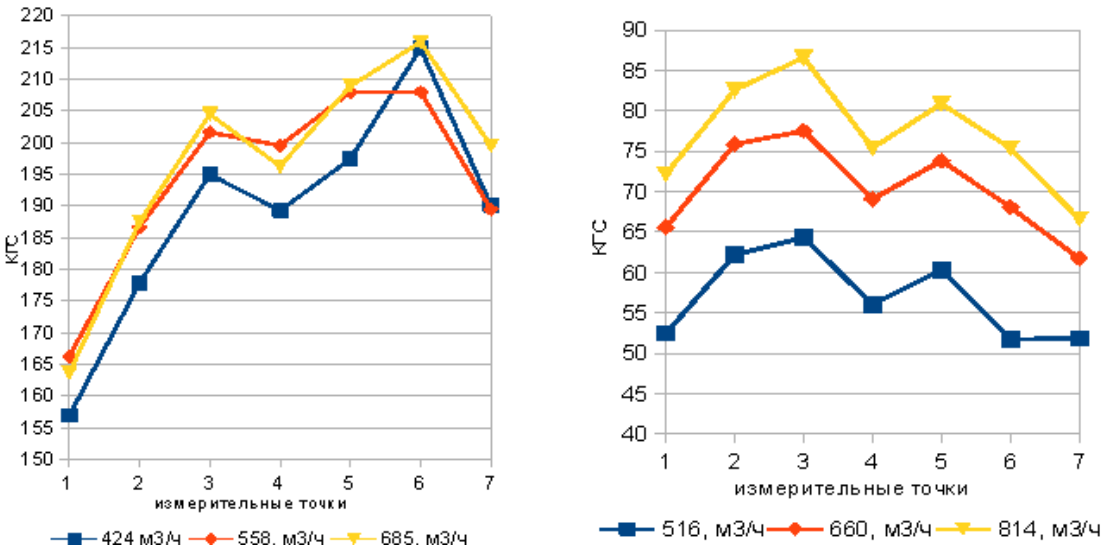


Рис. 4. Коэффициент гидравлического сопротивления для циклонов «ЦН15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа) при различной производительности вентилятора

Коэффициент аэродинамического сопротивления циклона Коэффициент аэродинамического сопротивления циклона описывается эмпирической формулой

$$\xi_{вх}(N, Q) = 1{,}0246\cdot(466{,}33 - 734{,}33\cdot N + 640{,}87\cdot N^2 - 258{,}45\cdot N^3 + \\ + 53{,}086\cdot N^4 - 5{,}3819\cdot N^5 + 0{,}2134\cdot N^6)\cdot[1 - e^{-Q/138.3}], \quad (5)$$

где N – номер измерительной точки; Q – расход м3/ч. Погрешность (5) не превышает 4 % (рис. 4, левый фрагмент).

Аналогичный результат для циклона «ЦОК-200-300» имеет функциональный вид

$$\xi_{вх}(N, Q) = 1{,}589\cdot(318{,}67 - 614{,}98\cdot N + 545{,}85\cdot N^2 - 229{,}1\cdot N^3 + \\ + 49{,}266\cdot N^4 - 5{,}2458\cdot N^5 + 0{,}219\cdot N^6)\cdot[1 - e^{-Q/673.5}], \quad (6)$$

с погрешностью, показанной на правом фрагменте рис. 5.

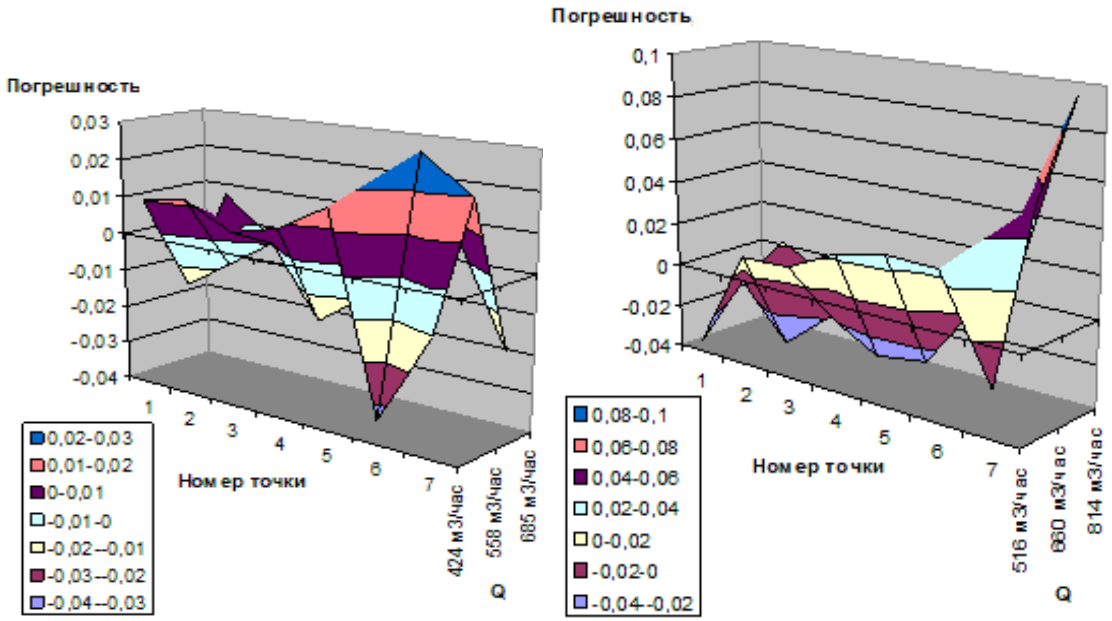


Рис. 5. Относительная погрешность формул (5) и (6), описывающих результаты измерений аэродинамического сопротивления циклонов «ЦН-15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа)

Таким образом, результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что КГС циклона «ЦОК-200-300» в 2 ÷ 2,2 раза меньше, чем КГС циклона «ЦН-15у-300». Различие объясняется более высокой скоростью потока воздуха в теле аппарата («ЦОК-200-300»).

Также исследована экспериментально эффективность улавливания абразивно-металлической пыли циклонами разных типов в зависимости от объема бункера [1,2]. Диапазон варьирования последнего составил 5 – 30 л. При этом использовались пылевые частицы, характерные для условий резания рельса (состав сталь – абразив, размер 40 – 315 мкм). Расход воздуха выбирался также приближенным к условиям работы рельсорезного станка – 27 м3/ч. Измеренная в экспериментах эффективность конического циклона превысила эффективность циклона цилиндрического. Оказалось также,

что эффективность конического циклона возрастает с увеличением отношения объёма бункера к объему функциональному. Результат измерений выражается формулами:

$$\eta(V_б/V_ц,\ d) = 100\cdot\{1 - \exp[-(V_б/V_ц)^{0.0758}\cdot(d/4.78)^{0.4168}\ ]\} \quad (7)$$

для конического циклона и

$$\eta(V_б/V_ц,\ d) = 100\cdot\{1 - \exp[-(V_б/V_ц)^{0.068}\cdot(d/6.23)^{0.344}\ ]\} \quad (8)$$

для цилиндрического. При этом погрешность моделей (7)-(8) не превышает 6 %.

Также экспериментально исследована связь глубины погружения выходного патрубка циклона с эффективностью пылеулавливания. Объем бункера и размеры частиц выбирались актуальными для условий резания рельса (30 л 40 – 250 мкм соответственно). Данные измерений удобно представить в следующей математической форме:

$$\eta(Г,\ d) = 100\cdot\{1 - \exp[-(d/(12.18 + 0.00028\cdot(\ Г - 304.2)^2)^{0.574}\ ]\}\ , \quad (9)$$

где $Г$ – глубина погружения выхлопного патрубка в тело циклона.

Модель (9) позволяет утверждать, что оптимальной глубине погружения выхлопного патрубка в тело конического циклона соответствует значение $Г$ = 304 мм.

Заключение

Экспериментально определены следующие параметры потока в коническом и цилиндрическом циклонах при изменении производительности вентилятора в широком диапазоне: 1) давление (статическое, динамическое, полное); 2) эпюры скорости во входном и выходном сечениях. После статистической обработки полученные результаты представлены в графической форме и в виде явных аналитических зависимостей.

Экспериментально доказано, что КГС аппарата «ЦОК-200-300» в 2-2,2 раза меньше, чем КГС циклона «ЦН-15у-300». Результат объясняется более высокой скоростью потока в «ЦН-15у-300».

Сравнительный анализ свидетельствует, что циклон с обратным конусом имеет лучшие аэродинамические характеристики и как следствие повышенную эффективность пылеулавливания по сравнению с цилиндрическим циклоном. Результат объясняется более развитой турбулентностью в потоке очищаемого газа при использовании циклона («ЦОК-200-300»).

Установлено, что существует оптимальная глубина погружения выхлопного патрубка в тело конического циклона.

Список литературы: **1.** Азимова, Н. Н. Сравнительный анализ аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей при проведении параллельных сравнительных испытаний / Н. Н. Азимова, Ю. И. Булыгин, И. С. Купцова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 156-165 **2.** Азимова Н.Н. Снижение концентрации пыли и уровней шума в рабочей зоне при абразивной резке / Дисс. канд. технич. Наук. Ростов н/Д., 2020. 165 с. **3.** Пирумов, А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. – М.: Госстройиздат, 1961. – 124 с. **4.** М.Г. Зиганшин Проектирование аппаратов пылегазоочистки. – М.: Экопресс – 3М, 1998. –505 с. **5.** Minoux, M. Mathematical Programming: Theory and Algorithms. – New York: John Wiley, 1986. – 489 p.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Акинцева А.В. *(Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия)*
Email: akintsevaav@susu.ru

Abstrac: *The article describes the use of a digital twin of the circular grinding operation on a CNC machine in the design system of optimal cycles of the cutting modes, which ensures stable accuracy and quality of the processed surface under variable conditions of production of a batch of parts in serial production. The use of a digital twin of the circular grinding process in the development of control programs for CNC machines at the stage of technological preparation of production allows guaranteeing maximum productivity and the required quality of the processed surface under variable processing conditions.*

В настоящий момент в имеющихся CAD/CAM-системах процесс проектирования циклов частично автоматизирован только для программирования отвода и подвода шлифовального круга. Режимные параметры в имеющихся CAD/CAM-системах назначаются технологом вручную на основании имеющего производственного опыта и (или) по рекомендациям нормативно-справочной литературы, разработанной для универсальных станков. В результате становится невозможной полная автоматизация всех этапов проектирования цикла, реализуемая в рамках концепции индустрии 4.0. Отметим, что для гарантированного обеспечения требований чертежа по точности и качеству обрабатываемой поверхности режимы резания часто принимаются заниженными и требуют адаптации к реальным производственным условиям.

Вопросами повышения производительности циклов и стабилизации показателей точности и качества в проектируемых циклах занималось множество ученых [1-3 и др.]. Данные работы имеют ряд общих замечаний: не всегда используются математические методы оптимизации; рассматривается оптимизация только одного режимного параметра (чаще всего радиальной подачи); отсутствует одна из самых важных моделей ограничений производительности по точности обработки; не учитывается влияние переменных технологических факторов.

В качестве решения вышеописанной проблемы предложена система автоматического проектирования оптимальных циклов управления режимами резания для операций круглого шлифования с ЧПУ. Разработка системы проектирования оптимальных циклов должна проводиться в единой виртуальной среде с использованием технологий цифрового моделирования путем создания цифрового двойника операции круглого шлифования (ЦД). В качестве цифрового двойника процесса круглого шлифования предлагается использовать аналитическую модель съема металла [4], которая устанавливает взаимосвязь между силами резания, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, геометрией зоны контакта инструмента с заготовкой, характеристикой инструмента и др. показателями, оказывающими влияние на процесс обработки. Данная модель съема металла позволяет рассчитывать величину снимаемого припуска (глубину резания) на каждом рассматриваемом радиусе обрабатываемых сечений, расположенных по всей длине заготовки. В результате становится возможным выполнить расчет текущих значений радиусов и провести описание процесса формообразования обрабатываемой поверхности заготовки на протяжении всего цикла шлифования. Знание текущих значений радиусов различных сечений, расположенных по всей длине заготовки, позволяет накладывать ограничение производительности цикла по точности обработки.

Рассмотрим применение ЦД на примере комплексной оптимизации циклов ра-

диальной подачи на операции круглого шлифования, выполняемой станке с ЧПУ [5]. В качестве критерия оптимальности выбрано минимальное время цикла, т.е. оптимальный цикл должен быть максимальным по быстродействию из всех возможных вариантов циклов и обеспечивать заданное качество обрабатываемой поверхности с учетом основных технологических ограничений и нестабильных условий обработки. В качестве метода оптимизации применен широко известный метод динамического программирования (МДП), используемый при решении классической транспортной задачи, в которой задана сеть дорог с промежуточными станциями, на которой требуется найти оптимальную траекторию передвижения транспорта [6].

Вначале рассмотрим оптимизацию одного режимного параметра – радиальной подачи, как наиболее простой случай. При оптимизации шлифования МДП вместо дорожной сети и станций используется координатная сетка с осями «Радиальная подача – Припуск», которая делит диапазоны программной подачи и припуска на мелкие дискретные части (рис. 1). Во всех узлах сетки помещается информационная клетка с координатами [*n, m*], где *n* – номер дискреты припуска, а *m* – номер дискреты программной подачи. Поскольку на практике «бесступенчатые» циклы не применяются, то каждая информационная клетка делится еще и на количество ступеней цикла (обычно от 3 до 5). В каждую информационную клетку можно сделать несколько конкурирующих ходов – возможных вариантов переключения подачи внутри цикла. Каждый из конкурирующих ходов проверяется по целому ряду ограничений, связанных с чертежными требованиями детали (точность, бесприжоговость, шероховатость), с паспортными данными станка (диапазоны режимных параметров, податливость технологической системы, мощность приводов), с параметрами инструмента (характеристика круга, осыпаемость круга, степень затупления зерен круга), с настроечными параметрами операции (перебег круга, настройка режимов резания в реверсных зонах) и др. Из всех возможных допустимых по ограничениям конкурирующих ходов выбирается один оптимальный, который обеспечивает минимальное накопленное время.

Время хода между узлами координатной сетки и допустимость хода по тому или иному ограничению определяется с помощью ЦД операции круглого шлифования путем имитационного моделирования процесса съема металла по упомянутой модели [4], т.е. рассчитываются величина снимаемого припуска по всей длине заготовки на каждом ходе шлифовального круга и на каждом обороте заготовки с учетом упругих деформаций технологической системы. По сути своей осуществляется имитационное моделирование процесса круглого шлифования в цифровой среде.

После выбора оптимального хода в информационную клетку записывается оптимальное время достижения состояния и в переменную *m** запоминается координата узла, откуда сделан оптимальный ход. После рассмотрения последний дискреты припуска процедурой обратного хода по координатам *m** восстанавливается оптимальная траектория цикла шлифования.

На рис. 1 изображена координатная сетка, для случая, когда оптимизируется цикл для одной (радиальной) подачи. Если оптимизация ведется для двух подач (рис. 2), то используется трехмерная оптимизационная матрица «Радиальная подача – Осевая подача – Припуск». Отметим, что комплексной оптимизации могут подвергнуться не только режимные параметры, но любой из входных параметров. Для проведения процедуры оптимизации МДП необходимо выполнить свертку объемной матрицы на плоскость. В результате информационная клетка, расположенная в узлах координатной сетки, усложнится из-за добавления нового оптимизируемого параметра – осевой подачи. В этом случае информационная клетка будет выглядеть, как показано на рис. 2, при этом процедура оптимизации изменится незначительно.

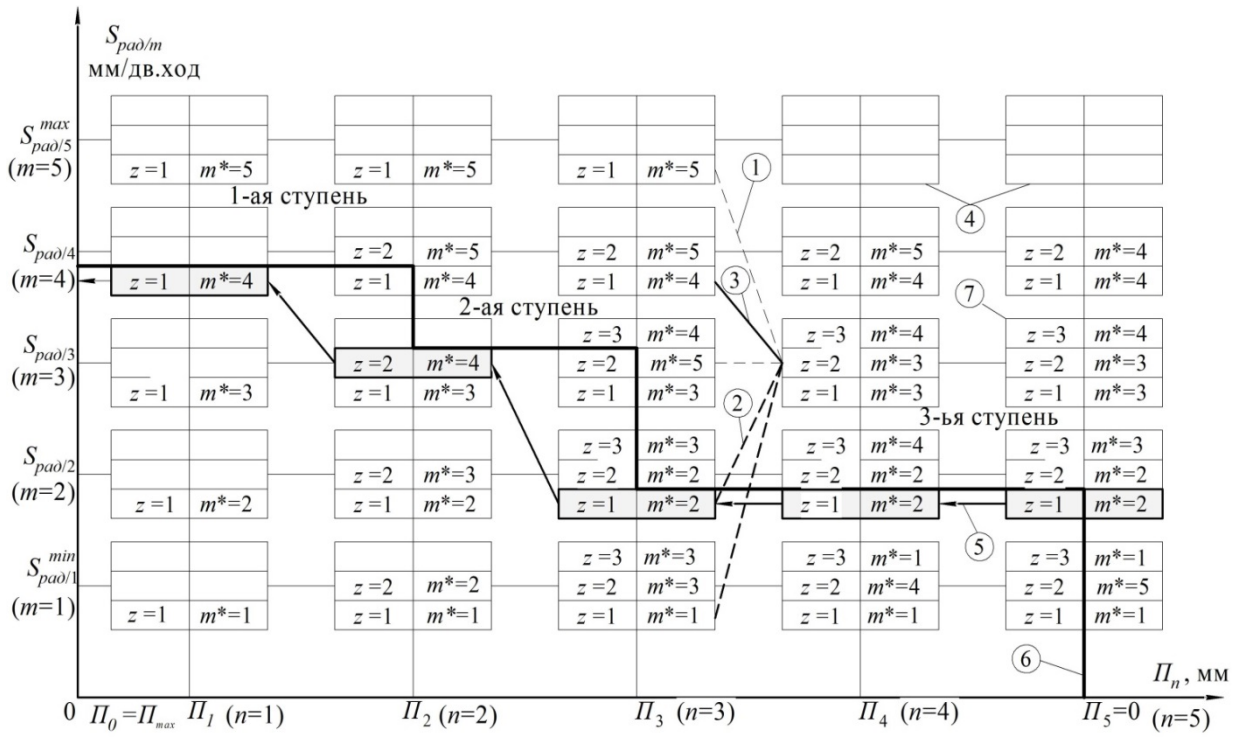


Рис 1. Координатная сетка для оптимизации цикла шлифования с одной (радиальной) подачей: 1 – конкурирующие ходы; 2 – допустимые ходы; 3 – оптимальный ход; 4 – выбывшие из расчета информационные клетки; 5 – процедура обратного хода; 6 – траектория оптимального управления; 7 – информационная клетка для оптимизации одного параметра; *n* – номер дискреты припуска; *m* – номер дискреты программной радиальной подачи; *m** – координата узла, откуда сделан оптимальный ход

Каждый вариант проектируемых циклов в процессе перебора проверяется по двум группам ограничений – благоприятных (степень затупления круга, исходное радиальное биение, припуск – минимальные и диаметр круга – максимальный) и неблагоприятных (степень затупления круга, исходное радиальное биение, припуск – максимальные и диаметр круга – минимальный). Необходимость расчета по двум группам ограничений обуславливается тем, что в реальном производстве обработка партии деталей на операции круглого шлифования с ЧПУ ведется в условиях действия переменных факторов. К переменным технологическим факторам относятся затупление зерен круга, колебание припуска, колебание исходного радиального биения заготовки, размерный износ шлифовального круга и снижение скорости резания, переменная жесткость технологической системы в разных сечениях обрабатываемой поверхности, колебание физико-механических свойств материала детали, флуктуация параметров характеристики шлифовального круга, погрешность срабатывания прибора активного контроля, стойкость круга между правками. Каждый переменный фактор изменяется в определенном диапазоне варьирования, но цикл шлифования остается неизменным при любом совокупном сочетании переменных факторов, что обуславливает колебание точности обработки и других параметров качества шлифуемой поверхности в партии детали.

Отметим, что цифровой двойник операции круглого шлифования с ЧПУ возможно применять не только для оптимизации циклов режимных параметров, пример которой приведен в данной статье, но и для прогнозирования точности и качества обработки применяемых циклов.

а) б)

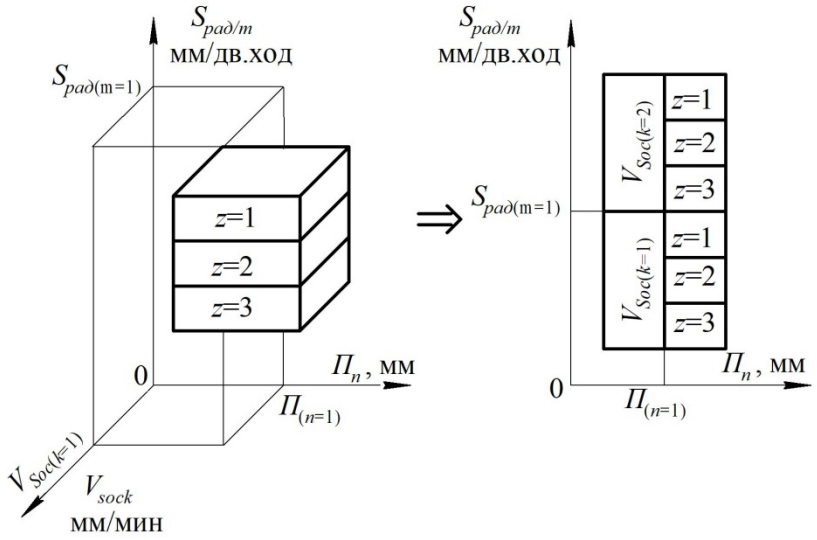


Рис. 2. Часть матрицы для оптимизации циклов радиальной и осевой подач МДП (а) и кусок свертки объемной матрицы на плоскость, содержащий информационную клетку для оптимизации двух параметров – осевой и радиальной подачи (б): *k* – номер дискреты программной осевой подачи

Выводы

Методика проектирования оптимальных циклов режимов резания с использованием цифрового двойника процесса круглого шлифования:

– основывается на аналитической модели процесса съема металла, устанавливающей функциональную взаимосвязь с режимами резания, геометрией зоны резания (размерами шлифуемой поверхности, параметрами круга и т.д.), физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, затуплением круга и его характеристикой;

– учитывает любое количество технологических ограничений целевой функции;

– учитывает изменения условий обработки (затупление зерен круга, колебание припуска и исходной точности обрабатываемой поверхности в партии заготовок), оказывающих влияние на колебания результирующих качественных показателей обрабатываемой поверхности;

– позволяет с математической точностью проектировать оптимальные циклы шлифования, используя метод динамического программирования;

– результатом оптимизации являются оптимальные значения режимов резания и оптимальное распределение снимаемого припуска на всех ступенях цикла, при которых обеспечивается минимальное основное время обработки и гарантируется выполнение требований чертежа по точности и шероховатости.

Список литературы: 1. Guzeev, V.I. Researching the CNC-Machine Stiffness Impact on the Grinding Cycle Design. / V.I. Guzeev, A. Nurkenov // Procedia Engineering. – 2016. – vol. 150. – pp. 815–820. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.118. **2.** Zhou, S.S. Improving workpiece roundness through centerless grinding cycle optimization / S.S. Zhou, G.C. Petrosky // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1997. – vol. 460. – pp. 217-248. **3.** Inasaki, I. Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process / I. Inasaki // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1991. – vol. 400. – pp. 359-363. **4.** Pereverzev P.P. Modeling Relationship Between Different Stages of Cylindrical Grinding Process with Axial Feed in Reversal Zones / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar // International Conference on Industrial Engineering Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018. Pages 1715-1722. **5.** Pereverzev, P.P. Designing optimal automatic cycles of round grinding based on the synthesis of digital twin technologies and dynamic programming method / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar, D.V. Ardashev // Inter. J. Mechanical Sciences. – 2019. – vol. 1. – pp. 1-11. DOI: 10.5194/ms-10-331-2019 **6.** Беллман, Р. Динамическое программирование и современная теория управления / Р. Беллман, Р. Калаба. – М: Наука, 1969. – 120 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА

Акопян Н. Х. *(представитель президента Nanotech Industrial Solutions, г. Ереван, Армения)*
Тел. +374 (094) 007889; E-mail: nerses.hakobyan.xch@gmail.com

Abstract: *Atomic force microscopy is an effective means of obtaining images of the surface of a material with an accuracy of up to atoms. With its help, it is possible to detect the trend of changes in the process of formation of the surface of the nanostructure and it can be implemented both in a vacuum and in air or liquid. When considering the physical processes underlying the semi-contact mode, it is necessary to imagine the atomic force microscope as a generator of sinusoidal oscillations. In the semi-contact or amplitude-modulation mode, there are two main modes of interaction-the mode of exclusively attractive forces and the mixed mode of attraction-repulsion. Semi-contact mode is mainly used for obtaining high-resolution surface relief of a material, and also as a way to obtain information about the phenomena of energy scattering at the nanometer level. However, the system of the oscillating measuring instrument of the microscope - a cantilever with a needle, is a certain degree of complexity, so an exhaustive and detailed explanation of the obtained images of the surface of the nanostructure is extremely difficult. An exception is the self-excitation mode, where the interaction forces acting between the cantilever needle and the material surface can be obtained from the spectroscopic characteristics of the elements, based on the identification of characteristic lines in their emission spectrum, i.e. by measuring the distance between the lines themselves. A model of the vibration amplitude in the modulation mode and a model of the tip of the needle end of a cantilever sliding on the surface of the material are presented. The trajectory of the cantilever needle was analyzed when the oscillation frequency is lower, equal and higher the resonant frequency. With a sharp change in the stable modes of attraction to attraction/repulsion, the system goes into an unstable position and a hysteresis effect appears. The effect of hysteresis is studied on the basis of the graph of the trajectory of the cantilever needle and the interaction force during one oscillation cycle.*
Keywords*: cantilever needle end distance, material surface, amplitude, frequency, phase, attractive force, repulsive force, hysteresis, instability.*

В атомно силовых микроскопах (АСМ) наиболее широкий интерес представляет его полуконтактный режим, когда кантилеверу передаются периодические изменение амплитуды колебаний с частотой, значительно меньшей, чем частота самих колебаний (амплитудная модуляция - АМ) при контакте последнего атома острого конца иглы кантилевера и первого атома поверхности материала. Основной элемент в схеме полуконтактного АСМ является четырёх секционный фотодиод, сигнал которого анализируется усилителем синхронного детектирования - информатором амплитуды и фазы переодического колебания кантилевера. Далее величина амплитуды сравнивается с заданной, и информация о разнице или об ошибке передаются на пропорционально интегрально дифференциальный (ПИД) регулятор, который включаясь начинает процесс регулирования пьезопривода – расстояние между кантилевером и поверхностью материала. Внешний вибрационный пьезоэлемент направляет сигнал на сверхпрецизионный короткоходовой линейный электропривод, контролируемое линейное перемещение с высоким усилием. Одновременно этот сигнал колебаний служит базовым сигналом для усилителя схемы синхронного преобразования в колебания с другой частотой. Этот метод используют в наноразмерном масштабе для определения

шероховатости поверхности в материаловедении [1]. При большом увеличении изображении шероховатости поверхности можно видеть изменение его структуры на субструктуру.

Силы действующие между иглой кантилевером и поверхностью материала, в процессе одного колебательного цикла с амплитудами 10 -100 нм, образуются разные силы притяжения и отталкивания. В результате происходит отклонение траектории кривой сила – расстояние на траекторию колебаний, что отрицательно влияет на интерпретацию измерений амплитуды колебаний, при этом частота резонанса кантилевера изменяется ввиду появления градиентов силы. При отсутствии силы взаимодействия кантилевер находится на частоте резонанса, но как только появляются силы взаимодействия, происходит её выход из резонанса. Следовательно разные амплитуды вызывают разные изменения эффективной силы взаимодействия, поэтому интерпретация траектории силы согласно известных теорий, позволяющие рассчитать отношение между силой и расстоянием определяют только на основании экспериментальных данных. На рис. 1 представлено модель отношения значения амплитуды к расстоянию *X*.

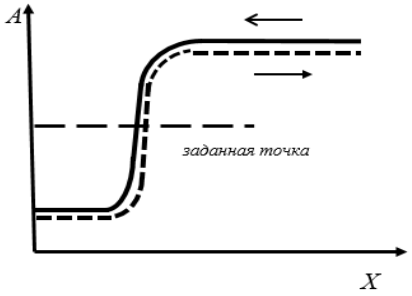


Рис. 1. Модель, показывающая амплитуду колебаний в режиме модуляции

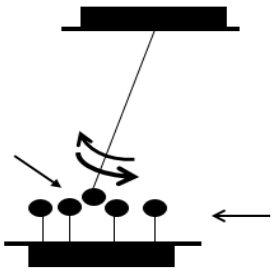


Рис. 2. Модель иглы кантилевера при скольжении по поверхности материала

Модель показывает, что при большом расстоянии, когда силы взаимодействия стремятся к нулю, игла кантилевера колеблется с амплитудой свободных колебаний. По мере приближения конца острой части иглы кантилевера к поверхности материала, силы взаимодействия влияют на амплитуду, что приводит её к уменьшению. В конечном итоге график отношения расстояния амплитуды достигает минимальной точки, где начинает действовать силы отталкивания, что создаёт критическую точку мешающую острию иглы кантилевера углубляется в поверхность материала, а амплитуда колебаний продолжает стремится к нулю.

На рис. 2 представлена модель атома острия конца иглы кантилевера, скользящего по атомной плоской поверхности исследуемого материала. На схеме показано, как атом иглы перескакивает с одного потенциального атома поверхности материала на другой, что приводит к прерывистому скольжению. В схеме игла кантилевера и атомы материала установлены на упругие элементы.

Траектория кантилевера была проанализирована путём решения дифференциального уравнения второго порядка, разложенного с помощью числового алгоритма Верле [2, 3]. Результаты моделирования амплитуды и фазы колебания острого конца иглы кантилевера как функции расстоянии *X* до поверхности материала показаны на рис. 3. Из графиков видно, что кантилевер рассматривался в трёх состояниях, когда частота колебаний ниже частоты резонанса ω_0 , равной и выше её. Необходимо иметь в

виду, что настоящая частота резонанса равна ω_0^* с учётом значения добротности Q.

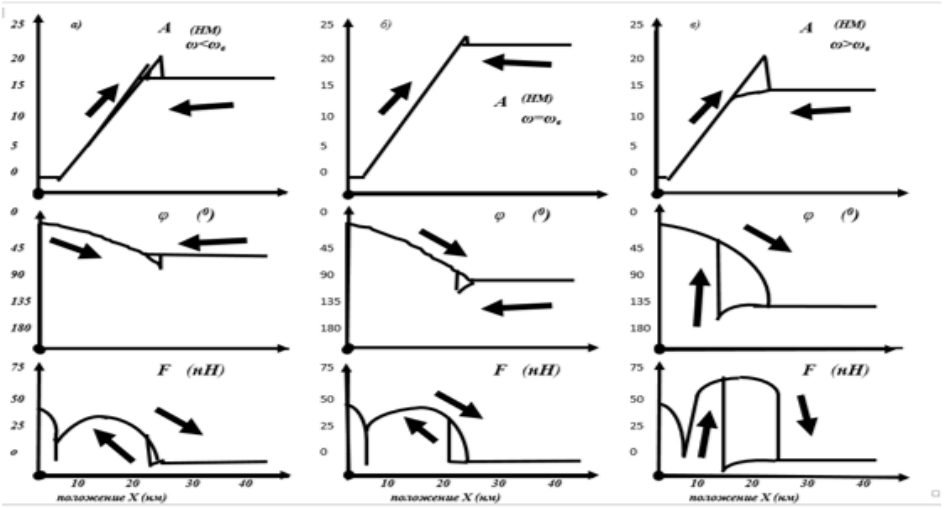


Рис. 3. Амплитуда и фаза колебаний при частоте возбуждения а) ниже, б) равной и в) выше частоты резонанса. Сила взаимодействия, при расстоянии до кончика острия иглы кантилевера и амплитуды колебания были минимальны

Рассмотрим прерывистый характер графиков в случае, когда частота возбуждения меньше ω_0. Представим амплитуду как функцию частоты возбуждения рис. 4 и сравним с графиком силы рис. 5, согласно исследований из работ [4, 5].

С сокращением расстояния между острым концом иглы кантилевера и поверхностью материала сила притяжения уменьшает частоту резонанса колебаний. Следовательно необходимо приблизить частоту возбуждения к резонансной частоте, чтобы увеличить амплитуду колебаний, что, в свою очередь, приведёт к сокращению расстояния и способствует увеличению силы притяжения. Система становиться неустойчивой до тех пор, пока не достигнет точки, где сила отталкивания естественным путём самостоятельно устранит нарастающую неустойчивость, что видно из рис. 3 а), в котором отношение сила и расстояние не могут быть построены из-за нестабильности.

Во втором случае, когда частота возбуждения равна резонансной частоте свободных колебаний, прослеживается незначительная прерывистость, при уменьшении расстоянии X. Здесь уменьшения частоты резонанса обусловлена действием силы притяжения, которые уменьшают амплитуду колебаний, поэтому и происходит уменьшение расстояния между острым концом иглы кантилевера и поверхностью материала, поэтому неустойчивость не обнаруживается до появления силы отталкивания. Одновременно сила отталкивания способствует увеличению частоты резонанса, что способствует увеличению амплитуды с уменьшением расстояния. Следовательно, возникает нарастающая неустойчивость, но только в точке перехода участка действия силы притяжения, к участку, где характерны силы отталкивания, что наблюдается на графике амплитуды рис. 3 б) и резкое изменение показателя фазы на его графике.

Рассмотрим последний случай, когда частота возбуждения больше резонансной частоте свободных колебаний, эффект уменьшения амплитуды в силу изменения частоты резонанса ещё более заметен. Снова не появляется неустойчивость амплитуды в процессе приближения иглы кантилевера к поверхности материала, когда действуют силы притяжения. Однако, как только начинают действовать силы отталкивания, появляется

неустойчивость в следствии увеличения частоты.

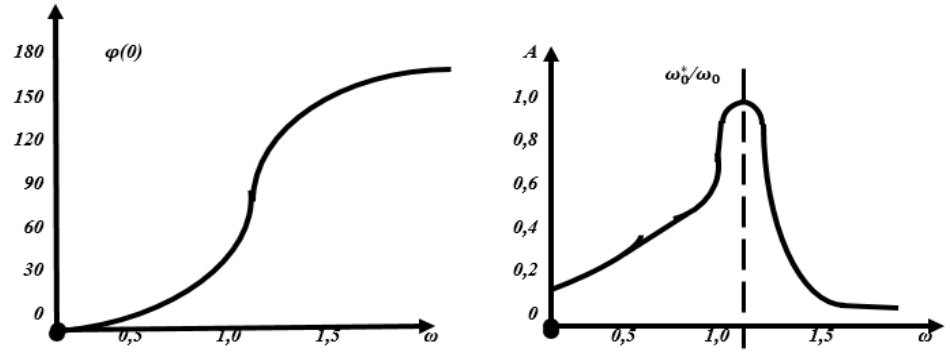


Рис. 4. График зависимости амплитуды и фазы от частоты возбуждения для затухающего гармонического колебания с добротностью Q=5

В результате, на графике наблюдается скачок значения фазы от менее 90^0 до более 90^0. Из рис. 3 в) графика амплитуды наблюдается небольшое изменение амплитуды.

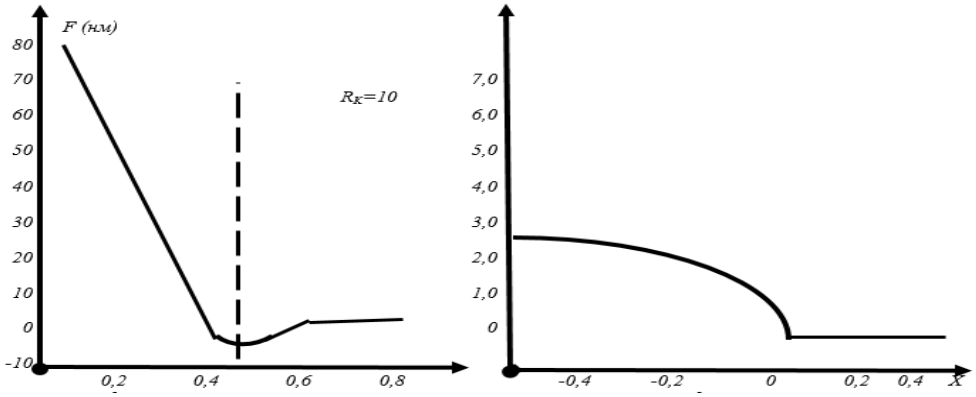


Рис. 5. График силы и соответствующей контактный радиус, высчитаны как функция конца радиуса острия иглы для контакта кремний – кремний

Интерпретация графиков рис.3 заключается в рассмотрении всех физических параметров колебаний в комплексе. Действительно, сила взаимодействия между концом острия иглы кантилевера и поверхностью материала в точке с минимальным расстоянием, происходит переход силы притяжения на силу отталкивания. В этой точке графика совокупная сила взаимодействия переходит от доминирующей силы притяжения к комбинированным, совместным силам притяжения и отталкивания, т. е. явление полуконтактного режима. Как только достигается минимальное значение расстояния, острый конец кантилевера подвергается действию силы отталкивания, что полностью меняет характер колебания, система от одного типа колебаний переходит к другому типа колебаний.

Таким образом, свойство мгновенно реагировать на изменение системы, а также неодинаковость траекторий между крайними состояниями и получения остроугольной петли на графиках, говорит о прямом отношении полученного явления к эффекту гистерезиса. Действительно, при равномерном приближении иглы к поверхности материала и отдаление от неё среднее значение амплитуды и фазы не должны зависит от

направления движения иглы кантилевера. Однако гистерезис между приближением и отдалением, вызванное межатомным взаимодействием, должно непосредственно повлиять на амплитуду и фазу. Поэтому, появление гистерезиса рис. 3 происходит из-за резкой смены режимов колебания и имеющих в системе двух устойчивых положений.

Для познания природы этого эффекта необходимо рассмотреть модель графика рис. 6 и рис. 7 траектории движения иглы кантилевера и силы взаимодействия в период одного цикла колебания. На графиках изображены параметры системы в точках гистерезиса при а) приближении и б) удалении иглы кантилевера. Здесь отчётливо прослеживается явление гистерезиса при резонансном возбуждении и такой же величине амплитуды. Однако, при одинаковом расстоянии колебание отличается друг от друга, так на графике а) действует только сила притяжения, б) одновременное присутствие сил притяжения и отталкивания.

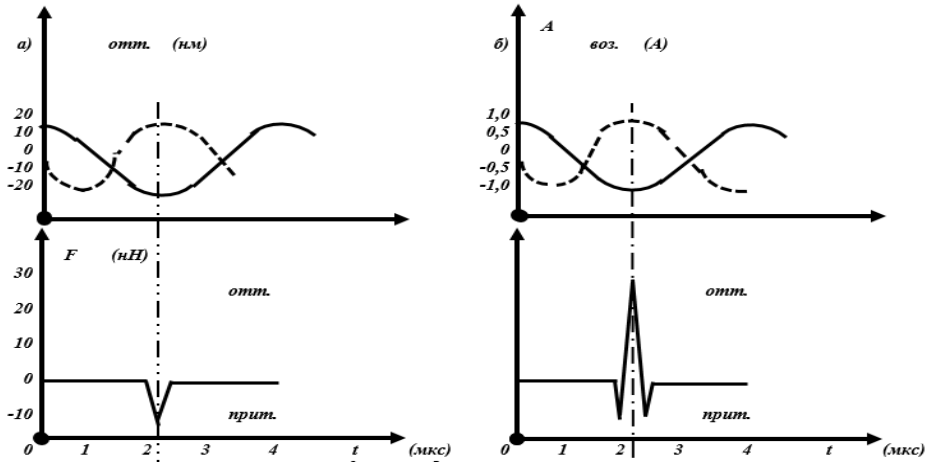


Рис. 6. Модель колебания иглы кантилевера а) в режиме силы притяжения, б) в режиме прерывистого контакта (сплошная линия показывает амплитуду колебания, пунктирная – амплитуду возбуждения)

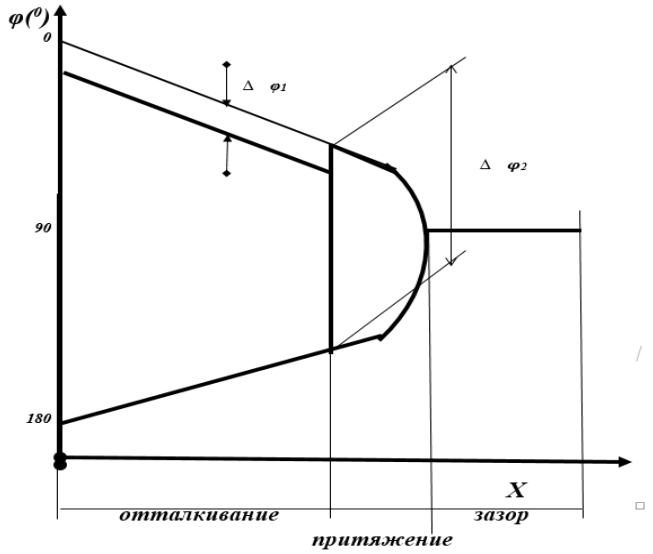


Рис. 7. Изменение фазы, функция расстояние между иглой и поверхностью материала

Из графиков видно, что переход от одного режима к другому, происходит при

различных значениях расстояния, поэтому система, между этими двумя устойчивыми положениями, находится в неустойчивом состоянии. Это подтверждается значениями фазы и минимальными изменениями амплитуды. С другой стороны, если система остаётся только лишь под действием силы притяжения и нет явления гистерезиса, то система находится в устойчивом положении. Из анализа графиков можно прийти к заключению, что получение числовых параметров силы взаимодействия между иглой кантилевера и поверхностью материала практически возможно, но не применимо. Но предлагаемый способ получения топографии поверхности наноструктур материала применимо. Кроме того, установлено, что имеем два вида колебаний, первый вид режим притяжения, второй вид режим смешанный - притяжения и притяжение-отталкивание, которые описывает силы взаимодействия, где фаза указывает на тип взаимодействия. Если частота возбуждения меньше резонансной частоты кантилевера, то в системе присутствуют лишь силы притяжения и она не подвергается воздействию других сил, из- за нарастающей неустойчивости. Однако необходимо ограничивать фактор значительной силы отталкивания, поскольку она отрицательно влияет при измерении тонких и чувствительных материалов. Спектр использования АМ должна проводится только на резонансной частоте или превышающей её, с ограничением силы взаимодействия, поскольку появляется возможность вхождения в режим прерывистого контакта, и эффект гистерезиса, не позволит системе выйти из неустойчивого состояния. Поэтому необходимо предварительно отрегулировать параметры колебания так, чтобы при АМ в системе присутствовали только силы притяжения, а это возможно достичь экспериментальным определением Q добротности.

В литературе [6, 7] были проведены сравнительные исследования экспериментальных и смоделированных данных. В результате было подтверждено сходство качественных характеристик, формы гистерезиса и неустойчивости, но также было обнаружено некоторые количественные несоответствия между двумя пиками неустойчивости. Это ошибка объясняется упрощённостью модели силы, где кроме сил Ван-дер-Ваальса и отталкивания не учитываются другие разнообразные, многочисленные внешние силы между иглой кантилевера и поверхностью материала, способствующие появлению силы притяжения и перехода механической энергии в её другие формы энергии, теплоту и так далее.

Список литературы: 1. Magonov S. N**.** Visualization of Polymer Structures with Atomic Force Microscopy // In book: Applied Scanning Probe Methods, ed by Fuchs H., Hosako M, Bhushan B., Springer, Berlin 2004, pp 207 – 251 **2.** Verlet L**.** Computer experiments on classical fluids // I volume. Thermodynamical properties of Lennard – Sones Molecules, Phys. Rev. 159, 1967, 98 – 103 **3.** Verlet L. Computer experiments on classical fluids // II volume. Equilibrium correlation functions, Phys. Rev. 165, 1968, 201 - 214 **4.** Anczykowski B., Kruger D., Fuchs H. Cantilever dynamies in quasinoncontact force microscopy // Phys. Rev. B53, 1996, 15485 – 15488 **5.** Anczykowski B., Kruger D., Babcock K.L., Fuchs H. Basic properties of dynamic force spectroscopy with the scaning force microscope in experiment and simulation, ultramicroscopy // Phys. Rev. 66, 1996, 251 – 259 **6.** San Paulo A., Garcia R. High – resolution imaging of antihodies by tapping – mode atomic force microscopy // Attractive and repulsive tip – sample interaction regimes, biophys. J78, 2000, 1599 – 1605 **7.** Kruger D., Anczykowski B., Fuchs H. Physical properties of dynamic force microscopies in contact and noncontact operation // Ann. Phys. 6, 1977, 341 - 363

ПОЛУЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О РЕЛЬЕФЕ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ МОЩНОСТИ ЭНЕРГИИ

Акопян Н. Х. *(представитель президента Nanotech Industrial Solutions, г. Ереван, Армения)*
Тел. +374 (094) 007889; E-mail: nerses.hakobyan.xch@gmail.com

Abstract: *The development of industrial countries is impossible without the creation of a modern high-tech industry. This means that developments in the field of nanotechnology determine the direction of research - the key structures of technological processes of nanoobjects. This fact determines the relevance of the study of surface phenomena and properties of the resulting materials. The variety of new materials poses practical challenges for the creation of universal methods for the study of surface interactions, to get reliable and reliable data results with minimal time and effort. In the process of determining the forces of interaction between the sharp end needle of the cantilever and the material, there are forces of attraction and repulsion that affect the force-distance curve, which in turn changes the parameters of the oscillations-amplitudes and phase. To get the correct image of the surface relief in semi-contact mode the miroscope system includes a four-section photodiode and a scanner equipped with feedback and a dual servo drive controlled by a PID controller. When a voltage is applied to the cantilever between its needle point and the surface of the material, appears charge, which follows its movement. The phenomenon is repeated, without applying voltage, when the distance between the end needle of the cantilever and the surface of the material is close to 1 nm. The energy is scattered over the surface of the material by changing the interaction forces at the contact points, which depends on the distance and mismatch of the surface structure, and it is analagic with the phenomenon of elastic hysteresis having a nonlinear function. The observed phenomenon of hysteresis, where the amplitude, frequency and phase of the oscillations contain information about the energy dissipation and therefore the system must be considered according to the law of conservation of energy. The calculation scheme of the dynamic model is presented, formulas for calculating the average power of the dissipated energy during the movement of the cantilever are proposed, the calculation formula for the power value between the end of the cantilever needle and the surface of the material is determined. The dependence of the scattering energy dynamics on the cantilever oscillation parameters is considered.*

Keywords*: cantilever, contact point, dynamic hysteresis, energy dissipation, amplitude, frequency, phase, average power.*

В полуконтактном режиме динамические атомно – силовые микроскопы (АСМ) доказали свои огромные возможности в получении топографии поверхности материалов на наноуровне. В настоящее время разработана позиционная система сканирования – пьезодатчик (возбудитель) и XYZ – сканер. Преимущество такого динамического АСМ заключается в следующем: работает на более высокой резонансной частоте по сравнению с традиционными сканерами, частота реагирования равна 10 кГц, скорость измерения и сканирования выше в 10 раз, игла кантилевера защищена от поломок. Система XYZ - сканирования снабжена обратной связью и двойным сервоприводом повышенной точности, которые имеют две малошумные датчики положения на каждой из осей, функция второго датчика заключается в корректировке и компенсации ошибок нелинейности и не плоскостности расположения, возникающие при работе своего напарника.

При определения сил, действующих между углом кантилевером и материалом, в процессе одного колебательного цикла на уровне амплитуды 10 – 100 нм, возникают силы

как отталкивания, так и притяжения. Поэтому происходит искривление кривой сила – расстояние по траектории колебаний, что естественно усложняет процесс истолковании значений измерения. В тоже время, частота резонанса кантилевера изменяется с появлением градиентов силы. Изменение частоты резонанса происходит не только после появления силы взаимодействия, но и до её появления. Это в свою очередь, непосредственно изменяет параметры колебания амплитуды и фазы, т.е. возникает функция изменения силы взаимодействия от изменения величины амплитуды.

В АСМ динамическом режиме вынужденные колебания передаются кантилеверу извне с постоянной частотой, близкой к её резонансной. Амплитуда и фаза колебания во время приближения острия иглы кантилевера к материалу определяется экспериментальными измерениями.

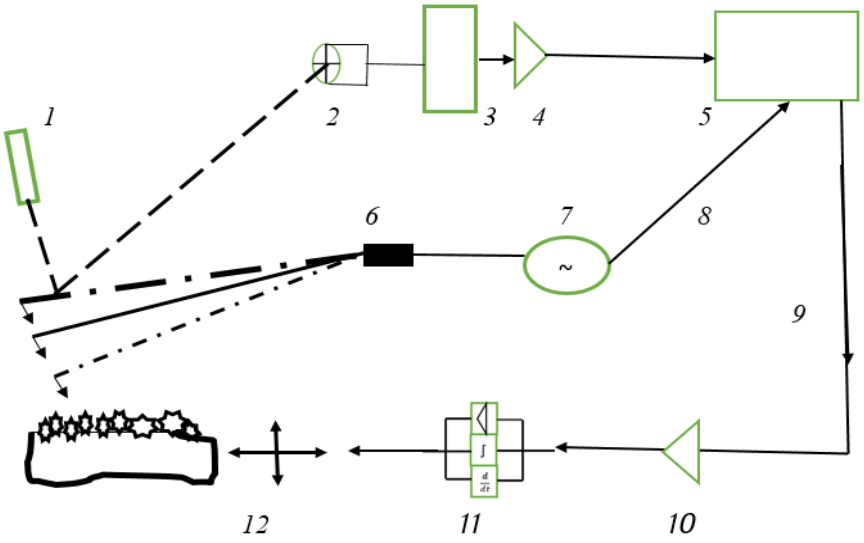


Рис. 1. Устройство динамического АСМ
1 – лазер; 2 – четырехсекционный фотодиод; 3 – детектор; 4 – усилитель сигнала детектора; 5 – усилитель схемы синхронного детектирования; 6 – пьезодатчик, установленный на кантилевере; 7 – генератор функций; 8 – опорный сигнал; 9 – заданная функция амплитуды и фазы; 10 – усилитель сигнала ошибки; 11 – ПИД; 12 – сигнал на сканере XYZ

На рис. 1 представлена упрощённая схема полуконтактного динамического АСМ. В процессе измерения рельефа поверхности упругие силы взаимодействия иглы кантилевера и материала, приводящие к изгибу и к изменению её геометрических размеров, регистрируются с помощью оптического полупроводникового датчика, в котором величина и направление изгиба детектируются прецизионным четырёхсегментным фотодатчиком. Луч лазерного диода под угом падает на заднюю поверхность кантилевера и информация отражается в центр фоточуствительной части четырёхсекционного фотодетектора. При изгибе кантилевера или при его кручении возникает разница в сигналах соответствующих четырёх равно одинаковых участков фотодиода. Отношение разницы сигналов верхнего и нижнего сегментов фотодиода даёт информацию об изгибе кантилевера в вертикальном направлении, а также о величине или градиенте сил притяжения или отталкивания, вызванное силами Ван дер Ваальса, а левого и правого сегмента об его кручении и позволяет различать области с различными коэффициентами трения, а также подчёркивает особенности рельефа поверхности. Кроме того, при сканировании обратная связь фиксирует разность верхних и нижних сегментов нормированная на величину суммы сигнала всех сегментов фотодиода, которая позволяет уменьшить низкочастотные и высокочастотные шумы/помехи и увеличить точность измерения за счёт увеличения помехозащищенности и помехоустойчивости АСМ. Этот сигнал анализируется детектором и усиливается усилителем сигнала детектора и отправляется на

усилитель схемы синхронного детектирования, выдающим информацию о фазе и амплитуде. Частота возбуждения кантилевера устанавливается извне модуляционным генератором, контролирующий пьезовозбуждение. Синхронизирующий усилитель определяет фазу и амплитуду колебания кантилевера. Затем амплитуда сравнивается с исходной при помощи обратной связи, и информация о разнице или сигнал об ошибке передаются на пропорционально интегрально дифференциальный (ПИД) регулятор. ПИД регулятор - прибор, встроенный в управляющий контур, имеющий обратную связью. Прибор подаёт выходной сигнал на устройство регулирования, на основании полученных данных амплитуды и фазы от сенсеров. Пропорциональная составляющая прибора вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени, при их равенстве выходной сигнал равен нулю. Интегрирующая составляющая прибора пропорциональна интегралу по времени от отклонения регулируемой величины, для обеспечения учёта и устранения со временем статической ошибки. Дифференцирующая составляющая прибора пропорциональна темпу изменения отклонения регулируемой величины и предназначена для противодействия отклонениям от заданных прогнозируемых параметров. Изменения могут быть обусловлены внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему.

Прибор определяет положение пьезопривода материала, где внешний модуляционный элемент направляет сигнал на привод поступательного движения с высокой точностью позиционирования (пьезоактюатор), и в то же время сигнал колебаний служит опорным сигналом для усилителя схемы синхронного детектирования.

Частота резонанса кантилевера изменяется ввиду появления градентов силы. В частном случае кантилевер может колебаться на частоте резонанса до возникновения силы взаимодействия, и при её появления может выйти из резонанса, что изменяет амплитуду и фазу задействованных в процессе измерения.

В литературе рассмотрены физические свойства позволяющие измерять силы между отдельными молекулами. Однако не исследован физический механизм в полуконтактном режиме как рассеивания энергии, который может действовать в динамической системе.

Если в вакууме силы в точке контакта объясняются молекулярными силами Ван дер Ваальса, электростатическими и химическими силами взаимодействия, то физика процесса рассеивания энергии неоднозначна и требует дополнительного рассмотрения. Фазовый сигнал в полуконтактном режиме нельзя объяснить только внутренними силами, процессы рассеивания энергии также играют определённую роль. Во время регистрации сигнала происходит изменение высокочастотных колебаний в соотвествии с изменением низкочастотного регистрационного сигнала. В режиме частотной модуляции с неизменной амплитудой, анализ экспериментальных данных сил взаимодействия между иглом кантилевера и материалом становится реальным. Существующая связь между силой взаимодействия и сдвигом частоты колебательной системы дополняется амплитудой возбуждения, которая необходима для поддержания постоянства амплитуды колебания, что в свою очередь является источником рассеивания энергии во время колебательного цикла. В режиме самовозбуждения, где разница сдвига фаз равно 90^0, энергия рассеивания распределяется между тремя участниками: кантилевером, точкой контакта острия иглы и материала и вязких сил окружающей среды [1].

Впервые рассеивание энергии [2] обнаружили при взаимодействии магнитных материалов на границах магнитных полей по причине их колебаний. Группа учёных [3] при исследовании степени легирования полупроводников между остриём иглы кантилевера и материалом при подачи напряжения, наблюдали появление заряда на поверхности материала, который следовал за движением острия иглы кантилевера. Ввиду наличия определённого сопротивле-

ния материала полученная энергия рассеивается во время движения заряда по поверхности. Эту величину рассеивания энергии вычислили [4] при колебаниях электромагнитных полей, а позднее на основании Ван дер Ваальсова сил трения [5] объяснили это явление. Процесс рассеивания энергии присутствует и при отсутствии внешних электромагнитных полей, когда острия иглы кантилевера и материала находились на расстоянии близкой 1 нм.

Очевидно, что рассеивание энергии над поверхностью материала постепенно должна привести к её уменьшению и потере. Процесс можно представить следующим образом, остриё иглы кантилевера в виде молотка ударяется об поверхность материала с высокой частотой, создавая в его последним атомом колебательные движения атомов кристалла материала. При этом вся копируемая область изображения подвергается рассеиванию энергии, из – за упругой реакции и вязкоупругого эффекта поверхности материала. С точки зрения экспериментальной науки, изучая силовое поле между остриём иглы кантилевера и материалом, можно узучать меняющееся положение его последнего атома. Изучая это явление [6] пришли к выводу, что изменение положения последнего атома приводит к изменению самой силы в точке контакта, следовательно, меняется расстояние до поверхности материала во время приближения и отвода, в результате чего проявляются явление гистерезиса на уровне атомов. Экспериментально такое краткосрочное рассеивание энергии вычислили [7, 8] для различных комбинаций острия иглы кантилевера и материала в вакууме при низких температурах, при этом определили, что рассеивание энергии является скачкообразной функцией.

В теории упругости явление гистерезиса наблюдается в поведении упругих материалов и носит название упругого гистерезиса, в данном случае наблюдается динамический гистерезис, причиной которого является неупругость либо вязкоупругость материала, который при снятии напряжений исчезает с некоторым запаздыванием или исчезает не полностью. Величина энергии упругой деформации не зависит от амплитуды деформации и меняется с частотой изменения нагрузки.

Такие же явления гистерезиса наблюдается и в статичной АСМ при приближении и отвода иглы от материала.

Из выше изложенного анализа следует, что возникающая сила взаимодействия и растояния имеют нелинейную функцию, и однозначное решение определяется только на основе экспериментальных данных [9, 10 и 11].

На рис. 2 показаны соответствующие экспериментальные графики амплитуды и фазы колебаний при частоте возбуждения ниже и выше частоты резонанса в воздушной среде для кремневого кантилевера и кремниевого материала на частоте резонанса 299,95 кГц.

В состоянии равновесия расстояние Z в реальности не одинаково до поверхности материала и иглы кантилевера. Кантилевер имеет три возможных варианта: частота вынужденных колебаний кантилевера ниже его резонансной частоты, равно его резонансной частоты и выше резонансной частоты. Вариант равенства не будем рассматривать из-за нулевой вероятности совпадения. Из рисунков видно, что при сокращении расстояния амплитуда и фаза изменяется достаточно редко.

Из графиков видно, что область между кривыми приближения и отвода сила – расстояние представляет собой потерю или рассеивания энергии из – за необратимого изменения структуры поверхности. Однако, очевиден гистерезисный характер между режимами изменения при приближении и отведения иглы кантилевера. В АСМ динамического режима амплитуда, частота и фаза содержат информацию о рассеивания энергии и целесообразно рассматривать систему с точки зрения сохранения энергии.

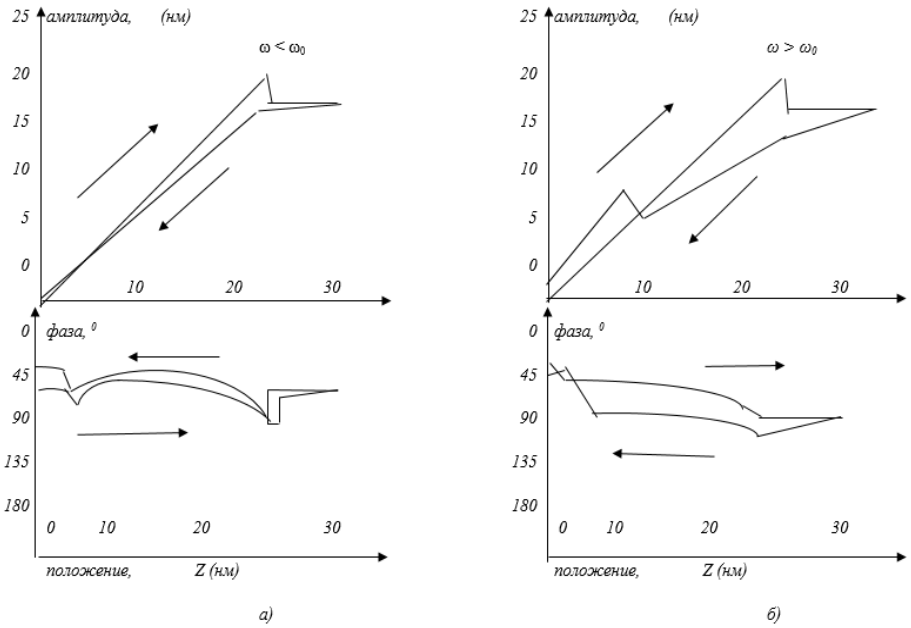


Рис. 2. Амплитуда фаза колебаний при частоте возбуждения: а) $\omega<\omega_0$ и *б)*$\omega>\omega_0$

Допустим, что динамическая модель рис. 3 находится в равновесии, тогда средняя величина потребления энергии должна быть равна средней величине потери или рассеивания энергии. Согласно этому закону средняя мощность возбуждения кантилевера от внешних источников энергии $\overline{N_V}$ должна быть равна средней мощности рассеиваемой энергии при движении кантилевера $\overline{N_0}$ и мощности взаимодействия острия иглы кантилевера с материалом $\overline{N_C}$:

$$\overline{N_V} = \overline{N_0} + \overline{N_C} \quad (1)$$

Из уравнения (1) $\overline{N_C}$ выражает количество рассеянной энергии при контакте острия иглы кантилевера и поверхности материала. Поэтому предлагаемая на рис. 3 упрощенная динамическая модель учитывает все характерные показатели и близка для описания эксперимента, несмотря на 1))сложное движение кантилевера.

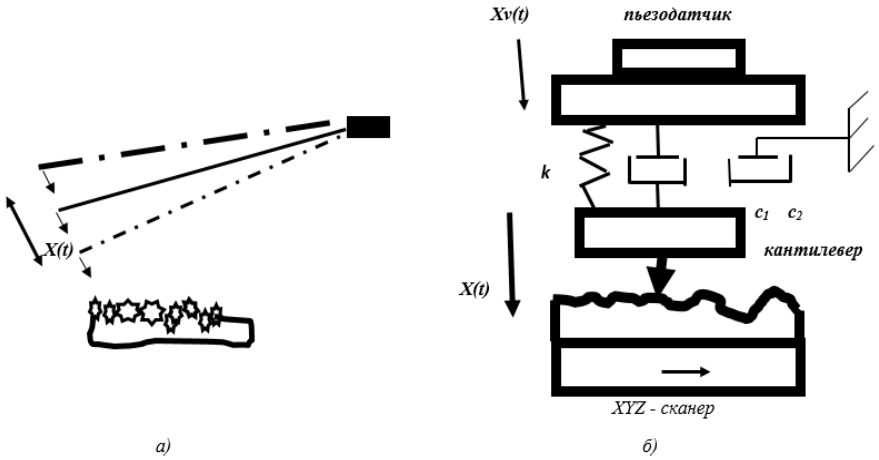


Рис. 3. а) Схема отталкивания и притягивания иглы кантилевера; б) динамическая модель колебаний кантилевера

Известно, что средняя мощность динамической системы $\overline{N_V}$ равна силе $F_V(t)$ от внешних источников умноженной на его скорость $\dot{X}_V(t)$

$$N_V = F_V(t) \times \dot{X}_V(t) = k[X(t) - X_V(t)] \times \dot{X}_V(t), \quad (2)$$

где k коэффициент упругости пружины, $X(t)$ величина движения иглы кантилевера и $X_V(t)$ величина движения внешнего источника.

Энергия возникающая от демпфирования не передается кантилеверу и равна нулю по причине их мгновенного рассеивания демпферами C_1 и C_2. Платформа кантилевера получает синусоидальное движение $X_V(\mathrm{t}) = A_V \cos \omega t$ от синусоидального сигнала внешнего источника с амплитудой A_V и частотой ω. В результате происходит отклонение иглы кантилевера от состояния равновесия в соотвествии с уравнением $X_1(t) = A_0 \cos(\omega t + \varphi)$, где A_0 и $0 \leq \varphi \geq \pi$ амплитуда колебаний и сдвиг фазы отклонения иглы кантилевера от равновесного состояния. Следовательно, интегрируя уравнение (2) за один период $T = 2\pi/\omega$, можно определить средную мощность внешних возбуждений за один цикл колебаний

$$\overline{N_V}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T N_V(t)\, d(t) = \frac{1}{2} k\omega A_V \sin\varphi \quad (3)$$

Из полученного уравнения вытекает, что кантилевер получает максимальную мощность при сдвиге фазы выходного сигнала на $\varphi = 90^0$ т.е. $\sin 90^0 = 1$.

Теперь рассмотрим чему равна величина средней мощности рассеиваемой энергии при движении кантилевера $\overline{N_0}$. Из предлогаемой модели рис. 3 видно, что $\overline{N_0}$ зависит от показателей демпфирования.

В первом случае от вязкого демпфирования с коэффициентом C_1, где основным механизмом демпфирования в вакууме является внутреннее трение, вызванное деформацией острия иглы кантилевера относительно корпуса кантилевера и поэтому формулу можно представить в виде

$$\overline{N_{01}(t)} = \left|F_{01}(t) \times \dot{X}(t)\right| = \left|C_1 \left[\dot{X}(t) - \dot{X}_V(t)\right] \dot{X}(t)\right| \quad (4)$$

В формуле (4) вычисляется абсолютная величина, поскольку со временем вся мощность рассеивания стремиться к нулю.

Во втором случае от дополнительного воздушного демпфирования окружающей среды, которое в большинстве случаев оказывает главное влияние и поэтому мощность энергии рассеивания будет равно

$$\overline{N_{02}(t)} = \left|F_{02}(t) \times \dot{X}(t)\right| = C_2 \dot{X}^2(t) \quad (5)$$

Для определения средней величины рассеянной мощности уравнения (4)

$$\overrightarrow{\overline{N_{01}(\mathrm{t})}} = \frac{1}{T} \int_0^T N_{01}(\mathrm{t})\mathrm{dt} = \frac{1}{\pi} C_1 \omega^2 A_0 \left\{ [A_0 - X_V(t)\cos\varphi] arc\sin \left[\frac{A_0 - X_V(t)\cos\varphi}{\sqrt{A_0^2 + A_V^2 - 2A_0 A_V \cos\varphi}} \right] \right\} + A_V \sin\varphi \quad (6)$$

$$\overline{N_{02}} dt = \frac{1}{T} \int_0^T N_{02}(t) dt = \frac{1}{2} C_2 \omega^2 A_0^2 \quad (7)$$

Выражение (6) можно упростить до выражения похожего на (7) используя приближение первого порядка, с учётом высокого коэффициента добротности кантилеверов, амплитуды колебаний превышающих амплитуду вынужденных колебаний, а также смещение системы в сторону резонансной частоты**,** то получим

$$\overline{N_{01}}(t) = \frac{1}{2} C_1 \omega^2 A_0^2 \quad (8)$$

В результате сложения уравнений (7) и (8) получим среднее количество энергии рассеивания колеблющимся кантилевером

$$\overline{N_0} = \frac{1}{2}(C_1 + C_2)\omega^2 A_0^2 \quad (9)$$

Из выражения (1) определим рассеивание мощности N_C между остриём иглы кантилевера с поверхностью материала с учётом коэффициента упругости k, добротности Q, резонансной частоты ω_0 кантилевера, а также обозначив коэффициенты демпфирования через $C = C_1 + C_2$ и приняв равным $C = \frac{k}{Q\omega_0}$ при свободно колеблющемся кантилевера получим

$$\overline{N_C} = \overline{N_V} - \overline{N_0} = \frac{k\omega}{2Q}(Q_C A_V A_0 \sin\varphi - A_0 \frac{\omega}{\omega_0}) \quad (10)$$

Q_C добротность в точке контакте. В полуконтактном режиме благодаря наличия в схеме узла генератора функции кантилевер получает колебания с постоянной амплитудой возбуждения и частотой. При взаимодействии острия иглы кантилевера с поверхностью материала изменяется амплитуда колебаний и сдвиг фазы. При частоте колебаний равной частоте резонанса $\omega = \omega_0$ и принимая рассматриваемый сигнал, как коэффициент усиления в цепи пьезовозбуждения, с помощью $A_0 = QA_V$ уравнение (10) упрощается, принимая вид

$$\overline{N_C} = \frac{k\omega_0}{2Q_c}(A_0 A \sin\varphi - A^2) \quad (11)$$

Физический смысл уравнения (11) заключается в постоянстве амплитуды А, которое обеспечивается наличием в схеме динамического АСМ узла обратной связи, что имеет место в полуконтактном режиме. Кроме того, наличие sinφ делает уравнение (11) применимо к различным режимам динамической АСМ. Изменение взаимодействия острия иглы кантилевера и материала с притягивающего $\varphi > 90^0$ на прерывистое $\varphi < 90^0$, подтверждается графиком фазы изображенного на рис. 2.

Выводы: динамическая АСМ позволяет получать изображения с точностью до атомов, в режиме самовозбуждения увидеть изменения динамики поверхности материала и исследовать рассеивание энергии влияющее на колебание кантилевера.

Список литературы: 1. Durig U. Interaction sensing in dynamic force microscopy // New J. Phys. 2, 2000, 1 – 5. **2.** Liu Y., Grutter P. Magnetic dissipation force microscopy studies of magnetic materials // J. Appl. Phys. 83, 1998, 7333 – 7338 **3.** Stowe T.D., Kenny T. W., Thomson D. J., Rugar D. Silicon dopant imaging by dissipation force microscopy // Appl, Phys. Lett. 75, 1999, 2785 – 2787 **4.** Stipe B. C., Mamin H. J., Stowe T. D., Kenny T. W., Rugar D**.** Noncontact friction and force fluctuations between closely spaced bodies, Phys. Rev. Lett. 87, 2001, 96801/1-4 **5.** Volokitin A. I., Persson B. N. J. Resonant photon tunneling enhancement of the van der Waals friction // Phys. Rev. Lett. 91, 2003, 106101/1-4 **6.** Sasaki N., Tsukada M**.** Effect of microscope nonconservative process on noncontact AFM // J pn. J. Appl. Phys. 39. 2000, 1334 **7.** Hoffmann P. M., Jeffery S., Pethica J. B., Ozer H. O., Oral A. Energy dissipation in atomic force microscopy and atomic loss processes // Phys. Rev. Lett. 87, 2001, 265502 – 265505 **8.** Hembacher S., Giessibe F. J., Mannhart J., Quate C. F. Local spectroscopy and atomic imaging of tunneling current, forces, and dissipation on graphite // Phys. Rev. Lett. 94, 2005, 056101/1- 4 **9.** Rabe U., Turner J., Arnold W. Analysis of the highfrequency response of AFM cantilevers // Appl. Phys. L 66, 1998, 277 **10.** Bennewitz R., Foster A. S., Kantorovich L. N., Bammerlin M., Loppacher Ch., Schar S., Gugasberg M., Meyer E., Shluger A. L. Atomically resolved edges and kinks of NaCl islands on Cu (111) // Experiment and theory, Phys. Rev. B 62, 2000, 2074 – 2084 **11.** Kantorovich L. N., Trevethan T. General theory of microscopic dynamical response in surface probe microscopy: From imaging to dissipation // Phys. Rev. Lett. 93, 2004, 236102/1 – 4.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГТД

Анастасьев А.В., Пичко Н.С., Недашковский А.П.
(ДОННТУ, УФ УГТУ, ДФ ООО «Авиатех», г. Донецк, г. Усинск, г. Снежное, ДНР, Россия)
Тел.: +38(050)9316000; E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

Abstract: *The article describes the basic requirements for the materials of the turbine blades of gas turbine engine, the materials used and their properties. Methods of applying protective coatings are considered, and a universal scheme of protective coatings is described. Methods of finishing and hardening processing are analyzed and classified, and their brief characteristics are presented.*

Key words: *gas turbine engine, blade, coatings, finishing hardening treatment, coating materials.*

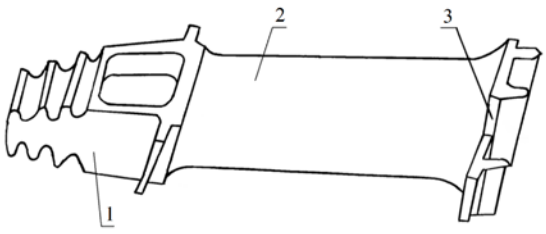
Актуальность работы. Лопатки газотурбинных двигателей работают в условиях постоянного воздействия высоких температур (960…1100°С) и целого комплекса статических, динамических и термических нагрузок. Следствием этого стало большое разнообразие методов отделочно-упрочняющей обработки, целью которой является повышение стойкости и снижение износа поверхностей в процессе работы. Однако отсутствие системного подхода и сложность сравнительного анализа существенно затрудняет рациональный выбор оптимального метода ОУО.

В процессе эксплуатации ГТД наиболее подвержены выходу из строя лопатки турбин. Основными причинами являются усталостные разрушения и нарушение геометрических размеров и формы лопаток, вследствие работы при высоких температурах с агрессивным воздействием продуктов сгорания топлива и высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии.

Цель работы – провести анализ существующих методов отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин ГТД и их классификации.

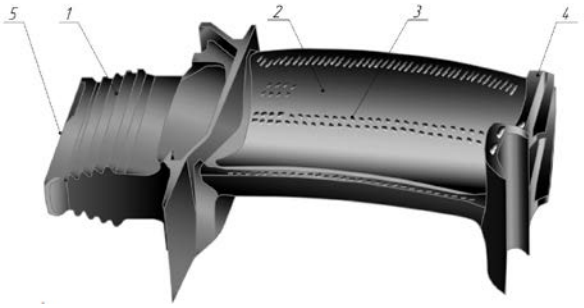
Лопатки турбины являются наиболее нагруженными, ответственными и массовыми деталями ГТД, так, например, некоторые ГТД имеют до семи ступеней турбинных лопаток, общее количество которых может быть более 500. По назначению делятся на рабочие лопатки и сопловые. По конструктивному исполнению могут быть отдельными, выполненными в виде секторов, а также цельными колесами или сопловыми аппаратами. Рабочие лопатки могут выполнятся со сплошным сечением и полыми (охлаждаемые воздухом, реже водой или топливом) [1].

Общий вид и основные элементы лопаток турбины ГТД приведен на рис. 1.



а)

1 – хвостовик лопатки; 2 – перо;
3 – бандажная полка



б)

1 – хвостовик лопатки; 2 – пер о; 3 – отверстия охлаждения; 4 – бандажная полка; 5 – отверстие подачи воздуха

Рис. 1. Типовая лопатка турбины ГТД и её элементы

Неохлаждаемые лопатки эксплуатируются при температурах до 1000°С, при более высоких температурах применяются лопатки с воздушным охлаждением, воздух для которых отбирается из последних ступеней компрессора. Различают три способа воздушного охлаждения: конвективное, дефлекторное и проникающее (пористое) охлаждение.

Основное содержание работы. В работах [2,3] отмечается, что новые материалы и технологии изготовления деталей и узлов газотурбинных двигателей во многом определяют ресурс изделий, их трудоемкость, себестоимость, эффективность и конкурентоспособность.

К материалам, применяемым для изготовления лопаток газовых турбин, выдвигаются очень высокие требования, поскольку полученные изделия должны обладать высоким сопротивлением ползучести, усталости, высокотемпературной газовой коррозии, эрозионному разрушению, иметь высокую пластичность и жаропрочность, но при этом обладать хорошими технологическими свойствами, не препятствующими их серийному изготовлению, такие как возможность литья, обработки резанием или давлением и др.

В своей работе Гецов Л.Б. приводит классификацию материалов применяемых для деталей газовых турбин, предполагающую разделение на следующие классы: перлитные, хромистые ферритные, ферритно-мартенситные, мартенситные и аустенитно-мартенситные, аустенитные стали, титановые сплавы, сплавы на никелевой и кобальтовой основе. Перспективными, в настоящее время считаются керамические материалы, металлоокисные сплавы, например $Al\text{-}Al_2O_3$, $Ni\text{-}Al_2O_3$, а также композитные материалы. Применение вышеуказанных материалов позволяет снизить массу деталей и достичь рабочих температур 1100…1300°С, которые являются недостижимыми для жаропрочных материалов на железной и никелевой основе [4].

Как видно из работ таких авторов как Иноземцев А.А., Кротинов Н.Б. – в турбинах авиационных ГТД температура газов достигает 1027…1077°С и более, и наблюдается тенденция роста температуры (рис. 2) [5]. Применение методов отделочно-упрочняющей обработки позволило значительно повысить ресурс лопаток турбины ГТД, что было подтверждено рядом работ [6].

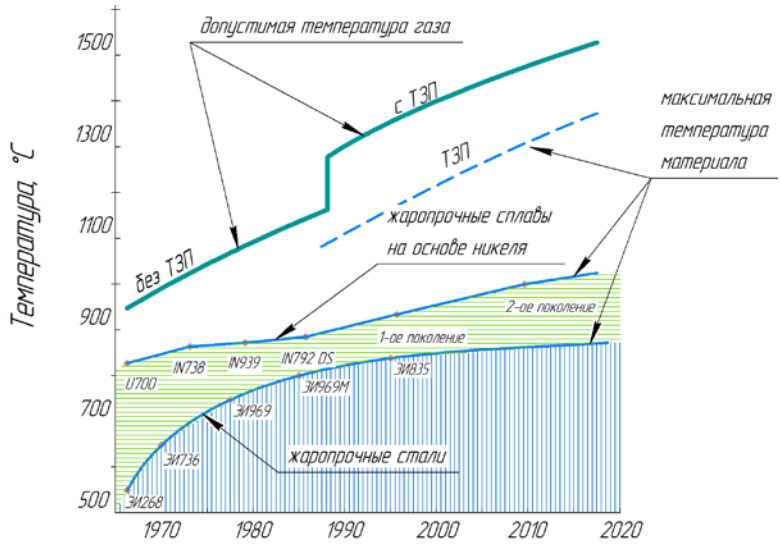


Рис. 2. Тенденции изменения температуры газа перед турбиной ГТД за последние десятилетия

По способу воздействия на объект, методы ОУО лопаток турбины делятся на: упрочнение поверхностным пластическим деформированием, ионно-имплантационную обработку и нанесение защитных и специальных покрытий.

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) повышает эксплуатационные свойства деталей машин за счет упрочнения поверхностного слоя, которое является следствием упруго-пластического деформирования, возникающего при механическом воздействии на металл [7]. Так как лопатки турбины работают в сложных условиях, при которых вся эксплуатационная нагрузка воспринимается поверхностным слоем – износостойкость зависит от сопротивления поверхностного слоя разрушению. Несмотря на преимущества методов пластического деформирования, они не могут обеспечить повышение работоспособности при высоких температурах.

Как показывает опыт использования ГТД, эффективность методов упрочнения зависит от условий эксплуатации. В связи с чем применение комбинированного упрочнения лопаток на основе функционально-ориентированного подхода позволяет обеспечить свойства функциональных элементов в зависимости от эксплуатационных особенностей или требуемого потенциала изделия [8].

Процессы ионной имплантации позволяют изменять механические, физико-механические и эксплуатационные характеристики поверхностных слоев материала. Сущность метода ионной имплантации заключается в бомбардировке имплантируемым веществом поверхности металлических материалов, при этом ионизированные атомы или молекулы внедряются в кристаллическую решетку и формируют новые поверхностные сплавы, что дает возможность создания композиционных систем с уникальными структурами и свойствами, которые существенно отличаются от свойств основного материала [9]. Такое модифицирование структуры поверхностей обеспечивает повышение эксплуатационных свойств изделий, а, следовательно, и увеличение ресурса их эксплуатации. Однако следует отметить, что глубина имплантированного слоя с измененным химическим составом не превышает 10…15 мкм, а глубина модифицированного поверхностного слоя может доходить до нескольких миллиметров.

При нанесении защитных и специальных покрытий используют основные группы методов, отличающиеся способом испарения наносимого материала и его осаждения на подложку детали. По механизму формирования защитного слоя методы получения покрытий можно разделить на диффузионные и конденсационные. К диффузионным относятся защитные покрытия, в процессе осаждения которых формируется защитный слой в результате взаимной диффузии химических элементов материала подложки и осажденного материала. Следовательно, свойства диффузионных защитных покрытий определяются не только осаждаемым на поверхность лопатки материалом, но и составом сплава, на который напыляется.

В настоящее время активное применение получили следующие методы нанесения диффузионных защитных покрытий:

- диффузионное насыщение поверхности;
- шликерный метод;
- золь-гель метод;
- горячее окунание в расплав;
- электрохимические и химические методы.

К конденсационным защитным покрытиям относят покрытия, имеющие переходную диффузионную зону с материалом подложки и собственно покрытие, структуру и состав которого определяют технология осаждения и состав осаждаемого материала [10]. Может выполняться различными методами, такими как: физическое осаждение PVD (physical vapor deposition), магнетронным, вакуумно-дуговым или

воздушно пламенным методами, а также вакуумно-плазменной технологией высоких энергий (ВПТВЭ) разработанной под руководством профессора Мубояджяна С.А. При нанесении конденсационных покрытий широко распространены сплавы систем: Ni-Cr-Al-Y (СПД-2), Al-Si-Y (ВСДП-11), Ni-Cr-Al-Ta-W-Hf-Y (СДП-ТВГ) и др.

Приведенную Степановой Т.Ю. классификацию методов ОУО можно представить в виде схемы на рисунке 3.

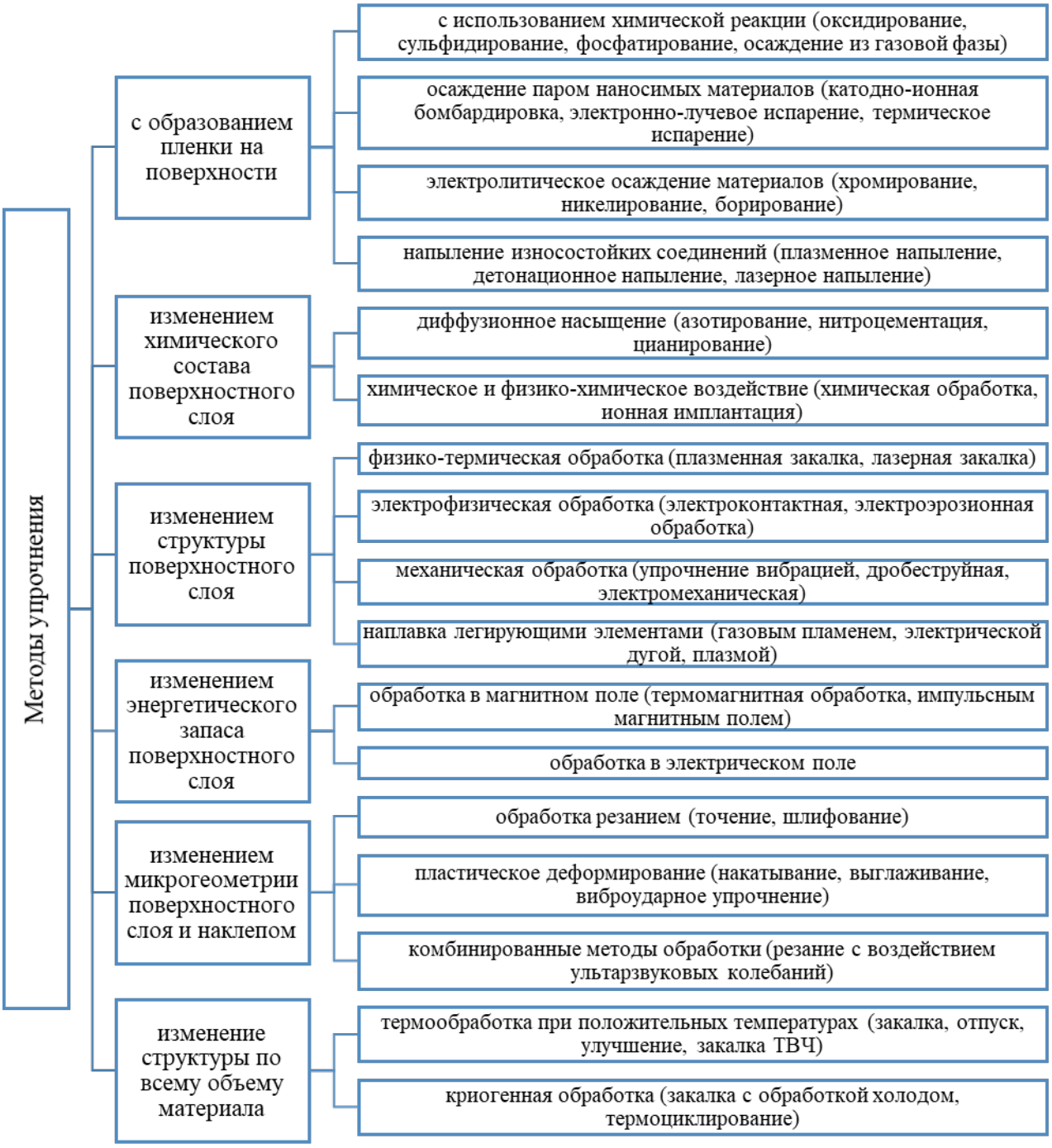


Рис. 3. Классификация методов отделочно-упрочняющей обработки разработанная Степановой

Универсальная схема защитного покрытия представлена на рисунке 4.

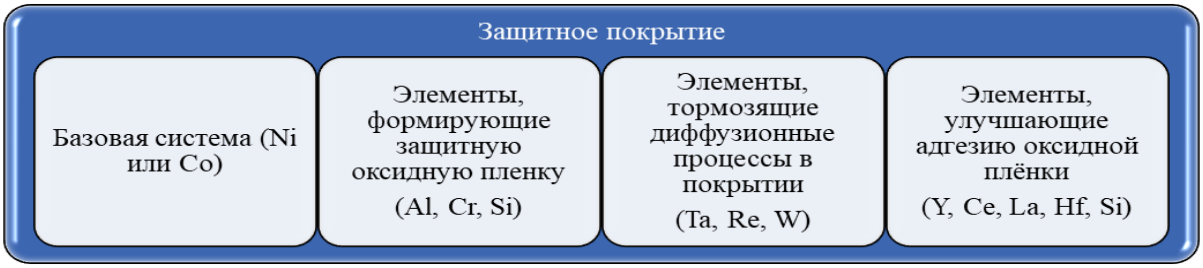


Рис. 4. Универсальная схема защитного покрытия

Выводы.

Представлен обзор существующих методов отделочно-упрочняющей обработки, применяемых к лопаткам турбины ГТД. Каждый из существующих методов нанесения покрытий имеет технологические особенности и режимы, которые определяются характеристиками лопаток, родом и формой напыляемых материалов, а также требованиями, предъявляемыми к покрытию.

Проведенный анализ показывает, что существующие методы ОУО лопаток турбины ГТД очень разнообразны как по способу воздействия, так и по сущности процесса упрочнения.

Существуют различные классификации методов упрочнения, однако они не учитывают функционально-ориентированные свойства (ФОС) лопаток. Разработка классификации методов ОУО, основанной на ФОС лопаток, позволит оптимизировать процесс выбора метода упрочнения, с точки зрения повышения качества.

Список литературы: **1**. Богуслаев, В.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. [монография] / В.А. Богуслаев [и др.]. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с. **2.** Абраимов, Н.В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов: Учеб. Пособие для авиационных вузов / Н.В. Абраимов, Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов. – Москва: Высшая школа, 1998. – 444 с., ил.. **3**. Завалишин, И.В. Особенности технологической подготовки производства деталей турбины газотурбинного двигателя / И.В. Завалишин, А.Г. Финогеев. // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014. – №6. – С. 1-11. – URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/6cc/osobennosti-tekhnologicheskoy-podgotovki-proizvodstva-detaley-turbiny-gazoturbinnogo-dvigatelya.pdf. **4**. Гецов, Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. / Л.Б. Гецов. – Москва: Недра, 1996. – 591 с. **5**. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с. **6**. Кротинов, Н.Б. Продление ресурса лопаток газотурбинных двигателей упрочняющей обработкой / Н.Б.Кротинов. – Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. – №5. – С. 221-224. **7**. Степанова, Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т.Ю. Степановаю – Иваново. – 2009. – 64с. **8**. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов ; А. Н. Михайлов. – Донецк : Технополис, 2009. – 346 с. **9**. Патент № 2228387 С2 Российская федерация, МКП С23С 14/06, 14/48. Способ нанесения покрытия на металлические изделия: №2002119793/02 : заявл. 22.07.2002 : опубл. 10.05.2004 / Падеров А.Н., Векспер Ю.Г. – 8 с.: ил. **10**. Мубояджян, С.А. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. / С.А. Мубояджян, В.П. Лесников, В.П. Кузнецов. – Екатеринбург: «Квист». – 2008. – 208 с.

РАЗРАБОТКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ТРОСОВ

Андреев Д.Р., Апанасевич И.В., Меркурьев И.В., Зуев Ю.Ю.
(НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия)
Тел./Факс: +7 (495)3627261; E-mail: MerkuryevIV@mpei.ru

Abstract: *We consider the problem of developing a robotic device for periodic monitoring of the technical condition of the cables of mine lifting.A mathematical model of the dynamics of the system has been built, which can be used to calculate the power section of an electrohydraulic drive that provides the required programmed motion. An algorithm has been developed for evaluating the control torques necessary for working out the programmed motion. Numerical simulation of the motion corresponding to the mode of approaching the magnetic flaw detector heads to the steel rope has been carried out.*
Key words: *testing technologies, the magnetic flaw detector, robotic complex.*

Актуальным направлением развития производственных технологии является обеспечение безопасности производства путем разработки механико-математических методов прогнозирования состояния сложных промышленных инженерных систем. В целях предупреждения аварийных ситуаций при эксплуатации подъемного шахтного оборудования необходимо в установленные сроки контролировать техническое состояние стальных тросов. Известны технические средства оперативной неразрушающей диагностики и оценки несущей способности конструкционных материалов в процессе эксплуатации, основанные на магнитном и вихретоковом методах [1,2]. В работах [3,4] предложены процессы диагностики напряженно-деформированного состояния и прочности стального троса в реальном масштабе времени для оценки дефектов троса, степени его коррозии и изношенности. При этом следует отметить, что аппаратура магнитной и вихретоковой дефектоскопии устанавливается в ручную, диагностика проводится в тяжелых погодных условиях с диапазоном температуры окружающей среды от минус 50 до +50°C, в труднодоступных для персонала местах.

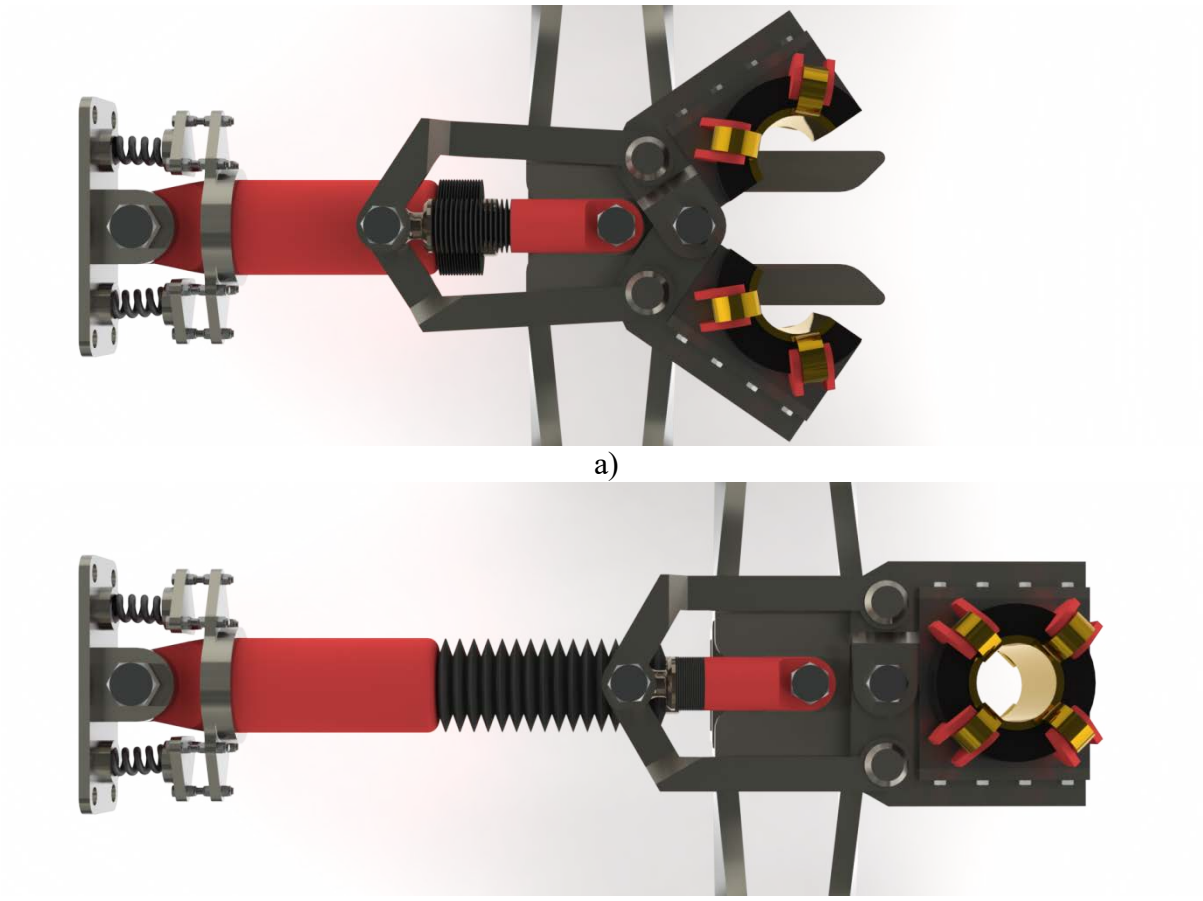
В целях повышения производительности труда, сокращения времени простоя, обеспечения безопасности подъемного шахтного оборудования поставлена задача разработки нового робототехнического комплекса, предназначенного для периодического мониторинга технического состояния стальных тросов диаметром 30–120 мм. При работе тросовой системы возможно ограниченное размерами технологического люка поперечное перемещение троса. Со стороны движущегося троса на аппаратуру неразрушающего контроля могут действовать произвольно направленные внешние силы величиной до 5 кН. Также, при функционировании аппаратуры неразрушающего контроля возможно налипание смазки, грязи и образование наледи.

Проектирование робототехнического комплекса (рис.1) проведено в SolidWorks. В составе робототехнического комплекса применяется магнитный дефектоскоп «Интрос-Авто» разработки ООО «Интрон Плюс», предназначенный для неразрушающего контроля и технической диагностики стальных канатов шахтных, буровых подъемных установок и других сооружений [3,4].

Предложенная конструкция робототехнического комплекса представляет собой управляемое многозвенное устройство с целевым оборудованием в виде магнитных измерительных головок дефектоскопа «Интрос-Авто», которые автоматически подводятся к стальному тросу для мониторинга технического состояния в реальных

условиях эксплуатации без непосредственного участия специалистов по неразрушающему контролю.

Периодическая оценка степени износа стального троса по измерению поперечного сечения троса вдоль его длины осуществляется при штатном функционировании подъемной шахтной системы. Робототехнический комплекс обеспечивает автоматическое определение одометрической информации и обработку первичных измерительных сигналов дефектоскопа стального троса. По окончании процедуры диагностики магнитные головки дефектоскопа автоматически отводятся от троса и размещаются в технологических нишах объекта.



а)

б)

Рис. 1. Конструкция робототехнического дефектоскопического комплекса

Учитывая, что система функционирует при сравнительно малых скоростях перемещения целевой аппаратуры и значительных внешних нагрузках и возмущениях со стороны троса, в качестве привода выбрана гидравлическая приводная система цикловой автоматики [5,6]. Применение гидравлической системы также обусловлено минимизацией влияния приводного механизма на работу чувствительного к магнитным воздействиям прибора диагностики технического состояния троса.

Структурная схема гидропривода робототехнического комплекса построена на базе системы цикловой автоматики (рис. 2). Регулировка и настройка гидравлической системы осуществляется с использованием управляемого дросселя (ДР1), позволяющего регулировать скорость перемещения выходного звена цилиндра (Ц) для прямого и обратного хода захватов (рис. 1 а, б). Двухсторонний гидрозамок (ЗМ) обеспечивает фиксацию положения штока цилиндра. Пневмогидравлический аккумулятор (АК) обеспечивает обратное перемещение штока цилиндра. Обратный

клапан КО2 является зарядным, а дроссель ДР2 обеспечивает опорожнение (разрядку) АК с расходом, дающим нужную скорость перемещения штока цилиндра.

Из соображений компактности, надёжности и сравнительно кратковременного периода работы системы при диагностике состояния троса использован насос (Н) постоянной подачи с переливным клапаном, перепускающий жидкость через гидроочиститель (Ф) в открытый гидробак (Б). Обратный клапан КО3 служит для защиты фильтроэлемента от прорыва при загрязнении. Обратный клапан КО4 исключает подсос воздуха из атмосферы за счёт обеспечения подпорного сливного давления. Направляющий распределитель (Р) осуществляет прямой и обратный ход выходного звена цилиндра. Вентили ВН1 и ВН2 в штатном режиме функционирования заблокированы и открываются для «ручного» перемещения штока цилиндра при отключённом насосе в целях обслуживания системы и регламентных работ. Вентиль ВН3 используется для зарядки АК, в процессе эксплуатации системы вентиль заблокирован. Установленное в напорную линию реле давления (РД) автоматически включает приводящий электродвигатель (ЭД) насоса при падении давления в напорной линии ниже заданного значения и отключает ЭД при достижении требуемого давления. В штатной или аварийной ситуации (например, в случае обрыва энергопитания ЭД), запасённая в АК энергия используется для обратного хода штока цилиндра для отвода захватов с магнитными головками дефектоскопа от стального троса.

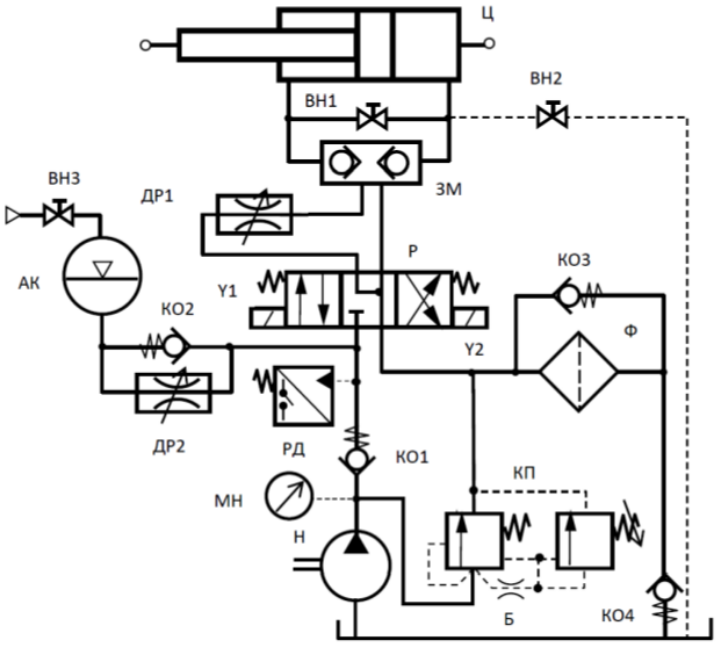


Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема робототехнического комплекса

Наличие пневмогидравлического аккумулятора позволяет оптимизировать энергопотребление системы управления робототехническим комплексом, улучшить тепловой режим и повысить надёжность и живучесть системы. С этой целью рабочий объём пневмогидравлического аккумулятора рассчитывается из условия обеспечения прямого и обратного перемещения захватов с магнитными головками дефектоскопа.

В докладе обсуждается оценка необходимых скоростных и тяговых характеристик гидропривода подвижных звеньев робототехнического комплекса в условиях внешнего возмущения со стороны движущегося стального троса заданного номинального диаметра.

Математическая модель робототехнического комплекса включает в себя дифференциальные уравнения управляемого движения многозвенного механизма в форме уравнений Лагранжа, уравнения силовой гидравлической системы в условиях внешнего ударного и вибрационного воздействия, а также алгоритмическое и программное обеспечение для управления робототехническим комплексом.

Разработанная новая математическая модель робототехнической системы применена для оптимизации конструктивных параметров и построения алгоритмов управления, обеспечивающих выполнение технологического цикла работы системы с наименьшими энергозатратами и максимальной точностью.

Заключение. В целях оценки технического состояния и мониторинга несущей способности грузоподъемного тросового оборудования шахты предложен новый робототехнический комплекс для управляемого подвода и фиксации магнитных головок дефектоскопа «Интрос-Авто» вокруг движущегося стального троса заданного диаметра. Разработанная новая кинематическая и динамическая модель робота использована для оптимизации схемотехнического решения цикловой автоматики силового гидропривода робота. Построенная математическая модель робототехнического комплекса и алгоритмы управления обеспечивают заданную циклограмму автоматической диагностики технического состояния стального троса. Проведена оптимизация процессов управления движением звеньев конструкции с учетом динамики гидроприводной системы в условиях внешнего ударного и вибрационного воздействия.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка прототипа нового автономного мобильного робота для решения задач мониторинга технического состояния тросового оборудования» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020-2022 гг.

Список литературы: 1. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин. Изд-во "Инновационное машиностроение", Москва, 2019, 247с. **2.** Дьяков А.Ф., Канцедалов В.Г., Берлявский Г.П., Матюнин В.М. Основы оперативной дистанционной диагностики энергооборудования ТЭС и АЭС. – М.: Горная книга. Т.2. Энергетика, 2010. – 572 с. **3.** Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Шпаков И.И., Гончаров В.В. Анализ эксплуатационной надежности грузовых канатов заливочных кранов сталеплавильного производства // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 5. С. 7-16. **4.** Слесарев Д.А., Потехин О.П., Шпаков И.И., Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н. Мониторинг технического состояния талевых канатов буровых установок эксплуатационного и разведочного бурения нефтяных и газовых скважин: технология, эффективность, перспективы // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 6. С. 13-22. **5.** Зуев Ю.Ю., Зуева Е.Ю., Меркурьев И.В., Скулова П.А., Дони В. Постановка прямой и обратной задачи следящего гидравлического привода с дроссельным управлением с позиции системно-креативного подхода// В сборнике: Завалишинские Чтения. XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, 2021. С. 106-110. **6.** Зуев Ю.Ю., Зуева Е.Ю. Сравнение структур контуров энергетики гидроприводов с частотным, насосным управлением и электромеханическими аналогами//Вестник Московского энергетического института. 2019. № 5. С. 150-160.

БУДУЩЕЕ ТЕХНОСФЕРЫ: БЛИЖНИЕ И ДАЛЬНИЕ РУБЕЖИ И ПРОГНОЗЫ

Аноприенко А.Я. *(ДонНТУ, Донецк, ДНР)*
E-mail: anoprien@ya.ru

Abstract: *The system of trends in technical and technological development in the past and present also makes it possible to effectively predict the future. The system dynamics of the Technosphere is formed from a system of such trends that make it possible to form a scientifically grounded and specific forecast of the future development of the Technosphere both in the near and in the long term, with specific milestones and timing of their achievement, relatively well structured, verifiable and open for reasoned discussion, clarification and development.*
Key words: *Technosphere, exponential growth, system dynamics, future development.*

Введение. Прогнозирование технологического развития является весьма нетривиальной задачей, впервые системно сформулированной и более-менее успешно решаемой в эпоху научно-технической революции (НТР) на базе самых различных методов и инструментов. Но в эпоху информационно-компьютерной революции (ИКР), в полную силу развернувшуюся с начала 1990-х годов, процессы технологического развития приобрели особенно динамичный, преимущественно экспоненциальный, характер. Многообразие и высокая степень динамизма этих процессов актуализировали настоятельную необходимость их исследования и систематизации с целью выявления основных закономерностей, позволяющих понимать и прогнозировать их влияние на развитие техносферы. В предыдущих работах данного цикла автором было предложено решать эту задачу на базе выявления и использования системы экспоненциальных и периодических закономерностей, определяющих системодинамику развития техносферы [1-3]. Данная работа является продолжением и развитием изложенных ранее идей с целью выявления и представления тех основных системных закономерностей, которые будут определять ближнее и дальнее будущее техносферы, конкретизируя основные рубежи, их количественные характеристики в динамике и возможные сроки и условия их достижения.

Системодинамика техносферы и её будущее в контексте глобальной и космической эволюции: основные результаты комплексного исследования в данном направлении в максимально сжатом и наглядном виде представлены на рис. 1-15

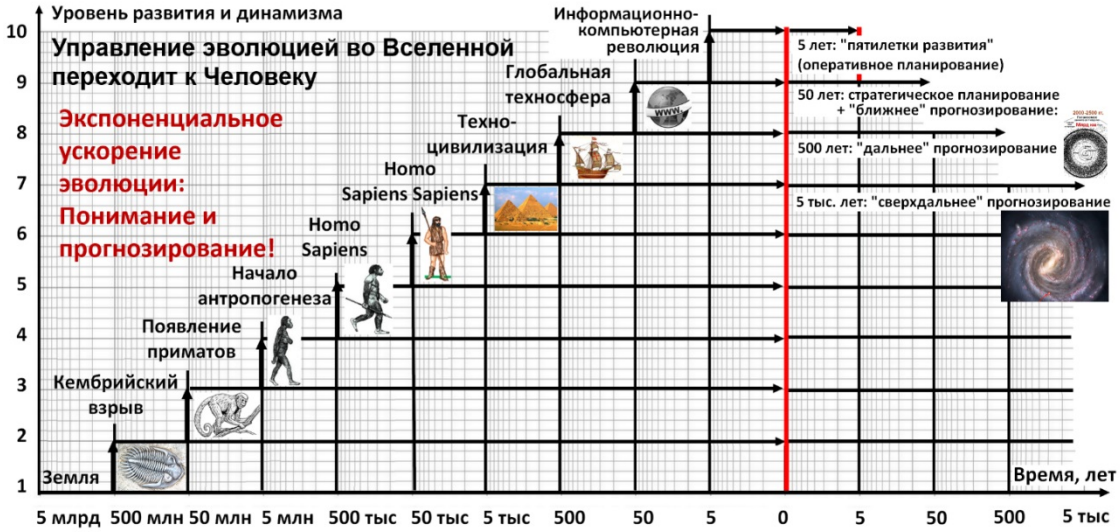


Рис. 1. Основные рубежи глобальной эволюции (концептуальная модель) и оптимальные сроки планирования и прогнозирования развития техносферы будущего

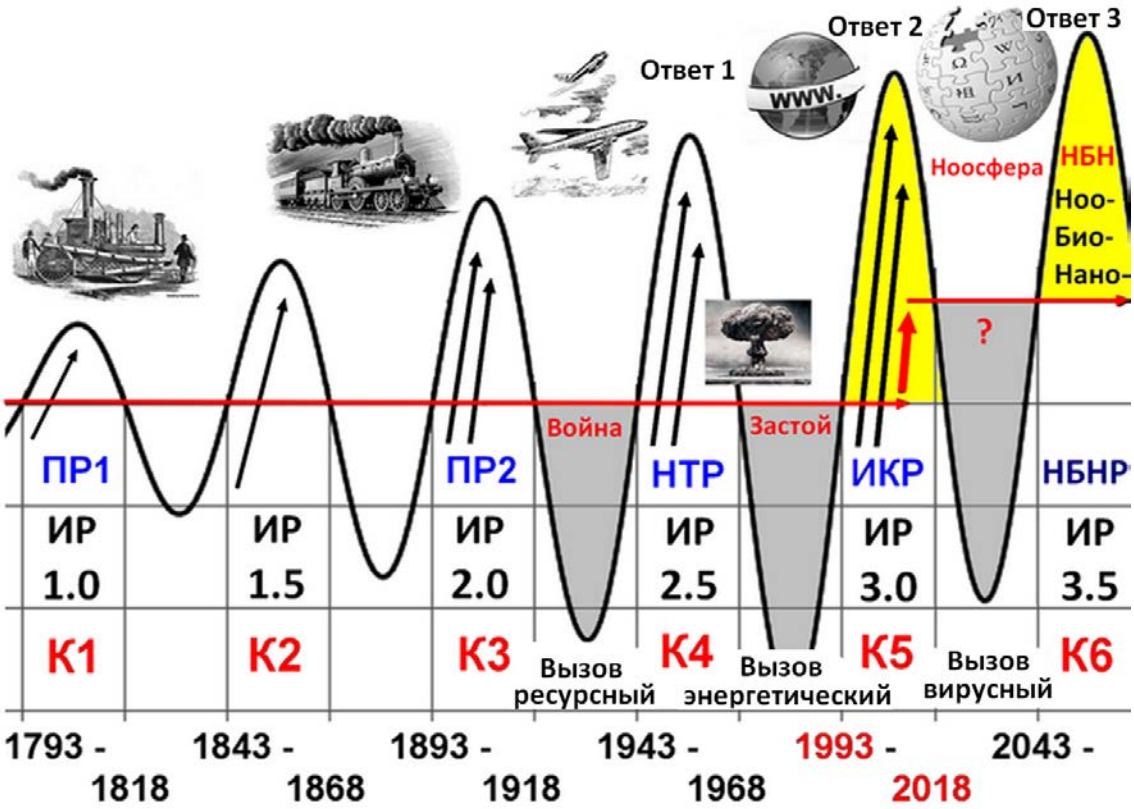


Рис. 2. Периодическая составляющая системодинамики техносферы как последовательность «вызовов-ответов» - основа для 50-летнего планирования-прогнозирования

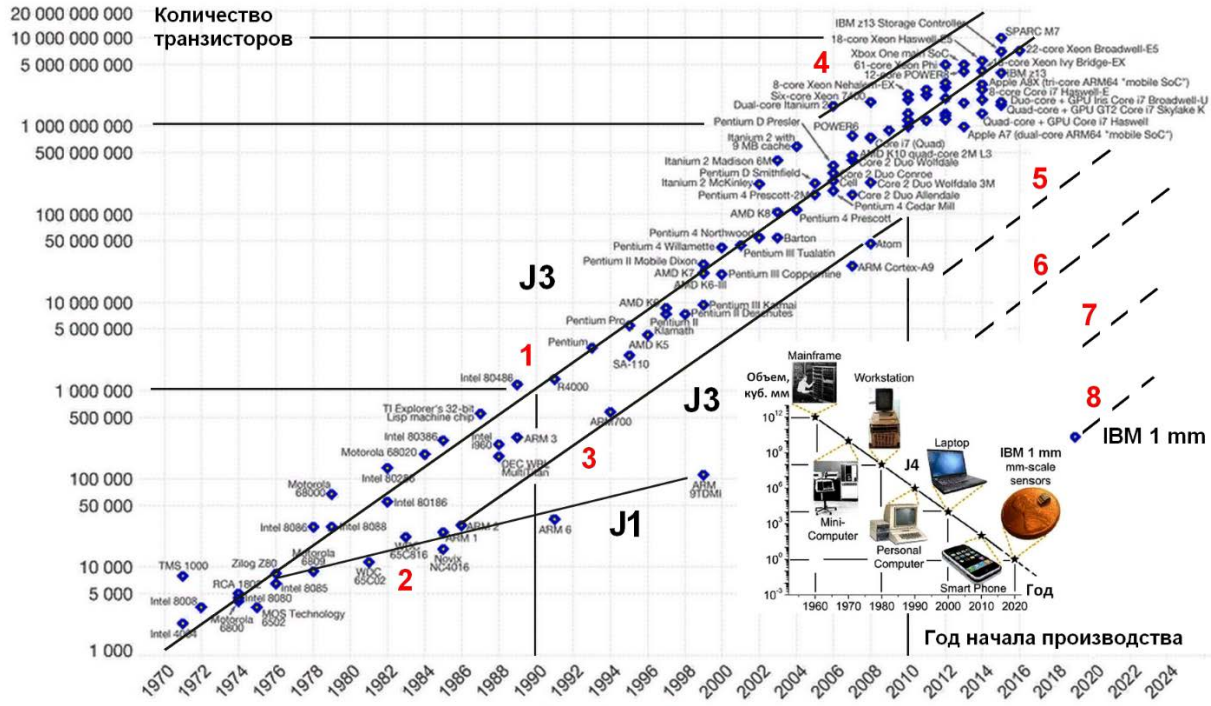


Рис. 3. Исходное выявление и формирование закона Мура в 1960-е годы применительно к основной линии микропроцессоров фирмы Интел в настоящее трансформировалось в целую систему закономерностей роста степени интеграции для самых различных классов микропроцессоров

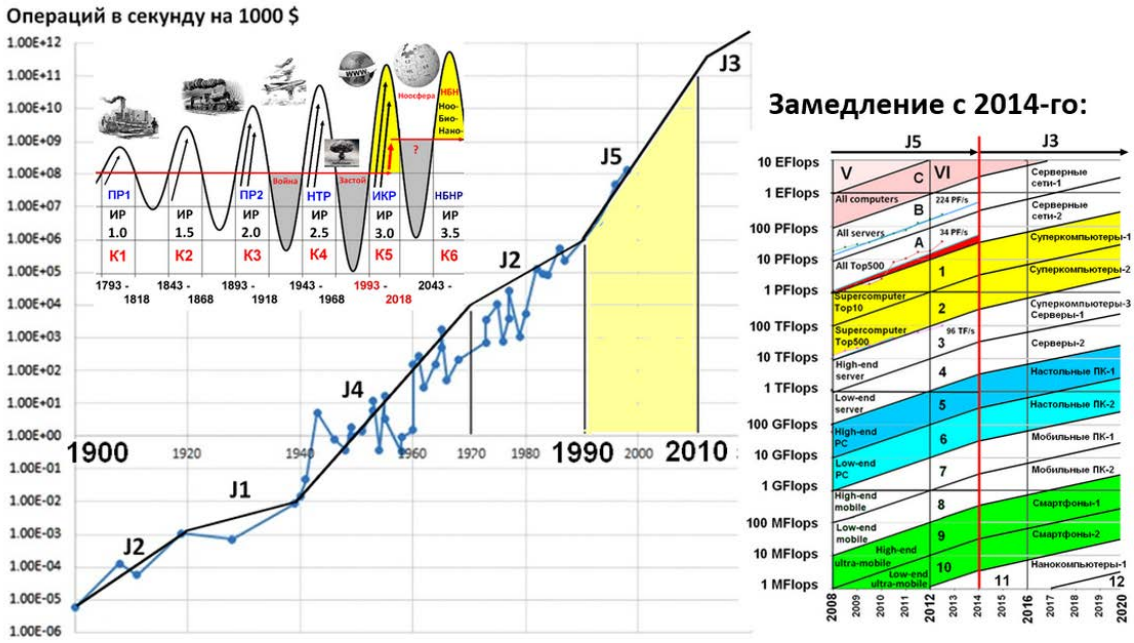


Рис. 4. Экспоненциальный рост производительности компьютерных систем: темпы роста определяются фазой периодической составляющей, что должно учитываться в процессе 50-летнего планирования-прогнозирования

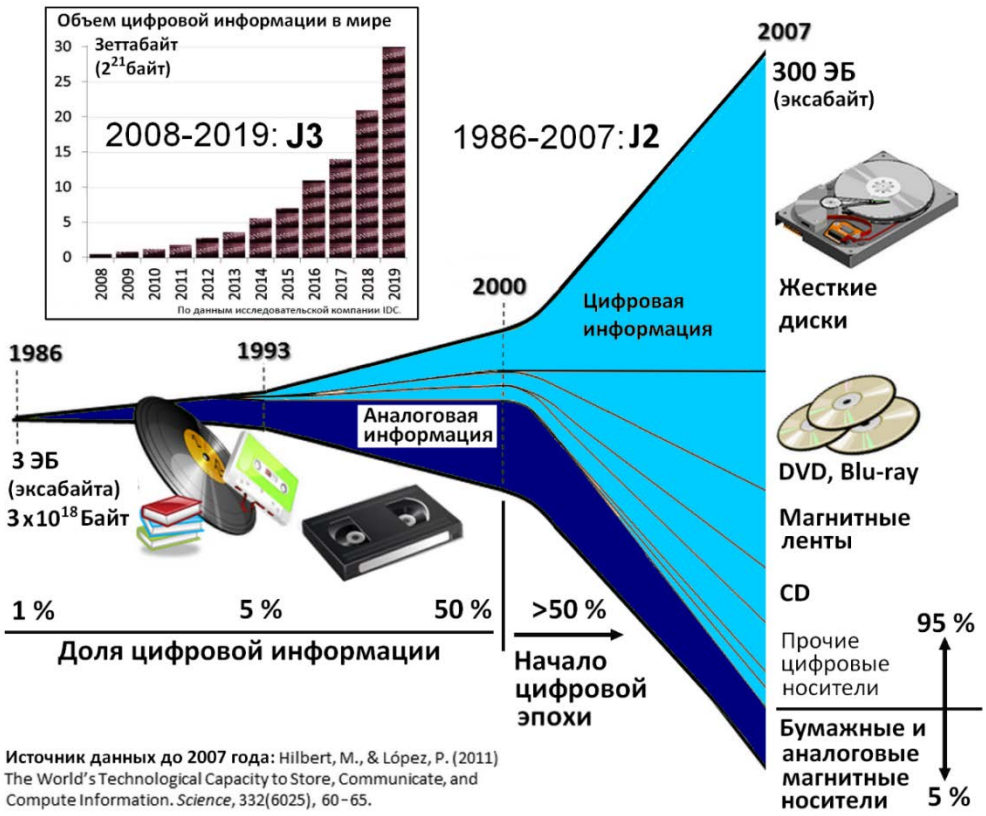


Рис. 5. «Информационный взрыв» продолжается: экспоненциальный рост объемов накапливаемой информации, впервые зафиксированный ещё в XIX веке и чрезвычайно актуализировавшийся в эпоху научно-технической революции (НТР), ускорился при переходе к преимущественно цифровым носителям информации в начале нового тысячелетия

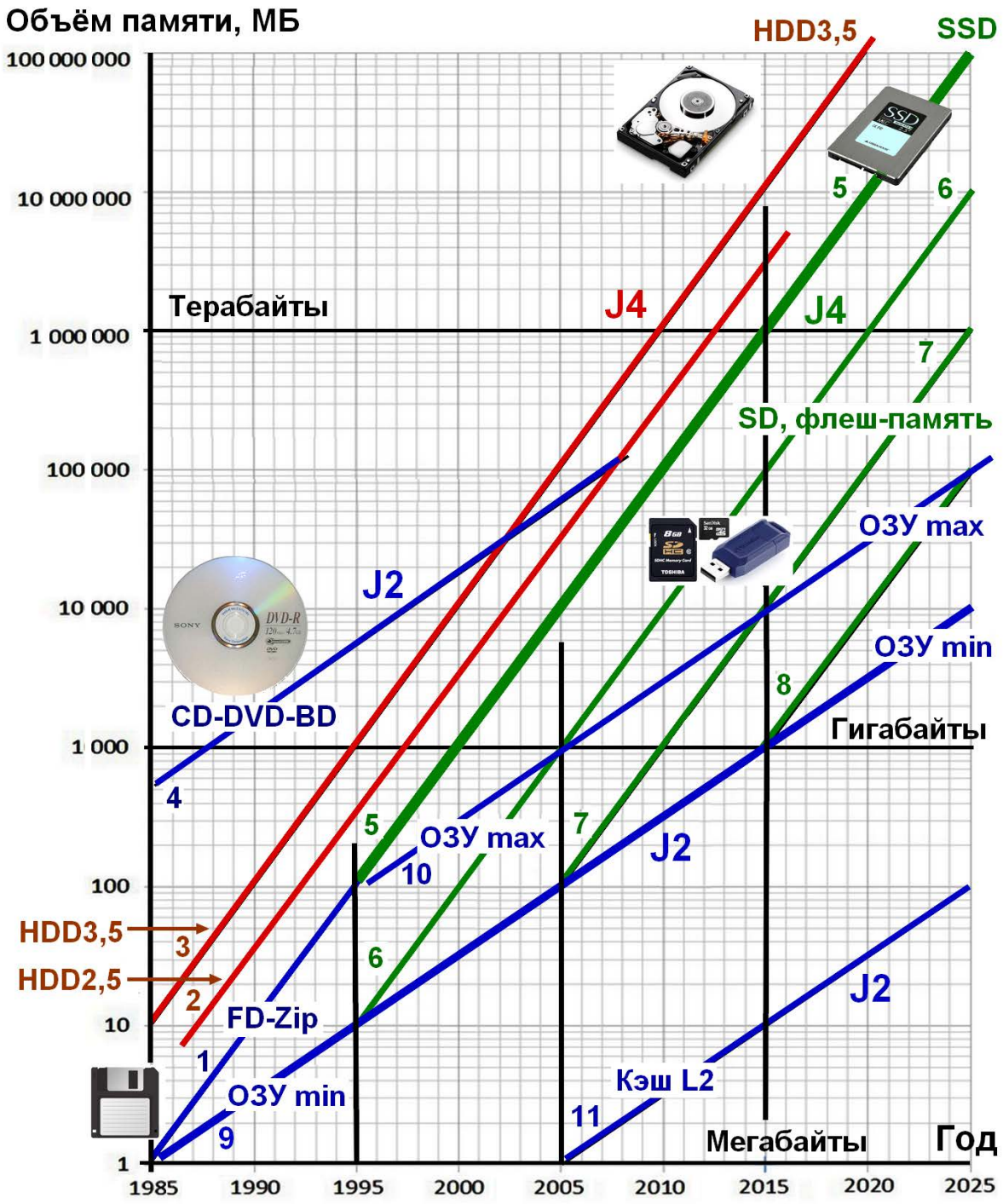


Рис. 6. Устойчивый согласованный экспоненциальный рост (на 4 порядка за 20 лет, что обозначено как J4) объемов памяти всего спектра компьютерных запоминающих устройств – технологический ответ на вызовы «информационного взрыва» и его техническое обеспечение, но одновременно и пример системы закономерностей, полезной и необходимой для 5-летнего и более длительного планирования развития любых систем с памятью

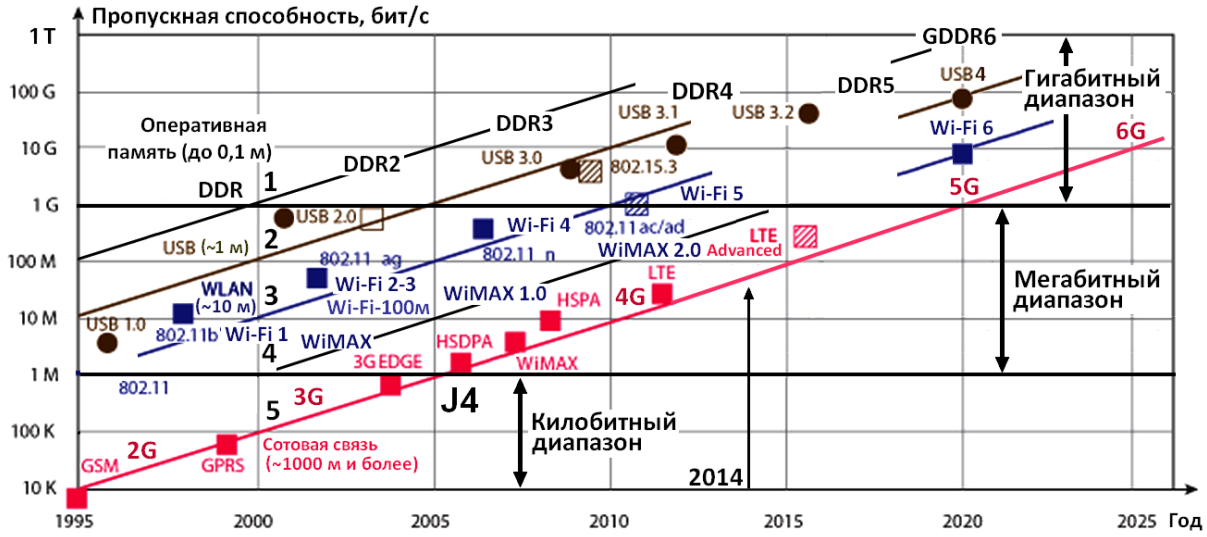


Рис. 7. Устойчивый согласованный экспоненциальный рост (на 4 порядка за 20 лет, что обозначено как J4) связности глобальной информационно-компьютерной инфраструктуры, представленной различными видами компьютерной связи, что позволяет достаточно уверенно планировать и прогнозировать самые различные коммуникационные подсистемы как минимум на ближайшие десятилетия

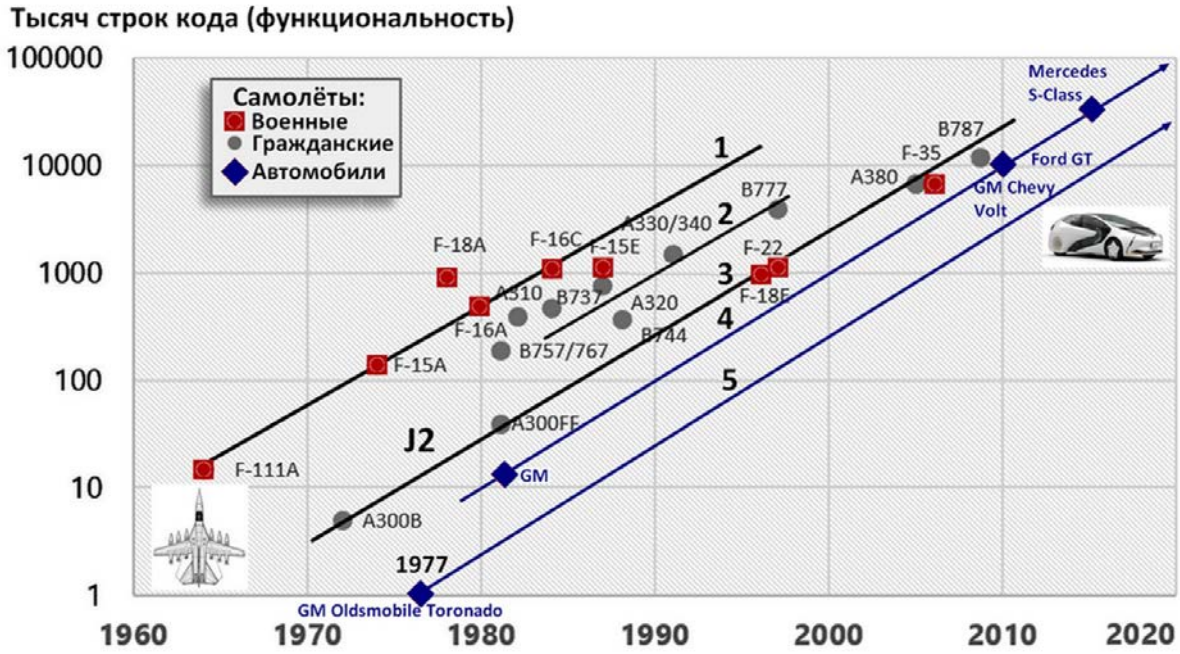


Рис. 8. Закономерности экспоненциального роста (на 2 порядка за 20 лет, что обозначено как J2) сложности программного кода в бортовых информационно-компьютерных системах различных видов современного транспорта позволяют конкретно планировать и прогнозировать процессы интеллектуализации транспортных систем самого различного назначения

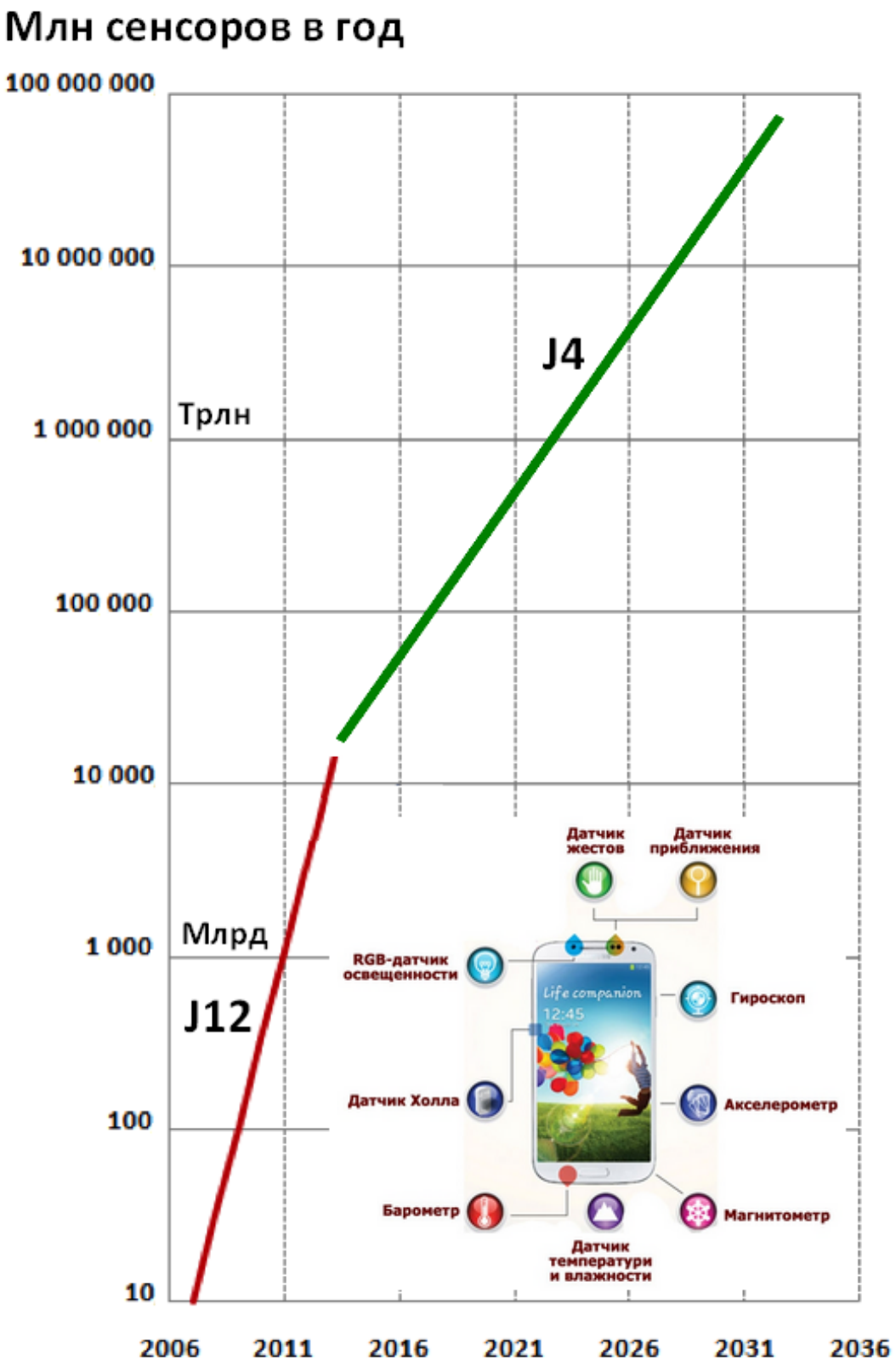


Рис. 9. «Сенсорный взрыв» - чрезвычайно быстрый экспоненциальный рост (на 12 (!) порядков за 20 лет, что обозначено как J12) насыщенности техносферы разного рода сенсорами (преимущественно в составе смартфонов и различных устройств «Интернета вещей») в начале нового тысячелетия означает ускоренное формирование развитой сенсорной составляющей техносферы будущего

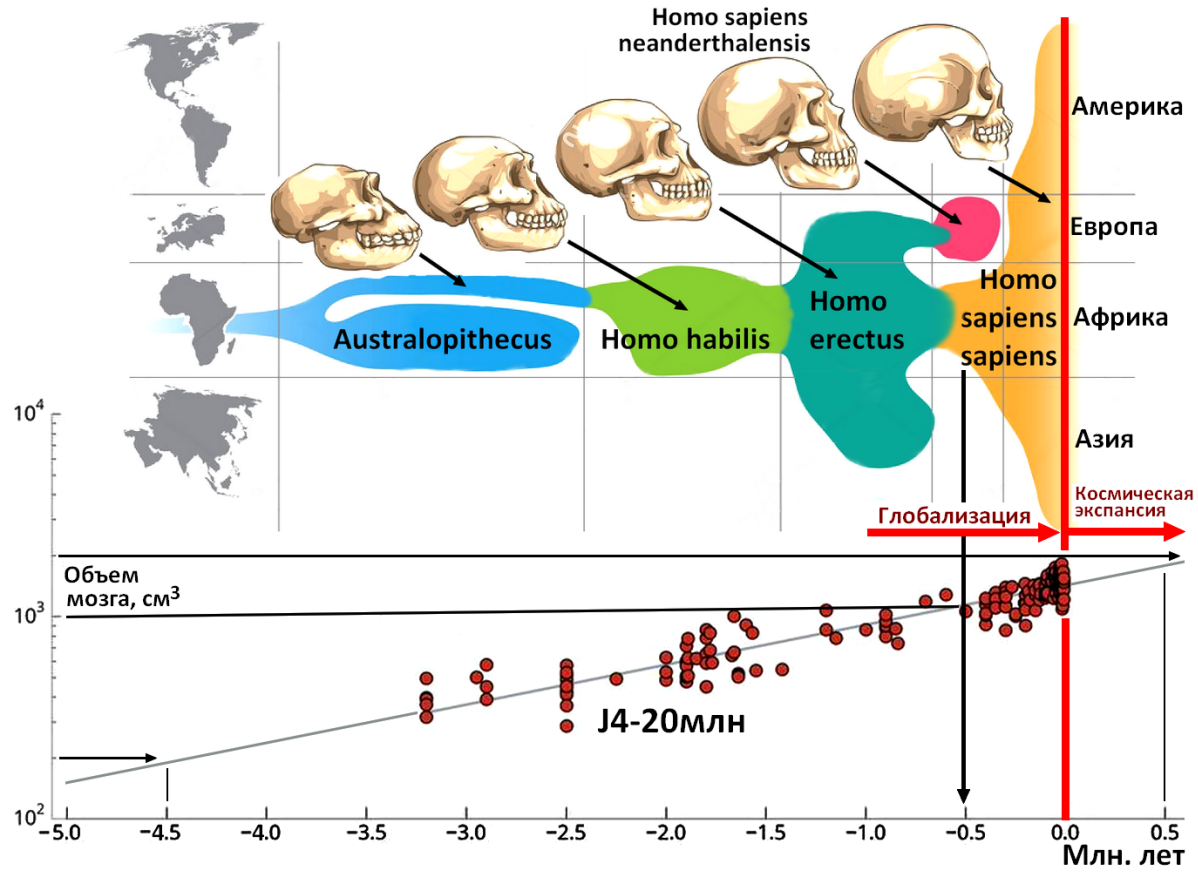


Рис. 10. Современный этап развития техносферы и прогнозируемые на ближайшие столетия и тысячелетия рубежи и динамика её дальнейшего развития могут рассматриваться как органическое продолжение процессов экспоненциального развития и соответствующей пространственной экспансии «человека разумного» как вида

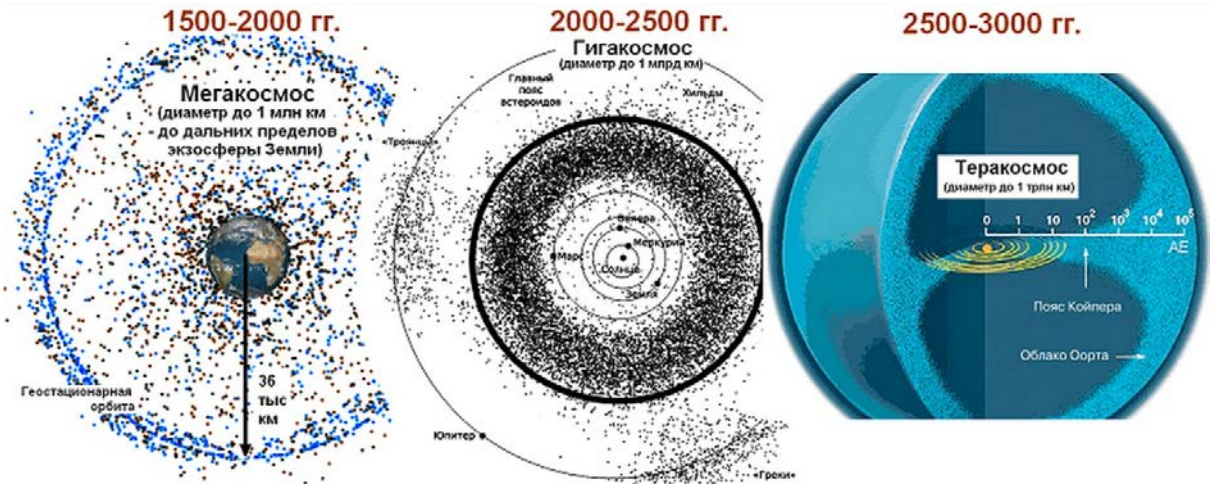


Рис. 11. Естественные рубежи экспансии техносферы во II-III тысячелетиях нашей эры: к началу 3-го тысячелетия освоен в основном Мегакосмос в пределах экзосферы диаметром порядка 1 миллиона километров, следующими рубежами являются Гигакосмос (диаметр сферы, включающей пояс астероидов, порядка миллиарда километров) и Теракосмос, простирающийся до дальних рубежей Солнечной системы, диаметром порядка триллиона километров

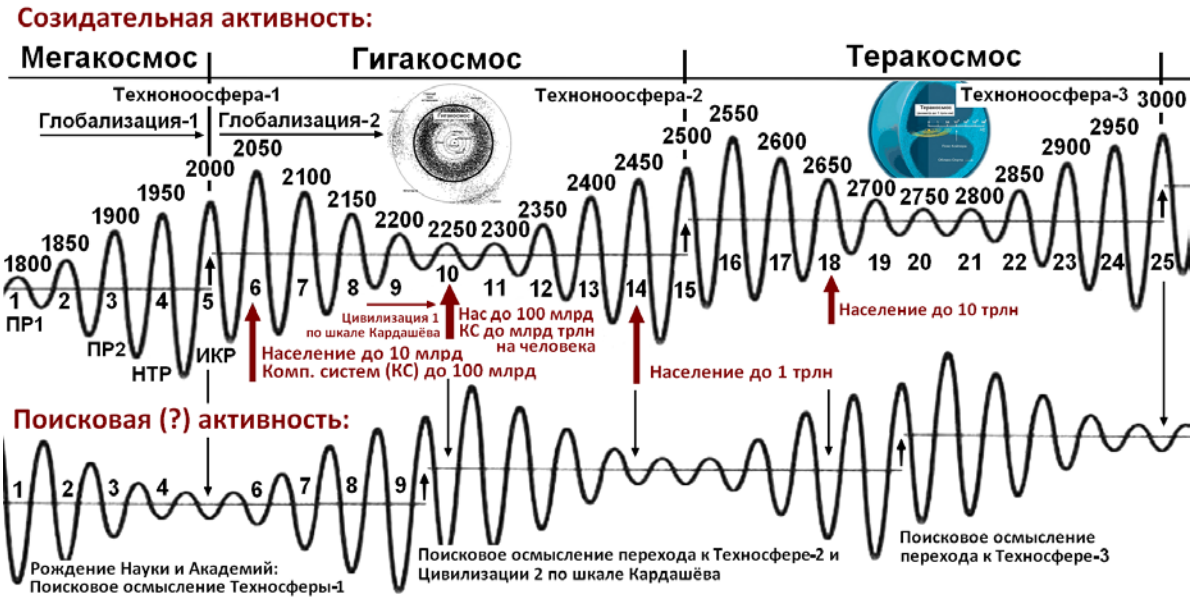


Рис. 12. Концептуальная модель периодической составляющей системодинамики техносферы III тысячелетия, сформированная на основе экстраполяции динамики II тысячелетия и предполагающая чередование периодов доминирования созидательной и поисковой активности в процессе развития. Физическим фактором такой динамики могут быть гравитационные волны, источником которых являются сверхмассивные чёрные дыры в центре галактик, вероятнее всего – наиболее близкая к нам в центре нашей галактики Млечный Путь

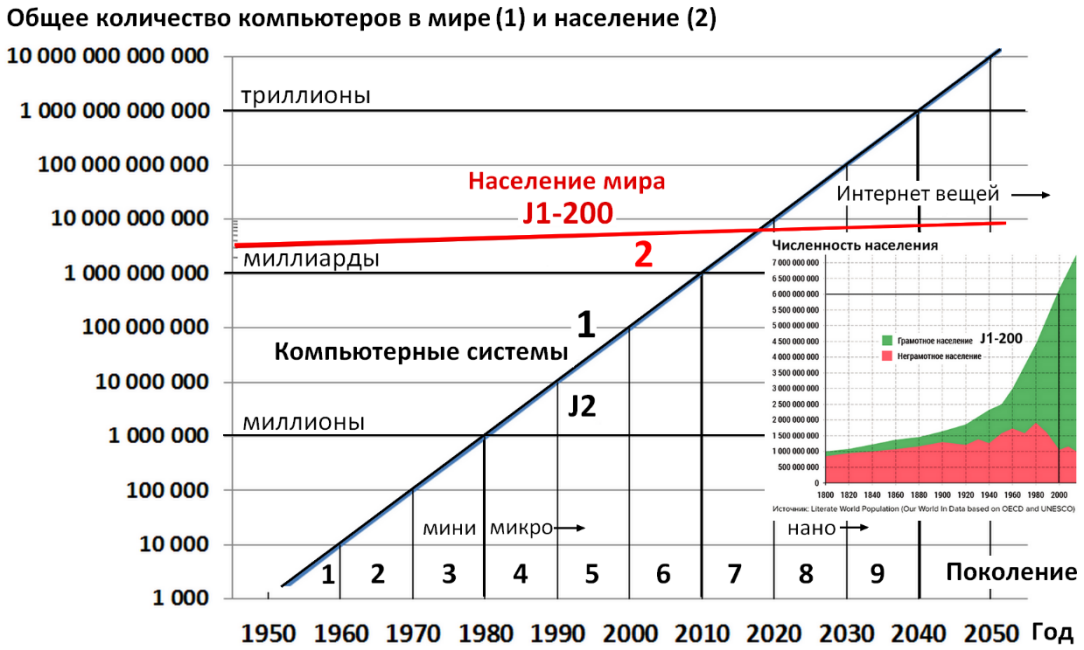


Рис. 13. Экспоненциальные процессы роста населения со скоростью на один порядок каждые 200 лет (J1-200) и нарастание количества компьютерных систем в техносфере на один порядок каждое десятилетие (или на 2 порядка каждые 20 лет – J2) определяют основные количественные показатели роста на рис. 12.

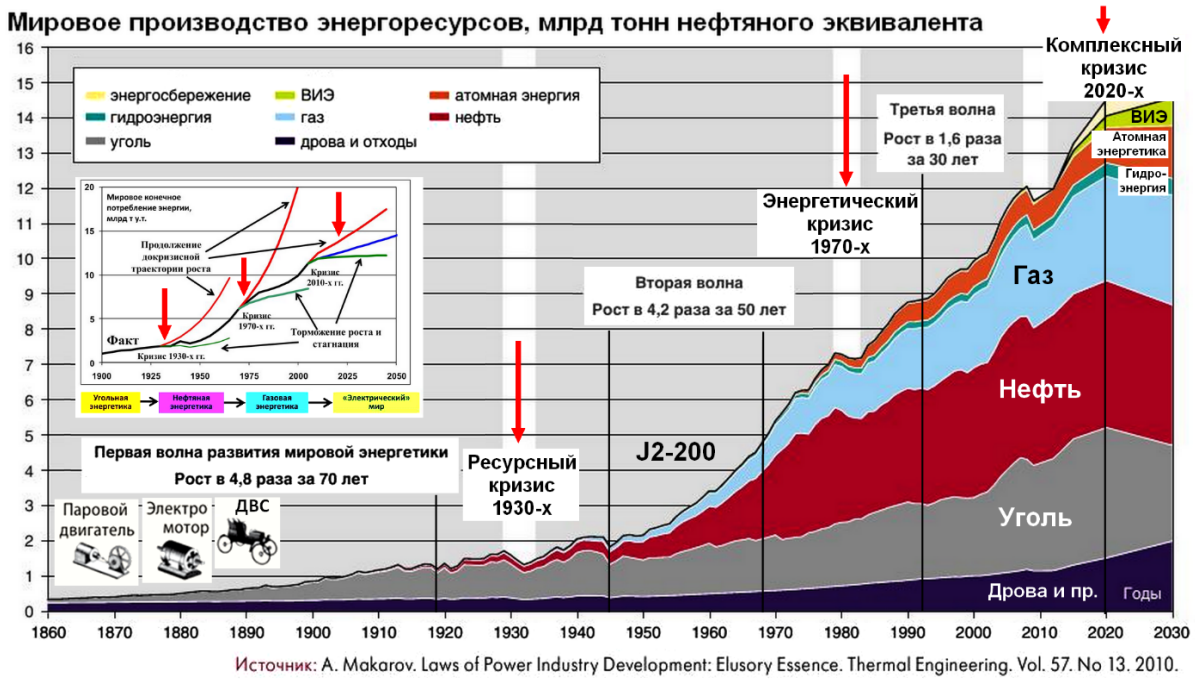


Рис. 14. Достаточно устойчивый (даже с учётом периодических глобальных кризисов в среднем раз в 50 лет) экспоненциальный рост энергообеспеченности техносферы на протяжении XIX-XX веков позволяет рассчитывать на поддержание аналогичных темпов и в последующие столетия, обеспечивая, в частности, формирование «Цивилизации первого типа» по шкале Кардашёва примерно через 200 лет (рис. 12) и цивилизаций второго и третьего типа к концу, соответственно, третьего и четвертого тысячелетий

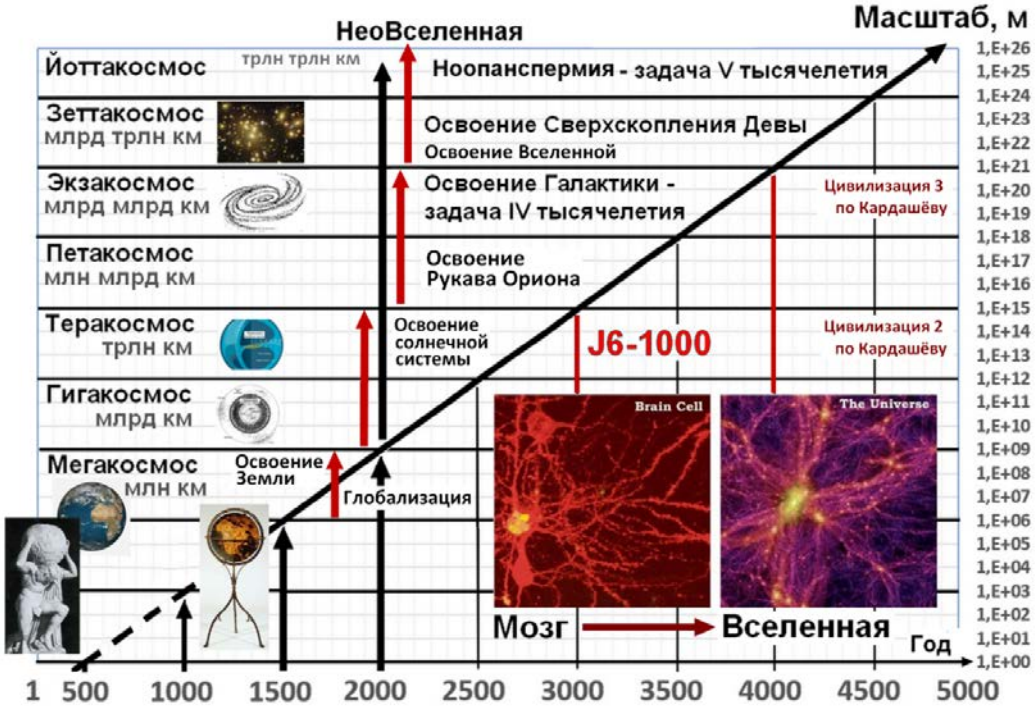


Рис. 15. Динамика роста масштабов техносферы в процессе цивилизационной экспансии человечества как экстраполяция роста на протяжении предыдущих столетий позволяет надеяться на достижение «вселенских масштабов» созидательной деятельности человека уже к концу четвёртого тысячелетия, что можно рассматривать наиболее оптимистичный сценарий будущего развития техносферы

На основе анализа всей известной на сегодня совокупности информации о развитии как техносферы в целом, так и отдельных её подсистем на всём протяжении их истории, можно сделать уверенный вывод о существования целого комплекса закономерностей, объективно определяющих динамику и особенности развития технических и технологических систем как в краткосрочной, так и в дальней перспективе. При этом фактор индивидуальной гениальности и/или изобретательности имеет существенное значение, но максимально эффективно проявляет себя только в случае следования объективным закономерностям.

Важно также отметить особую значимость научно обоснованной оптимистичной перспективы, которая сама по себе может являться вдохновляющим и мобилизующим фактором, особенно, в условиях тех периодов неопределенности и нестабильности, подобных нынешнему, наступившему с середины-конца 2010-х годов, которые неизбежно приходится переживать под аккомпанемент панических утверждений и заявлений. Кроме того, в настоящее время критическая масса накопленных новых знаний и технологий настоятельно требует стратегического переосмысления цивилизационных прогнозов и целей и, соответственно, разработки новых моделей и сценариев развития.

Заключение. Система выявленных закономерностей, основные из которых наглядно представлены на рис. 1-15, позволяет не только систематизировать и объяснить динамику технического и технологического развития в прошлом, но позволяет также сформировать в достаточной степени научно обоснованный и конкретный прогноз будущего развития техносферы как в ближней, так и в дальней перспективе, с конкретными рубежами и сроками их достижения, относительно хорошо структурированный, проверяемый и открытый для аргументированного обсуждения, уточнения и развития. Естественно, в дальнейшем, исходя из реально наблюдаемой динамики процессов развития техносферы эти прогнозные предположения будут существенно уточняться и детализироваться, но уже сегодня они могут служить достаточно надёжной научной базой для планирования и конкретного прогнозирования развития как отдельных технологических систем и процессов самого различного назначения, так и техносферы в целом.

Список литературы: **1.** Аноприенко А.Я. Системодинамика техносферы: закономерности и перспективы научно-технологического развития в контексте информационно-компьютерной революции // Доклад на XXV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» в г. Севастополе 11 сентября 2018 г. 40 слайдов. **2.** Аноприенко А.Я. Интеллектуализация техносферы в контексте универсальной эволюции // «Машиностроение и техносфера XXI века». Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. С. 482-486. **3.** Аноприенко А.Я. Системодинамика техносферы как новое научное направление в понимании прошлого и прогнозировании будущего // «Машиностроение и техно-сфера XXI века». Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. С. 18-28.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЫЛИ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Ашихмин Д.В., Купцова И.С., Милев И.Ю., Русляков Д.В., Цымбалов Д.С.
(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)
Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

Abstract: *A mathematical analysis of dust size distribution with respect to wood drilling is performed. It is found that dust investigated obeys the two-parametric Rosin – Rammler distribution. The error in size distribution determination is estimated.*

Пыль, образующаяся при механической обработке твердых материалов, не только ухудшает качество обработки, но наносит ущерб здоровью человека и загрязняет окружающую среду. Чтобы исключить такие негативные эффекты используют циклоны [1], улавливание частиц в которых обеспечивается конкуренцией инерционных и аэродинамических сил. Эффективность циклонов достигается предварительным аэродинамическим расчетом, в основу которого закладывается геометрия улавливаемых частиц. Из-за неоднородности технологической пыли ее геометрические характеристики имеют статистическую природу, что выдвигает жесткие требования к корректности их осреднения. Следовательно, достоверные научные сведения о геометрии технологической пыли крайне актуальны для рациональной организации пылеулавливания.

Целью данного исследования является разработка математических методов для корректного определения размерно-массовых параметров производственной пыли, образующейся в различных технологических процессах. Практически полученные результаты позволяют анализировать мелкодисперсные отходы различных производств.

На пылевую частицу с характерным размером x [мкм] действует сила земного тяготения или иная инерционной природы, которая пропорциональна массе частицы, т.е. $\rho \cdot x^3$, где ρ [кг/м^3] – плотность образующего материала. Величина аэродинамической силы, действующей на частицу со стороны потока, пропорциональна квадрату ее характерного размера x^2 и не зависит от плотности. Фигурирующее в критерии эффективности циклона отношение этих сил соответственно пропорционально $\rho \cdot x$. Здесь следует учесть два важных обстоятельства: во-первых, пылевые частицы существенно отличаются по размерам и, во-вторых, форма каждой пылинки уникальна и далека от используемых эталонов (сфера, куб и др.). Эти особенности выдвигают весьма жесткие требования к процедуре двойного осреднения величины, названной выше *характерным размером* пылевой частицы – по размеру и форме. Методика осреднения размера пылинок носит целевой характер – расчет эффективности циклонов.

Проблему параметрического осреднения полидисперсных сред систематически исследовал *Заутер* [2-3]: для различных приложений важен специфически осредненный средний размер частиц неоднородной совокупности. Наиболее естественным способом размерного осреднения ансамбля частиц с функцией распределения $F(x)$ (соответственно плотностью вероятности $P(x) = dF(x)/dx$) является следующий:

$$\langle x_{ij} \rangle \equiv D_{ij} = \left[\int P(x)\, x^i\, dx \,/\, \int P(x)\, x^j\, dx \right]^{1/(i-j)} . \qquad (1)$$

Формула (1) подразумевает, что все пылевые частицы характеризуются единственным размером, т.е. имеют форму шара. Величину x_{ij} называют заутеровским диаметром (чаще всего под заутеровским диаметром понимается величина D_{32}). Если же форма частиц существенно не правильна и характеризуется двумя или темя параметрами, в рассмотрение вводят также коэффициент формы и два (или три) заутеровских диаметра. Для их расчета необходимо знать вид и параметры функции распределения $F(x)$. Последнюю получают путем аппроксимации [4] экспериментальных данных.

Существенно, что определить $F(x)$ по результатам первичных измерений $\{(x_i, F_i)\}$, $i = 1, 2, \ldots, I$ можно различными способами. Первый и самый естественный состоит в решении переопределенной системы уравнений:

$$F(x_i, \alpha) = F_i\,, \qquad i = 1, 2, \ldots, I\,, \tag{2}$$

которая эквивалентна задаче математического программирования [4]:

$$\Sigma\,[F(x_i, \alpha) - F_i]^2 \to \min\,. \tag{3}$$

В формулах (2)-(3) – вектор подгоночных параметров, размерность которого должна быть существенно меньшей, чем объем выборки I.

Второй способ состоит в приравнивании фактических и модельных процентилей, например, для девяти значений 0.1, 0.2, …, 0.9. В этом случае размерность переопределенной системы подобной (2) существенно сокращается, а устойчивость вычислений, наоборот, – повышается.

Третий способ, как показывает непосредственное сравнение, оказывается самым эффективным. Он состоит в минимизации относительных отличий теоретических (для искомой $F(x, \alpha)$) и фактических моментов. В качестве последних удобно использовать собранные в табл. 1.

Таблица 1. Моменты случайной величины, используемые для идентификации функции распределения

Название	Расчетная формула	
	Непрерывная случайная величина	Дискретная случайная величина
Математическое ожидание, М x	$\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)x\,dx$	$\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} x_i$
Среднеквадратическое значение, СК x	$\left[\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)x^2\,dx\right]^{1/2}$	$\left[\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} {x_i}^2\right]^{1/2}$
Среднегармоническое значение, СГарм x	$\left[\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)\frac{1}{x}dx\right]^{-1}$	$\left[\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} \frac{1}{x_i}\right]^{-1}$
Среднегеометрическое значение, СГеом x	$10^{\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)\lg x dx}$	$10^{\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I}\lg x_i}$
Среднемодульное отклонение, СМО	$\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)\lvert x - Mx\rvert dx$	$\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} \lvert x_i - Mx\rvert$
Среднеквадратичное отклонение, СКО	$\left[\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)(x-Mx)^2 dx\right]^{1/2}$	$\left[\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} (x_i - Mx)^2\right]^{1/2}$
Асимметрия	$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)(x-Mx)^3 dx}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)(x-Mx)^2 dx\right]^{3/2}}$	$\frac{\sum_{i=1}^{I}(x_i - Mx)^3}{\left[\sum_{i=1}^{I}(x_i - Mx)^2\right]^{3/2}}$
Эксцесс	$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)(x-Mx)^4 dx}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} p(x,\alpha)(x-Mx)^2 dx\right]^2}$	$\frac{\sum_{i=1}^{I}(x_i - Mx)^4}{\left[\sum_{i=1}^{I}(x_i - Mx)^2\right]^2}$
Процентиль, Perc	$0 < \int_{-\infty}^{\mathrm{Perc}_k} p(x,\alpha)dx = k < 1$	$0 < \frac{\sum_{i=1}^{\mathrm{Perc}_k} x_i}{\sum_{i=1}^{I} x_i} = k < 1$
Медиана, Med	$\mathrm{Med} = \mathrm{Perc}_{1/2}$	

Рассмотрим применение описанного подходя для параметрической идентификации функции распределения (большего) размера пылевых частиц, образующихся при сверлении древесины сверлом ∅ 35 мм. Вид получаемой пыли показан на рис.

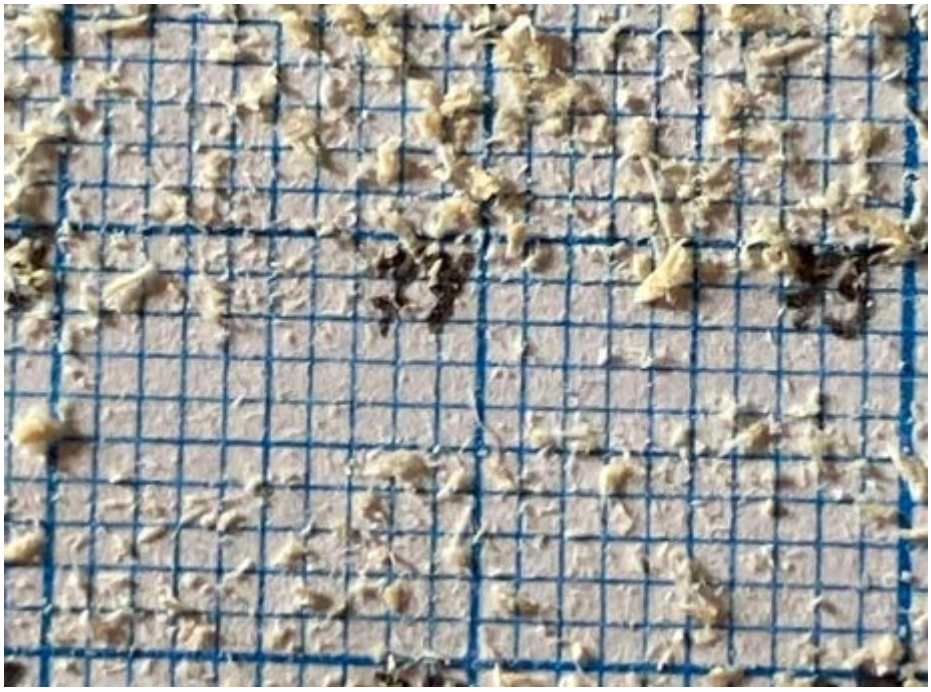


Рис. 1. Технологическая пыль при сверлении древесины сверлом ∅ 35 мм

Удобным для аппроксимации размерных параметров пыли является двухпараметрическое распределение Розина – Раммлера:

$$F(x, D, n) = 1 - \exp[-(x/D)^n] , \quad (4)$$

в котором D и n – подгоночные параметры. Результатом идентификации (4) на основе сопоставления второй и третьей колонок табл. является формула

$$F(x) \approx 1 - \exp[-(x/0.39)^{1.43}] , \quad (4)$$

в рамках которой средняя относительная погрешность модели при определении показателей табл. составляет 3.5 %, а коэффициент корреляции двух правых колонок табл. превышает 0.999.

Результаты выполненных авторами исследований сводятся к следующему:

– рациональным способом инициализация модельных распределений размера пылевых частиц является минимизация расхождения интегральных показателей;

– для описания размерного распределения пылевых частиц по имеющимся экспериментальным данным хорошо подходит распределение частиц по размеру типа Розина – Раммлера с параметрами $D \approx 0.39$ мм, $n \approx 1.43$;

– предложенная методика идентификации функции распределения $F(x, \alpha)$ удобна для автоматизированного и дорабатывается авторами для полностью автоматического анализа размерных характеристик технологической пыли.

Список литературы: 1. М.Г. Зиганшин Проектирование аппаратов пылегазоочистки. – М.: Экопресс, 1998. – 505 с. **2.** J. Sauter Grassenbestimmung von Brennstoffteilchen // *Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*. – 1926. – Heft 279. **3.** J. Sauter Untersuchung der von Spritzvergasern gelieten Zerstobung // *Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*. – 1928. – Heft 312. **4.** Minoux, M. Mathematical Programming: Theory and Algorithms. – New York: John Wiley, 1986. – 489 p.

ВЛИЯНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРОИЗВОДСТВО ДЕТАЛЕЙ

Базров Б.М. *(ИМАШ им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва, Россия)*
Тел. +7 (499) 135-55-21; E-mail: modul_lab@mail.ru

Abstract: *The article discusses the application of methods of additive technologies used in the production of parts; the areas of their application, advantages and disadvantages are shown. The main disadvantages of additive technologies are noted: low precision of parts and productivity of their manufacture. The influence of additive technologies on the labor intensity of technological processes for manufacturing parts, the structure of the machine park, the design of machine tools is shown.*

Key words: *additive technologies, method, product, detail, precision, production, material, machine, blanks.*

В последнее время в производстве деталей все шире применяют аддитивные технологии, такие как [1-3]:

– селективное лазерное сплавление,
– прямое лазерное спекание металлов,
– электронно-лучевое плавление.

Метод селективного лазерного сплавления

Применяется в автомобилестроении для создания прототипов, в аэрокосмической области для печати трубопроводов и других частей, в производстве инструментов.

Преимущества:

- широкий выбор материалов печати;
- возможность построения изделий со сложной геометрией или высоким уровнем детализации;
- безотходное производство.

Недостатки:

- дороговизна технологии;
- не подходит для начинающих печатников;
- грубая поверхность готового изделия, требующая последующей обработки.

Метод прямого лазерного спекания металлов

Прямое лазерное спекание металлов используется в аэрокосмической и промышленной отраслях.

Преимущества:

- высокое разрешение печати (до 20 микрон);
- возможность печати объектов со сложной структурой и геометрией;
- высокие механические качества готового изделия;
- безотходное производство;
- большое количество материалов для печати: нержавеющая сталь, алюминий, титан, никель, кобальт-хром, и драгоценные металлы, не считая сплавов.

Недостатки:

- невысокая скорость печати;

Метод электронно-лучевого плавления.

Применяется в автомобилестроении (производство запчастей), аэрокосмической отрасли (производство конструктивных элементов).

Преимущества:

- высокая плотность (и, следовательно, прочность) изделий благодаря полному расплавлению порошка;
- ускоренный процесс печати;

- не спеченный порошок можно использовать повторно;
- высокая точность печати, благодаря использованию специальных магнитных зеркал;
- недорогие и доступные материалы;
- высокая скорость печати.

Недостатки:

- небольшой объем печати (макс. диаметр 350 мм и высота 380 мм);
- ограниченный выбор материала (только титановые или хром-кобальтовые сплавы);
- ограничения в геометрии моделей.

В целом, к преимуществам аддитивных технологий относятся:

– повышение качества деталей за счет возможности обеспечения теоретически в любой точки детали требуемых эксплуатационных характеристик материала, например, прочности, вязкости и др;

– снижение расходов материала заготовки, т.к. последняя получается методом наращивания материала.

– повышение точности заготовок;

– сокращение сроков освоения производством деталей новых конструкций, за счет быстрого получения прототипа;

– возможность изготовления детали сложной конфигурации.

К наиболее важным недостаткам аддитивных технологий относятся невысокая точность изготовления деталей (до 20мкм) и производительность их изготовления по сравнению с обработкой на станках.

Рассмотрим применение аддитивных технологий в производстве деталей, принимая во внимание их преимущества и недостатки, а так же конструкции, материалы, качество и количество изготавливаемых деталей.

Низкая точность изготовления деталей ограничивает номенклатуру их изготовления аддитивными технологиями.

При изготовлении деталей высокой точности применением аддитивной технологии позволяет использовать заготовки с высокой точностью, следовательно, с малыми припусками, что существенно снижает трудоемкость изготовления деталей.

Низкая производительность изготовления деталей аддитивными технологиями ставит вопрос о целесообразности их широкого применения.

Попытки объединить в одной технологической системе выращивания заготовки детали и ее обработки сужает область ее применения из-за низкой производительности выращивания заготовки.

Такая технологическая система может быть эффективна при прототипировании.

В связи с изложенным, наибольший эффект от применения аддитивных технологий следует ожидать в заготовительном переделе, позволяя получить точные заготовки с оптимальными эксплуатационными характеристиками.

В некоторых случаях можно ожидать замену термообработки аддитивной технологией.

Повышение точности заготовок, изготовление деталей невысокой точности с помощью аддитивных технологий может повлиять на структуру станочного парка, сводя к минимуму долю станков для предварительной обработки и повышая долю станков для изготовления деталей высокой точности.

В процессе развития станкостроения были созданы станки для изготовления соответствующих поверхностей деталей, например, токарные станки, круглошлифовальные станки, сверлильные, расточные станки – для изготовления, главным образом, поверхностей вращения; фрезерные, плоскошлифовальные, строгальные станки - для изготовления плоских поверхностей и т.д.

С другой стороны, станки создавались для изготовления деталей такой конструкции, которая обеспечивает свободу доступа к изготавливаемым поверхностям.

Последнее привело к усложнению конструкции создаваемых изделий, т.к. конструктор, стремясь создавать конструкцию изделия технологичной, детали сложной конфигурации разделяет на группы простых деталей. Это приводит к повышению трудоемкости изготовления деталей из-за увеличения их количества и трудоемкости сборки изделия из-за увеличения числа соединения деталей в изделии.

Применение аддитивных технологий позволит изготавливать детали сложной конфигурации, которые можно разделить на три группы:

– изготавливаемые полностью на станках;

– изготавливаемые частично на станках;

– изготавливаемые полностью с помощью аддитивных технологий.

При изготовлении деталей сложной конфигурации на станках из-за трудностей к доступу обрабатываемых поверхностей детали в конструкциях станков появятся элементы консольного типа, несущие обрабатывающие инструменты. В связи с этим возникнут проблемы с обеспечением жесткости таких элементов, повышение виброустойчивости и др., что существенно усложнит конструкции таких станков.

В заключении можно отметить следующее:

1. К основным преимуществам применения аддитивных технологий в производстве деталей следует отнести возможность получения эксплуатационных характеристик материала в любой «точке» детали, получение высокой точности заготовок, изготовление деталей сложной конфигурации, быстрое получение прототипа при выпуске новых деталей.
2. К основным недостаткам производства деталей с помощью аддитивных технологий относятся невысокая точность и производительность изготовления деталей.
3. Широкое применение аддитивных технологий следует ожидать в заготовительном переделе при изготовлении деталей невысокой точности.
4. Широкое применение аддитивных технологий в производстве деталей может изменить структуру станочного парка, за счет снижения доли станков предварительной обработки деталей, увеличения доли станков высокой точности.
5. Изготовление на станках деталей сложной конфигурации может потребовать значительных изменений в конструкциях станков.

Список литературы: 1. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении/ Нагайцев М.В., Довбыш В.М. // пособие для инженеров – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». 2015. 220 с. **2.** Шишковский, И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения – СПб.: Питер, 2016. - 400с.: ил. **3.** Горбатов И.В., Орлов Ю.А., Антюфеев В.А., Орлова Н.Ю., Тельгерекова Т.В. Определение геометрической точности и шероховатости поверхности малогабаритных деталей круглого и квадратного сечения, получаемых в зависимости от расположения в рабочем пространстве принтера по технологии селективного лазерного плавления из стали марки 12Х18Н10Т//Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» № 1, 2019.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Бахадиров Г.А., Цой Г.Н., Набиев А.М.
(Институт механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан, Узбекистан, Ташкент)
E-mail: instmech@rambler.ru

Abstract: *The article presents the results of an experimental study of the technological process of extracting excess moisture from a moisture-saturated capillary-porous material, using the example of a semi-finished leather product. The experiment was carried out with the use of moisture-wicking synthetic cloth materials LASCH, folded on a rigid base plate. In the study, the processed package consists of a wet leather semi-finished product and three layers of moisture-wicking synthetic material LASCH, folded on a metal base plate for their further retraction between rotating squeezing rollers under pressure. The results of an experimental study of wringing out a wet leather semi-finished product using moisture-removing materials showed a significant increase in the efficiency of the technological process of wringing out moisture on a rigid base plate.*
Key words: *roller stand, semi-finished tanning chrome tanned product, moisture-wicking material, squeezing rollers, pressure, retraction speed, productivity.*

Совершенствование существующих конструкций и внедрение нового технологического оборудования это один из путей инновационного развития предприятий (производителей готовой продукции), которые адаптируются к современным требованиям потребителей, обеспечивают конкурентоспособность кожевенной продукции и прибыльность предприятий на рынке. В решении этих вопросов необходимо стремиться к улучшению качества обработки кожевенного сырья в процессах его механической обработки. Что являлось целью данного экспериментального исследования.

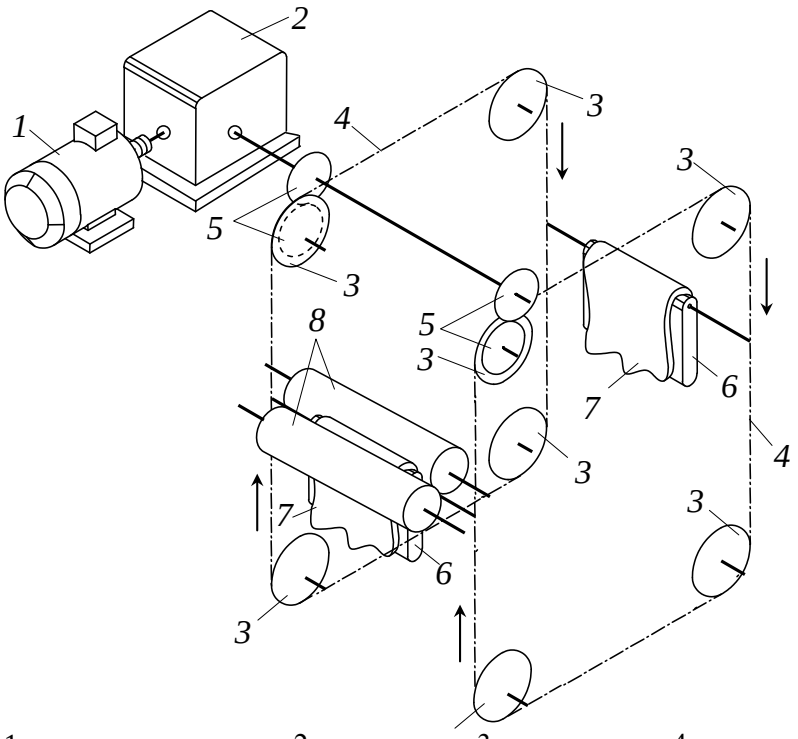
С целью совершенствования конструкций используемых отжимных машин, нами разработана новая конструкция валковой отжимной машины для механической обработки кожевенного полуфабриката (Рис.1).

Широкое применение валковых отжимных машин, а также современные требования к ним способствовали развитию исследований по совершенствованию валковых технологических машин, а также технологии обработки кожевенно-меховых полуфабрикатов. В работе [1] исследовано влияние внутренних напряжений на свойства дермы при сушке кожевенного полуфабриката. Исследованы изменения предельных показателей на операциях разводки и тяжки кожевенного и мехового полуфабриката. Установлено, что при разводке происходит уменьшение прочности кожевой ткани, а также при тяжке увеличение, что необходимо учитывать при назначении параметров проведения данных технологических операций.

Исследованиям свойств и методов обработки кожевенного сырья и готовой кожи посвящена работа [2]. В работе [3] исследованы дефекты, полученные после отжима кожевенного полуфабриката, а также описаны методы по предотвращению технологических дефектов. Отмечена важность обеспечения требуемого давления отжимных валов и скорости подачи кожевенного полуфабриката при его отжиме. Автор работы [4] для повышения качества обработки материалов, с учетом их свойств, разработал модели валичных кожевенно-меховых машин, которые позволяют определить усилия между рабочими и вспомогательными валами. В работе [5] исследованы вибродинамические характеристики волососгонно-чистильных, мездрильных машин и разработал математическую модель для научно-обоснованного совершенствования валичных машин для повышения качества обработки кожевенных полуфабрикатов. В работе [6] авторы проанализировали состояние кожевенного производства и изучили перспективы развития кожобрабатыва-

ющей отрасли. Описаны способы наибольшей достоверной оценки показателей качества обрабатываемого кожевенного полуфабриката за счет снижения вибронагрузки рабочих органов валковых машин. Автор работы [7] исследовал эксплуатационные свойства технологических машин для отделки кожевенного полуфабриката.

Таким образом, в результате анализа исследований и литературных источников определены основные направления совершенствования процессов механической обработки кожевенного полуфабриката, а также развития основных устройств и механизмов валковых технологических машин.



1 – электродвигатель, 2 – редуктор, 3 – звездочки, 4 – транспортерная цепь, 5 – зубчатые колеса, 6 – опорная плита, 7 – кожевенный полуфабрикат, 8 – отжимные валы

Рис. 1. Схема валкового стенда для отжима влагонасыщенного кожевенного полуфабриката

Эксперимент проводился на валковом стенде, где отжимные валы установлены горизонтально рядом друг с другом, а опорная плита изготовлена из металлического листа толщиной 0,005 м, шириной 0,1 м и длиной 0,3 м (рис. 1). Пакет составляет один слой кожевенного полуфабриката и три слоя влагоотводящего материала – сукна марки ЛАЩ [8–12].

При эксперименте на опорную плиту устанавливали три слоя влагоотводящего материала ЛАЩ толщиной 0,008 м, а затем мокрый кожевенный полуфабрикат толщиной 0,004 м, суммарная толщина которых составляет 0,012 м.

Использовали метод D-оптимального планирования второго порядка с использованием матрицы плана К. Кано [13].

Выбран диаметр отжимных валов 0,2 м с покрытием толщиной 0,008 м из войлочного сукна марки БМ. Перед проведением эксперимента методами математической статистики было выбрано необходимое количество измерений (число повторений), которое обеспечивало требуемую точность.

Рабочую матрицу составили по матрице плана К. Кано для двухфакторного эксперимента.

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования фактора эксперимента

Показатель	Кодированное значение факторов	Натуральные значения факторов	
		x_1, кН/м	x_2, м/с
Верхний уровень	+	96	0,340
Нулевой уровень	0	64	0,255
Нижний уровень	–	32	0,170
Интервал варьирования		32	0,085

Однородность дисперсии оценена с помощью критерия Кохрена [13] при доверительной вероятности α=0,95. Зная общее число оценок дисперсии N и число степеней свободы $f=k-1$ вычисляем из [13, 14] находим G_T=0,358 при N=9; $f=k-1=5-1=4$,
где k – число параллельных опытов;

$$G_P = \frac{S^2_{\max}}{\sum_1^N S_i^2} = \frac{83,79}{266,68} = 0,314 < G_T = 0,358.$$

Следовательно, результаты исследования воспроизводимы.

После реализации рабочей матрицы получены средние арифметические значения (табл. 2).

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

№	P, x_1	V, x_2	Результаты измерений, в %					
			y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	$\bar{y}$
1	0	0	19,1	31,6	25,4	20,4	22,3	23,8
2	+	+	17,5	29,0	21,8	31,4	23,3	24,6
3	-	+	13,6	23,3	19,0	16,6	14,8	17,5
4	-	-	23,1	24,6	30,8	19,3	18,1	23,2
5	+	-	17,2	24,4	34,9	40,2	24,9	28,3
6	+	0	18,7	25,3	32,1	34,1	21,1	26,3
7	0	+	20,2	23,0	23,1	21,1	21,4	22,8
8	-	0	21,9	19,9	20,5	21,2	16,5	20,0
9	0	-	23,9	33,0	30,4	18,1	20,7	25,2

Определяем коэффициенты регрессии b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} из [14]. Для кожевенного полуфабриката в кодированном виде b_0=23,77; b_{11}=–0,62; b_{22}=0,23; b_1=3,06; b_2=–2,09; b_{12}=0,5.

Получим следующее уравнение регрессии в кодированном виде:

Для кожевенного полуфабриката

$$y = 23,77 - 0,62x_1^2 + 0,23x_2^2 + 3,06x_1 - 2,09x_2 - 0,5x_1x_2.$$

Подставляя вместо $x_1 = \frac{P-64}{32}$, где P – усилие прижима отжимных валов и $x_2 = \frac{V-0,255}{0,085}$, где V – скорость пропуска мокрого кожевенного полуфабриката между вращающимися отжимными валами, получим в натуральном виде уравнение количества удаленной влаги из мокрого кожевенного полуфабриката между вращающимися отжимными валами.

Гипотезу об адекватности полученных уравнений проверили с помощью критерия Фишера при доверительной вероятности α=0,95 [14]

$$F_p = \frac{S^2_{ad}}{S^2\{y\}} < F_T,$$

Продолжение таблицы 2. Матрица планирования эксперимента

№	$\sum_1^n (y-\bar{y})^2$	$S^2_{ош}$	y_p	$\bar{y}-y_p$	$(\bar{y}-y_p)^2$
1	99,3	24,83	23,77	0,03	0,0009
2	79,3	19,83	23,85	0,75	0,5625
3	59,2	14,80	17,75	0,25	0,0625
4	100,95	25,24	22,93	0,27	0,0729
5	335,14	83,79	29,01	0,71	0,5041
6	180,28	45,07	26,19	0,11	0,0121
7	72,58	18,15	21,91	0,89	0,7921
8	17,56	4,39	20,11	0,11	0,0021
9	122,43	30,6	26,09	0,89	0,7921
	Σ 1066,74	Σ 266,68			Σ 2,8113

где $S^2_{ад}$ – остаточная дисперсия, или дисперсия адекватности; $S^2\{y\}$ – дисперсия воспроизводимости.

Из таблиц 1 и 2 определим $S^2_{ад}$ и $S^2\{y\}$. Для кожевенного полуфабриката

$$S^2_{ад} = \frac{\sum_1^N n\cdot(\bar{y}-y_p)^2}{N-\frac{(k+2)(k+1)}{2}} = \frac{5\cdot 2{,}8113}{3} = 4{,}686,$$

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_1^N\sum_1^n (y-\bar{y})^2}{N(n-1)} = \frac{1066{,}74}{36} = 29{,}63.$$

Критерий Фишера об адекватности модели

$$F_p = \frac{S^2_{ад}}{S^2\{y\}} = \frac{4{,}686}{29{,}630} = 0{,}158 < F_T = 2{,}880.$$

где N – общее число опытов; k – число факторов; n - число повторений в опыте; y_i – результат отдельного наблюдения; $\bar{y}$ – средние арифметические значения результата опыта; y_p – расчетные значения критерия по уравнению регрессии.

Итак, уравнение регрессии можно считать пригодным с 95 %-ной доверительной вероятностью, которое в именованном виде после раскодировки имеет вид:

Для кожевенного полуфабриката

$$\Delta W = 26{,}5096 - 0{,}0006055\cdot P^2 + 31{,}8339\cdot V^2 + 0{,}1263\cdot P - 273{,}8809\cdot V + 0{,}1838\cdot P\cdot V.$$

Результаты исследований показывают, что минимальное количество влаги, удаляемой из кожевенного полуфабриката при отжиме, составляет 17,5 %, а максимальное количество 28,3 % от начального содержания влаги в мокром кожевенном полуфабрикате в топографическом участке полы 73 %, а в чепраке 65,5 % после жидкостной обработки хромового дубления. Следовательно, можно дополнительно удалять избыточную влагу из мокрого кожевенного полуфабриката от 4,5 до 15,3 %.

Анализ результатов эксперимента показывает (Рис.2), что можно повысить производительность отжима влаги из кожевенного полуфабриката за счет увеличения скорости отжима путем использования металлической опорной плиты с тремя слоями влагоотводящего материала из волокнистого сукна ЛАЩ при диаметре отжимных валов 0,3 м. Результаты показывают, что наибольшее удаление влаги при давление прижима P=96 кН/м отжимных валов и скорости пропуска V=0,255 м/с в среднем составляет 28,3 % , а наименьшее при скорости V= 0,425 м/с составляет 24,4 % от начального веса образца кожевенного полуфабриката, а наибольшее количество удаление влаги при давлении прижима P=32 кН/м и скорости пропуска 0,255 м/с составляет 23,2 %, а при скорости пропуска полуфабрикатов V=0,425 м/с составляет 17,5 % от исходного веса образцов.

Таким образом, определено, что с повышением усилия прижима отжимных валов P резко увеличивается количество удаленной влаги ΔW обрабатываемого кожевенного полуфабриката.

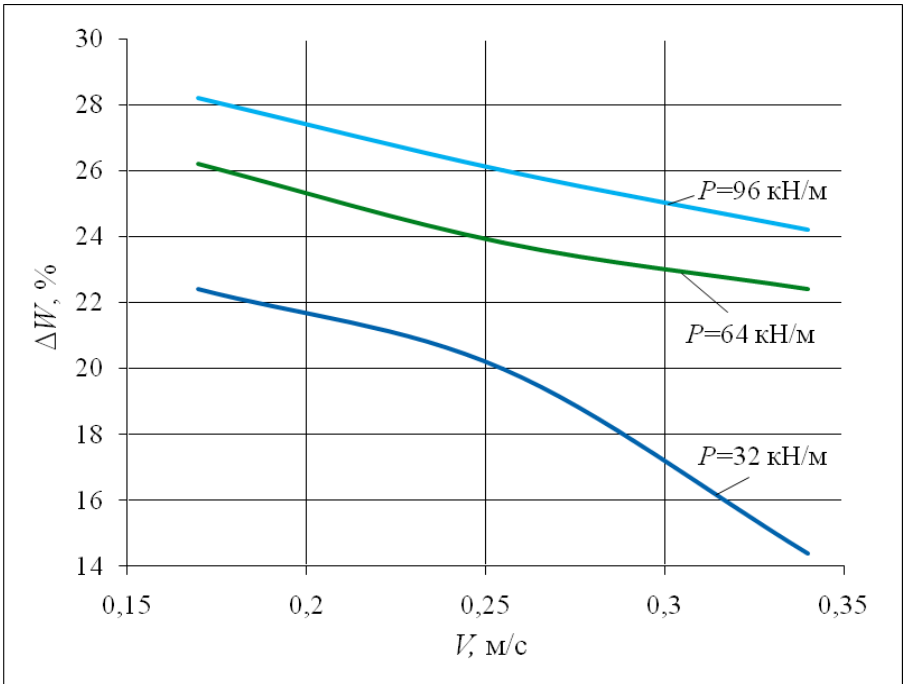


Рис. 2. Количество удаленной влаги ΔW из кожевенного полуфабриката в зависимости от скорости их пропуска V и усилии прижима отжимных валов при: P=32 кН/м, P=64 кН/м, P=96 кН/м

В нашем случае экспериментального исследования остаточная влажность должна быть в порядке 60 %. Следовательно, нам необходимо удалить максимум 13 % влаги при отжиме на валковом стенде. Эксперимент показал, что избыточная влага сверх требуемой 13 % составляет порядка еще от 4,5–15,3 % от исходного веса кожевенного полуфабриката.

Следовательно, можно будет отжимать влагу из мокрых кожевенного полуфаб-

риката при скорости пропуска более чем 0,425 м/с при усилии прижима отжимных валов от 32 до 96 кН/м.

Список литературы: 1. Раднаева, В.Д. Теоретические и практические основы интенсификации технологических процессов кожевенного производства. Дисс. … докт. техн. наук. Улан-Уде. 2017 г. -391 с. 2. Островская, А.В., Лутфуллина, Г.Г., Абдуллин, И.Ш. Основы технологии переработки кожи и меха. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. – 164 с. **3.** Абдуллин, И.Ш., Кулевцов, Г.Н., Тихонова, В.П., Рахматуллина, Г.Р. Прижизненные, посмертные и технологические пороки и дефекты кожевенно-мехового сырья и готовых полуфабрикатов: учебное пособие / М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ ISBN 978-5-7882-1489-4, 2013. – 84 с. **4.** Островский, К.Ю. Автоматизация контроля и управления качеством кож на основе анализа их релаксационных характеристик. дисс. … канд. техн. наук. Москва. 2001. 160 с. **5.** Дарда, И.В. Разработка теоретических основ совершенствования технологического оборудования кожевенно-мехового производств: Дисс. ... доктора технических наук:. - Москва, 2004. -325 с. **6.** Иванов, В.А., Рашкин, В.В. Тенденции и перспективы развития оборудования кожевенных производств. Электротехнические и информационные комплексы и системы № 1, т. 8, Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ). 2012 г. -С. 47-52. **7.** S.Ponsubbiah1 & Dr. Sanjeev Gupta. Role of Machineries for Film Forming in Leather Finishing. International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS) Volume VII, Issue IV, April 2018. Pp. 330-337. **8.** Bahadirov G.A., Tsoy G.N., Nabiev A.M., Umarov A.A. Experiments on Moisture Squeezing from a Leather Semi-Finished Product. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Volume-8 Issue-5, January 2020. Pp. 3367-3371. doi:10.35940/ijrte.E6125.018520 **9.** Bahadirov, G., Tsoy, G., Nabiev, A. (2021). Study of the efficiency of squeezing moisture-saturated products. EUREKA: Physics and Engineering, (1), 86-96. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001606 **10.** Бахадиров, Г.А., Набиев, А.М. Классификация и анализ опорных плит валковой машины. Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXIV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-17 сентября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. стр. 32-35. – 368 с. **11.** Amanov, A.T., Bahadirov, G.A., Amanov, T.Y., Tsoy, G.N., Nabiev, A.M. Determination of Strain Properties of the Leather Semi-Finished Product and Moisture-Removing Materials of Compression Rolls. Journal Materials. Volume 12, Issue 21, November (1) 2019. Basel, Switzerland. https://doi.org/10.3390/ma12213620 **12.** Бахадиров, Г.А., Цой, Г.Н., Набиев, А.М. Отжим мокрого кожполуфабриката с использованием влагоотводящего сукна. Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Выпуск 4 (71)' 2020, Донецк. -С. 3-8. **13.** Головтеева, А.А. Лабораторный практикум по химии и технологии кожи и меха / А.А. Головтеева, Д.А. Куциди, Л.Б. Санкин. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 309 с. 14. Тихомиров В.А. Планирование и анализ эксперимента. –М.: Легкая индустрия, 1974. – 283 с.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ

Болотина И.О., Седнев Д.А., Жвырбля В.Ю., Филиппов Г.А., Долматов Д.О., Портенко В.А. *(ТПУ, ТГУ, г. Томск, Россия)*
Тел./Факс: +007 (3822) 705-701; E-mail: bolotina@tpu.ru

Abstract: *The article deals with the issues of automated non-destructive testing of large-sized cast products. The concept of an automated system developed by TPU employees is presented. The principle of operation is described, the appearance of the systems of X-ray, ultrasound tomography, and optical topography is shown. The advantages of the developed systems in comparison with analogs showing.*
Key words: *non-destructive testing, X-ray tomography, ultrasound tomography, optical topography, automated system.*

Совершенствование существующих и внедрение инновационных технологий в производственные процессы, в том числе разработка новых автоматизированных систем управления оборудованием на базе современной вычислительной техники являются важнейшими задачами во многих отраслях промышленности, в том числе и в машиностроении.

На сегодняшний день применение систем автоматизированного управления распространено достаточно широко [1]. Можно сказать, что постепенно автоматизированным становится весь процесс по созданию изделий, включающий в себя конструкторскую подготовку за счет создания 3D- моделей и чертежей изделия, а также технологическую подготовку, позволяющую спроектировать оснастку и создание управляющих программ для станков с ЧПУ.

Вместе с тем, ввиду развития производственных и инструментальных возможностей на мировом уровне, отдельное применение автоматизированных систем проектирования и систем технологической обработки уже является недостаточным для существенного увеличения эффективности производства. Актуальной задачей становится интеграция всех используемых автоматизированных систем в одну комбинированную информационную систему, позволяющую управлять всеми аспектами технологического процесса.

Изделия, детали и узлы в машиностроении должны обладать повышенными характеристиками качества. Необходимо наличие высокой прочности, коррозийной и температурной устойчивости, а также большого эксплуатационного ресурса.

Одной из причин, влияющих на качество конечного изделия в процессе механообработки, является деформация образца во время обработки, некорректное построение траекторий работы ЧПУ, низкое качество самих заготовок, нарушение режима обработки.

В настоящее время в России слабо развито применение комбинированных систем и технологий интеллектуального производства, частности интегрированных решений в области контроля качества. Диагностика осуществляется отдельными инструментами контроля на начальном, конечном этапах производственного процесса, а также во время эксплуатации.

Разработанные в Томском политехническом университете (ТПУ) автоматизированная система и программный комплекс интеллектуального производства реализуют полный контроль за литыми крупногабаритными изделиями. Созданы технологии и средства автоматизированного неразрушающего контроля, при этом управление, анализ результатов и адаптация параметров осуществляются централизованно посредством комплексного программного обеспечения.

Концепция участка автоматизированного неразрушающего контроля представлена на рисунке 1.

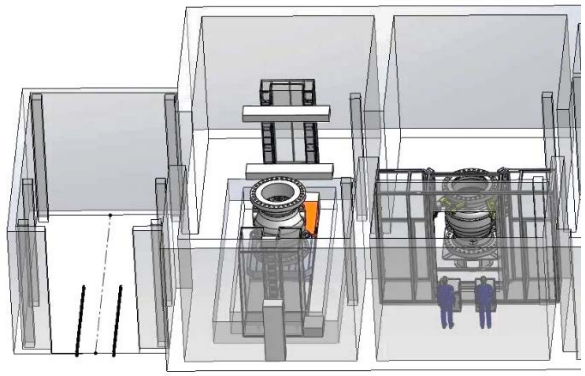


Рис. 1. Концепция участка автоматизированного неразрушающего контроля

Для контроля качества изделий (узлов, компонентов, деталей) в машиностроении на 1 этапе проводится рентгеновский контроль. Осуществление диагностики основано на принципах цифровой рентгенографии, которая на сегодняшний день практически не распространена для промышленных целей. В результате этого появилась возможность улучшить характеристики по точности детектирования существующих дефектов в узлах и элементах конструкций и добиться практически мгновенной визуализации результатов для оптимальной оценки состояния изделия оператором. Кроме того, появилась возможность хранения и анализа данных при помощи цифровых устройств.

Результаты работы обеспечивают создание комплексной связи, позволяющей оператору получать точную информацию и проводить эффективную обработку, а также контроль качества изделий. Так, на 1 этапе проведения контроля компонентов и узлов получаемые данные от рентгенографического контроля с высокой точностью, отразят месторасположение имеющихся дефектов.

Цифровая рентгенография обладает высокой точностью и достоверностью получаемых результатов. Она позволяет получать томографические результаты, за счет реконструкции полученных данных. Цифровая рентгенография дает возможность оптимизировать и снизить затраты на проведение выборочного контроля, а также провести обратное проектирование, при котором полученные объемные данные могут быть сопоставлены с техническими требованиями.

Данное решение является весьма важным, поскольку результаты имеют цифровой вид, это позволит провести интеграцию разрабатываемого модуля в комбинированную систему. Кроме того, появляется возможность проводить качественный и количественный анализ результатов контроля. На рисунке 2а показана система цифровой рентгеновской томографии, разработанной автоматизированной системы.

На 2 этапе реализована технология и средства оптического роботизированного сканирования. Разработанная автоматизированная система решает проблему, связанную с появлением незапланированных деформаций изделий. На текущем этапе развития технологий для контроля соблюдения заданных геометрических параметров изделий применяются визуальные и измерительные методы контроля. Современные решения предполагают использование дополнительных измерительных средств, таких как оптические профилометры. На международном уровне в данной области работают компании как Nikon, Brucker, Sensofar-Tech, LaserFocusGroup. Они производят высококачественные профилометры для контроля качества поверхности материалов,

позволяющие построить изображения с высоким разрешением. Существенным отличием разработанного в ТПУ модуля оптического санирования от зарубежных аналогов является то, что в основе анализа данных лежит технология сопоставления получаемых результатов с заданной на начальном этапе CAD-модели создаваемого изделия, а также проведение сканирования при помощи роботизированного манипулятора.

а)

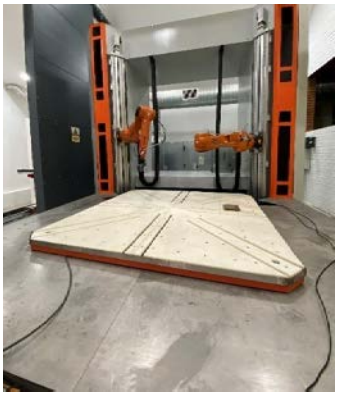

б)

Рис. 2. Внешний вид автоматизированной системы
а – система цифровой рентгеновской томографии, б – система ультразвуковой томографии и оптической топографии

В результате этого существенно повысилась точность результатов оптического контроля за счет отсутствия человеческого фактора при проведении визуального контроля и анализа данных. Применение роботизированного манипулятора является необходимым условием в связи со сложностью геометрической формы крупногабаритных объектов контроля (рис. 2б).

Кроме того, за счет интеграции в комплекс интеллектуального производства разработанный модуль оптической топографии непосредственно связан с модулем ультразвуковой томографии. Предлагаемое решение ультразвукового томографического контроля направлено на проведение диагностики изделий на 3 этапе. Применяемые отечественные системы ультразвукового контроля, основаны, как правило, на эхо-импульсном или теневом методах [2]. Преимущественно они не обладают возможностью визуализации и реконструкции объекта контроля, что существенно снижает точность диагностики. Доступное на рынке зарубежное оборудование способно восстанавливать трехмерную реконструкцию объекта на основе полученных ранее данных. Но оно не позволяет осуществлять трехмерную визуализацию в реальном времени, что существенно снижает скорость проведения инспекций. Примером ведущих зарубежных фирм, выпускающих ультразвуковые системы контроля являются: AREVA, Sonotron NDT, SoNet, SonaTest, OLYMPUS, Eclipse Scientific, General Electric. В России разработкой систем ультразвукового контроля занимаются организации: Научно-Производственный Центр «Кропус», НПЦ "ЭХО+".

Разработанная в ТПУ система ультразвуковой томографии позволяет производить контроль при помощи роботизированного манипулятора (рис. 2б). Наличие связи с модулем оптической топографии существенно повысит достоверность получаемых результатов. Учитывая проведенный анализ соответствия геометрических параметров технологическим требованиям, точная CAD-модель компонента позволяет построить траекторию ультразвукового сканирования роботизированным манипулятором таким образом, чтобы соблюдалось ортогональное взаимное расположение поверхности и направления ввода акустической волны. Кроме того, модуль ультразвукового контроля

осуществляет томографическую реконструкцию объекта контроля в режиме реального времени, что является уникальным решением по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами.

Для контроля сплошности конечного изделия был разработан инновационный метод ультразвуковой томографии изделий сложной формы. Применяемые традиционные методы ультразвукового контроля качества изделий в России основываются на использовании одноэлементных датчиков, которые не позволяют в дальнейшем реконструировать получаемые данные. Уровень развития техники в области ультразвукового контроля обозначил тенденцию использования многоэлементных фазированных решёток, что существенно повышает точность полученных данных. Также при помощи создания определенных режимов излучения акустических волн становится возможным детальное исследование изделия в каждой точке с целью дальнейшей реконструкции.

Был разработан метод и установка автоматизированного ультразвукового контроля с возможностью визуализации и реконструкции данных контроля объектов произвольной формы. Созданный метод ультразвуковой томографии за счет применения передовых технологий цифровой обработки сигналов позволяет достичь качество детализации результатов контроля сравнимого с рентгенографическим контролем. Особенность метода и прибора заключается в применении технологии фокусирования с синтезированной апертурой (SAFT) и решетки с цифровым фокусом (DFA), которая является наиболее современной технологией фазированных решеток [3].

В автоматизированной системе выполнена интеграция всех описанных модулей в комбинированную систему за счет разработки специального программного обеспечения.

Таким образом, создано комплексное технологическое решение, потенциально применимого для обширного спектра задач неразрушающего контроля в машиностроении. В сравнении с традиционными средствами решение основано на применении передовых технологий интеллектуальных автоматизированных систем. Благодаря этому стало возможным создание единой комбинированной системы, обеспечивающей эффективный контроль качества изделий, что существенно влияет на повышение производительности контроля, позволяет снизить долю возникающего брака, повысить качество изделий и сократить время проведения технологических операций.

Разработанная автоматизированная система внедрена в производственную линию ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Государственного задания «Наука» (базовая фундаментальная) № проекта FSWW-2020-0014.

Список литературы: 1. Gorski F. Knowledge based engineering as a condition of effective mass production of configurable products by design automation / F. Gorski, P. Zawadzki, A. Hamrol // Journal of Machine Engineering. – 2016. – Vol. 16. – No. 4. 123с. **2.** Венгринович В.Л. Трехмерная томографическая реконструкция литейных изделий по ограниченным модельным и экспериментальным данным // Литье и металлургия. – 2009. – № 1. С. 177-122. **3.** Bolotina I.O., Kroening H.M., Kvasnkov K.G., Sednev D.A., Sumtsova O.V. Acoustic field simulation of an antenna array at scanning by the SPA method for modern ultrasonic testing technologies // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol.1040. – p. 959-964.

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К РАЗМЕЩЕНИЮ ЗАДАЧ В МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Борзов Д.Б., Чернышев А.А. *(ЮЗГУ, г. Курск, Россия,)*
Тел. +7-919-273-67-00; E-mail: borzovdb@mail.ru

Abstract: *This article discusses the main approaches to the placement of tasks in multiprocessor computing systems. The analysis of these methods is carried out and the classification according to several characteristic features is proposed.*
Keywords: *computer networks, multiprocessor systems, placement methods, distributed computing.*

Введение.

С развитием IT-технологий разработано множество многопроцессорных вычислительных систем (ВС), у каждой из них есть как плюсы, так и минусы, и для более продуктивной работы ВС важно подобрать метод размещения, учитывающий особенности архитектуры комплекса.

Подходы к размещению задач – это методы, направленные на оптимальное размещение объектов с целью достигнуть пика выбранного показателя. При этом оптимальным будет такое положение, при котором указанный показатель достигнет своего максимума или минимума, в зависимости от требований задачи [1].

Классификация подходов размещения

Все подходы к размещению принято разделять по следующим признакам:
- по степени точности результата;
- по характеру процесса размещения;
- по степени однородности параллельной системы.

Ниже рассмотрен каждый подход и выявлены его особенности.

Точные методы опираются на свойства графа. Взаимодействие процессоров происходит по его сечению. Особенностью точных методов является то, что они всегда находят оптимальные – точные решения. Они характеризуются высокой вычислительной сложностью и существенным временем выполнения. Эти характеристики позволяют использовать данный класс методов только в некоторых случаях – когда число размещаемых объектов невелико [2].

К данным методам относятся:
- графо-теоретический;
- математического программирования;
- ветвей и границ.

Графо-теоретические методы отличаются высокой вычислительной сложностью, если в модели используется более двух процессоров. Помимо этого сложно использовать несколько критериев или такой возможности нет совсем. Данный метод находит свое применение, где важна точность расчетов. Например, в хаотических системах, где от полученного в расчетах показателя зависит состояние системы. Использование графо-теоретического метода показано в работе [3], в которой исследуется т-синхронизация хаотических систем.

Метод математического программирования базируется на переборе всех вершин алгоритма. Его ограничениями выступают объем памяти ВМ, на которой реализуется метод и временем, которое необходимо для получения оптимального решения. Пример

использования данного метода представлен в работе [4], в которой промоделированы процессы роста и разделения пузырьков пара в кипящей магнитной жидкости.

Метод ветвей и границ используется в компьютерных системах, где необходимо размещать прикладные задачи между процессорами. Модель удовлетворяет следующим требованиям:

- минимум межпроцессорного взаимодействия;
- сбалансированное использование каждого процессора;
- все требования конкретной прикладной задачи.

Модель задачи размещения для процессорной системы (ПС), основана на технике бивалентного программирования и методе ветвей и границ. Для заданной конфигурации системы и набора ограничений находится оптимальное решение для задач средней размерности. Для больших задач модель размещения оценивается требованиями практических инженерных задач [5]. Пример метода ветвей и границ описан в работе [6], в которой рассматривается комбинаторная задача сетевого планирования с ограниченными ресурсами.

Приближенные методы отличаются тем, что не стараются получить точное решение. Их цель – эффективные решения, то есть близкие к оптимальным. Основная идея подобных методов найти такое размещение, которое бы удовлетворяло заданным требованиям. Как результат данные методы требуют меньше времени на выполнение относительно точных методов. И как следствие с их помощью решаются задачи большой размерности (N>100).

К приближенным методам относятся:

- последовательные;
- параллельно-последовательные;
- итерационные.

Последовательные алгоритмы перебирают все вершины и/или дуги рассматриваемой модели друг за другом. Далее они фиксируются, и вычисляется заданный показатель. Если он удовлетворяет условию, вершина фиксируется и исключается из дальнейшего перебора. Процесс длится до тех пор, пока не размещены все вершины. Данные алгоритмы не обеспечивают получение решений высокого качества. Пример последовательного и параллельного алгоритма приведен в работе [7], в которой решается задача Коши.

Итерационные методы перебирают решения. Переход от одних вариантов к другим происходит путем парных перестановок. После чего результат сравнивается с предыдущим значением. Итерационные методы затрачивают больше времени на поиск, однако позволяют найти решение, близкое к оптимальному. Частный случай итерационного метода рассмотрен в работе [8].

Динамические методы отличаются тем, что используются в процессе выполнения или непосредственно перед началом работы. Как правило, в изменяющихся системах заранее не известна ни структура программы, ни объем доступных ресурсов. Известно только некоторое конечное состояние и некие критерии оптимальности. Данный метод рассматривается в работе [9]. Автор описывает проектирование электромонтажных схем с наименьшими временными и финансовыми затратами, используя принцип оптимальности Р. Беллмана, лежащий в основе динамического программирования.

Статические методы выполняют необходимые расчеты заранее. Ведь имеется полная информация о структуре, ресурсах и эта информация неизменна. Пример рассматривается в работе [10]. В статье показана возможность применения

статистического метода в исследовании роли социальной составляющей медицинской географии в формировании здоровья населения, в развитии сферы здравоохранения.

Вывод

В данной статье рассмотрены основные классификации подходов размещения, объяснены принципы их функционирования, что позволило выделить плюсы и минусы разобранных методов. Из всего выше сказанного следует что на современном этапе развития науки и техники существует возможность подобрать метод размещения, способный наиболее эффективно раскрыть практически любую архитектуру многопроцессорной системы.

Список литературы: **1.** Зинкин С. А., Белецкий П. А. Оптимизация размещения данных по узлам информационно-вычислительной сети [Текст] / С.А. Зинкин, П.А. Белецкий // Современные тенденции технических наук: материалы II Междунар. науч. конф. – 2013. – С.29-31 **2.** Скиена С. Алгоритмы. Руководство по разработке [Текст] / С. Скиена. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 720 с. **3.** Макаренко А. В. Применение методов теории графов к исследованию Т-синхронизации хаотических систем [Текст] / А.В. Макаренко // Проблемы управления. – 2016. – №3 **4.** Yanovskii A.A., Simonovskii A.Ya., Klimenko E.M. On the Influence of the Magnetic Field upon Hydrogasdynamic Processes in a Boiling Magnetic Fluid // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2014. – Vol. 50, No. 3, pp. 260–266. **5.** Костюкевич В. М., Давыдков Г. А., Хотина И. Г. Оптимальное распределение ресурсов с использованием динамического программирования [Текст] / В. М. Костюкевич, Г. А. Давыдков, И. Г. Хотина // Resour. Technol., 2008. **6.** Князева М. В. Метод ветвей и границ для решения задачи сетевого планирования с ограниченными ресурсами [Текст]/ М.В. Князева // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – №7 **7.** Новиков Е.А., Ващенко Г.В. Последовательный и параллельный алгоритмы переменного шага на основе (2,2)-метода [Текст]/ Е.А. Новиков, Г.В. Ващенко // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 5. **8.** Бедакова Н.В. Анализ методов размещения складской сети пространственно-распределенного предприятия [Текст] / Н.В. Бедакова // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 6. – С. 123-135. **9.** Семахин А. М., Баталов И. С. Динамическое программирование в решении задачи оптимального размещения электронных компонентов системы управления [Текст]/ А. М. Семахин, И. С. Баталов // Молодой ученый. – 2013. – №6. – С. 144-146 **10.** Чистобаев А.И., Семенова З. А. Статистический метод в медико- географических исследованиях [Текст] / А.И. Чистобаев, З. А. Семенова // Географический вестник. – 2013. – №1 (24)

КОНСТРУИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ

Бохонский А.И. (*СевГУ, г. Севастополь, Россия)*
E-mail: bohon.alex@mail.ru

Abstract: *Using the algorithm for realizing the reverse optimality principle (RPO), two types of controls (acceleration - deceleration) of the portable motion of the object are found. It is shown that at a given time and distance, the attainment of the state of rest at the end of the movement occurs at the minimum control energy intensity.*
Key words: *Reversible design, optimal control, minimum energy consumption, reaching a state of rest.*

Введение

Решение задач с использованием вариационного метода теории оптимального управления приведено в работах [1 - 3] и других. Конструированию управлений движением посвящены работы [4 - 6].

Цель исследования – поиск управлений движением с минимальной энергоемкостью.

Алгоритм включает этапы: формулирование цели движения и ограничений; задание свойств предполагаемого кососимметричного управления; использование полинома для описания движения; определение констант полинома (с учетом краевых условий и косой симметрии управления); факторизация полинома; восстановление уравнения Эйлера и функционала - критерия, для которого дифференциальное уравнение Эйлера является первой вариацией. С использованием алгоритма реализации реверсионного принципа оптимальности найдены два типа управлений (разгон – торможение) переносным движением объекта. Показано, что при заданном времени и расстоянии достижение состояния покоя в конце движения наступает при минимальной энергоемкости управления.

1. Кососимметричное управление (ускорение) объекта как модификация известного оптимального управления, найденного вариационным методом [3].

Известно управление перемещением массы m=1 кг на расстояние L за время T, полученное при заданном критерии $J = \int_0^T U_e^2(t)dt$:

$$U_e(t) = \frac{6L}{T^3}(T-2t), V_e(t) = \frac{6Lt(T-t)}{T^3}, S_e(t) = \frac{Lt^2}{T^3}(3T-2t), \qquad (1)$$

где $U_e(t)$– управление; $V_e(t)$– скорость; $S_e(t)$– перемещение. В данном случае энергия, затрачиваемая для достижения цели движения

$$A = 2\int_0^{\frac{T}{2}} U_e\, V_e(t)dt = 2{,}25\frac{L^2}{T^2}. \qquad (2)$$

Для исходных данных m=1 кг, L = 1 н, T= 1 с из (2) энергия A= 2,25 дж.

Графики $U_e(t)$, $V_e(t)$, $S_e(t)$ совмещены на рисунке 1.

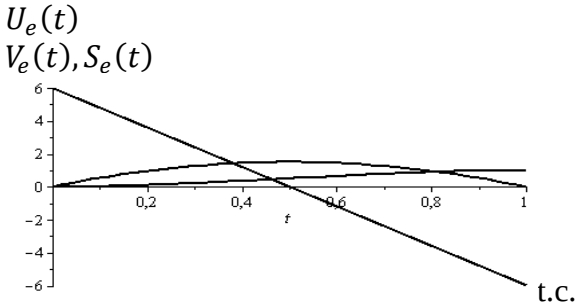


Рис. 1. Оптимальное движение (вариационный метод)

Обобщая известный результат синтеза управления (1), можно (для любой нечетной степени полинома) записать:

$$U_e(t) = \frac{2L(n+2)(T-2t)^n}{T^{n+2}},$$
$$V_e(t) = -\frac{L(n+2)((T-2t)^{n+1}T^{-n-1}-1)}{T^{n+1}}, \quad (3)$$
$$S_e(t) = \frac{L(T^{-n-1}(T-2t)^{n+2}+2nt+4t-T)}{2T^{(n+1)}},$$

где n=1,3,5,…∞. Из (3) при n=1 следует частный случай управления (1). При L=1 м, T= 1 с предельно возможная энергия, при которой все еще достигается цель движения, вычисляется согласно зависимости (с учетом правила Лопиталя):

$$A = \lim_{n\to\infty} 2\int_0^{\frac{T}{2}} U_e(t)V_e(t)dt = 1 \text{ Дж}. \quad (4)$$

Если, например, n=7, то энергия A=1,2656 дж, что свидетельствует о снижении энергоемкости при увеличении степени полинома. Графики $U_e(t)$, $V_e(t), S_e(t)$ построены при n=3, рисунок 2.

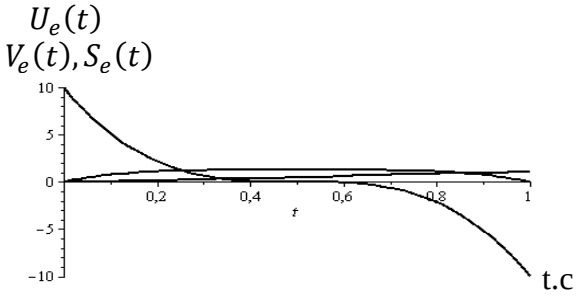


Рис. 2. Оптимальное движение (конструирование, вариант 1)

Важно отметить, что с ростом степени полинома затрачиваемая энергия на реализацию оптимального движения уменьшается экспоненциально с асимптотой A= 1 дж. При практической реализации управления необходим выбор приемлемого вида кососимметричной функции оптимального управления, которая обеспечивает достижение цели движения с минимальной энергоемкостью.

2. Конструирование нового типа кососимметричного управления (разгон - торможение).

Варьирование краевых условий, условий косой симметрии управления с учетом предполагаемой минимальной энергоемкости управления (при использовании алгоритма РПО) привело к получению следующих аналитических зависимостей:

$$U_e(t) = \frac{60Lt}{T^9}(T-t)(24t^2-24Tt+5t^2)(T-2t)^2,$$
$$V_e(t) = \frac{10Lt^2}{T^9} - (15T^4-88T^3t+232T^2t^2-288Tt^3+144t^4)(T-t)^2. \quad (5)$$

В данном примере энергия равна $A = 2\int_0^{\frac{T}{2}} U_e(t)V_e(t)dt = 1{,}5625$ Дж. Графики функций $U_e(t)$, $V_e(t), S_e(t)$ изображены на рисунке 3.

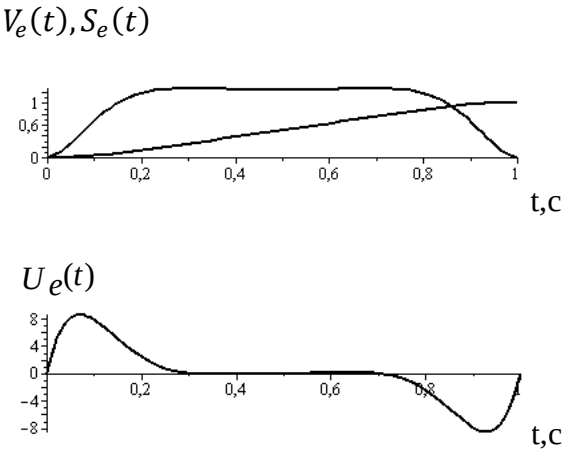


Рис. 3. Оптимальное движение (конструирование, вариант2)

Интересно, как в этом примере строго соблюдаются условия косой симметрии.
Пример:

$$\int_0^{0,3} U_e\,(t)dt = \left|\int_{0,7}^{1,0} U_e\,(t)dt\right| = 2{,}265846\ \frac{\text{м}}{\text{с}}. \qquad (6)$$

Рассмотренные примеры показывают, что существует достаточно широкий класс управлений с минимальной энергоемкостью, при проектировании которых могут, в том числе, учитываться характеристики приводов для их реализации

Заключение.

1. Применение алгоритма РПО приводит к появлению различного типа оптимальных управлений переносным движением объектов, обеспечивающих достижение цели движения со снижением энергоемкости управления.

2. В результате реализации алгоритма конструирования управления находятся неизвестные ранее критерии оптимальности, которые затем позволяют проверить решение с использованием вариационного метода теории оптимального управления. Например, управлению (3) при n=7 соответствует функционал – критерий $J = \int_0^T (\frac{d^4 U_e}{dt^4})\,dt$.

Список литературы: 1. Красовский, Н.Н. Теория управления движением / Н.Н.Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с. **2.** Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д.Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с. **3.** Воронов А.А. Теория автоматического управления. Ч.II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / А.А.Воронов. – М.: Высш. шк., 1977. – 288 с. **4.** Бохонский, А.И. Конструирование управляемого движения объекта / А.И.Бохонский, А.И.Рыжков // Механика, автоматика и робототехника: матер. междунар. науч.-практич.конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С.64 – 69. **5.** Бохонский, А.И. Конструирование оптимального управления движения объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел / А.И.Бохонский, Н.И.Варминская, А.И.Рыжков // фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: НИЦ МС, 2016. – С.70 – 76. **6.** Бохонский, А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И.Бохонский. – М.: Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2016. – 174 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ КРОМОК ПО ГЛУБИНЕ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Братан С.М., Харченко А.О., Рощупкин С.И., Часовитина А.С.
(ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь)
Тел./Факс: +7(8692)417741 добавочный: 1150; *E-mail:* tm@sevsu.ru

Abstract: *The article provides data of investigation of the distribution function of cutting edges along the depth of the abrasive tool during grinding, which changes due to wear and destruction processes. The research include analyzes the influence of tool wear on the function of density of the distribution.*

Key words: *grinding, wear, function of distribution, cutting edges, abrasive tool.*

На сегодняшний день процесс шлифования характеризуется устойчивым обеспечением заданного уровня качества и точности обрабатываемых поверхностей. Для повышения эффективности обработки, следует учитывать, что с течением времени абразивный инструмент изменяет свою форму, и ухудшаются параметры режущих зерен вследствие их износа.

В связи с этим в настоящей работе производится исследование функциональной зависимости плотности распределения режущих кромок по глубине инструмента при шлифовании.

Число режущих кромок на рабочей поверхности инструмента за период его стойкости может, как увеличиваться, так и уменьшаться. Самозатачиваемостью инструмента называют его способность непрерывного восстановления при обработке поверхностей с заданным уровнем качества. Самозатачиваемость появляется за счет изменения параметров поверхности абразивного инструмента, скалывании и выкрашивании зерен, другими словами, данное свойство является следствием износа. Описанное свойство проявляется у мягких и среднемягких кругов, которые работают при высокоинтенсивном съеме материала. В других случаях, для кругов характерно затупление рабочей поверхности.

В процессе затупления режущая способность инструмента, сопровождающаяся изменением его геометрической формы, и точность обработки снижается из-за выкрашивания абразивных зерен [1,2]. Помимо этого наблюдается увеличение шероховатости обрабатываемой поверхности, а также возникновение шумов и вибраций.

Для того, чтобы восстановить геометрическую форму инструмента выполняется его правка. При правке необходимо снять абразив и связку с рабочей поверхности инструмента специальными средствами. При правке на шлифовальной поверхности формируется слой с повышенной плотностью режущих кромок. При шлифовании часть режущих кромок разрушается и вырывается из связки круга, что приводит к уменьшению числа кромок. В то же время с износом инструмента в работу вступают новые режущие кромки. Число режущих кромок на единице его поверхности в момент времени t может быть рассчитано по зависимости:

$$n_{з\tau} = n_{з0} - \int_0^{\tau} S_n dt + n_{з0} \cdot \int_{t_\phi}^{t_\phi + \Delta R} f(u) du, \qquad (1)$$

где $n_{з0}$ - число кромок после правки круга; S_n - скорость разрушения кромок; $f(u)$ - плотность распределения кромок по глубине инструмента; ΔR - радиальный износ круга за время t.

При выводе зависимости (1) предполагается, что в работу вступают все абразивные зерна, лежащие в слое толщиной ΔR, равной износу инструмента. Число режущих кромок после правки рассчитывается по зависимостям работы [3], скорость разрушения

кромок принимается пропорциональной вероятности разрушения кромок при одном контакте поверхности с инструментом и числу контактов за единицу времени

$$S_n = P_p \cdot n_{з\tau} \cdot v_k, \quad (2)$$

где P_p - вероятность разрушения кромки, численно равная вероятности события, заключающегося в том, что сила резания при единичном контакте зерна с материалом станет больше прочности кромки либо прочности закрепления зерна в связке круга;

v_k - частота вращения круга.

Распределение режущих кромок по глубине инструмента в процессе шлифования меняется вследствие их износа и разрушения [5]. Для некоторого фиксированного уровня функция распределения равна вероятности события, заключающегося в том, что случайная величина ξ - расстояние от условной наружной поверхности инструмента до уровня – будет меньше или равна координате уровня u,

$$F_\xi(u) = P(\xi \le u) \quad (3)$$

Вероятность $P(\xi \le u)$ определяется пределом отношения числа режущих кромок $n_з(u)$, находящихся в слое между уровнем и условной поверхностью инструмента, к общему числу зерен $n_з(H)$ участка поверхности S

$$P(\xi \le u) = \lim_{s\to\infty} \frac{n_з(u)}{n_з(H)}, \quad (4)$$

где H - слой инструмента, в пределах которого производится расчет числа зерен.

Уравнения (3) и (4) справедливы как для инструмента после правки, так и после работы. Для анализа влияния износа инструмента на функцию распределения выделим на поверхности круга после правки и после износа за время τ слои с одинаковым числом вершин режущих кромок.

Для этого достаточно переместить условную наружную поверхность на величину износа наиболее выступающих зерен $h_з(0)$, а уровень u на величину износа кромок этого уровня $h_з(u)$. Координату уровня от новой условной поверхности инструмента при этом обозначим u'. Причем $u' = u + h_з(u) - h_з(0)$.

Если разрушение зерен отсутствует, то в выделенных слоях равны не только число зерен, но и функции распределения соответствующих случайных величин ξ и ξ'

$$F_{\xi'}(u') = F_\xi(u). \quad (5)$$

Заменяя в уравнении (5) координату u' на $u = u' - h_з(u) + h_з(0)$, получим

$$F_{\xi'}(u') = F_\xi(u' - h_з(u) + h_з(0)) \quad (6)$$

Плотность вероятностей распределения зерен по глубине инструмента определится дифференцированием зависимости (6):

$$f_{\xi'}(u') = f_\xi\left[u' - h_з(u) + h_з(0)\right]\frac{d(u' - h_з(u) + h_з(0))}{du'} \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) могут быть также записаны

$$F_{\xi'}(u) = F_\xi(u - h_з(u)); \quad (8)$$

$$f_{\xi'}(u) = f_\xi\left[u - h_з(u)\right]\frac{d(u - h_з(u))}{du} \quad (9)$$

Если величина износа режущих кромок пропорциональна расстоянию $H - u$, т.е. $h_з(u') = C_h \cdot (H - u') \cdot \tau$, а плотность распределения после правки моделируется степенной зависимостью вида

$$f_{\xi'}(u) = C_f \cdot u^{\chi - 1} \quad (10)$$

где C_h, C_f и χ - коэффициенты и показатель степени зависимостей, то плотность распределения изношенного инструмента вычисляется

$$f_{\xi'}(u) = C_f \cdot (u - C_h \cdot (H - u') \cdot \tau)^{\chi-1} \cdot (1 + C_h \cdot \tau \cdot \frac{du'}{du})$$

При переходе к координате u'

$$f_{\xi'}(u') = C_f \cdot (u' - C_h \cdot u' \cdot \tau)^{\chi-1} \cdot (1 + C_h \cdot \tau) \ , \qquad (11)$$

где $C_f = \frac{\chi}{H^{\chi}}$.

Например, после двухсот секунд работы при $\chi = 0{,}5$; $C_h = 1 \cdot 10^{-3}$, зависимость плотности распределения режущих кромок по глубине инструмента принимает вид

$$f_{\xi'}(u') = \frac{1{,}8 \cdot \sqrt{1{,}2 \cdot u}}{H^{1,5}} \qquad (12)$$

при исходном распределении

$$f_x(u) = \frac{1{,}5 \cdot \sqrt{u}}{H^{1,5}}. \qquad (13)$$

При моделировании плотности вероятности β - распределением, соответственно получим:

$$\beta_{m,n}(x) = \frac{1}{\beta(m,n)} \cdot (u - h_з(u))^{m-1} \cdot (1 - u - h_з(u))^{n-1} \cdot \frac{d(u - h_з(u))}{du} \qquad (14)$$

где $\beta(m,n)$ - значение β-функции; m и n - параметры β- распределения.

Анализ полученных зависимостей показывает, что за период стойкости инструмента наиболее значительно плотность вероятностей распределения абразивных зерен по глубине инструмента изменяется для мягких кругов и кругов средней твердости. Для кругов, работающих в режиме затупления, она изменяется незначительно.

Полученные зависимости позволяют производить теоретический анализ механики процесса шлифования с учетом износа режущих кромок инструмента. Результаты выполненного исследования рекомендуется использовать при выборе условий обработки и соответствующих режимов резания на машиностроительных предприятиях для проектирования высокоэффективных технологических процессов шлифования.

Список литературы: **1.** Братан, С.М. Анализ и моделирование закономерностей изменения размеров профилей абразивных зерен и площадок износа в процессе шлифования / С.М. Братан, А.О. Харченко, А.С. Часовитина // Вестник современных технологий.2020. №1 (17). С. 43-48. **2.** Шавва, М. А. Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании / М.А. Шавва, С.В. Грубый // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. №11. **3.** Братан, С.М. Определение закономерностей изменения текущего состояния рабочей поверхности абразивного инструмента/ С.М. Братан, А.О. Харченко, А.С. Часовитина // В сборнике: Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. 2021. С. 112-115. **4.** Попов А. В. Исследование влияния параметров режима шлифования на скорость износа связки // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. №1. **5.** Богуцкий, Б.В. Анализ способов правки алмазных кругов на металлических связках/ Б.В. Богуцкий, В.Б. Богуцкий, С.М. Братан // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2019. №1 (63). С. 232-239. **6.** Носенко, В.А. Динамическое моделирование распределения вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента при шлифовании с использованием переходных вероятностей / В.А. Носенко, Е.В. Федотов, М.В. Даниленко // Известия вузов. Машиностроение. 2017. №2 (683).

ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОЦЕССАХ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Бутенко В.И.
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г.Москва, Россия)
Тел. +7-928-600-57-61; E-mail: butenkowiktor@yandex.ru

Abstract: *The abrasive grain and material contact formulas for determining the local temperature and friction coefficient are given. The role surfactants in increasing the abrasive processing efficiency has been determined. The surfactants influence on the abrasive cut-off wheels on a bakelite bond performance is considered.*
Keywords: *local temperature, friction coefficient, abrasive grain, surfactants, efficiency.*

1. Введение

В отличие от процессов обработки поверхностей деталей машин лезвийным инструментом абразивная обработка протекает при наличии в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом высоких локальных температур, вызванных неоднозначностью характера процесса трения между абразивными зёрнами, обрабатываемым материалом, стружкой и связкой, а также изменением условий его протекания во времени. В связи с этим применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) при абразивной обработке поверхностей деталей машин имеет своей целью формирование на поверхностях абразивных зёрен и обрабатываемого материала плёнок, обладающих низким коэффициентом трения.

2. Основное содержание и результаты работы

В работе [1] приведена следующая формула определения локальной температуры в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом Θ при подаче в неё ПАВ:

$$\theta = \frac{0{,}427 \cdot L_p \cdot \theta_n \cdot (1 + f_\Sigma \cdot f_{пл})}{HB \cdot f_{пл} \cdot (1 - f_{пл}^2)}, \qquad (1)$$

где L_p – скрытая теплота плавления металла на единичной площадке контакта; Θ_n – температура плавления обрабатываемого материала; f_Σ – обобщённый коэффициент трения, учитывающий неравномерность распределения плёнки по контактирующим поверхностям в зоне резания; $f_{пл}$ – коэффициент трения плёнки на контактных поверхностях абразивного зерна и обрабатываемого материала, определяемый через угол трения $\alpha_{пл}$ [2]; HB – начальная твёрдость обрабатываемого материала.

Анализ формулы (1) свидетельствует о том, что локальная температура в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом Θ находится в сложной зависимости от коэффициента трения $f_{пл}$, так как обобщённый коэффициент трения f_Σ также зависит от коэффициента $f_{пл}$ и может быть определён по формуле [1, 2]:

$$f_\Sigma = \frac{0{,}427 \cdot L_p \cdot \theta_n}{HB \cdot \theta} - tg(1{,}0 - 1{,}5)\alpha_{пл}, \qquad (2)$$

где $\alpha_{пл}$ – переменный угол трения, величина которого зависит от наличия и характера распределения плёнкообразующего материала в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом.

Формулы (1) и (2) могут быть использованы для выбора наиболее эффективных видов ПАВ и способов подачи их в зону контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом.

Из анализа литературных данных и опыт производственной деятельности передовых машиностроительных предприятий показывает, что основными способами применения ПАВ при абразивной обработке деталей являются следующие:

1. Введение ПАВ в состав СОТС.
2. Внесение ПАВ в состав абразивной массы для изготовления инструмента.
3. Импрегнирование абразивных инструментов составами, содержащими ПАВ.

Каждый из представленных способов применения ПАВ при абразивной обработке деталей зависит от факторов, обусловленных типом производства, материалом обрабатываемой детали, видом абразивной обработки, состоянием используемого оборудования, квалификацией оператора, техникой безопасности и т.д. В связи с этим перед технологами машиностроительных предприятий при разработке ими технологических процессов возникает проблема рационального выбора способа применения ПАВ при абразивной обработке поверхностей конкретных деталей в условиях действующего производства. Одним из путей решения этой проблемы может стать использование критериального подхода к выбору вида и способа применения ПАВ при абразивной обработке деталей [3]. Например, в работе [1] показано, что для повышения эффективности процесса шлифования поверхностей деталей из хромоникелевых сталей и сплавов весьма перспективным является импрегнирование абразивных инструментов водным раствором кристаллического йода или дийодида хрома.

Разработан способ импрегнирования шлифовальных кругов на керамической связке в водном растворе дийодида хрома, включающий пропитку последнего в ёмкости с водным раствором, содержащим (20 – 25)г дийодида хрома на литр воды, и конвективную сушку абразивного инструмента при его вращении со скоростью (0,3 – 0,5) $с^{-1}$ в течение 1,5 – 2 часов при температуре (40 – 50)^{o}С. При этом импрегнируемому инструменту, находящемуся в ёмкости с водным раствором дийодида хрома, в течение одной минуты сообщаются вертикальные колебательные движения с определённой частотой *v*, обеспечивающей его полное окунание в водный раствор и полное вынимание абразивного инструмента из него [4]. Сравнительные исследования, выполненные в лабораторных и производственных условиях, показали, что предложенный способ импрегнирования шлифовальных кругов водным раствором дийодида хрома при обработке стали 12ХН3А и сплава 45Х25Н20С2А позволяет в 2,1 раза сократить время пропитки абразивного инструмента, уменьшить интенсивность изнашивания круга на 25 – 30%, параметр шероховатости обработанной поверхности детали *Ra* на 15 – 20% и относительную площадь поверхности, подвергнутой прижогам на 30 – 40%.

Перспективным направлением повышения эффективности абразивной обработки поверхностей деталей машин является введение ПАВ в состав абразивной массы при изготовлении инструмента. При этом следует рассматривать два варианта изготовления абразивных инструментов с ПАВ:

1 – на основе высокомолекулярных органических соединений (например, эпоксидной или фенолформальдегидной смол);

2 – на керамической связке.

На основе высокомолекулярных органических соединений могут изготовляться абразивные инструменты в виде брусков или сегментов, предназначенных для выполнения доводочной обработки поверхностей деталей, хонингования или суперфиниширования, когда температура в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом не превышает температуры разрушения используемого ПАВ. В этом случае в состав абразивной массы могут добавляться ПАВ как органического происхождения, так и неорганического (например, кристаллический йод).

С целью повышения эффективности шлифовальных кругов на керамической связке предложена масса для изготовления абразивного инструмента [5], включающая абразив, высокопрочный ферритный чугун дисперсности $D_{вч} = (1,2 – 1,5)\cdot d_А$, порошок серого чугуна дисперсности $D_{сч} = (0,8 – 1,0)d_А$, дийодид хрома, древесную муку с размером частиц $D_м = (1,0 – 1,2)\cdot d_А$и глину, где $d_А$ – дисперсность используемого абразива. Предложено следующее соотношение компонентов, входящих в абразивную массу, масс. %: абразив – 40-50; высокопрочный ферритный чугун – 10-15; порошок серого чугуна – 5-10; дийодид

хрома – 2-3; древесная мука – 8-10; глина – 22-25.Добавление в массу для изготовления абразивного инструмента древесной муки с размером частиц $D_м = (1,0 – 1,2)\cdot d_А$ обеспечивает в процессе обжига при температуре 950 – 1100°С спрессованной абразивной массы образование древесной золы за счёт сгорания частиц древесной муки. Как показали металлографические исследования, образующаяся в порах абразивного инструмента мелкодисперсная древесная зола выполняет роль модификатора и стабилизатора структуры возникающих на обрабатываемой поверхности детали йодидов железа.

Проведены сравнительные испытания стандартных шлифовальных кругов и кругов, изготовленных из абразивной массы и технологии, описанной в работе [5].В качестве стандартного использовался шлифовальный круг ПП 400×203×60 14АF60К7V 35м/с ГОСТ Р 52781-2007. Для изготовления шлифовального круга в соответствии с предложенной массой также использовался электрокорунд нормальный 14А зернистости F60.

На круглошлифовальном станке мод. 3М151 обрабатывались бесступенчатые валики диаметром 30 мм и длиной 350 мм из сталей 12Х2Н4А, 20ХН2МА, 30ХГСА и сплавов ХН62МВКЮ, ХН77ТЮР с использованием в качестве смазочно-охлаждающей жидкости 5-процентного водного раствора эмульсола Укринол-14. Режимы шлифования для каждой марки стали или сплава устанавливались согласно рекомендациям, приведённым в справочнике [6].

Результаты исследований показали, что использование шлифовальных кругов, изготовленных из абразивной массы, содержащей в качестве ПАВ дийодид хрома и древесную золу, позволяет в 1,5 – 2 раза повысить стойкость шлифовальных кругов между правками, на 25 – 30% уменьшить параметр шероховатости обработанной поверхности *Ra*, почти в 2 раза уменьшить относительную площадь прижогов*ΔS*и на 15 – 25% уменьшить толщину поверхностного слоя с изменёнными физико-механическими свойствами *ΔH*. При этом следует отметить, что предложенная в работе [5] технология изготовления абразивных инструментов, содержащих в своём составе ПАВ, может быть реализована на любом машиностроительном предприятии.

Экспериментальными исследованиями, выполненными в лабораторных условиях, и анализ производственной практики внедрения различных видов и способов подачи ПАВ показали, что применение ПАВ позволяет существенно сократить поле рассеивания размеров партии обрабатываемых деталей. Была проведена подконтрольная обработка шлифованием валов из различных железоуглеродистых сплавов. Определялись поля рассеивания размеров партии деталей в пределах стойкости шлифовального круга. В течение продолжительного времени подконтрольной обработке было подвергнуто большое количество валов с диаметрами обрабатываемых поверхностей от 20 мм до 40 мм и допусками 6-8 квалитетов. По результатам подконтрольной обработки определялись поля рассеивания размеров диаметров деталей, обработанных без применения ПАВ ω_1 и с применением различных способов подачи импрегнатора – дийодида хрома в зону обработки (импрегнирование, добавка в СОТС, введение в состав абразивной массы) ω_2. Поля рассеивания определялись после обработки каждой партии деталей из 10 штук. Сравнивались поля рассеивания при обработке первой партии $\omega_1^н$, $\omega_2^н$ и последней $\omega_1^к$, $\omega_2^к$.

Результаты изменения полей рассеивания размеров деталей ω_1 и ω_2 за период стойкости инструмента при допустимом диапазоне изменения размеров обрабатываемых деталей в обобщенном виде представлены на рис.1, позволяющем проследить закономерность их изменения. Установлено, что во всех случаях $\omega^н > \omega^к$, что, по-видимому, связано с уменьшением числа режущих зерен и увеличением сглаживающих и давящих [1]. При этом из рис.1 следует, что $\omega_1^н > \omega_2^н$ и $\omega_1^к > \omega_2^к$. Если принять $\Delta\omega_1 = \omega_1^н - \omega_1^к$ и $\Delta\omega_2 = \omega_2^н - \omega_2^к$, то $\Delta\omega_1 \geq \Delta\omega_2$. Практическую значимость имеет коэффициент $K_\Delta = \dfrac{\Delta\omega_1}{\Delta\omega_2} \geq 1$, по величине которого можно будет судить о степени влияния принятого вида и способа

применения ПАВ на точность получаемых размеров обрабатываемой детали.

В современной металлообработке широко используются абразивные отрезные круги на бакелитовой связке как наиболее востребованные типы абразивных инструментов ввиду своей доступности и эффективности. Однако в работе отрезных кругов на бакелитовой основе имеются особенности, заключающиеся в контактном взаимодействии боковых сторон круга со срезом, при котором имеет место изменение силы трения между ними по мере врезания круга в заготовку. Одновременно в бакелитовой связке под влиянием переменной высокоскоростной деформации и температуры протекает процесс термомеханической деструкции, вызванный разрушением фенольного связующего и накоплением деструкционных факторов в бакелитовой связке (например, субмикротрещин).

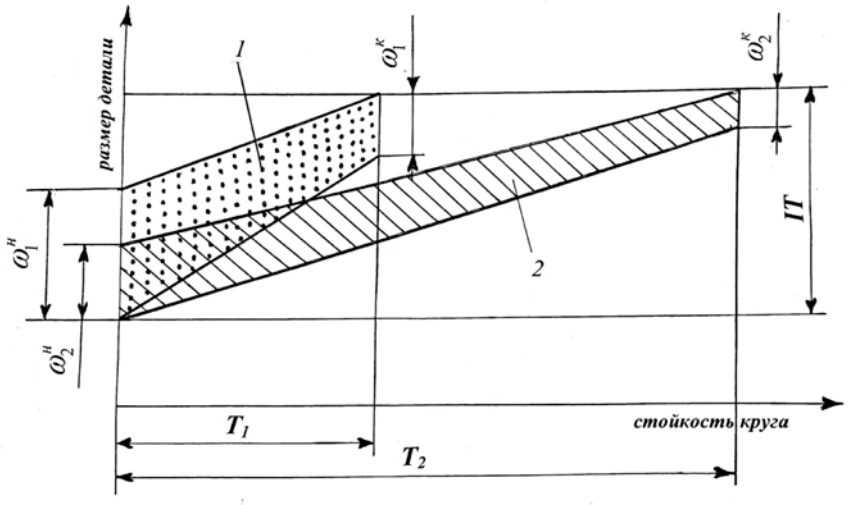


Рис. 1. Схемы полей рассеивания размеров партии деталей в пределах стойкости круга, обработанных стандартным (1) и импрегнированным (2) инструментами

Процесс термомеханической деструкции бакелитовой связки можно замедлить уменьшением трения между боковыми поверхностями круга и срезом, снизив переменную высокоскоростную деформацию в рабочей части контактную круга и температуру. Для этого предложено вводить в абразивную смесь для изготовления отрезных кругов на бакелитовой основе ПАВ, хорошо работающие при высоких температурах (например, мелкодисперсные порошки дисульфида молибдена MoS_2 или дийодида хрома). В работе [1] приведена технология изготовления абразивных отрезных кругов на бакелитовой связке с ПАВ, которая может быть осуществлена на любом машиностроительном предприятии.

Исследования работоспособности абразивных отрезных кругов на бакелитовой связке проводились на специально созданной установке, схема и общий вид которой представлены в работе [1]. В качестве основного показателя эффективности отрезных кругов был принят коэффициент резания K_p, определяемый по формуле:

$$K_p = \frac{4F_{ср} \cdot n_p}{\pi\left(D_н^2 - D_к^2\right)}, \qquad (3)$$

где $F_{ср}$ – площадь сечения разрезаемой заготовки, мм^2; n_p – количество резов круга; $D_н$, $D_к$ – диаметр круга до и после резки, мм; в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [1], было принято допустимое срабатывание круга $D_н/D_к$ = 0,75.

Режимы резания прутков из стали 30ХГСА диаметром 24 мм и труб из сталей 45 и 10 размером 24×4,5 мм устанавливались из условия, что шероховатость поверхности среза по параметру *Ra* не должна превышать 3,2 мкм, а высота заусенца по краю среза *H* не должна быть более 0,5 мм.

В табл. 1 приведены результаты испытания отрезных кругов диаметром 250 мм и высотой 2 мм при резке различных конструкционных материалов, анализ которых свидетельствует о том, что при одной и той же подаче $S_м$ использование отрезных кругов с ПАВ позволяет в 1,3 раза увеличить скорость резки V и в зависимости от обраба-

тываемого материала, в среднем на 15 –25% повысить коэффициент резки $K_р$ при одновременном уменьшении мощности резания.

Таблица 1. Результаты испытания отрезных кругов диаметром 250 мм и высотой 2 мм при резке заготовок из сталей

Обрабатываемый материал	Характеристика круга	Режимы резки		$K_р$	Мощность резания, кВт
		V, м/с	$S_м$, мм/мин		
сталь 30ХГСА, пруток диаметром 24 мм	без ПАВ	56,25	320	1,14	2,35
	с дисульфидом молибдена	75,0	320	1,36	2,20
	с дийодидом хрома	75,0	320	1,45	2,16
сталь 45, труба 25×4,5 мм	без ПАВ	56,25	450	1,28	2,25
	с дисульфидом молибдена	75,0	450	1,47	2,05
	с дийодидом хрома	75,0	450	1,63	1,90
сталь 10, труба 25×4,5 мм	без ПАВ	56,25	550	1,65	1,84
	с дисульфидом молибдена	75,0	550	1,89	1,75
	с дийодидом хрома	75,0	550	2,05	1,70

Анализ данных, приведённых в табл. 1, свидетельствует также о том, что во всех случаях добавка в состав отрезного круга на бакелитовой связке ПАВ в виде дисульфида молибдена и дийодида хрома существенно повышает коэффициент $K_р$, а, следовательно, стойкость круга. При этом во всех экспериментах введение в формовочную смесь дийодида хрома обеспечивает более высокие значения коэффициента $K_р$, чем введение дисульфида молибдена, эффект от которого достигается за счёт натирания его частичек чешуйчатого строения на контактную поверхность среза. Это может быть объяснено тем, что при использовании дийодида хрома на поверхности среза образуются более устойчивые йодиды железа, чем образующийся тонкий слой дисульфида молибдена, который неустойчив при высоких температурах (снижается его адгезия) и частично разлагается, вследствие чего нарушается сплошность образовавшегося на поверхности среза слоя дисульфида молибдена. Производственный опыт также показал, что себестоимость изготовления абразивных отрезных кругов на бакелитовой связке, содержащих в своём составе дийодид хрома, на 10 – 15% ниже, чем себестоимость таких же кругов, содержащих дисульфид молибдена.

3. Заключение

Таким образом, применение ПАВ в процессах абразивной обработки деталей машин позволяет решить ряд технологических задач, связанных с повышением стойкости используемого инструмента и качеством обработанных поверхностей с минимальными финансовыми и материальными затратами.

Список литературы: 1. Бутенко, В.И. Поверхностно-активные вещества в процессах абразивной обработки материалов / В.И. Бутенко, Г.А. Прокопец. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2021. – 135 с. **2.** Бутенко, В.И. Повышение эффективности шлифования поверхностей деталей машин / В.И. Бутенко, Л.В. Гусакова. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – 176 с. **3.** Бутенко, В.И. Критерии выбора вида и способа применения поверхностно-активных веществ для повышения эффективности абразивной обработки деталей / В.И. Бутенко, К.В. Давиденко // Инженер. Студенческий науч.-техн. журнал. – 2019. - №2(28)′. – С. 24 – 28**. 4.** Патент РФ № 2703063 МПК B24D 3/34. Способ импрегнирования абразивных инструментов / В.И. Бутенко, К.В. Давиденко. – Бюлл. №29, 2019. **5.** Патент РФ № 2672973 МПК B24D 3/14, B24D 3/34. Масса для изготовления абразивного инструмента / В.И. Бутенко. – Бюлл. № 33, 2018.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРОЧНЯЮЩЕГО РОЛИКА С ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

Бутенко В.И., Шаповалов Р.Г. *(МАИ (НИУ), ИТА ЮФУ,*
г. Москва, г. Таганрог, Россия)
Тел./факс +7(928)6005761; +7(8634)371697; E-mail: shapovalov116@mail.ru

Abstract. *The contact interaction of the reinforcing roller with the flat surface of the processed part is considered, which made it possible to identify the features of the friction-force loading of the surface layer material and explain the mechanism of formation of technological residual stresses in it, taking into account the resulting deformation coefficient of friction. The performed experimental studies confirmed the results of an analytical study of the mechanism of occurrence of technological residual compression stresses during finishing and strengthening treatment of flat surfaces of parts with a roller and showed that the choice of the value of the roller indentation force and feed should be carried out according to the condition of creating the required depth of its introduction into the processed material and ensuring minimal changes in the contact spot of the strengthening roller with the processed surface of the part.*
Keywords**:** *part, reinforcing roller, contact zone, flat surface, roller, stresses, coefficient of friction.*

В современном машиностроительном производстве актуальной является проблема повышения работоспособности и надёжности машин и механизмов. Согласно данным, приведённым в работах [1, 2], отделочно-упрочняющая обработка плоских поверхностей деталей машин является эффективным способом повышения работоспособности деталей машин и может осуществляться с использованием достаточно простых по конструкции устройств [3 – 5]. В связи с этим научную и практическую значимость имеет исследование процесса пластической деформации, протекающего в зоне контакта упрочняющего ролика с материалом обрабатываемой поверхности детали.

Исследованиями проф. В.П. Кузнецова доказано [6 – 8], что при контакте радиусного индентора с плоской поверхностью обрабатываемой детали имеет место фрикционно-силовое нагружение, обусловленное силой вдавливания ролика P и подачей инструмента (заготовки) S (рис. 1). Определяющее влияние на формирование поверхностного слоя в процессе контактного взаимодействия упрочняющего ролика радиусом R и высотой B с материалом поверхностного слоя детали при фрикционно-силовом нагружении оказывают сила вдавливания P, направленная по нормали к обрабатываемой поверхности (рис. 1, *а*), и сила деформационного трения $P_{тр}$, вызванная проскальзыванием рабочей поверхности ролика и направленная противоположно подаче S. Эта сила вызывает проворачивание упрочняющего ролика относительно его оси установки с некоторой угловой скоростью n_p и зависит от обобщённого коэффициента трения $f_{тр}$ между рабочей поверхностью упрочняющего ролика и обрабатываемым материалом. Его величина определяется суммированием коэффициента трения ролика непосредственно с упрочняемой поверхностью детали по линии касания *1 – 1'* (рис. 1, *б*) $(f_{тр})^1$ и закономерно изменяющимся коэффициентом трения проворачиваемого ролика с выдавливаемым материалом вдоль линии *2 – 2'* $(f_{тр})^2$. Величина коэффициента $(f_{тр})^2$ изменяется как по высоте выдавливаемого материала, так и по дуге контакта рабочей поверхности ролика с ним.

Как видно из рис. 1, характерной особенностью фрикционно-силового нагружения материала поверхностного слоя обрабатываемой детали упрочняющим роликом является образование вне контактной зоны деформации в виде валика оттеснённого металла высотой $h_в$, вызывающего, с одной стороны, дополнительное сопротивление упрочняемого материала в направлении подача S. С другой стороны, образование валика перед движущимся с подачей S упрочняющим роликом приводит к дополнительно-

му сдвигу материала поверхностного слоя детали и, как следствие, изменение пятна контакта на величину l_c (рис. 1, *б*), которая может быть определена из соотношения

$$l_c = 2\sqrt{R^2 - \left(R^2 - h_{вр}^2\right)},$$

где R – радиус упрочняющего ролика, мм;

$h_{вр}$ – глубина внедрения упрочняющего ролика в материал поверхностного слоя детали.

От длины l_c и подачи S зависит шаг образующихся вследствие вибрации ролика шероховатости обработанной поверхности детали, а от силы вдавливания упрочняющего инструмента P и физико-механических свойств материала – величина упругого восстановления поверхностного слоя $h_{вос}$ (рис. 1, *а*) и степень его упрочнения ε.

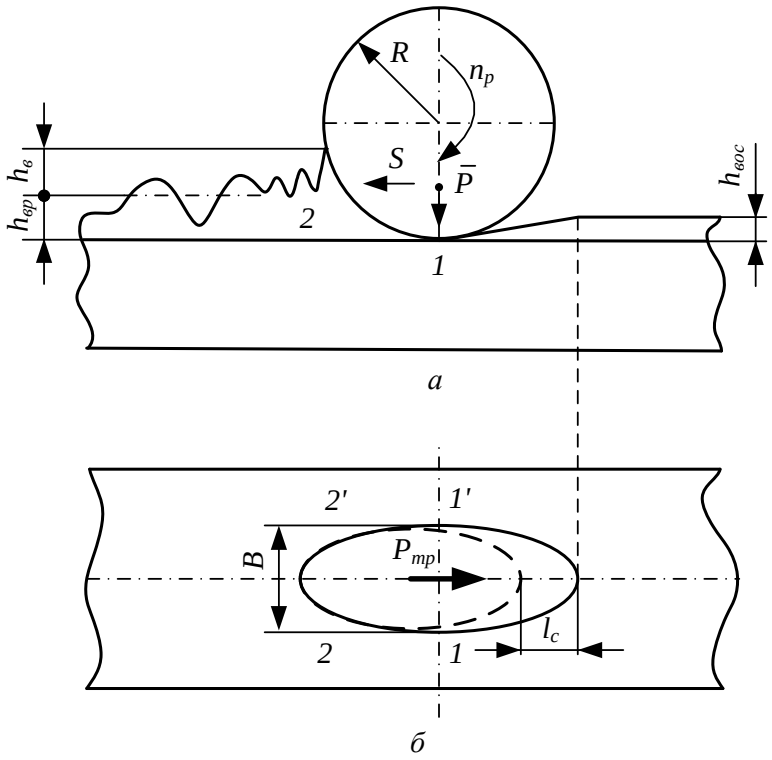


Рис. 1. Схемы фрикционно-силового нагружения материала поверхностного слоя детали при отделочно-упрочняющей обработке роликом (*а*) и образующегося пятна контакта (*б*)

Следовательно, основными параметрами фрикционно-силового нагружения материала поверхностного слоя при отделочно-упрочняющей обработке плоских поверхностей деталей роликом, определяющими протекание деформационных процессов в зоне контакта, являются сила вдавливания ролика P и коэффициент деформационного трения $f_{тр}$. При этом характер пластического деформирования материала поверхностного слоя детали в зоне контакта определяется не только глубиной внедрения упрочняющего ролика $h_{вр}$, но и высотой образующегося перед ним валика пластически оттеснённого металла $h_в$. Согласно исследованиям проф. В.П. Кузнецова и других учёных в области отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин [6 – 8] предполагается, что фрикционная составляющая силового взаимодействия ролика с материалом поверхностного слоя, представляющая собой силу трения $P_{тр}$, оказывает существенное влияние на высоту формируемого валика $h_в$ и практически не влияет на глубину внедрения ролика $h_{вр}$, обусловленную силой вдавливания P. При этом величина коэффициента трения $f_{тр}$ определяется материалом и шероховатостью рабочей поверхности упрочняющего ролика, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и подачей S. Поэтому условия трения в зоне контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью детали влияют на формирование конечного состояния материала поверхностного слоя. С одной стороны, увеличение коэффициента трения $f_{тр}$ обеспечивает интенсивное накопление пластических деформаций сдвига в контактной зоне что приводит к повышению величины напряжения сжатия в материале поверхностного слоя , т.е. увеличению степени упрочнения ε. С другой стороны, повышение деформационного трения способствует усиленному росту высоты валика $h_в$, что может привести к потере динамической устойчивости процесса отделочно-упрочняющей обработки детали [9].

Следует отметить, что окончательное значение величины технологических остаточных напряжений сжатия при отделочно-упрочняющей обработке плоских поверхностей деталей роликом зависит от числа его проходов $n_{д.х.}$ и эффективностью пластического деформирования материала, которая носит дискретный характер и зависит от принятых параметров фрикционно-силового нагружения обрабатываемого материала. Если в качестве критерия эффективности пластического деформирования материала поверхностного слоя обрабатываемой детали принять степень упрочнения ε, то диаграмма её изменения от числа проходов $n_{д.х.}$ (или времени обработки t) в общем виде может быть представлена графиком на рис. 2. При этом количество двойных проходов упрочняющего ролика $n_{д.х.}$ (или время обработки t), при которых будет происходить накопление деформаций в материале поверхностного слоя, а следовательно, изменяться величина технологических остаточных напряжений сжатия $\sigma_{ост}$, зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, состояния рабочей поверхности упрочняющего ролика и его диаметра, а также усилия вдавливания P.

Для подтверждения достоверности проведённых аналитических исследований контактного взаимодействия упрочняющего ролика с материалом плоской поверхности обрабатываемой детали были выполнены экспериментальные исследования изменения величины технологических остаточных напряжений сжатия $\sigma_{ост}$ в зависимости от числа двойных ходов ролика $n_{д.х.}$. Упрочняющей обработке подвергались поверхности пластин из стали 12ХН3А с размерами $B \times L \times H$ = 30×200×50 мм. Устройство для упрочняющей обработки плоских поверхностей деталей конструкции по патенту РФ на полезную модель №152055 устанавливалось в шпинделе вертикально-фрезерного станка мод. 6Т13, а пластины закреплялись на столе станка в машинных тисках. Упрочняющий ролик диаметром 42 мм с радиусом рабочего профиля 16 мм был изготовлен из быстрорежущей стали Р6М5 и подвергнут закалке до твёрдости HRC 62…65. Исследования проводились при продольной подаче ролика S = 2 мм/с и усилиях вдавливания P_1 = 1000Н, P_2 = 750Н, P_3 = 500Н. Определение технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ производилось по уширению дифракционных линий $B_л$, полученных на рентгеновской установке ДРОН-3М. Предварительно был построен тарировочный график зависимости напряжений $\sigma_{ост}$ от $B_л$.

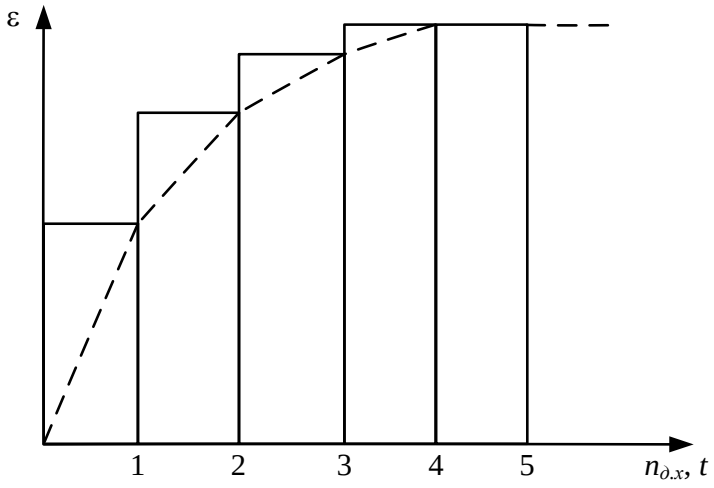


Рис. 2. Графики изменения степени упрочнения материала поверхностного слоя ε от числа проходов ролика $n_{д.х.}$ (сплошные линии) и времени обработки t (пунктирные линии)

Результаты выполненных исследований представлены на рис. 3, из анализа которого видно, что окончательное значение величины технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя при обкатке его роликом $\sigma_{ост}$ (а, следовательно, и степень его упрочнения ε) происходит ступенчато и зависит от усилия вдавливания P и числа проходов упрочняющего ролика $n_{д.х}$.

Таким образом, выполненные аналитические и экспериментальные исследования контактного взаимодействия упрочняющего ролика с плоской поверхностью детали свидетельствуют о том, что при формировании требуемого состояния материала поверхностного слоя по степени его упрочнения необходимо обоснованно назначать силу вдавливания ролика с учётом возникающего деформационного коэффициента трения. Выбор значения силы вдавливания ролика и подачи следует осуществлять по условию создания требуемой глубины внедрения его в обрабатываемый материал и обеспечения минимального изменения пятна контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью детали.

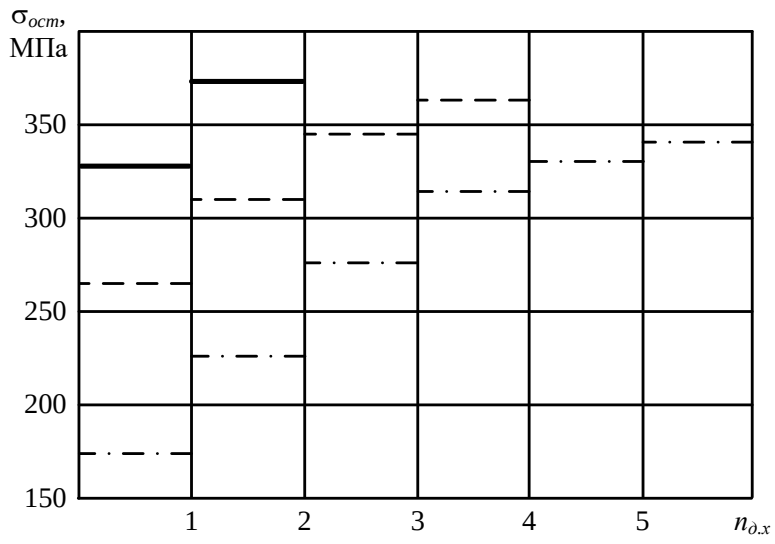


Рис. 3. Изменение величины технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ в материале поверхностного слоя детали от числа проходов упрочняющего ролика $n_{д.х.}$ при усилиях вдавливания его P_1 = 1500Н (сплошные линии), P_2 = 750Н (пунктирные линии) и P_3 = 500Н (штрихпунктирные линии). Сталь 12ХН3А, S = 2 мм/с

Список литературы: 1. Бутенко, В.И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2017. – 481 с. **2.** Бутенко, В.И. Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства. Инструменты / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2016 – 219 с. **3.** Патент № 152055 Российская Федерация. МПК B24B 39/00. Устройство для упрочняющей обработки плоских поверхностей деталей / В.И. Бутенко. Бюлл. № 12, 2015. **4.** Патент № 190964 Российская Федерация. МПК B24B 39/06. Устройство для упрочняющей обработки плоских поверхностей деталей / Тамаркин М.А., Бутенко В.И., Тищенко Э.Э. Бюлл. № 20, 2019. **5.** Патент № 192435 Российская Федерация. МПК B24B 39/06. Устройство для упрочняющей обработки плоских поверхностей деталей / Бутенко В.И., Лебедев В.А., Давыдова И.В., Максимов Д.В. Бюлл. № 26, 2019. **6.** Кузнецов, В.П. Исследование механизмов наноструктурирования поверхностного слоя при пластическом деформировании скользящим индентором. Моделирование на атомном масштабе / В.П. Кузнецов, А.Ю. Никонов, А.И. Дмитров [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 59 – 69. **7.** Дмитров, А.И. Моделирование локального контакта кристаллических тел в условиях сдвигового нагружения / А.И. Дмитров, А.Ю. Никонов, В.П. Кузнецов [и др.] // Труды IX Междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ´ 2012). – Алушта, 2012. – С. 13 – 15. **8.** Кузнецов, В.П. Интегральный параметр фрикционного силового нагружения и оценка накопленной пластической деформации сдвига при наноструктурирующем выглаживании / В.П. Кузнецов // Вестник Курганского гос. ун-та. Серия «Технические науки». – Выпуск 7. – 2012. – № 2 (24). – С. 113 – 119. **9.** Заковоротный, В.Л. Динамическая диагностика процесса обработки методами поверхностного пластического деформирования / В.Л. Заковоротный, В.С. Минаков, М.М. Ханукаев // Вестник Донск. гос. тех. ун-та. – 2012. – № 1 (62). – С. 38 – 45.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ РАБОЧЕГО ЦИЛИНДРА ГИДРОСТОЙКИ И ЕГО ПЕРЕКОСОВ СО ШТОКОМ

Буялич Г. Д., Бяков М. А., Гвоздкова Т. Н., Буялич К. Г.
(КузГТУ, г. Кемерово, г. Междуреченск, Россия)
Тел. +7 (384-2) 396940; e-mail: gdb@kuzstu.ru

Abstract: *the article reviews the original method of measuring radial deformations of the hydraulic prop working cylinder and its misalignment with respect to rod and piston performed on the bench in factory conditions. The method is based on registering the deviation of the working cylinder surface with respect to the stationary frame of the bench as a result of external loading on the hydraulic prop. The deviations are registered in the hydraulic prop section of interest, then the radial deformations and misalignments are calculated using the mathematical functions. The special device was developed for the implementation of such measurements.*
Key words: *hydraulic prop, power cylinder, rod and cylinder misalignment, cylinder radial deformations, tightness.*

По результатам статистики работы комплексно-механизированных забоев на угольных предприятиях России [1] прослеживается направление уменьшения их количества с одновременным увеличением общей добычи из этих забоев.

Ранее рядом авторов [2–5] проводился анализ и классификация факторов, влияющих на работоспособность гидростоек механизированных крепей в комплексно-механизированных забоях, что особенно важно для поддержания рабочего пространства лавы и управления горным давлением.

Проводились также теоретические исследования механизмов деформирования рабочих цилиндров под действием давления рабочей жидкости, конструктивных особенностей гидростоек, и внецентренным приложением внешней нагрузки [2–3], вызванной расположением гидростойки в механизированной крепи под углом к плоскости пласта.

Проводилось также ряд экспериментальных работ по влиянию внешних факторов (динамические нагрузко во время проявления резких осадок кровли [6–13], резонансные явления в гидросистеме механизированной крепи, низкочастотные воздействия на крепь при обрушениях основной и непосредственной кровель [14–17]) на образование герметизируемых зазоров в местах расположения манжетных уплотнений.

Одним из эффективных технических решений уменьшения герметизируемого зазора является специальное исполнение поршней адаптивного типа [18–19].

Для более точной оценки зазоров между поршнем и рабочим цилиндром, с целью подбора необходимых параметров уплотнительных элементов был разработан способ измерений деформаций гидростоек под нагрузкой [20].

Силовой цилиндр (гидростойка) (рис. 1) с рабочим цилиндром 1, штоком 2, поршнем с манжетой устанавливается на стенде 5 с направляющими 12 и нагрузочным устройством 8, через которое прикладывается внешняя нагрузка *P*.

Для интересующего нас поперечного сечения гидростойки устанавливаются четыре индикатора 3, расположенные по взаимно перпендикулярным направлениям (рис. 2, 3). При этом расположение индикаторов вокруг внешней поверхности рабочего цилиндра может быть произвольным, в зависимости от расположения на гидростойке трупроводов, бобышек, клапанов, грузовых устройств и проч. Варианты размещения измерительных устройств приведены в работах [19–24].

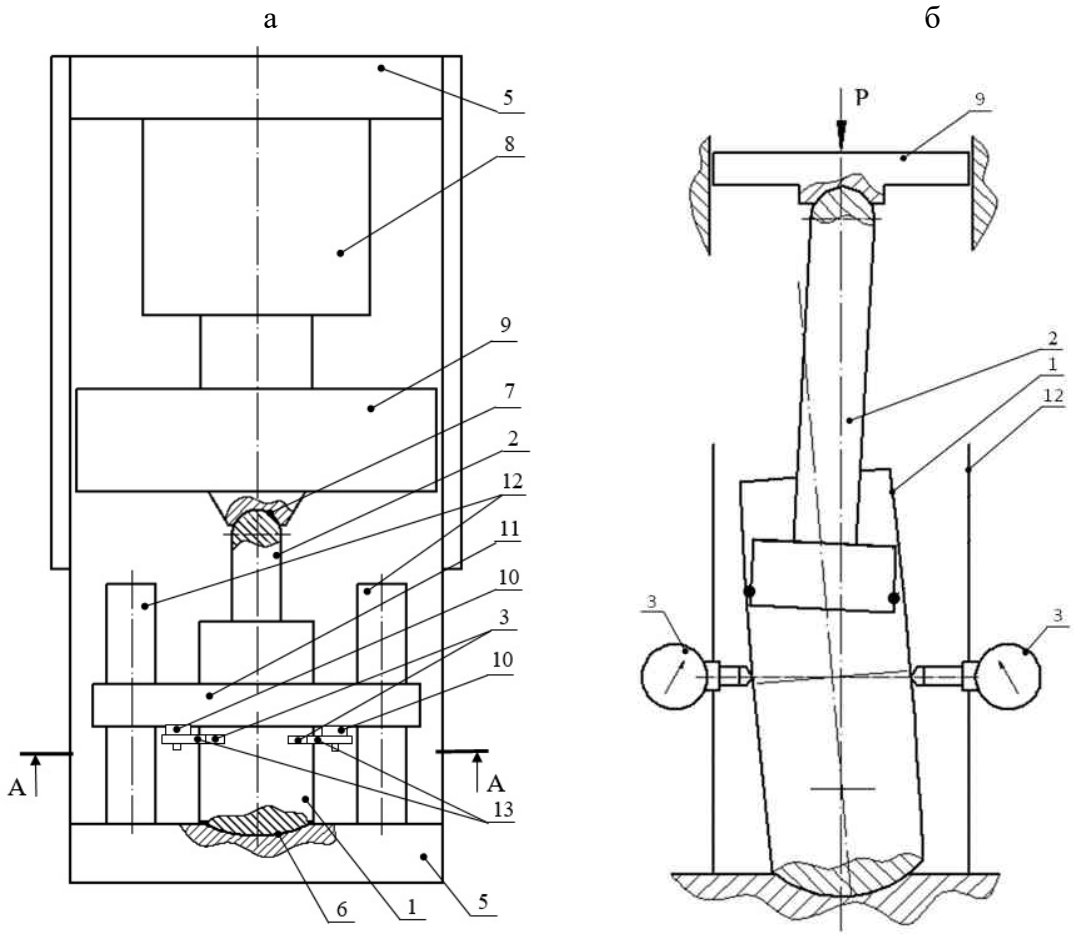


Рис. 1. Установка гидростойки на стенде (а) и схема образования перекоса цилиндра и штока (б)

Показания индикаторов фиксируют до и после приложения внешней нагрузки P на гидростойку, после чего по разнице показаний индикаторов δ_1, δ_2, δ_3 и δ_4 производят расчёт углов перекоса α_x и α_y штока и цилиндра по направлениям осей x и y из приведённым ниже зависимостей:

$$\delta_1 - \delta_3 = 2L\left[sin(\alpha_x) + \left(1 - cos(\alpha_x)\right)tg(\alpha_x)\right]$$

$$\delta_2 - \delta_4 = 2L\left[sin(\alpha_y) + \left(1 - cos(\alpha_y)\right)tg(\alpha_y)\right]$$

где L – расстояние от шарнирной опоры цилиндра 1 до плоскости измерения.

Далее по найденным значениям α_x и α_y определяют радиальные деформации рабочего цилиндра dR_x и dR_y в направлении осей x и y:

$$\delta_3 = L\,sin(\alpha_x) + (R + dR_x)[cos(\alpha_x) + sin(\alpha_x)tg(\alpha_x)] + L[1 - cos(\alpha_x)]tg(\alpha_x) - R$$

$$\delta_4 = L\,sin(\alpha_y) + (R + dR_y)[cos(\alpha_y) + sin(\alpha_y)tg(\alpha_y)] + L[1 - cos(\alpha_y)]tg(\alpha_y) - R$$

где R – радиус рабочего цилиндра перед приложением внешней нагрузки.

После некоторых преобразований из последних двух уравнений можно выразить зависимости изменения радиуса внешней поверхности рабочего цилиндра:

а б

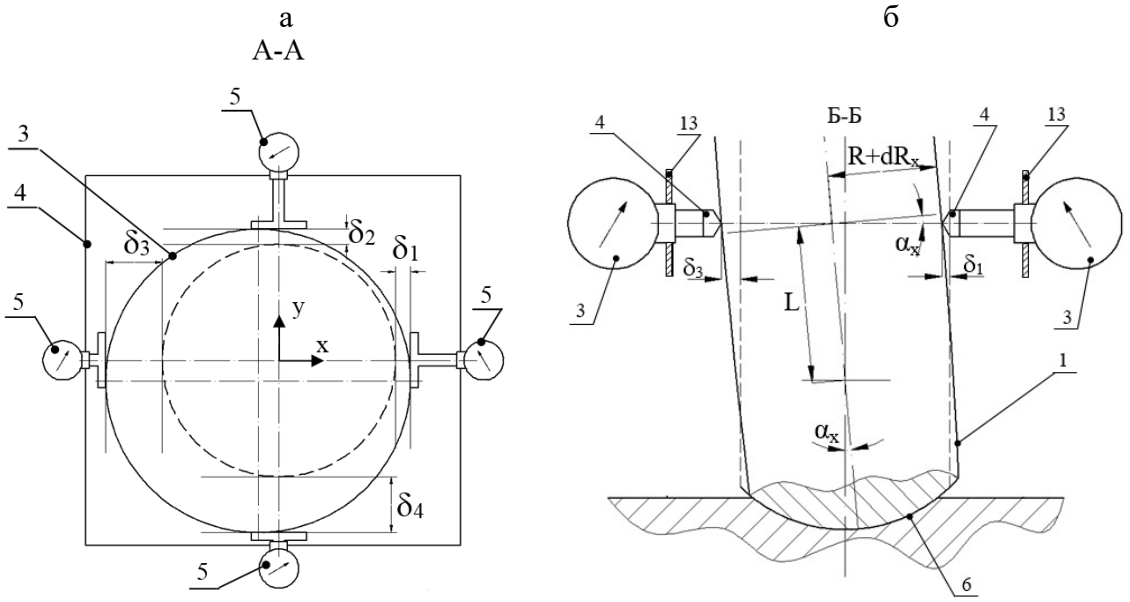


Рис. 2 – Разрез А-А на рис. 1 и схема установки измерительных элементов (а); схема для опредеделения деформаций рабочего цилиндра и перекосов штока (б)

а б

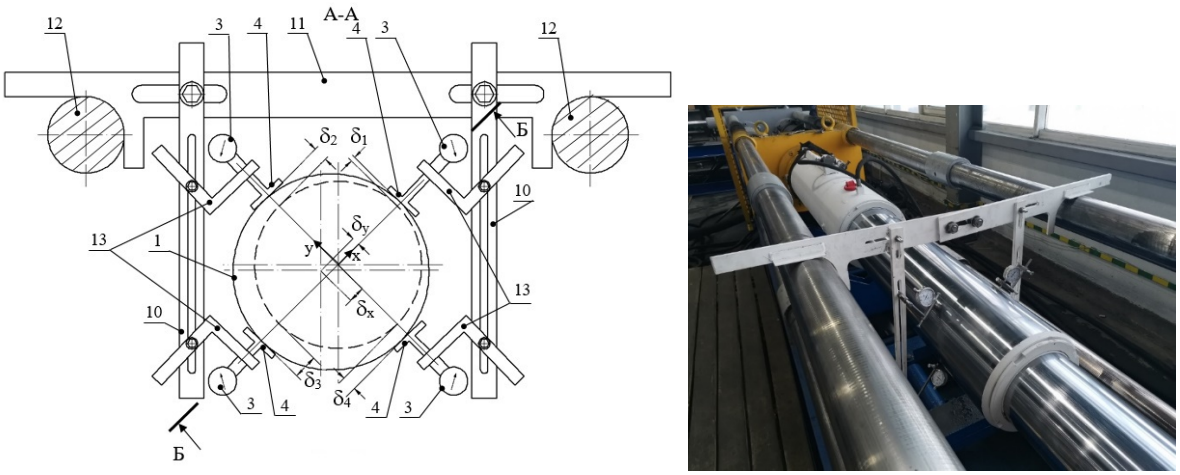


Рис. 3 – Измерительное приспособление (а) и его установка на стенде (б)

$$dR_x = \frac{\delta_3 - L\,tg(\alpha_x)}{cos(\alpha_x) + sin(\alpha_x)tg(\alpha_x)} - R\left(1 - \frac{1}{cos(\alpha_x) + sin(\alpha_x)tg(\alpha_x)}\right);$$

$$dR_y = \frac{\delta_4 - L\,tg(\alpha_y)}{cos(\alpha_y) + sin(\alpha_y)tg(\alpha_y)} - R\left(1 - \frac{1}{cos(\alpha_y) + sin(\alpha_y)tg(\alpha_y)}\right).$$

В этих выражениях вторые слагаемые имеют числовые значения на несколько порядков меньше по отношению к первым слагаемым, что свидетельствует о фактической независимости радиальных деформаций от радиуса рабочего цилиндра.

Абсолютные деформации рабочего цилиндра и углы перекоса, а также их направления в пространстве определяют векторным сложением полученных выше величин.

На рис. 3 приведено расположение в измерительном устройстве индикаторов для определения деформаций рабочего цилиндра гидростойки и расположение

измерительного устройства на гидростойке при производственных испытаниях на стенде в заводских условиях.

Предложенный способ измерений деформаций рабочего цилиндра и перекосов штока и цилиндра позволяет достоверно определить их реальные значения для принятия последующих решений по подбору и расчёту уплотнительных элементов.

Список литературы: 1. Итоги работы угольной промышленности России за январь–декабрь 2020 года / Таразанов И. Г., Губанов Д. А. // Уголь. – 2021. – № 3. – С. 27–43. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-3-27-43. **2.** Разработка модели для исследования шахтных гидравлических стоек двойной раздвижности / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Увакин С. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S65. – С. 21–28. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-65-21-28. **3.** Исследование радиальных деформаций гидростоек двойной гидравлической раздвижности / Бяков М. А., Буялич Г. Д., Буялич К. Г., Увакин С. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 1. – С. 133–140. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-133-140. **4.** Классификация факторов, оказывающих влияние на работу манжетных уплотнений гидростоек механизированных крепей / Бяков М. А., Буялич Г. Д., Буялич К. Г. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 12 (S65). – С. 29–37. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-65-29-37. **5.** Modeling of Hydraulic Power Cylinder Seal Assembly Operation / Buyalich G. D., Buyalich K. G. // Mining 2014 : Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control : Chinese Coal in the Century: Mining, Green and Safety, China, Qingdao, 17–20 October 2014. – Amsterdam – Paris – Beijing : Atlantis Press, 2014. – P. 167–170. – (Advances in Engineering Research, ISSN 2352-5401). – ISBN 978-94-62520-28-8. **6.** Буялич, Г. Д. Оценка характера взаимодействия крепи с труднообрушаемой кровлей // Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых : сб. науч. тр. / Ассоциация «Кузбассуглетехнология». – Кемерово, 1995. – № 9. – С. 35–37. **7.** Буялич, Г. Д. Экспериментально-теоретическая оценка и обоснование параметров механизированных крепей для сложных горно-геологических условий пологих угольных пластов : автореферат дис. … док-р техн. наук : 05.05.06 / Буялич Геннадий Даниилович. – Кемерово, 2004. – 32 с. **8.** Контактное и силовое взаимодействие механизированных крепей с боковыми породами / Александров Б. А. , Буялич Г. Д. , Антонов Ю. А. , Шейкин В. И. . – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003. – 130 с. **9.** Особенности взаимодействия механизированных крепей с боковыми породами в сложных горно-геологических условиях пологих и наклонных пластов / Александров Б. А. , Буялич Г. Д. , Антонов Ю. А. , Леконцев Ю. М. , Лупий М. Г. . – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. – 144 с. **10.** Исследование работы предохранительного клапана ЭКП в период резких осадок кровли / Буялич Г. Д., Леконцев Ю. М. , Александров Б. А. // Механизация горных работ : межвуз. сб. науч. тр. / Кузбас. политехн. ин-т. – Кемерово, 1978. – Вып. 2. – С. 49–55. **11.** О направлении снижения напряженно-деформированного состояния призабойной зоны угольного пласта / Буялич Г. Д., Антонов Ю. А., Шейкин В. И. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S2 : Горное машиностроение. – С. 198–202. **12.** Влияние начального распора механизированной крепи на частоту и интенсивность резких осадок кровли / Александров Б. А., Буялич Г. Д., Антонов Ю. А. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2002. – № 6. – С. 21–22. **13.** Механизм взаимодействия механизированных крепей с кровлями угольных пластов / Буялич Г. Д., Антонов Ю. А., Шейкин В. И. // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S3 : Горное машиностроение. – С. 122–125. **14.** Моделирование динамических колебаний блока кровли / Буялич Г. Д., Буялич К. Г., Умрихина В. Ю. // Инновации в технологиях и образовании : сб. ст. VII Между-нар. науч.-практ. конф., Белово, 28–29 марта 2014 г. в 4 ч. Ч. 1 / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово, Велико Тырново : Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия, 2014. – С. 115–119. **15.** О форме динамических колебаний блока кровли при реакции крепи в виде сосредоточенной силы / Буялич Г. Д., Буялич К. Г., Умрихина В. Ю. // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф., Прокопьевск, 4–5марта.2014 г. – Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2014. – С.133–134. **16.** О динамических колебаниях блока кровли при реакции крепи в виде распределенной нагрузки / Буялич Г. Д., Буялич К. Г., Умрихина В. Ю. // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : сб. тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 7–10 окт. 2014 г. [Электронный ресурс] – Кемерово : СО РАН, КемНЦ СО РАН, ИУ СО РАН, Кузбас. гос. техн. ун-т, ООО КВК «Экспо-Сибирь», 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD–ROM). – Загл. с этикетки диска. – ISBN 978-5-902305-42-2. – С. 108–110. **17.** К вопросу о частотах колебаний пород основной кровли при вторичных обрушениях / Фофанов А. А., Дырдин В. В. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 3. – С. 9–12. **18.** Гидравлическая стойка шахтной крепи : пат. на полезную модель РФ 191999 U1 / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Увакин С. С., Умрихина В. Ю. ; КузГТУ, 29.08.2019. **19.** Гидравлическая стойка шахтной крепи : пат. на изобретение РФ 2702781 C1 / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Увакин С. С., Умрихина В. Ю.; КузГТУ, 11.10.2019. **20.** Способ определения деформаций гидроцилиндра под нагрузкой с шарнирными опорами штока и цилиндра : пат. на изобретение РФ 2708915 C1 / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Хуснутдинов М. К., Ананьев К. А., Увакин С. В., Умрихина В. Ю., Анучин А. В. ; КузГТУ; 12.12.2019. **21.** Стенд для определения радиальных деформаций гидроцилиндра под нагрузкой : пат. на полезную модель РФ 194631 U1 / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Хуснутдинов М. К., Ананьев К. А., Увакин С. В., Умрихина В. Ю., Анучин А. В. ; КузГТУ, 17.12.2019. **22.** Стенд для определения радиальных деформаций гидроцилиндра под нагрузкой : пат. на полезную модель РФ 194767 U1 / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Хуснутдинов М. К., Ананьев К. А., Увакин С. В., Умрихина В. Ю., Анучин А. В. ; КузГТУ, 23.12.2019. **23.** Стенд для определения радиальных деформаций гидроцилиндра под нагрузкой : пат. на полезную модель РФ 194863 U1 / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Хуснутдинов М. К., Ананьев К. А., Увакин С. В., Умрихина В. Ю., Анучин А. В. ; КузГТУ, 25.12.2019. **24.** Стенд для определения радиальных деформаций гидроцилиндра под нагрузкой : пат. на полезную модель РФ 195048 U1 / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Хуснутдинов М. К., Ананьев К. А., Увакин С. В., Умрихина В. Ю., Анучин А. В. ; КузГТУ; 14.01.2020.

ПЕРСПЕКТИВЫ И ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Великородный С.Д., Семенов А.Н.
(РГАТУ имени П. А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия)
Тел.: +7 (4855) 222334; E-mail:semenov.an@mail.ru

***Abstract**: The analysis of the experience of foreign companies in the production of aircraft engine parts from composite materials is carried out. Promising technologies for manufacturing parts and the effects of their use in modern engines are considered..*
***Key words:** Engine, polymer composites, fan, strength*

В настоящее время в гражданской и военной авиации широко применяют новые конструкционные материалы, существенно повышающие экономическую эффективность их изготовления и использования. В частности, эта тенденция относится к области конструирования двухконтурных двигателей, обеспечивая снижение массы двигателя и самолета в целом, поскольку избыточный вес летательного аппарата влечет увеличение расхода топлива и снижение веса полезной нагрузки.

В мировой практике двигателестроения все шире применяются конструкции частей двухконтурных двигателей из композиционных материалов: мотогондолы, корпуса вентилятора, лопатки и др. Особенно актуальным является уменьшение массы корпуса вентилятора, обеспечивающего безопасность и надежность конструкции для защиты фюзеляжа от разрушения при обрыве или повреждении лопаток, поскольку он характеризуется максимальным объемом конструкционного материала и соответственно, большим весом [1].

В настоящее время корпусы вентиляторов двухконтурных газотурбинных двигателей в основном изготавливают из алюминиевых и титановых сплавов, имеющих большую стоимость и массу. Поэтому ведущие иностранные фирмы все шире применяют композиционные полимеры в конструкциях планеров и двигателей. Целесообразность их применения определяется весовым совершенством конструкций и минимальной радиолокационной заметностью. Использование композитов в силовых конструкциях планеров обеспечивает высокий уровень надежности при ресурсе не менее 50000 летных часов.

Например, General Electric внедрила в конструкции двигателя «GEnx» композиционные материалы для таких деталей как корпус вентилятора и его рабочие лопатки, форсунки, элементы камеры сгорания, направляющие аппараты компрессора низкого давления (рис.1). Двигатели семейства LEAP (рис. 2), разработанные фирмой CFM, также имеют композитный вентилятор, диаметр которого составляет 1,68 м, что позволило увеличить топливную эффективность по сравнению аналогичными силовыми установки на 15 процентов. Фирма Rolls Royce начала проектирование крупнейшего двигателя для коммерческих самолетов, у которого диаметр вентилятора будет равен 3,55 м. По данным производителя, первое поколение UltraFan будет на 25% более экономичным, чем его аналог Trent.

В России подобные технологии начинают разрабатывать крупнейшие предприятия АО «Объединенная двигателестроительная корпорация»: ПАО «ОДК-Сатурн», завод "Машиностроитель", АО «ОДК-Авиадвигатель» ОАО "Искра" и многие другие.

Рис. 1. Двигатель General Electric «GEnx»

Рис. 2. Двигатель консорциума «CFM LEAP»

Основной проблемой в создании конструкций двигателей из композиционных материалов является обоснованный выбор способа формования. Для изготовления корпуса вентилятора фирма General Electric использует трансферный метод формования, в котором при изготовлении армирующей структуры применяется триаксиальная плетеная лента большой ширины с использованием технологии «Megabraiders™» фирмы «A&P Technology» (рис. 3). Для плетения используется радиальноое плетение машиной, имеющей 400 – 800 веретен. Преформа изготавливается в виде рукава, который впоследствии разрезается (рис. 4), затем наматывается для формования на внутреннюю оправку оснастки. Пропитка преформы связующим осуществляется методом RTM в металлической формообразующей оснастке [2].

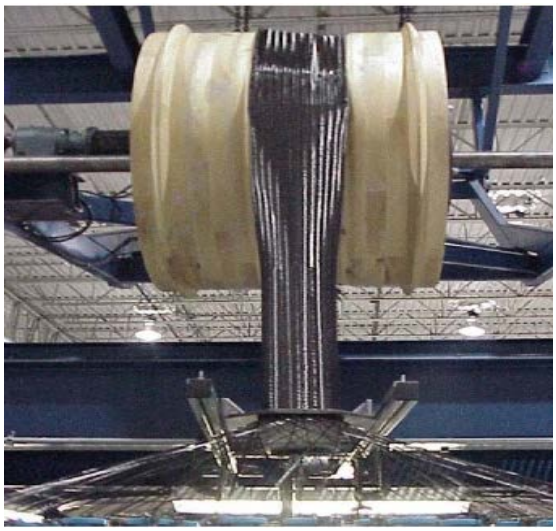


Рис. 3. Процесс плетения рукава

Рис. 4. Триаксильная плетеная лента

Используемые композиционные материалы состоят из двух и более компонентов, образующих монолитную систему с четкой границей раздела между ними. Обычно один компонент образует сплошную фазу и называется матрицей. Другой компонент является армирующим элементом или наполнителем, воспринимающим основные нагрузки и обеспечивающим эксплуатационные

свойства. Для создания прочной связи между волокнами и связующим используется аппретирование - нанесение веществ, повышающих прочность адгезионных связей между компонентами и смачиваемость волокон связующим [3].

Наиболее широко в качестве армирующего наполнителя используют углеродные волокна, которые обладают уникальными механическими и физико-химическими свойствами, такими как:

- низкие: плотность от 1,43 до 2,0 г/см^{3,} коэффициент термического расширения (от -1,5 до 0,5) х10^{-6} 1/°С, коэффициент трения, ползучесть;
- высокие: удельная прочность, теплостойкость, стойкость к атмосферным воздействиям и химическим реагентам, усталостная и радиационная прочность.

Углеволокна для изготовления деталей могут использоваться в виде:

- однонаправленных нитей;
- лент;
- ровингов;
- тканей саржевого плетения толщиной от 0,2 до 0,35 мм.

Механические свойства отечественных и зарубежных углеродных волокон (УВ) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Механические свойства углеродных волокон

Марка УВ	Плотность, р,г/см3	Модуль упругости, ГПа	Прочность$\sigma_в$, ГПа	Предельная деф. ε, %
Россия				
ВМН-4	1,71	270	2,21	0,8
Кулон	1,9	400...600	2,0	0,4
ЛУ-4	1,7	250	3,0-3,5	1,3
Урал-24	1,7...1,8	150-200	1,7-2,0	1,1
Элур	1,6	150	2,0	1,3
США				
Форнел -800	1,8	273	5,46	2,0
(HMS	1,8	245-390	2,3	0,6-0,9
Целион G4-70	1,77	530	1,9	0,38
Целион ST	1,77	235	4,34	1,8
Фортафил 5Ф	-	270	2,76	1,0
Хитекс 46HS	1,8	322	5,6	1,7
Япония				
Карболон-L	1,95	380	2,42	0,6
Бесфайт НМ-4S	-	450	1,8	0,35
Торейка	1,8	300	5,6	1,9
М-50	1,9	500	2,35	0,5
Великобритания				
Графил	1,88	365-400	2,00	0,5-0,7
Модмор-1	2,0	400-450	1,7-2,5	0,5
АЕ-1	1,99	407	1,74	0,4
Франция				
Регилор AG	2,0	420	1,9	0,45
Регилор АС	1,75	200	2,0	1,5

Фирма CFM для изготовления корпуса вентилятора двигателя LEAP применяет трансферный метод формования, а для изготовления армирующей преформы использована технология трехмерного ткачества (рис. 5). Компания Rolls

Royce для изготовления композитного корпуса вентилятора двигателя UltraFan выбрала метод роботизированной выкладки из лент препрега. Автоматизированная выкладка осуществляется двумя многоосевыми манипуляторами на позитивную формообразующую оснастку (рис.6).

Рис. 5. Изготовление преформы корпуса вентилятора LEAP

Рис. 6. Робототизированная выкладка корпуса вентилятора двигателя UltraFan

В отечественном двигателестроении работы по применению композиционных материалов в конструкциях газотурбинных двигателей также начали активно проводиться. Альтернативными для вышеуказанных технологий являются поверхностное оплетение и лебедочная обмотка. Первый процесс характеризуется большой трудоемкостью и требует крупногабаритного оборудования. При лебедочной обмотке трубчатый рукав, заранее изготовленный на машине радиального плетения, наматывается слоями на вращающуюся внутреннюю оправку и, в последующем, пропитывается связующим, отверждается и механически обрабатывается. Также не менее важным является выбор оптимального направления намотки по направлениям относительно оси. По одной из схем намотки слоёв может использоваться принцип симметричной укладки и разнесения стыков.

Таким образом, в этой области отечественные компаниями ВИАМ, ЦИАМ, ОАО «НПО «Сатурн» и др. активно ведут работы по внедрению перспективной технологии изготовления элементов ГТД из композиционных материалов, что позволит успешно конкурировать на международном рынке авиационной техники [4].

Список литературы: **1.** Beine, C. NDT for CFRP Aeronautical Components A Comparative Study [Электронный ресурс]. **2**. C. Beine, U. Netzelmann, F. Porsch, S.V. Ramanan, M. Schulze, A. Bulavinov, H. Heuer // 2nd International Symposium on NDT in Aerospace [Электронный ресурс]. **3.** Петрова Г. Н., Бейдер Э. Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов. М.: Российский химический журнал, Т. LIV №1, 2010. [G. N. Petrova, E. Y. Beyder., Structural based materials reinforced thermoplastics. (in Russian). Moscow: Russian Chemical Magazin , т. LIV №1, 2010.] **4.** Крутилин С.Г., Кожина Т.Д. Особенности технологического процесса изготовления деталей компрессоров авиационных ГТД из полимерных композиционных материалов // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А Соловьева, 2014. - № 1 (28).

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ И СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕЙ

Веремейчик А.И. *(БрГТУ, г. Брест, Беларусь)*
Тел./ факс: +375-162-32-17-53; E-mail: vai_mrtm@tut.by

Abstract: *The process of surface plasma hardening of the cutting part of the shredder of a crushing machine by a moving plasma jet was simulated in the ANSYS Workbench 2019 R2 software package. The temperature fields and the stress-strain state of the shredder model under its temperature loading by a concentrated heat source at various process parameters are determined.*
Keywords: *shredder, quenching, plasma, temperature field, stress, deformation, head flux.*

Термическое упрочнение режущего и дробильного инструмента является одним из наиболее эффективных и действенных способов увеличения ресурса работы нагруженных элементов машин и механизмов, а также снижения их материалоемкости. Проведенный анализ и эксперименты позволяют выделить из способов термического упрочнения поверхностную закалку деталей при помощи движущейся плазменной струи [1], которая состоит в нагреве поверхностного слоя до аустенитного состояния и быстрого охлаждения с целью получения высокой твердости, износостойкости прочности в поверхностном слое в сочетании с вязкой сердцевиной. Нагрев и охлаждение металла при термической обработке вызывает появление внутренних термических напряжений в детали. Величина и характер распределения этих напряжений изменяются в течение процесса нагрева или охлаждения. Основная причина возникновения термических напряжений – неодинаковые скорости нагрева или охлаждения различных объемов изделия. Временные (соответствующие определенному моменту сремени) и остаточные (сохраняющиеся после полного выравнивания температур) структурные термические напряжения могут привести к образованию дефектов в подвергающихся термообработке изделиях. Цель работы состоит в теоретическом исследовании температурных полей и термонапряжений в измельчителе дробильной машины при его поверхностной плазменной закалке.

Измельчитель представляет собой усеченную пирамиду из конструкционной легированной стали 40Х (рисунок 1).

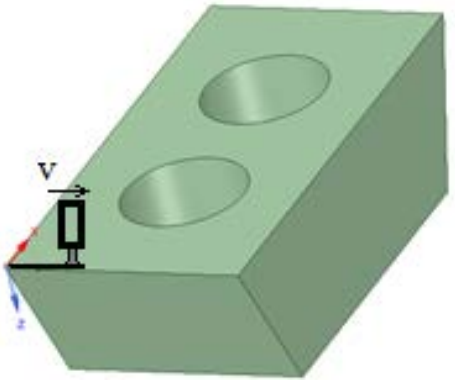


Рис. 1. Измельчитель дробильной машины

Рис. 2. Схема теплового нагружения измельчителя

В процессе изготовления деталь подверглась предварительной объемной закалке. Визуальные обследования после ее эксплуатации показали ряд типичных дефектов – поверхностная коррозия металла, затупление, растрескивание и

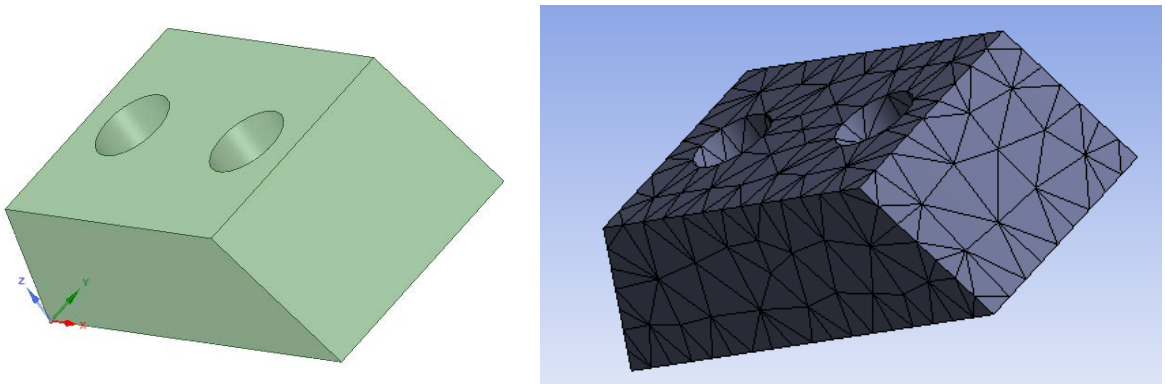
выламывание режущей кромки, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне [2]. Для повышения срока службы измельчителя предлагается использовать поверхностную закалку рабочей зоны плазменной струей.

Для разработки оптимальных режимов термообработки проведено исследование температурных полей и остаточных напряжений при закалке режущей кромки измельчителя. Для расчетов использовался конечно-элементная расчетная платформа ANSYS Workbench. Модуль управления материалами в ANSYS Workbench 2019 R2 представлен элементом Engineering Data, входящим в структуру блока инженерного анализа. Все физико-механические и термодинамические свойства материала, зависящие от температуры, задавались в табличном виде (таблица 1).

Таблица 1. Физико-механические и термодинамические характеристики стали 40Х

Свойства	**Температура, °С**									
	20	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**	**600**	**700**	**800**	**900**
Модуль упругости E, ГПа	214	211	206	203	185	176	164	143	132	-
Модуль сдвига G, ГПа	85	83	81	78	71	68	63	55	50	-
Коэффициент Пуассона υ	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Плотность $\rho_п$, кг/м^3	7850	-	7800	-	-	7650	-	-	-	-
Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м*К)	41	40	38	36	34	33	31	30	27	-
	20-100	**20-200**	**20-300**	**20-400**	**20-500**	**20-600**	**20-700**	**20-800**	**20-900**	**20-1000**
Коэффициент линейного расширения α*10^6, К$^{-1}$	11,8	12,2	13,2	13,7	14,1	14,6	14,8	12,0	-	-
Удельная теплоемкость c, Дж/(кг*К)	466	508	529	563	592	622	634	664	-	-

Построение геометрической модели выполнено с использованием графического модуля ANSYS SpaceClaim. Сетка конечных элементов построена с помощью модуля Mesh. В зоне воздействия источника тепла используется уплотненная сетка. 3D-модель измельчителя и его конечно-элементная модель приведены на рисунке 3.



а) б)

Рис. 3. 3D (а) и конечно-элементная (б) модели измельчителя

Схема нагружения режущей части измельчителя движущимся источником тепла приведена на рисунке 2.

Решение связанной нестационарной задачи теромупругости на базе ANSYS Mechanical Enterprise проводится в два этапа. На первом этапе в модуле Transient Thermal проводится анализ теплового поля на основе решения задачи нестационарной

теплопроводности. Для моделирования распространения температуры вглубь детали создан макрос для ANSYS Mechanical на параметрическом языке программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language). В соответствии со скоростью движения плазменной дуги к узлам конечно-элементной модели вдоль режущего лезвия пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка. Согласно [3, 4], распределение удельного теплового потока в пятне нагрева при действии плазменной струи описывается законом нормального распределения Гаусса:

$$q_z = q_0 \exp\left(-k_0 r^2\right), \quad (1)$$

где q_z – удельный тепловой поток в любой точке пятна нагрева, Вт/м^2; $q_0 = q\dfrac{k_0}{\pi}$ – максимальная плотность теплового потока в центре пятна нагрева, Вт/м^2; k_0 – коэффициент сосредоточенности кривой распределения, характеризующий концентрацию энергии в пятне нагрева и зависящий от его диаметра, 1/м^2; r – расстояние от точки, в которой определяется тепловой поток, до центра пятна нагрева.

Для плазменной струи эффективная тепловая мощность составляет: $q = U \cdot I \cdot h$, где U – напряжение дуги; I – сила тока дуги; h – эффективный КПД процесса плазменного нагрева, учитывающий потери энергии при передаче ее изделию (часть энергии дополнительно расходуется на нагрев анода-сопла). Коэффициент сосредоточенности, зависящий от режима работы плазмотрона и геометрии сопла, имеет большое значение в процессах плазменной закалки, т.к. регулирует скорость нагрева поверхностного слоя металла. В соответствии с [4], теплообмен между плазменной струей и упрочняемой поверхностью происходит в области пятна нагрева с условным диаметром $d = \dfrac{3,46}{\sqrt{k_0}}$, который определяется из условия равенства удельного теплового потока на границе нагрева в 5 % от максимального. Максимальная температура наблюдается в центре на оси плазменного потока, при этом плотность теплового потока может достигать 10^{10} Вт/м^2.

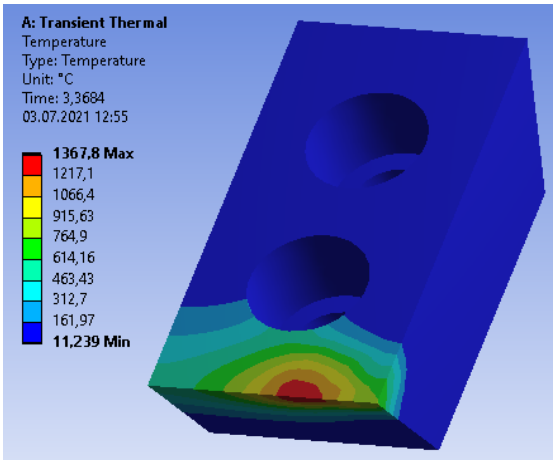
В APDL-макросе для учета температурной нагрузки использовалась следующая зависимость:

$$q\left(x, y, z, t\right) = q_H \exp\left[\left(-\frac{\left(x^2 + \left(y - vt\right)^2\right)}{r_H^2}\right) u\left(z\right)\right], \quad (2)$$

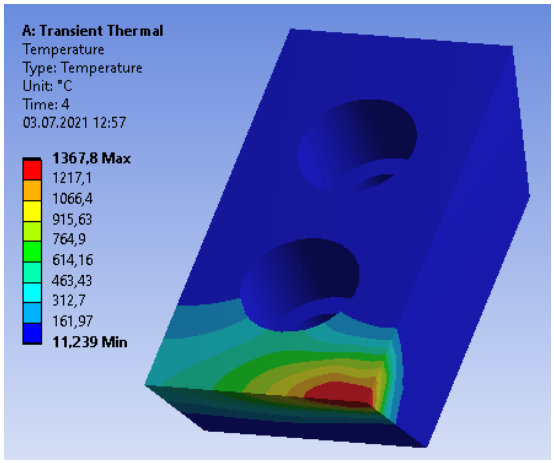
где $q_H = \dfrac{Q}{\pi r_H^2}$; Q – тепловой поток, Вт; $r_H = d/2$ – радиус пятна нагрева, *м*; x, y, z – координаты центра пятна нагрева, м; v – скорость движения источника тепла, м/с.

С учетом того, что температура плазменной струи на расстоянии 50 мм от среза сопла плазмотрона может достигать 6000 °С [3], а температура плавления стали 40Х равна 1420 °С, на всех поверхностях модели измельчителя задавалась конвекция с различными коэффициентами теплоотдачи α=5…30 $\dfrac{Вт}{м^2 \cdot К}$. При задании коэффициента учитывалось, что он зависит от температуры окружающей среды, температуры стенки, формы поверхности, направления теплового потока и т.д. Начальная температура принималась равной 20 $°C$. Скорость движения источника тепла варьировалась в пределах 2…20 мм/с.

В результате теоретических исследований в широком диапазоне параметров получены распределения температурного поля в зависимости от времени. Некоторые результаты приведены на рисунках 4, 5.

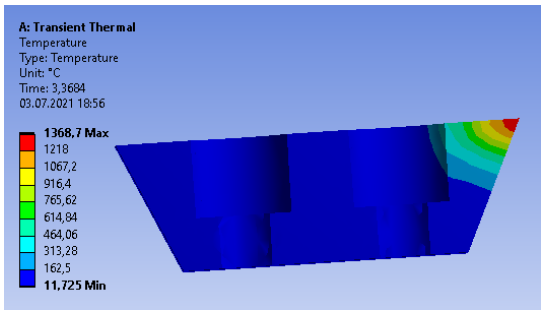


а) t=3,37 с;

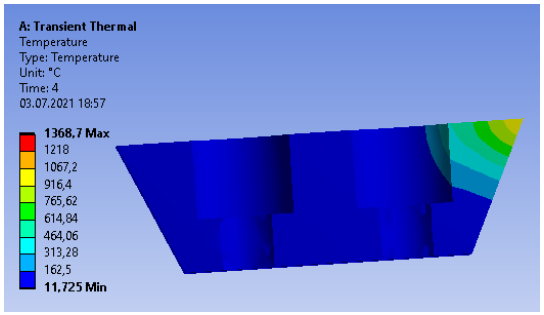


б) t=4,00 с

Рис. 4. Характерное распределение температурного поля в измельчителе при скорости движения источника нагрева v=10 мм/с, $q_H = 7 \cdot 10^9$ Вт/м^2



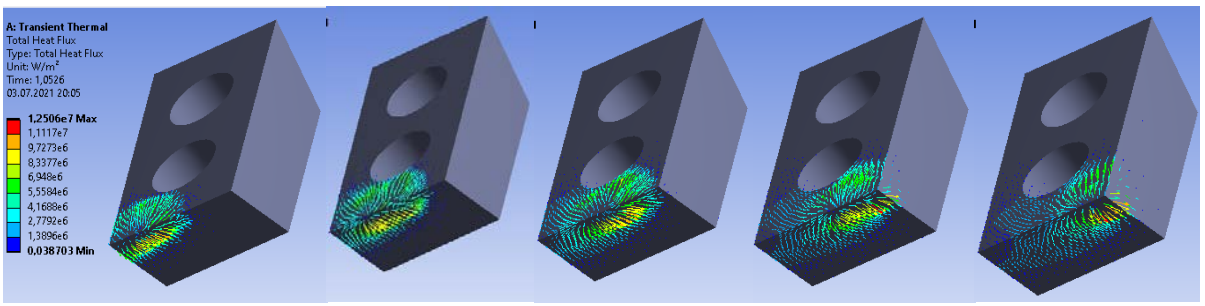
а) t=3,37 с



б) t=4,00 с

Рис. 5. Температурное поле в сечении измельчителя, v=10 мм/с, $q_H = 7 \cdot 10^9$ Вт/м^2

Анализ температурных полей показывает, что при движении источника нагрева точка, в которой возникает максимальная температура, отстает от центра пятна нагрева, в котором плотность теплового потока максимальна. Зона термического воздействия плазменного источника в поперечном сечении имеет форму сегмента. На рисунке 6 приведены результаты исследований распределения векторного поля теплового потока.



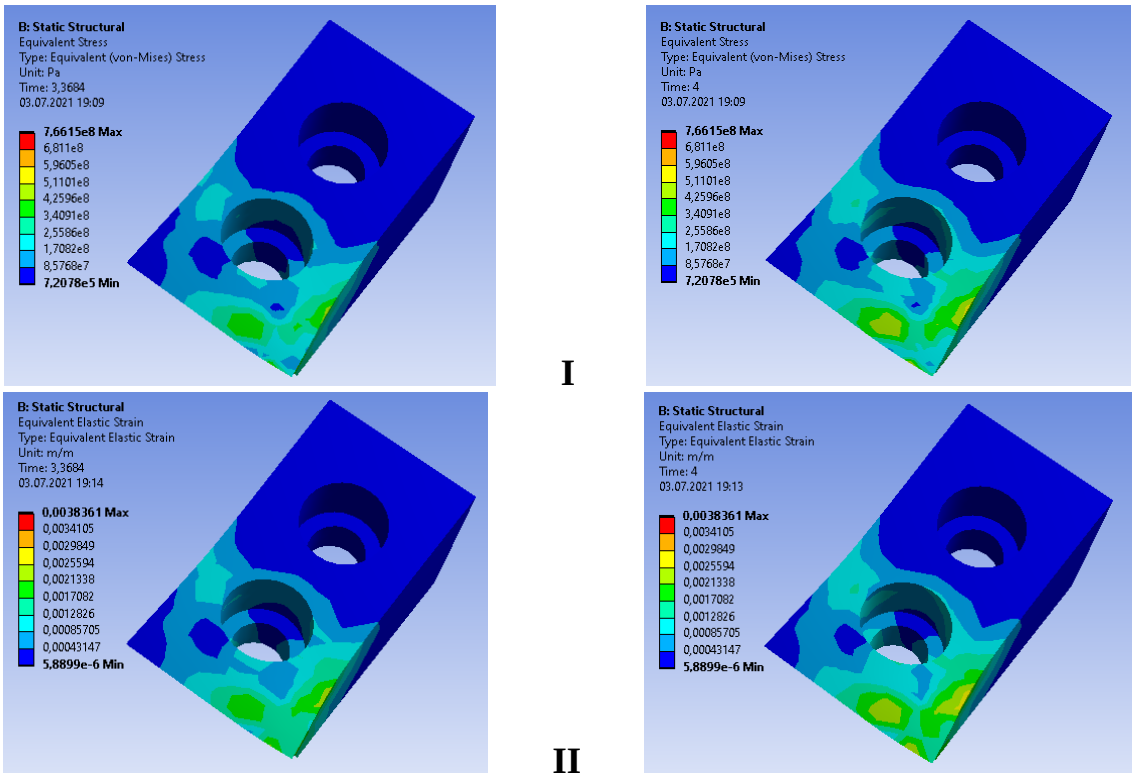
а) t=1,05 с; б) t=1,89 с, м в) t=2,53 с; г) t=3,36 с, д) t=4,00 с

Рис. 6. Распределение векторного теплового потока в измельчителе для различных моментов времени при v=10 мм/с, $q_H = 7 \cdot 10^9$ Вт/м^2

Результаты теплового анализа сохраняются в отдельный файл и используются при проведении статического анализа (определении напряженно-деформированного состояния) модели в качестве внешней нагрузки.

На втором этапе в модуле Static Structural на базе ANSYS Mechanical решается связанная задача термоупругости по исследованию напряженно-деформированного состояния в измельчителе при воздействии движущегося концентрированного источника тепла. Граничные условия соответствовали реальным условиям закрепления измельчителя при его термообработке. При исследовании напряжений и деформаций измельчитель закреплялся по верхней плоскости для ограничения перемещения в направлении, перпендикулярном направлению движения струи, и по отверстиям для ограничения перемещения в направлении, параллельном его опорной плоскости.

Некоторые результаты статического анализа модели измельчителя при ее температурном нагружении приведены на рисунке 7.



а) t=3,37 с б) t=4,00 с

Рис. 7. Характерное распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (I) и эквивалентных деформаций (II), v=10 мм/с, $q_H = 7 \cdot 10^9$ Вт/м^2

Полученные результаты нестационарного температурного анализа могут быть использованы для определения оптимальных режимов работы и геометрических размеров плазмотронов, позволяющих проводить поверхностную обработку металлоизделий движущейся плазменной струей.

Список литературы: 1. Спиридонов Н.В. и др. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. – Мн.: «Вышэйшая школа». – 1988. – 158 с. **2.** Сазонов М.И. и др. Локальная поверхностная плазменная закалка измельчителя древесных отходов // Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XXVI междунар. научно-техн. конф., Севастополь, 23–29 сентября 2019 г. – Донецк : ДонНТУ, 2019. – С. 386–389. **3.** Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск: ИрГТУ, 2006. – 180 с. **4.** Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. - 296 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ

Веремейчик А.И., Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Сосновский А.А.
(БрГТУ, г. Брест, Беларусь)
Тел./ факс: +375-162-32-17-53; E-mail: vai_mrtm@bstu.by

Abstract: *To increase the service life of the cutting and crushing tools, various methods of heat treatment are used. The analysis of the methods and experiments carried out allow us to distinguish from these methods the surface hardening of parts using a moving plasma jet, the use of which allows us to implement the process of hardening the parts only to an insignificant depth, leaving the plastic core of the part. The study of the influence of this type of heat treatment on the wear resistance of shredders of a crushing machine is carried out.*
Keywords: *wear resistance, crushing machine, shredder, surface hardening, plasma.*

При использовании установок (машин) для дробления древесных отходов мебельного и других производств применяются детали (измельчители) в виде усеченной пирамиды из стали 40Х после объемной закалки. В процессе эксплуатации эти детали подвергались механическому изнашиванию и воздействию динамических нагрузок, в результате чего происходил не только интенсивный износ их режущей части, но и выламывание кусков металла размерами до 1–2 см [1]. Такой вид разрушения характерен при упрочнении деталей объемной закалкой и обусловлен возникновением в металле значительных механических напряжений и охрупчивания стали. Чтобы исключить возникновение таких дефектов в материале предложено осуществлять упрочнение измельчителей, в частности их режущей кромки, поверхностной плазменной закалкой (ППЗ).

Для осуществления процесса упрочнения сначала осуществляли групповую ППЗ заготовок измельчителей с помощью плазменной установки. При осуществлении процесса ППЗ заготовки укладывали так, что их предполагаемые режущие кромки располагались на одной линии. Для достижения высокой производительности групповую ППЗ осуществляли по 40-50 деталей в течение 12-17 минут. Процесс ППЗ производили в двух вариантах: упрочнение без перекрытия зоны влияния плазменной струи (с зазором 1,5 мм между упрочненными зонами) и с перекрытием зоны влияния плазменной струи на 30%. В первом варианте формировали по 4–5 дорожек, во втором по 6–7 дорожек. Эксперименты показали, что срок эксплуатации измельчителей, упрочненных по второму варианту на 10% выше. Это связано с тем, что перекрытие дорожек зоны теплового воздействия плазменной струи существенно повышает трещиностойкость и ударную вязкость деталей, при этом несколько снижается износостойкость. Снижение износостойкости вызвано не наличием зоны отпуска, которое здесь имеет место, а снижением микротвердости упрочненной поверхности из-за повторного нагрева детали. Повышение трещиностойкости можно объяснить только повышенной пластичностью сталей с структурой отпуска. Образованная в этой зоне троосто-сорбитная структура вследствие воздействия плазменной струи характеризуется высокой степенью дисперсности. Такой вариант ППЗ играет более значительную роль в случае воздействия динамических нагрузок на деталь, чем вариант без перекрытия.

Для ППЗ измельчителей принят вариант с 30% перекрытием зоны влияния плазменной струи. После ППЗ осуществлялась механическая заточка заготовок для образования режущей кромки измельчителей. ППЗ измельчителей производиась при постоянном расстоянии среза сопла плазмотрона до поверхности детали (h=1,5–2 мм), скорости перемещения плазмотрона v = 11,2 мм/с, токе дуги I = 26 А, расходах рабочего газа аргона Q_{Ar} = 1,9 л/мин и защитного газа аргона Q_{Ar} = 3,6 л/мин. При этом

достигается существенно большая микротвердость поверхностного слоя (710 $HV_{0.1}$) по сравнению с объемной закалкой (450 $HV_{0.1}$).

Проведены натурные производственные испытания измельчителей дробильной машины на износостойкость. Известно, что долговечность и износостойкость поверхностного слоя изделий в основном зависят от характера распределения микротвердости по глубине слоя в пределах допуска на износ. Например, при абразивном механизме изнашивания изделий параметры микротвердости и износостойкости хорошо согласуются между собой. Измельчитель для дробления древесных отходов подвергается абразивному износу и воздействию ударных нагрузок. Поэтому те свойства, которые приобретает изделие при поверхностном упрочнении с помощью плазменной дуги, позволяют существенно увеличить его долговечность.

Для определения степени износа выбирались две партии по пять деталей, упрочненных объемной закалкой и с помощью плазменной струи, которые соответствовали следующему времени эксплуатации: № 1 – базовая деталь (неэксплуатируемая); № 2 – после месячной эксплуатации; № 3, 4, 5 – после 2-х, 3-х, 4-х месячной эксплуатации соответственно.

Сравнительные измерения профиля детали выполнялись на измерительном комплексе с лазерным сканированием Mistral 070705 фирмы BROWN&SHARPE с программным обеспечением PC-DMIS PRO Software, позволяющего производить контроль в 3D с предоставлением протоколов контроля (точность измерения 0,003 мм). По результатам измерений определялась форма детали в формате “igs” и результаты поступали в компьютер на обработку программой SolidWorks, с помощью которой строилась модель детали (рисунок 1).

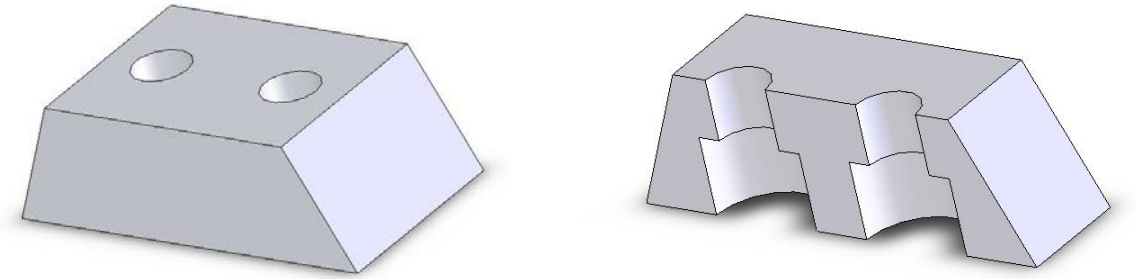


Рис. 1. Компьютерная модель детали

Далее деталь разделялась плоскостями A-D на части, с выделением плоскостью T исследуемого фрагмента (рисунок 2).

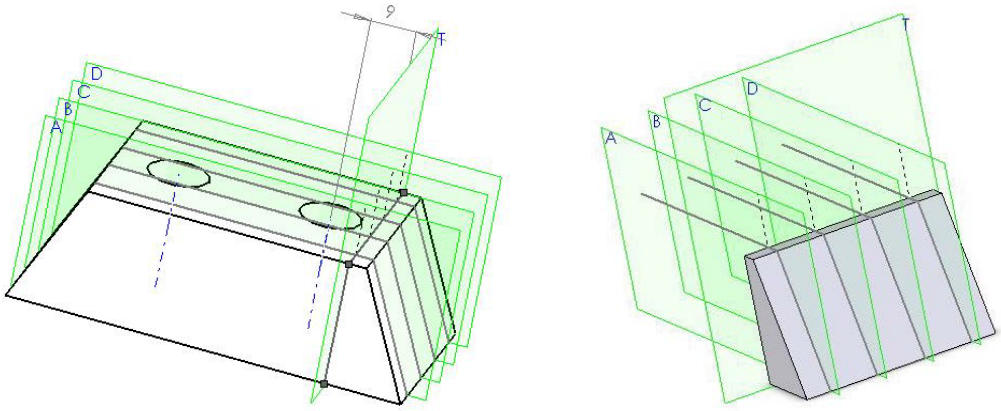


Рис. 2. Положение плоскостей для анализа исследуемого фрагмента

На сгенерированных кривых построена поверхность с помощью техники «вытягивания» профилей (рисунок 3).

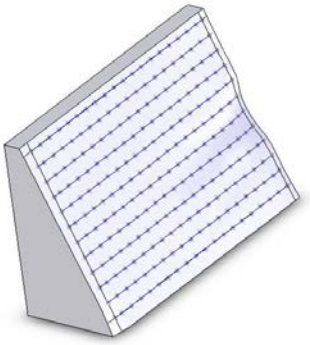


Рис. 3. Поверхность анализируемого фрагмента детали

Основываясь на полученных поверхностях, были построены элементы анализируемых частей детали.

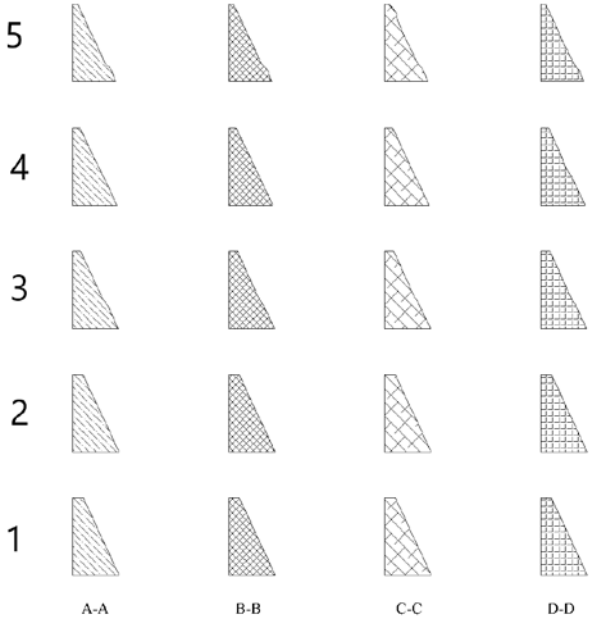


Рис. 4. Плоские элементы деталей 1–5

Используя плоскости A–D, с помощью программы AutoCAD построены плоские элементы соответствующих фрагментов деталей и вычислены поля поверхностей рассматриваемых элементов. Для вычисления параметра износа детали использовалась формула:

$$\Phi_{nm} = \frac{S_{1m} - S_{nm}}{S_{1m}} \cdot 100\% \qquad (1)$$

где Φ_{nm} – относительный процент износа детали, S_{nm} – поле поверхности анализируемого сечения для соответствующей детали n в соответствии с плоскостью m; n – номер детали (n=1–5), m – наименование соответствующей плоскости (m=A–D). Вычисленные по формуле (1) значения сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Относительный износ измельчителя дробильной машины после объемной и поверхностной плазменной закалки

№ Детали	Объемная закалка				Объемная и поверхностная плазменная закалка			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,523	0,373	0,292	0,208	0,515	0,484	0,348	0,222
3	7,329	6,060	5,661	5,153	3,243	2,665	2,142	2,338
4	9,530	9,147	9,313	10,186	4,811	4,711	4,032	4,488
5	17,911	18,154	17,131	18,884	9,710	9,888	9,233	9,953

На основании полученных данных построены графики относительного износа деталей, упрочненных объемной закалкой и поверхностной плазменной закалкой (рисунок 5).

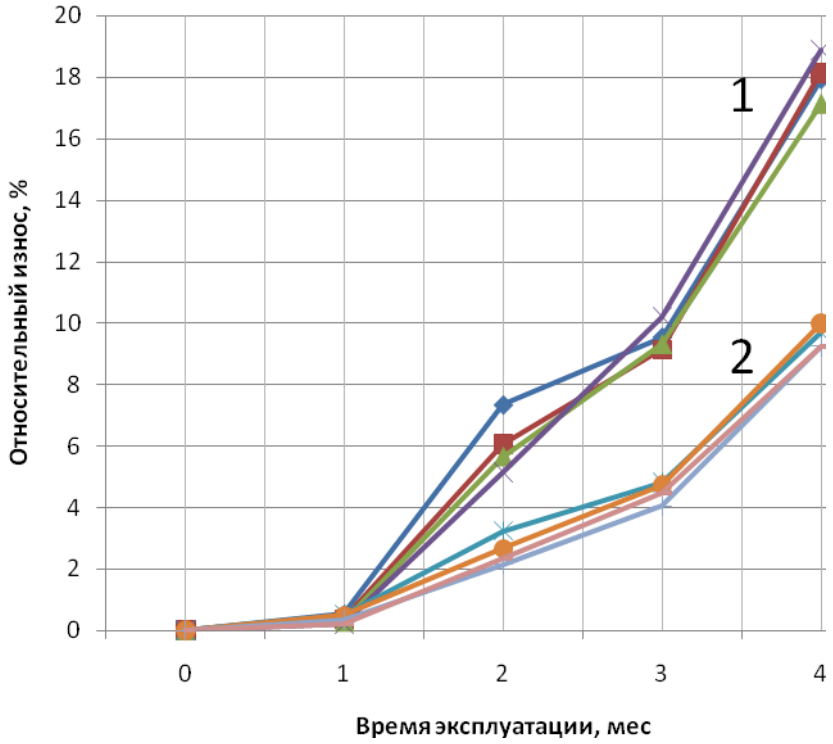


Рис. 5. Графики износа измельчителей из стали 40Х, упрочненных:
1 – объемной закалкой; 2 – объемной и поверхностной плазменной закалкой

Экспериментами установлен значительный эффект применения ППЗ для стали 40Х. В зоне воздействия плазменной дуги микроструктура состоит из однородного высокодисперсного мартенсита, остаточного аустенита и карбидов. Износостойкость измельчителей дробильной машины при использовании локальной ППЗ увеличена более чем в 2 раза по сравнению с объемной закалкой.

Список литературы: 1. Сазонов М.И. и др. Локальная поверхностная плазменная закалка измельчителя древесных отходов // Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XXVI междунар. научно-техн. конф., Севастополь, 23–29 сентября 2019 г. – Донецк : ДонНТУ, 2019. – С. 386–389.

ВЫБОР ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГИПЕРБОЛОИДНОГО ИНСТРУМЕНТА

Витренко В.А., Ефимов А.А., Михайлова А.Д., Черных В.В. *(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*
тел./факс: + 38 (0642) 341826; e-mail:vitrenko.vl@gmail.com

Abstract: *The article investigates different instruments used to produce details in space machine-tools engagement. The surface of such instrument has been defined as an envelope of the detail being treated. The main instrument surface of the proposed instrument coincides with its producing surface.*

Key words: *instrument, linear contact, envelop, sliding speed, mechanical treatment.*

В представленной работе решена актуальная задача определения производящей поверхности инструмента, используемого для обработки деталей типа тел вращения, полученного согласно схеме формообразования третьего класса. Любой инструмент может иметь как точечный, так и линейный характер касания с обрабатываемой деталью [1,3]. Это зависит от схемы формообразования такого инструмента, а также при его изготовлении относительные движения формообразования должны быть такими же, как и при обработке деталей этим инструментом. Кроме того, увеличение передаточного отношения инструмента и обрабатываемой детали приводит к значительному изменению характера касания между контактирующими деталями. Производственники стремятся повысить производительность обработки деталей с одновременным снижением их себестоимости. Для этого необходим принципиально новый инструмент, полученный в пространственном станочном зацеплении, согласно схемы формообразования третьего класса [2,4]. Большинство существующих инструментов, применяемых для обработки тел вращения получают в плоском станочном зацеплении (при параллельных осях), а работает такой инструмент в пространственном станочном зацеплении (оси скрещиваются). Следовательно, наружная поверхность такого инструмента имеет сложную геометрическую форму и является огибающей обрабатываемой детали.

Для устранения существующих недостатков при проектировании инструмента необходимо чтобы его исходная инструментальная поверхность являлась огибающей обрабатываемой детали. Для этого следует изменить схему его изготовления. Необходимо его изготавливать в пространственном станочном зацеплении, т.е. при скрещивающихся осях обрабатываемого изделия и формообразующего инструмента [5]. В этом случае, инструмент должен проектироваться на заготовках вида однополостной гиперболоид. Выбор такой формы инструмента дает возможность получить производящую поверхность, полностью совпадающую с основной инструментальной поверхностью. Такое положение приводит к тому, что задние углы на таком инструменте получаются автоматически. Это позволяет исключить такую дорогостоящую операцию, как операция затылования. Кроме того, точность такого инструмента в значительной степени изменится в лучшую сторону. Одно из главных достижений в конструкции такого инструмента заключается в том, что передняя поверхность такого инструмента может быть заточена под любым углом. В этом случае основная инструментальная поверхность будет полностью совпадать с его производящей поверхностью.

Для аналитического определения профиля огибающей поверхности искомого гиперболоидного инструмента необходимо рассчитать переменные координаты x_2, y_2 в подвижной системе координат, связанной с пе5ременной поверхностью этого инструмента:

$$x_2 = (x_1 - r)(\cos\varphi_1 \cos\varphi_2 + \cos\gamma \sin\varphi_1 \sin\varphi_2) +$$
$$+ y_1(-\sin\varphi_1 \cos\varphi_2 + \cos\gamma \cos\varphi_1 \sin\varphi_2) +$$
$$+ z_1 \sin\gamma \sin\varphi_2 + A\cos\varphi_2;$$
$$y_2 = (x_1 - r)(\cos\varphi_1 \sin\varphi_2 - \cos\gamma \sin\varphi_1 \cos\varphi_2) +$$
$$+ y_1(-\sin\varphi_1 \sin\varphi_2 - \cos\gamma \cos\varphi_1 \cos\varphi_2) -$$
$$- z_1 \sin\gamma \cos\varphi_2 + A\sin\varphi_2;$$
$$z_2 = (x_1 - r)\sin\gamma \sin\varphi_1 + y_1 \sin\gamma \cos\varphi_1 - z_1 \cos\gamma;$$
$$f_1(v, \varphi_1, \psi) = (u_{21}\cos\gamma - 1)\left[y_1 y_1' + x_1'(x_1 - r)\right] + z_1 u_{21} \sin\gamma (y_1' \cos\varphi_1 +$$
$$+ x_1' \sin\varphi_1) - A u_{21} \cos\gamma (y_1' \sin\varphi_1 - x_1' \cos\varphi_1) = 0. \quad (1)$$

Решение данной системы предлагается провести в таком порядке: из четвертого уравнения системы (1) находим z_1, полученное значение подставляем в третье уравнение системы (1), после чего получаем:

$$- z_2 u_{21}(y_1' \cos\varphi_1 + x_1' \sin\varphi_1) =$$
$$= -\left[(x_1 - r)\sin\gamma \sin\varphi_1 + y_1 \sin\gamma \cos\varphi_1\right] u_{21}(y_1' \cos\varphi_1 +$$
$$+ x_1' \sin\varphi_1) + \left[A u_{21} \cos\gamma (y_1' \sin\varphi_1 - x_1' \cos\varphi_1) +\right.$$
$$\left. + (1 - u_{21}\cos\gamma)(y_1 y_1' + x_1'(x_1 - r))\right] ctg\gamma \quad (2)$$

После этого, задавая значения z_2 (от 0 до 100 с шагом $\approx$1мм) и варьируя значением угла развертки эвольвенты (от 0 до 50^0 с шагом 2^0), из (2) находим угол поворота φ_1 заготовки, при котором происходит ее касание с гиперболоидным инструментом. Подставляя найденные углы поворота φ_1 в первые два уравнения системы (1), находим координаты x_2, y_2 гиперболоидного инструмента. Необходимо отметить, что координаты x_2, y_2 в данном случае получены в зависимости от z_2. Имея координаты x_2, y_2, находим радиус гиперболоидного инструмента согласно следующего выражения: $r_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$.

Для нахождения контактных линий на обрабатываемой заготовке найдем переменный параметр ψ в следующем виде:

$$\psi = \{(u_{21}\cos\gamma - 1)\left[y_1 y_1' + x_1'(x_1 - r)\right] - A u_{21} \cos\gamma (y_1' \sin\varphi_1 -$$
$$- x_1' \cos\varphi_1)\} / u_{21} \sin\gamma (x_1' \sin\varphi_1 - y_1' \cos\varphi_1). \quad (3)$$

Совокупность уравнений (1) и полученного (3) при заданном значении угла поворота φ_1 будет определять контактные линии на поверхности обрабатываемой заготовки. Варьируя значениями φ_1, получим множество контактных линий на обрабатываемой заготовке.

При переходе от поверхности заготовки из подвижной системы координат $x_1 y_1 z_1$ в неподвижную xyz получим поверхность, образующуюся при формообразовании:

$$\begin{cases} x = (x_1 - r)\cos\varphi_1 - y_1 \sin\varphi_1; \\ y = (x_1 - r)\sin\varphi_1 + y_1 \cos\varphi; \\ z = \{(u_{21}\cos\gamma - 1)\left[y_1 y_1' + x_1'(x_1 - r)\right] - A u_{21} \cos\gamma (y_1' \sin\varphi_1 \\ \quad - x_1' \cos\varphi_1)\} / u_{21} \sin\gamma (x_1' \sin\varphi_1 - y_1' \cos\varphi. \end{cases} \quad (4)$$

Используя выражения (4) при конкретном значении угла поворота заготовки φ_1, можно определить контактные линии на ее поверхности.

Поверхность гиперболоидного инструмента найдена как огибающая обрабатываемой поверхности заготовки за счет движения производящей кривой вдоль оси заготовки

$O_1 z_1$. Вектор, определяющий нормаль к обрабатываемой поверхности лежит в касательной плоскости к поверхности заготовки и определяется следующими выражениями:

$$\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial v} = \{x_1', y_1', 0\}; \ \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi} = \{0, 0, 1\}, \tag{5}$$

Вектор нормали к обрабатываемой цилиндрической поверхности определяется по следующей зависимости:

$$N = \frac{d\vec{r}_1}{dv} \times \frac{d\vec{r}_1}{d\psi} \text{ и равен } \vec{N} = \{y_1', -x_1', 0\}. \tag{6}$$

Тогда орт нормали будет иметь вид:

$$\vec{n}_1 = \{\frac{y_1'}{\sqrt{(x_1')^2 + (y_1')^2}}; \frac{-x_1'}{\sqrt{(x_1')^2 + (y_1')^2}}; 0\}. \tag{7}$$

Теперь найдем коэффициенты первой и второй квадратичных форм для определения геометрии производящей поверхности:

$$E_1 = \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial v}\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial v}; \qquad F_1 = \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial v}\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}; \qquad G_1 = \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}; \tag{8}$$

$$L_1 = \frac{\partial^2 r_1}{\partial v^2}\vec{n}_1; \qquad M_1 = \frac{\partial^2 r_1}{\partial v \partial \psi}\vec{n}_1; \qquad N_1 = \frac{\partial^2 r_1}{\partial \psi^2}\vec{n}_1. \tag{9}$$

Учитывая, что:

$$\frac{\partial^2 r_1}{\partial v^2} = \{x_1''; y_1''; 0\}; \qquad \frac{\partial^2 r_1}{\partial v \partial \psi} = 0; \qquad \frac{\partial^2 r_1}{\partial \psi^2} = 0, \tag{10}$$

получим:

$$E_1 = (x_1')^2 + (y_1')^2; \qquad F_1 = 0; \qquad G_1 = 1. \tag{11}$$

$$L_1 = (x_1'' y_2' - x_1' y_2'') \Big/ \sqrt{(x_1')^2 + (y_1')^2}; \qquad M_1 = N_1 = 0. \tag{12}$$

Тогда нормальная кривизна χ производящей поверхности в произвольном сечении плоскостью будет иметь вид:

$$\chi = \frac{L_1 (dv)^2 + 2M_1 dv d\psi + N_1 (d\psi)^2}{E_1 (dv)^2 + 2F_1 dv d\psi + G_1 (d\psi)^2}, \tag{13}$$

или с учетом (11) и (12) главные нормальные кривизны вычисляются по формулам:

$$\chi_1 = \chi(v = const; \psi = const) = 0, \tag{14}$$

$$\chi_2 = \chi(v = const; \psi = const) = (x_1'' y_2' - x_1' y_2'') \Big/ \sqrt{((x_1')^2 + (y_1')^2)^3}. \tag{15}$$

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований удалось получить гиперболоидный обкатной инструмент, как огибающую обрабатываемой детали. Основная инструментальная поверхность предлагаемого инструмента полностью совпадает с его производящей поверхностью. Такое положение приводит к резкому повышению качества обрабатываемых деталей с одновременным повышением производительности их изготовления.

Список литературы: 1. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машиностроение, 1984. – 272 с. **2.** Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений /Ф.Л. Литвин. – М.: Наука, 1968, 584 с. **3.** Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов / П.Р. Родин. – К.: Вища школа, 1990. – 424 с. **4.** Сахаров Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л., Кисилев А.С. Металлорежущие инструменты. - М.: Машиностроение, 1989. - 328 с. **5.** Цвис Ю.В. Профилирование режущего обкатного инструмента / Ю.В. Цвис – М.: Машгиз, 1961. – 155 с.

АЛГОРИТМ И ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ВЧ-ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА

Герасимов А. В., Кирпичников А. П., Фам Минь Туен
(*КНИТУ, г. Казань, Россия*)
Тел./Факс: +7 (843) 2314188; E-mail: gerasimov@kstu.ru

Abstract: *Algorithm and numerical scheme for solving a two-dimensional system of Maxwell's equations written for a cylindrical coordinate system is presented.*

Для описания электромагнитных полей высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда воспользуемся системой двухмерных уравнений Максвелла, записанной в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{r}\frac{\partial(rE_\varphi)}{\partial r} = \frac{\omega}{c}H_z\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_E)\\
&\frac{\partial\varphi_E}{\partial r} = -\frac{\omega}{c}\frac{H_z}{E_\varphi}\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_E)\\
&\frac{\partial H_z}{\partial r} = \frac{\partial H_r}{\partial z}\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) + H_r\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial z}\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) - \frac{4\pi}{c}\sigma E_\varphi\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_E)\\
&\frac{\partial\varphi_{Hz}}{\partial r} = -\frac{1}{H_z}\frac{\partial H_r}{\partial z}\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) + \frac{H_r}{H_z}\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial z}\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) + \frac{4\pi}{c}\sigma\frac{E_\varphi}{H_z}\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_E)\\
&\frac{1}{r}\frac{\partial(rH_r)}{\partial r} = -\frac{\partial H_z}{\partial z}\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) + H_z\frac{\partial\varphi_{Hz}}{\partial z}\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr})\\
&\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial r} = -\frac{1}{H_r}\frac{\partial H_z}{\partial z}\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) - \frac{H_z}{H_r}\frac{\partial\varphi_{Hz}}{\partial z}\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr})
\end{aligned} \qquad (1)$$

Система состоит из шести уравнений и содержит семь неизвестных величин $E_\varphi, \varphi_E, \varphi_{Hz}, H_r, \varphi_{Hr}, \sigma, H_z$. Значения H_z берутся из эксперимента. Тогда система является замкнутой и может быть использована для расчетов электромагнитных величин внутри разрядной камеры плазмотрона.

Для численных расчетов электромагнитных и теплофизических параметров ВЧИ-плазмы в индукторе конечных размеров воспользуемся системой уравнений, аналогичной системе (1), но записанной относительно производных по координате z. Полученная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases}
\frac{\partial E_\varphi}{\partial z} = -\frac{\omega}{c}H_r\sin(\varphi_{Hr}-\varphi_E)\\
\frac{\partial\varphi_E}{\partial z} = \frac{\omega}{c}\frac{H_r}{E_\varphi}\cos(\varphi_{Hr}-\varphi_E)\\
\frac{\partial H_r}{\partial z} = \frac{\partial H_z}{\partial r}\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) - H_z\frac{\partial\varphi_{Hz}}{\partial r}\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) + \frac{4\pi}{c}\sigma E_\varphi\cos(\varphi_{Hr}-\varphi_E)\\
\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial z} = \frac{1}{H_r}\frac{\partial H_z}{\partial r}\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) + \frac{H_z}{H_r}\frac{\partial\varphi_{Hz}}{\partial r}\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) - \frac{4\pi}{c}\sigma\frac{E_\varphi}{H_r}\sin(\varphi_{Hr}-\varphi_E)\\
\frac{\partial H_z}{\partial z} = \frac{1}{r}\frac{\partial(rH_r)}{\partial r}\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) + H_r\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial r}\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr})\\
\frac{\partial\varphi_{Hz}}{\partial z} = \frac{1}{H_z}\frac{1}{r}\frac{\partial(rH_r)}{\partial r}\sin(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}) - \frac{H_r}{H_z}\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial r}\cos(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr})
\end{cases} \qquad (2)$$

Рассмотрим конечностно-разностную аппроксимацию первого, второго и шестого уравнений системы (2).

Для первого уравнения системы (2):

$$\frac{E_{\varphi(i,j)} - E_{\varphi(i,j-1)}}{\Delta z} = -\frac{\omega}{c}H_{r(i,j-1)}\sin\left(\varphi_{Hr(i,j-1)} - \varphi_{E(i,j-1)}\right).$$

Откуда:

$$E_{\varphi(i,j)} = E_{\varphi(i,j-1)} - \Delta z \frac{\omega}{c} H_{r(i,j-1)} \sin\left(\varphi_{Hr(i,j-1)} - \varphi_{E(i,j-1)}\right). \quad (3)$$

Для второго уравнения системы (2) можно записать:

$$\frac{\varphi_{E(i,j)} - \varphi_{E(i,j-1)}}{\Delta z} = \frac{\omega}{c} \frac{H_{r(i,j-1)}}{E_{\varphi(i,j-1)}} \cos\left(\varphi_{Hr(i,j-1)} - \varphi_{E(i,j-1)}\right).$$

Тогда:

$$\varphi_{E(i,j)} = \varphi_{E(i,j-1)} + \Delta z \frac{\omega}{c} \frac{H_{r(i,j-1)}}{E_{\varphi(i,j-1)}} \cos\left(\varphi_{Hr(i,j-1)} - \varphi_{E(i,j-1)}\right). \quad (4)$$

Шестое уравнение системы (2) перепишем в другом виде:

$$\frac{\partial \varphi_{Hz}}{\partial z} = \frac{1}{H_z} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial H_r}{\partial r} + \frac{H_r}{r} \right) \sin\left(\varphi_{Hz} - \varphi_{Hr}\right) - \frac{H_r}{H_z} \frac{\partial \varphi_{Hr}}{\partial r} \cos\left(\varphi_{Hz} - \varphi_{Hr}\right).$$

Для аппроксимации производной $\frac{\partial H_r}{\partial r}$ используем центральную разность. Тогда конечностно-разностный аналог данного уравнения запишется в виде:

$$\frac{\varphi_{Hz(i,j)} - \varphi_{Hz(i,j-1)}}{\Delta z} = \frac{1}{H_{z(i,j-1)}} \left(\frac{H_{r(i+1,j-1)} - H_{r(i-1,j-1)}}{2\Delta r} + \frac{H_{r(i,j-1)}}{r_{(i)}} \right) \times$$

$$\times \sin\left(\varphi_{Hz(i,j-1)} - \varphi_{Hr(i,j-1)}\right) - \frac{H_{r(i,j-1)}}{H_{z(i,j-1)}} \frac{\varphi_{Hr(i,j-1)} - \varphi_{Hr(i-1,j-1)}}{\Delta r} \cos\left(\varphi_{Hz(i,j-1)} - \varphi_{Hr(i,j-1)}\right).$$

Обозначив $r(i) = \Delta r(i-1)$, окончательно можно записать:

$$\varphi_{Hz(i,j)} = \varphi_{Hz(i,j-1)} + \frac{\Delta z}{\Delta r} \frac{1}{H_{z(i,j-1)}} \left[\left(\frac{H_{r(i+1,j-1)} - H_{r(i-1,j-1)}}{2} + \frac{H_{r(i,j-1)}}{i-1} \right) \times \right. \quad (5)$$

$$\left. \times \begin{array}{l} \sin\left(\varphi_{Hz(i,j-1)} - \varphi_{Hr(i,j-1)}\right) - \\ - H_{r(i,j-1)} \left(\varphi_{Hr(i,j-1)} - \varphi_{Hr(i-1,j-1)}\right) \cos\left(\varphi_{Hz(i,j-1)} - \varphi_{Hr(i,j-1)}\right) \end{array} \right]$$

Для нахождения поперечной составляющей магнитного поля H_r воспользуемся пятым уравнением системы (1) .Оно эквивалентно соответствующему уравнению системы (2). Запишем его несколько по-другому:

$$\frac{H_r}{r} + \frac{\partial H_r}{\partial r} = -\frac{\partial H_z}{\partial z} \cos\left(\varphi_{Hz} - \varphi_{Hr}\right) + H_z \frac{\partial \varphi_{Hz}}{\partial z} \sin\left(\varphi_{Hz} - \varphi_{Hr}\right).$$

Запишем конечностно-разностный аналог данного уравнения, используя схему с половинным весом:

$$\frac{H_{r(i,j)} + H_{r(i-1,j)}}{2\left(r_{(i)} + \frac{\Delta r}{2}\right)} + \frac{H_{r(i,j)} - H_{r(i-1,j)}}{\Delta r} = -\left(\frac{H_{z(i,j)} - H_{z(i,j-1)} + H_{z(i-1,j)} - H_{z(i-1,j-1)}}{2\Delta z} \right) \times$$

$$\times \cos\left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)} + \varphi_{Hz(i-1,j)} - \varphi_{Hr(i,j)} - \varphi_{Hr(i-1,j)}}{2} \right) + \frac{H_{z(i,j)} + H_{z(i-1,j)}}{2} \times$$

$$\times \left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)} - \varphi_{Hz(i,j-1)} + \varphi_{Hz(i-1,j)} - \varphi_{Hz(i-1,j-1)}}{2\Delta z} \right) \sin\left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)} + \varphi_{Hz(i-1,j)} - \varphi_{Hr(i,j)} - \varphi_{Hr(i-1,j)}}{2} \right)$$

После несложных преобразований можно записать выражение для $H_{r(i,j)}$:

$$H_{r(i,j)} = \left(1-\frac{1}{i-1}\right)H_{r(i-1,j)} + \left(1-\frac{1}{2(i-1)}\right)\Delta r\left[\frac{H_{z(i,j)}+H_{z(i-1,j)}}{2}\times\right.$$

$$\left(\varphi_{Hz(i,j)}-\varphi_{Hz(i,j-1)}+\varphi_{Hz(i-1,j)}-\varphi_{Hz(i-1,j-1)}\right)\sin\left(\frac{\varphi_{Hz(i.j)}+\varphi_{Hz(i-1.j)}-\varphi_{Hr(i.j)}+\varphi_{Hr(i-1.j)}}{2}\right)-$$

$$\left.-\left(\frac{H_{z(i,j)}-H_{z(i,j-1)}+H_{z(i-1,j)}-H_{z(i-1,j-1)}}{2\Delta z}\right)\cos\left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)}+\varphi_{Hz(i-1,j)}-\varphi_{Hr(i,j)}-\varphi_{Hr(i-1,j)}}{2}\right)\right] \quad (6)$$

Как видно, неизвестным в правой части данного выражения является значение $\varphi_{Hr}(i,j)$.Для его нахождения воспользуемся четвертым уравнением системы (1), подставив в него значение σ, полученное из третьего уравнения этой же системы. Тогда это уравнение перепишется в виде:

$$\frac{\partial\varphi_{Hz}}{\partial r} = -\frac{1}{H_z}\frac{\partial H_r}{\partial z}\sin\left(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}\right)+\frac{H_r}{H_z}\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial z}\cos\left(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}\right)+$$

$$+\frac{\frac{\partial H_r}{\partial z}\cos\left(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}\right)+H_r\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial z}\sin\left(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}\right)-\frac{\partial H_z}{\partial r}}{H_z\cos\left(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}\right)}\sin\left(\varphi_{Hz}-\varphi_E\right).$$

Или:

$$\left(\frac{\partial\varphi_{Hz}}{\partial r}H_z+\frac{\partial H_r}{\partial z}\sin\left(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}\right)-H_r\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial z}\cos\left(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}\right)\right)\cos\left(\varphi_{Hz}-\varphi_E\right)+$$

$$+\left(\frac{\partial H_z}{\partial r}-\frac{\partial H_r}{\partial z}\cos\left(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}\right)-H_r\frac{\partial\varphi_{Hr}}{\partial z}\sin\left(\varphi_{Hz}-\varphi_{Hr}\right)\right)\sin\left(\varphi_{Hz}-\varphi_E\right)=0$$

Запишем конечностно-разностный аналог последнего уравнения, используя схему с половинным весом:

$$\left[\frac{H_{z(i,j)}+H_{z(i-1,j)}}{2}\cdot\frac{\varphi_{Hz(i,j)}-\varphi_{Hz(i-1,j)}}{\Delta r}+\frac{H_{r(i,j)}-H_{r(i,j-1)}+H_{r(i-1,j)}-H_{r(i-1,j-1)}}{2\Delta z}\times\right.$$

$$\times\sin\left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)}+\varphi_{Hz(i-1,j)}-\varphi_{Hr(i,j)}-\varphi_{Hr(i-1,j)}}{2}\right)-\frac{H_{r(i,j)}+H_{r(i-1,j)}}{2}\times$$

$$\times\frac{\varphi_{Hr(i,j)}-\varphi_{Hr(i,j-1)}+\varphi_{Hr(i-1,j)}-\varphi_{Hr(i-1,j-1)}}{2\Delta z}\times$$

$$\left.\times\cos\left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)}+\varphi_{Hz(i-1,j)}-\varphi_{Hr(i,j)}-\varphi_{Hr(i-1,j)}}{2}\right)\right]\cos\left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)}+\varphi_{Hz(i-1,j)}-\varphi_{E(i,j)}-\varphi_{E(i-1,j)}}{2}\right)+$$

$$+\left[\frac{H_{z(i,j)}-H_{z(i-1,j)}}{\Delta r}-\frac{H_{r(i,j)}-H_{r(i,j-1)}+H_{r(i-1,j)}-H_{r(i-1,j-1)}}{2\Delta z}\times\right.$$

$$\times\cos\left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)}+\varphi_{Hz(i-1,j)}-\varphi_{Hr(i,j)}-\varphi_{Hr(i-1,j)}}{2}\right)-\frac{H_{r(i,j)}+H_{r(i-1,j)}}{2}\times$$

$$\left.\times\frac{\varphi_{Hr(i,j)}-\varphi_{Hr(i,j-1)}+\varphi_{Hr(i-1,j)}-\varphi_{Hr(i-1,j-1)}}{2\Delta z}\sin\left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)}+\varphi_{Hz(i-1,j)}-\varphi_{Hr(i,j)}-\varphi_{Hr(i-1,j)}}{2}\right)\right]\times$$

$$\times \sin\left(\frac{\varphi_{Hz(i,j)} + \varphi_{Hz(i-1,j)} - \varphi_{E(i,j)} - \varphi_{E(i-1,j)}}{2}\right) = 0 \qquad (7)$$

В данном уравнении неизвестной величиной тоже является $\varphi_{Hr(i,j)}$.

В общем виде уравнение (7) можно записать как:

$$F\left(H_{z(i,j)}, H_{z(i-1,j)}, \varphi_{Hz(i,j)}, \varphi_{Hz(i-1,j)}, \varphi_{E(i.j)}, \varphi_{E(i-1,j)}, H_{r(i,j)}, H_{r(i-1,j)}, H_{r(i,j-1)}, H_{r(i-1,j-1)}, \cdot\right.$$
$$\left.\varphi_{Hr(i,j-1)}, \varphi_{Hr(i-1,j)}, \varphi_{Hr(i-1,j-1)}, \varphi_{Hr(i,j)}\right) = 0.$$

Алгоритм решения системы дискретных уравнений следующий. Вначале делается шаг по координате z и из уравнений (3-5) находятся радиальные распределения $E_{\varphi(i,j)}, \varphi_{E(i,j)}, \varphi_{Hz(i,j)}$. Затем совместно решаются уравнения (6) и (7). Причем уравнение (7) решается методом деления отрезка пополам. Из решения этих уравнений находятся радиальные распределения величин $H_{r(i,j)}, \varphi_{Hr(i,j)}$.Затем вновь делается шаг по координате z и аналогичная процедура повторяется снова. Таким образом рассчитываются радиальные профили величин $E_{\varphi}, \varphi_{Ó}, \varphi_{Ðÿ}, H_r, \varphi_{Hr}, \sigma$ для каждого сечения индуктора.

Границы расчетной области находились в пределах от r=0 см на оси индуктора до r=3,2 см вблизи стенки индуктора по координате r, и по координате z от z=0 см в центральном сечении индуктора и до z=7 см на выходе индуктора. Шаг Δr по координате r и Δz по координате z принимался равномерным и был равен 0,1 см. После решения системы уравнений результаты этого решения вблизи оси (а именно до r=1,1 см) заменялись для каждого сечения результатами расчета по аналитическим зависимостям $E_{\varphi}(r,z), \varphi_E(r,z), H_z(r,z), \varphi_{Hz}(r,z), H_r(r,z), \varphi_{Hr}(r,z)$ [1-2].

Получены радиальные распределения величин H_z, E_{φ}, $\varphi_E, \varphi_{Hz}, \varphi_{Hr}, \Delta\varphi_1 = \varphi_{Hz} - \varphi_E, \Delta\varphi_2 = \varphi_{Hz} - \varphi_{Hr}$ для различных сечений индуктора. Затем производился расчет значения удельной электропроводности σ и используя зависимость $\sigma(T)$ находились радиальные распределения температуры для каждого сечения индуктора.

Предложенная математическая модель позволяет рассчитать основные параметры плазмы в разряде и восстановить его структуру, используя минимальную экспериментальную информацию о профиле продольного магнитного поля в разряде.

Список литературы: 1. А.П. Кирпичников, А. В. Герасимов Структура высокочастотного индукционного разряда вблизи оси плазмоида в случае индуктора конечных размеров Сборник трудов Международной конференции “Плазмотехнология-95”, Запорожье, 1995. с. 28-29. **2.** А.П. Кирпичников Структура квазистационарного электромагнитного поля высокочастотного индукционного разряда вблизи оси плазменного сгустка // ТВТ. 1995. № 1. Т. 33. С. 139-140.

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПЛЕКСОВ ГЛУБОКОЙ РАЗРАБОТКИ УГЛЯ[1]

Герике Б. Л. [1,2,3], **Клишин В. И.** [1], **Копытин Д. В.** [2 1] *(Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,* [2] *ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева»,* [3] *ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», филиал в г. Прокопьевск, г. Кемерово, г. Прокопьевск, Кемеровская область, Россия)*
E-mail: gbl_42@mail.ru

Abstract: *The use of fundamentally new complexes of the SHM type in open-pit mining of coal seams sharply raises the problem of transition from a system of scheduled preventive maintenance to a system of preventive maintenance based on the actual technical condition of the main components and assemblies of the complexes, which is determined on monitoring of mechanical vibrations of the diagnosed equipment.*
Key words: *open-pit mining, SHM type complex, technical condition assessment, actual condition maintenance, vibration diagnostics.*

Введение. Анализ использования основного технологического оборудования для добычи угля открыто-подземным способам свидетельствует об усиливающейся зависимости шахт и разрезов от поставок импортного оборудования и запасных частей к нему. Особенно это заметно при ведении открытых горных работ, где доля импортного оборудования достигает величины 84%, а при комбинированном открыто-подземном способе – 100%.

Рис. 1. Общий вид комплекса Superior Highwall Miners

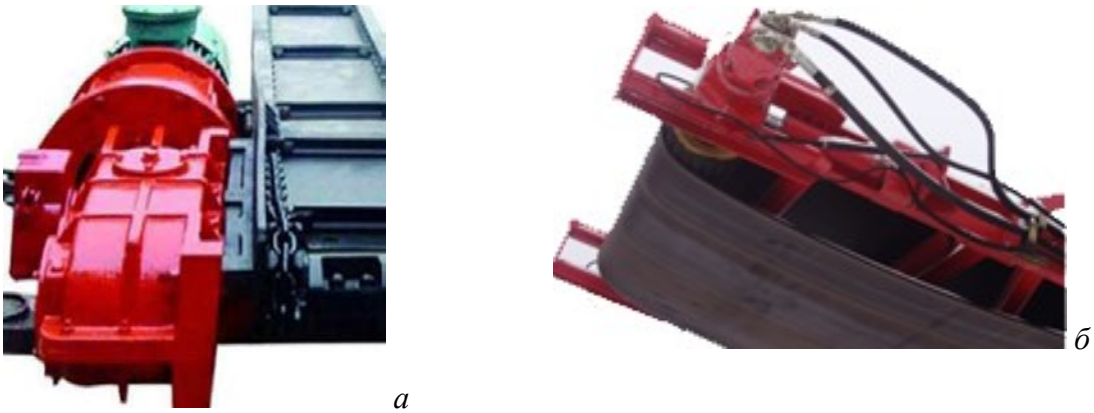
Постановка задачи. В мировой практике уже несколько десятилетий успешно применяется система разработки «Superior Highwall Miners» для добычи каменного угля открыто-подземным способом [1, 2]. Модели SHM-28 и SHM-29, произведенные фирмой SHM (г. Беркли, штат Вирджиния, США) являются первыми машинами такого рода, работающими в России. Эти системы являются идентичными и позволяют разрабатывать уголь из борта карьера на глубину до 270 м. Регулируемая высота качания ис-

[1] Статья подготовлена по результатам, полученным в рамках выполнения работы по договору РФФИ 20-45-420018\20 «Фундаментальные исследования в области совершенствования техники и технологии выемки забалансовых запасов угля с применением комплексов глубокой разработки пласта».

полнительного органа от 1,2 м до 3 м позволяет производить эффективную выемку угля из пластов мощностью от 1,3 до 3,0 м.

Опыт эксплуатации двух комплексов SHM-28 и SHM-29 на ЗАО «Разрез Распадский» ПАО «Распадская» [3, 4] показал хорошие результаты по добыче угля комбинированным открыто-подземным способом, но и выявил некоторые недостатки, присущие этому комплексу. Так, отсутствие сервисной службы требовало повышенного внимания к техническому состоянию узлов и агрегатов комплексов, выход из строя которых приводил к продолжительным простоям и значительным затратам времени и валютных средств для восстановления их работоспособности.

Методика проведения исследований. Для контроля технического состояния гидромеханического оборудования комплекса SHM принят метод вибродиагностики на основе анализа механических колебаний, поскольку при изменении технического состояния машины вибрационная сигнатура также изменится, что может быть использовано для обнаружения зарождающихся дефектов [5, 6, 7].



а *б*

Рис. 2. Привода скребкового конвейера (а) и ленточного перегружателя (б) комплекса Superior Highwall Miners

Результаты исследований. Построенные по результатам первичных обследований опорные спектральные маски [8] позволили ускорить процесс анализа полученных в результате мониторинга данных, поскольку из анализа были исключены те результаты, в которых уровень вибрационного сигнала не превышал уровня «предупреждение».

По общему уровню интенсивности вибрации техническое состояние привода ленточного перегружателя оценивается как ***недопустимое.*** Максимальная величина интенсивности вибрации зафиксирована на заднем подшипнике выходного вала редуктора ($V_e \approx$ 17 мм/с).

На рис. 3*а* приведены спектр вибрации на заднем подшипнике приводного гидродвигателя ленточного перегружателя, а на рисунке 3*б* – на выходном валу редуктора. Спектральный анализ механических колебаний указывает на недопустимый дисбаланс выходного вала редуктора (а, следовательно, приводного барабана перегружателя), причем амплитуды спектральных компонент на частоте ≈ 5 Гц достигают недопустимых величин (например, в вертикальной составляющей виброскорости, измеренной во 2 контрольной точке, амплитуда этой компоненты равна ≈ 17 мм/с). Результаты анализа позволяют утверждать о необходимости балансировки выходного вала редуктора и приводного барабана.

а *б*

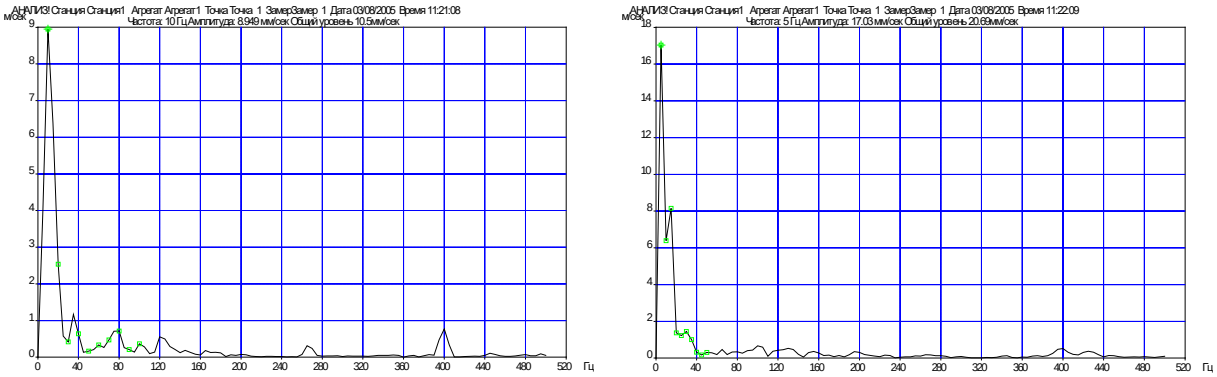


Рис. 3. Интенсивность вибрации на заднем подшипнике гидродвигателя ленточного перегружателя (а) и на выходном валу редуктора (б)

По общему уровню интенсивности вибрации техническое состояние привода скребкового конвейера также оценивается как ***недопустимое***. Максимальная величина интенсивности вибрации зафиксирована на заднем подшипнике двигателя и составляет величину $V_{СКЗ} \approx 14$ мм/с (рис. 4).

Спектральный анализ механических колебаний указывает на недопустимый дисбаланс ротора электродвигателя. В качестве рекомендаций можно указать на необходимости двухплоскостной балансировки ротора электродвигателя и ревизии редуктора.

Вертикальная составляющая Поперечная составляющая

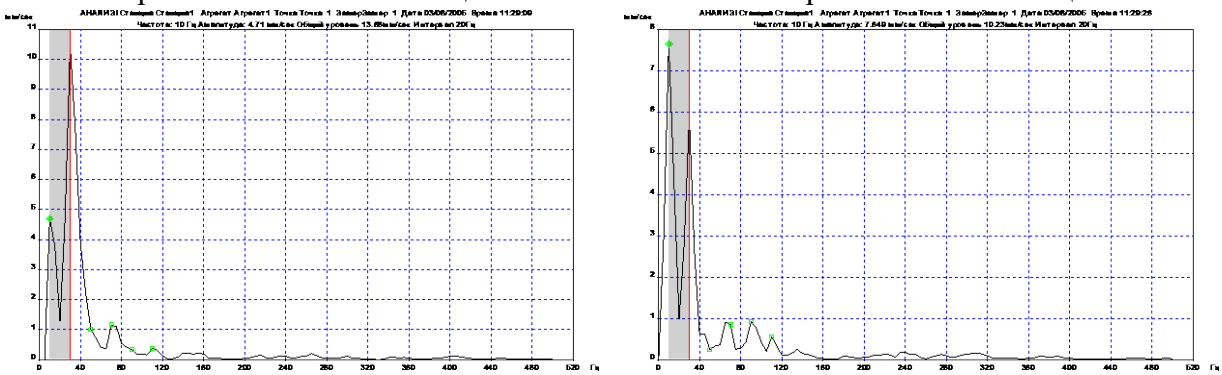


Рис. 4. Интенсивность вибрации на двигателе скребкового конвейера

Обсуждение результатов. Как известно, наиболее эффективным из методов вибродиагностики является постоянный (не реже двух раз в месяц) мониторинг, позволяющий своевременно получать точную и достоверную информацию о состоянии оборудования. Особенно актуальной представляется эта задача для комплексов типа SHM, не имеющих в России сервисной службы технического обслуживания. Мониторинг технического состояния позволит создать нормативно-методическую базу оценки и прогнозирования технического состояния по параметрам механических колебаний, своевременно выявлять зарождающиеся дефекты и оценивать степень их опасности, но и явится основой для экспертной системы диагностики подобных комплексов.

Выполнение вышеуказанных требований и рекомендаций позволило существенно повысить срок службы отдельных узлов и агрегатов комплекса SHM-29, избежать выхода оборудования из строя и минимизировать издержки, связанные с внезапными отказами.

Обработка статистических данных, собранных в ходе осуществления программы мониторинга технического состояния агрегатов SHM-29, позволила построить статистическую картину потери работоспособного состояния приводом ленточного перегружателя (рис. 5).

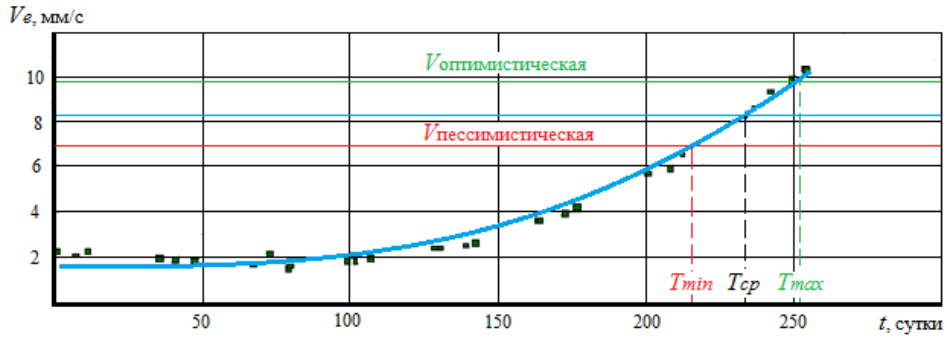


Рис. 5. Изменение СКЗ виброскорости во времени при дисбалансе выходного вала редуктора

При достижении уровня пессимистической оценки выбранного критерия *Ve* было проведено контрольное диагностическое обследование привода, в ходе которого было установлено, что основной причиной повышенной вибрации является дисбаланс выходного вала редуктора, величина виброскорости $V \approx 21$ мм/с (рис. 6).

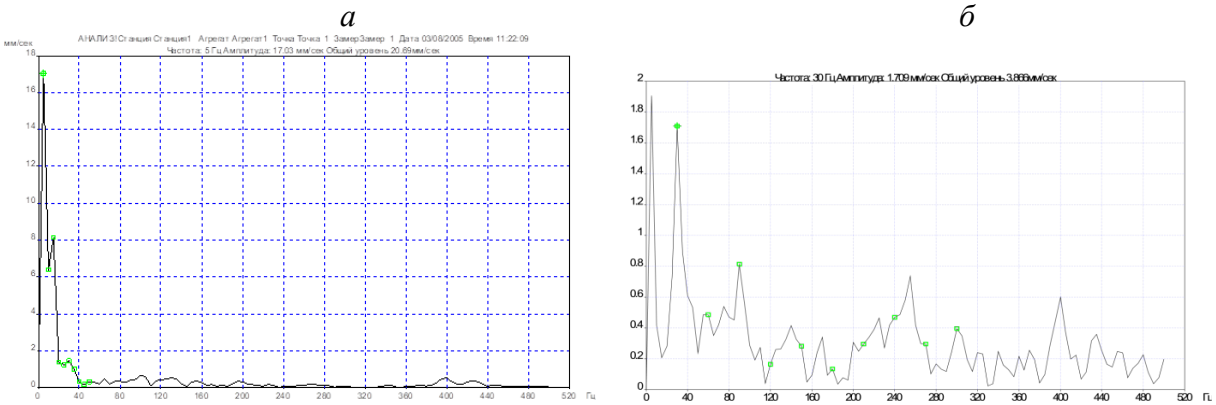


Рис. 6. Интенсивность вибрации на редукторе ленточного перегружателя до (а) и после (б) балансировки

После достижения критерием величины пессимистической оценки (примерно на 250 сутки эксплуатации) была проведена остановка комплекса для проведения балансировки гидромеханического привода ленточного перегружателя, что положительно сказалось на его работоспособности (рис. 7).

Использование прогностических моделей на основе статистических результатов вибродиагностики позволяет, с 95% доверительной вероятностью, оценить исследуемую неисправность, а также спрогнозировать остаточный ресурс узла или агрегата и осуществлять эффективное планирование ремонтных работ и предупреждать возникновения аварийных отказов.

Как показали результаты хронометражных наблюдений за работой КГРП №29 до и после внедрения разработанных мероприятий по климатической адаптации гидросистемы комплекса, а также разработанной «Методики» (рис. 10) сократились аварийные простои комплекса и время восстановления работоспособности его агрегатов. Коэффициент технического использования увеличился примерно в 1,3 раза с $K_{ТИ}$ = 0,617

до $K_{ТИ}$ = 0,824.

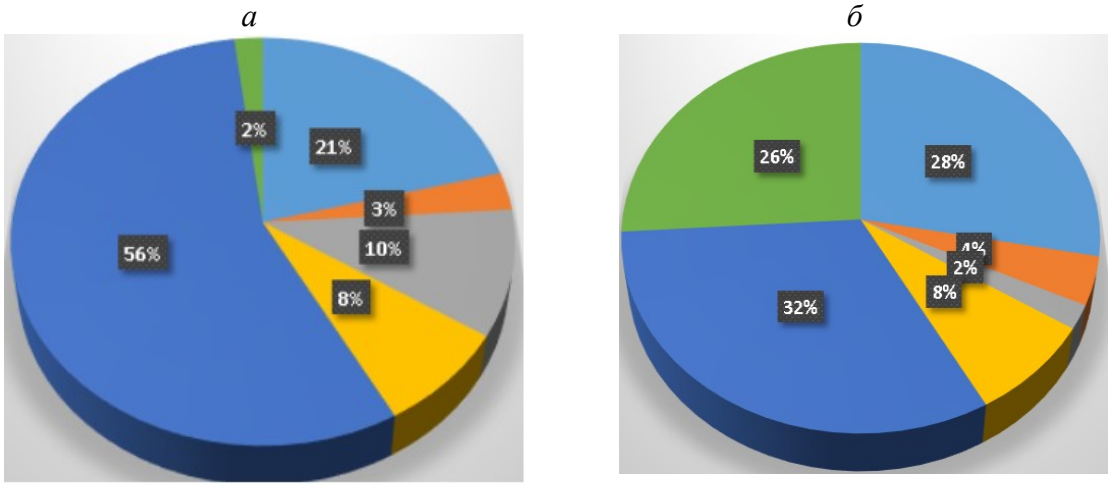


Рис. 7. Анализ результатов хронометражных наблюдений за работой КГРП №29 до (а) и после (б) внедрения разработанных мероприятий: здесь ■ - время производительной работы; ■ - время вспомогательных операций; ■ - время технического обслуживания; ■ - время аварийных ремонтов; ■ - время технологических простоев; ■ - время организационных простоев

Разработанные мероприятия по совершенствованию технического обслуживания и ремонта SHM №29 на основе использования прогнозных оценок остаточного ресурса гидромеханического оборудования позволят сократить издержки, связанные с внезапными отказами, оптимизировать логистику и складское хозяйство.

Список литературы: **1.** Kelly M. and other. (1998). Investigation in Highwaal Mining Instability, Pit 16BL South, Moura Mine, OLD. CSIRO Exploration and Mining Report # 467C (Confidential). **2.** Shen Baotang. Highwaal Mining Stability – Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control. – October, 17-20 Qingdao, China. – Atlantis Press. Amsterdam, Paris, Beijing. 2014. P. 184-189. **3.** Нецветаев А. Г. Технология добычи угля с применением комплексов глубокой разработки пластов./ А.Г. Нецветаев, Л. П. Репин, А. В. Соколовский.//Уголь. – № 11. – 2004. – С. 41-43. **4.** Опыт вибродиагностического обследования горнодобывающего комплекса «SUPERION HIGHWELL MINERS»./ Б. Л. Герике, П. Б. Герике, И. Л. Абрамов, Д. В. Копытин.// Вибрация машин: измерение, снижение, защита, №3. – Донецк. – 2005. – С. 19-22. **5.** Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis. 2013. – 637 p. — (Dekker mechanical engineering). **6.** Построение системы интеллектуального обслуживания редукторов горношахтного оборудования./ Б.Л. Герике, В.И. Клишин, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин// Горный журнал. № 12, 2017. – С. 68 – 73. **7.** Краковский Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. Новосибирск: Наука, СО, 2005. – 200 с. **8.** Герике Б.Л., Тациенко В.П., Копытин Д.В. Построение спектральных опорных масок для основных узлов и агрегатов комплексов глубокой разработки пластов SHM.

ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОПОРНЫХ МАСОК ДЛЯ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ КОМПЛЕКСОВ ГЛУБОКОЙ РАЗРАБОТКИ ПЛАСТОВ SHM[1]

Герике Б. Л.[1,2,3], Тациенко В. П.[2], Копытин Д. В.[2] *([1] Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, [2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева» [3] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», филиал в г. Прокопьевск, г. Кемерово, г. Прокопьевск Кемеровская область, Россия)*
E-mail: gbl_42@mail.ru

Abstract: *Based on the results of a diagnostic survey of a deep coal mining (SHM) complex, reference spectral masks were constructed for each of the units and assemblies, normalizing the level of vibration intensity in different frequency ranges of the spectra, which were used to assess their technical condition. Monitoring of the technical condition of deep coal mining complexes at the open-pit mines of Kuzbass confirmed the effectiveness of using the developed approach for reliable diagnosis and more accurate determination of the timing of the machine's withdrawal for maintenance or repair.*

Key words: *open-pit mining, SHM-type complex, technical condition assessment, vibroacoustic signal, spectral masks.*

Введение. Анализ использования основного технологического оборудования для добычи угля открытым и подземным способами свидетельствует об усиливающейся зависимости шахт и разрезов от поставок импортного оборудования и запасных частей к нему [1, 2]. Особенно это заметно при ведении открытых горных работ, где доля импортного оборудования достигает величины 84%, а при комбинированном открыто-подземном способе – 100%.

В этих условиях особо остро ставятся вопросы технического обслуживания и ремонта этого оборудования [3]. Это связано с тем, что изменяются подходы к эксплуатации горношахтного и горнотранспортного оборудования, усложняется сама техника и технологические процессы её эксплуатации, ужесточаются требования промышленной и экологической безопасности. Большое количество разнообразных узлов и агрегатов, входящих в состав этого оборудования, имеют скрытый характер зарождения и развития неисправностей, что нередко становится причинами аварийных ситуаций, которые могут сопровождаться значительным экономическим и социальным ущербом, а также загрязнением окружающей среды [4]. Ряд аварий и техногенных катастроф различного масштаба последних лет заставляют по-новому переосмысливать требования к достоверности оценки текущего состояния оборудования и определению его остаточного ресурса с учетом последних достижений науки в области технической диагностики [5, 6].

На сегодняшний день на угольных предприятиях Кузбасса за основу принята система планово-предупредительных ремонтов оборудования, основной задачей которой является обеспечение работоспособности оборудования в течение заданного времени при минимальных затратах труда и материальных ценностей. Независимо от условий работы деталей и сборочных единиц горной техники ремонты планируются по одному из критериев:

- календарному (или машинному) времени работы;
- объему переработанной горной массы.

Все это приводит [7…10]:

- к недоиспользованию ресурса отдельных деталей, агрегатов и сборочных единиц горного оборудования;
- к выполнению увеличенного объема разборочно-сборочных работ, не соответствующих техническому состоянию механизмов и устройств, и в то же время, увеличению

[1] Статья подготовлена по результатам, полученным в рамках выполнения работы по договору РФФИ 20-45-420018\20 «Фундаментальные исследования в области совершенствования техники и технологии выемки забалансовых запасов угля с применением комплексов глубокой разработки пласта».

вероятности быстрого изнашивания деталей, вызываемой приработкой из-за частой разборки и сборки;
- к значительному времени нахождения горного оборудования в ремонте.

Система планово-предупредительных ремонтов во многих случаях может быть принята за основу при обслуживании несложных машин и механизмов, но для основного безрезервного оборудования ее применение нецелесообразно. Поэтому дальнейшее развитие системы ремонтов должно предусматривать:
- установление дифференцированных критериев оценки ресурса деталей, сборочных единиц и агрегатов горного оборудования, учитывающих конкретные условия их эксплуатации;
- назначение конкретных сроков и объемов работ при ремонтах горного оборудования в зависимости от фактического технического состояния его деталей, сборочных узлов и агрегатов.

Для решения всего спектра задач, связанных с повышением надежности работы оборудования и сокращением затрат на его обслуживание и ремонт, одной диагностической информации недостаточно [5, 6, 11]. Необходима реализация целого комплекса мероприятий, объединенных в рамках общей стратегии эффективной эксплуатации, обслуживания и ремонта оборудования. К таким мероприятиям относятся:
- достоверная оценка технического состояния всего парка технологического оборудования;
- своевременное выявление неисправностей и прогноз остаточного ресурса с использованием всего арсенала методов и средств технического диагностирования в рамках распределенного мониторинга;
- контроль агрегатов на всех этапах жизненного цикла (входной контроль в процессе монтажа, приемосдаточные испытания, эксплуатация, предремонтный контроль, ремонт, послеремонтный контроль).

Методика проведения исследований. Для контроля технического состояния механического оборудования хорошо зарекомендовал себя метод вибрационного контроля [7, 10, 16], который позволяет обнаруживать до 77% возможных износовых отказов.

Ряд методов вибродиагностики основан на том, что определенные механические дефекты по мере развития генерируют вибрацию в определенных частотных полосах с определенным соотношением величин параметров. Таким образом, производя разбиение частотного диапазона измерений на сравнительно узкие, возможно перекрывающиеся, частотные полосы и применяя индивидуальные для каждой полосы допустимые значения и критерии, можно распознавать появление ряда зарождающихся дефектов.

Определение технического состояния по спектральным опорным маскам позволяет определять дефекты в различных частотных диапазонах:
- $(0{,}5...2{,}5)\times f_r$ – для обнаружения дисбаланса и расцентровки;
- $(7{,}5...15{,}5)\times f_r$ – для обнаружения дефектов в подшипниках качения;
- $(2{,}5...10{,}5)\times f_r$ – для предупреждения о нарушениях жесткости;
- $(z \pm 1)\times f_r$ – для распознавания дефектов зубчатых муфт и зубчатых передач.

Здесь f_r – частота вращения приводного двигателя, z – число зубьев.

Для определения «нормального» состояния оборудования комплексов SHM был использован метод «средненормального» состояния – когда в качестве критериев «нормального» состояния принимались среднестатистические величины контролируемых параметров заведомо работоспособного агрегата, полученные при обработке результатов нескольких периодических измерений [12].

Выбор того или иного типа определения границы «хорошего» состояния зависит от статистического разброса данных замеров.

В первую очередь из данных, предназначенных для анализа, были исключены вызывающие сомнение в их достоверности. Для проверки однородности выборки, характеризующей достоверность статистических выводов, и исключения из дальнейшей обработки резко отклоняющихся значений, связанных с ненормальной работой агрегатов, целесообразно использовать критерий грубых ошибок наблюдений при допущении, что полученный экспериментальный ряд значений вибрации (выборка) подчиняется нормальному закону распределения

$$X_{пр}=X_m + S\, q_{q,n},$$

где X_m – среднее арифметическое результатов измерений; S – оценка среднеквадратиче-

ского отклонения результатов измерений; $q_{q,n}$ – квантиль распределения величины, взятый из таблиц для уровня значимости α = 99% ($q_{q,n}$=3).

Все спектры, полученные в одноименных измерительных точках, рассматривались в частотном диапазоне, содержащем до 40-й гармоники частоты вращения ротора, для определения зон наибольшей гармонической активности.

Вибрация анализировалась отдельно по каждому узлу (приводные электродвигатели, гидравлические насосы и двигатели, редукторы, компрессоры, вентиляторы) и направлению измерения – вертикальному, поперечному и осевому.

Поскольку рекомендации стандарта ISO 2372 положены в основу национальных стандартов промышленно развитых стран (в том числе и большинства из действующих стандартов России), то при развертывании программы мониторинга технического состояния были использованы опорные спектральные маски, представленные в таблице 1.

Результаты исследований. Работа по проведению вибродиагностического обследования была проведена в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ ISO 10816-1-97 «Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях» и ГОСТ 12.1.012-2004 «Вибрационная безопасность. Общие требования».

Измерения и анализ параметров вибрации произведены с использованием коллектора/анализатора данных Кварц CU-060 №15 и программного обеспечения Диамант 2.04.

В соответствии с требованиями таблицы 1 были построены опорные спектральные маски, характеризующие каждый тип агрегатов, используемых на комплексах типа SHM.

Таблица 1. Опорные спектральные маски

Частотная полоса	Тревога	Предупреждение
	Коэффициенты к среднеквадратическому значению виброскорости $V_{СКЗ}$	
10... 1000 Гц	1	0,63
2 (10) Гц ...1,5×f_r	0,75	0,50
2×f_r	0,50	0,32
(3...4)×f_r	0,32	0,20
(5...20)×f_r	0,40	0,25
(21...50)×f_r	0,25	0,20
Пиковое значение виброускорения, м·с$^{-2}$		
1 ... 10 кГц	40	20

На рисунке 1 в качестве примера приведены опорные спектральные маски левого и правого приводов рабочего органа, на которых желтым цветом выделена граница «предупреждение», а оранжевым – граница «тревога». Превышение границы «предупреждение» свидетельствует о переходе диагностируемого узла из удовлетворительного технического состояния в предельно допустимое, а превышение границы «тревога» – о переходе их предельно допустимого технического состояния в недопустимое.

Аналогичным образом были построены опорные спектральные маски для всех агрегатов, используемых на комплексах типа SHM (привода рабочего органа, привода погрузчика, приводов шнековых конвейеров, приводов маслостанции и насоса системы охлаждения, приводов скребкового конвейера и ленточного перегружателя).

Заключение. Использование индивидуальных спектральных масок для конкретных узлов горного оборудования позволит повысить достоверность постановки диагноза и более точно определять сроки вывода машины в ремонт или на техническое обслуживание.

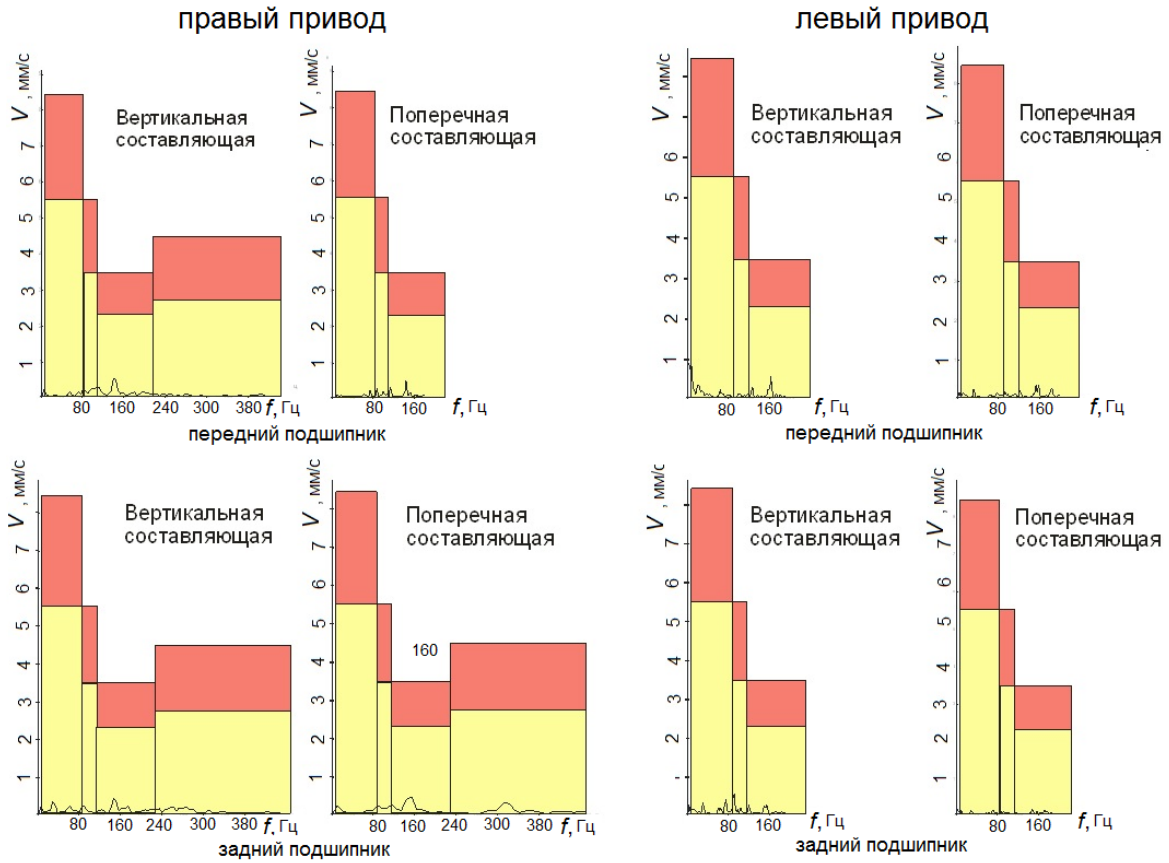


Рис. 1. Обобщенные спектральные маски для приводов режущей части комплекса Superior Highwall Miners

Список литературы: 1. Рожков А.А., Карпенко Н.В. Анализ использования отечественного и зарубежного технологического оборудования на угледобывающих предприятиях России.// Уголь. 2019, №7. – С.58-64. **2.** К вопросу импортозамещения и локализации производства основного технологического оборудования в угольной промышленности России./А.А. Рожков, Л.И. Кантович, А.А. Грабский, Е.П. Грабская. // Горное оборудование и электромеханика. 2018. № 2. – С. 50-57. **3.** Герике Б.Л., Сушко А.Е., Герике П.Б. Внедрение цифровых технологий в области диагностики, обслуживания и ремонта горных машин и оборудования. // Техника и технология горного дела. 2018. № 3. – С. 19-28. **4.** Указ Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г.№ 683 «Стратегия национальной безопасности Российской федерации». **5.** Предложения по внедрению на предприятии концепции технического обслуживания и ремонта горнотранспортной техники и оборудования./ И.М. Щадов, В.Ю. Конюхов, А.В. Чемезов, Т.С. Беляевская// ГИАБ – № 12. – 2015. – С. 134-143. **6.** Клишин В.И., Писаренко М.В. Научное обеспечение инновационного развития угольной отрасли.// Уголь, № 9. – 2014. – С. 42-46. **7.** Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis. 2013. – 637 p. — (Dekker mechanical engineering). **8.** Anil Rana, (2016). Optimal maintenance level of equipment with multiple components, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 22 Iss: 2, pp.180 – 187. **9.** Ierace S., Cavalieri S. An analytic hierarchy process based model for the selection of decision categories in maintenance systems // Management and Production Engineering Review. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 37–49. **10.** Построение системы интеллектуального обслуживания редукторов горношахтного оборудования./ Б.Л. Герике, В.И. Клишин, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин// Горный журнал. № 12, 2017. – С. 68 – 73. **11.** Герике Б.Л., Дрозденко Ю.В. Оценка технического состояния подшипниковых узлов горного оборудования по параметрам вибрации.// Неразрушающий контроль и диагностика: научный журнал. – Минск, 2017. – № 2. – С. 71-75. **12.** Диагностика горных машин и оборудования: Учеб. пособие./ Б.Л. Герике, П.Б. Герике, В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, А.А. Хорешок.// М.: ИПО «У Никитских ворот», 2012. – 400 с.

СПЕЦИАЛЬНОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ГРАНИТА

Горобец И. А., Голубов Н. В., Рудой Е. Р. *(ГОУВПО «ДОННТУ», г. Донецк)*
E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

Abstract: *The parameters of increasing the productivity of grinding granite are considered. The results of the synthesis of the structural and kinematic scheme of the device are presented. Studies of the dynamic characteristics of the device have been carried out. The source of ultrasonic vibrations is selected. The results of experimental studies are presented, confirming theoretical studies.*
Key words: *grinding, granite, adaptation, performance, characteristics, experiment, confirmation.*

Современные требования точности изделий машиностроения привели к формированию новых задач, в числе которых - использование неметаллических материалов в конструкциях объектов. Развитие точного приборостроения, высокоточного машиностроения и использование технологических процессов с применением агрессивных сред обусловили применение в конструкциях изделий природного камня. Одним из таких материалов является природный гранит, важнейшей характеристикой которого является отсутствие у него теплового расширения. Благодаря высокой твёрдости, термостойкости, стойкости к внешним воздействиям, сохранении своих свойств при различных физических и химических воздействиях, в том числе, резком перепаде температур, изделия из гранита могут быть использованы в качестве станин, направляющих прецизионных станков для обработки высокоточных поверхностей деталей, валков бумагоделательных машин, станин контрольно-измерительных приборов, ванн для металлургического и химического производств.

Процесс обработки природного камня имеет свои особенности и состоит из ряда последовательных технологических воздействий на заготовку. К процедурам, описывающим технологию изготовления гранитного изделия относятся: резание на мерные плиты, многократное шлифование и полирование поверхности заготовки. Самым продолжительным по времени является процесс шлифования заготовки, целью которого является устранение макронеровностей (до 3-5 мм), полученных в процессе заготовительных операций [1] и придания заготовке необходимых геометрических размеров и параметров качества.

Для выполнения условия максимизации производительности процесса шлифования природного камня

$$Q \rightarrow Q_{max}, \tag{1}$$

Необходимо выполнение условий

$$\begin{cases} \sum\limits_{j=1}^{j=n} \delta_j = \left(R_{MAXj-1} + \Delta_{\sum j-1} + h_{j-1}\right) - \left(R_{MAXj} + \Delta_{\sum j} + h_j\right)\Big|_{n\to\min} \to \min \\ V * S\Big|_{\sum\limits_{j=1}^{j=n}\delta_j \to \delta_{\max}} \to \max \end{cases}, \tag{2}$$

где j – количество проходов инструмента, V – скорость резания, S – подача, δ_j – величина снимаемого слоя материала, $\Delta_{\Sigma j}$ – отклонение формы поверхности, R_{max} – максимальная величина микронеровности поверхности, h – глубина микротрещин поверхностного слоя, получающаяся при механической обработки материала .

Одним из способов повышения производительности шлифования природного камня является использование вибраций в направлении подачи объекта обработки [2,3]. Такие вибрации могут быть переданы генератором колебаний как инструменту – шлифовальной головке, так и заготовке. Поскольку передача вибраций непосредственно инструменту имеет более сложное конструктивное исполнение и повлияет на долговечность шпиндельного узла, авторами была принята идея передачи колебаний специальному приспособлению, на котором будет закреплена заготовка из гранита. Разработанная авторами структурная схема специального приспособления – вибростола, рис.1, основана на использовании четырёх кинематических пар 5 класса, имеющих только одну степень подвижности. Схема приспособления включает верхнюю плиту 2, на которой закрепляется обрабатываемая заготовка, нижнее неподвижное основание 1, закрепляемое к столу технологического оборудования и соединительные подвижные звенья 3. К верхней плите 2 прикладываются внешние колебательные движения, вектор которых сонаправлен вектору подачи при шлифовании заготовки. Реализация структурной схемы приспособления включает опоры, выполненные в виде упругих элементов, для возврата верхней плиты 2 в исходное положение относительно основания 1, рис.2, при наложении колебаний.

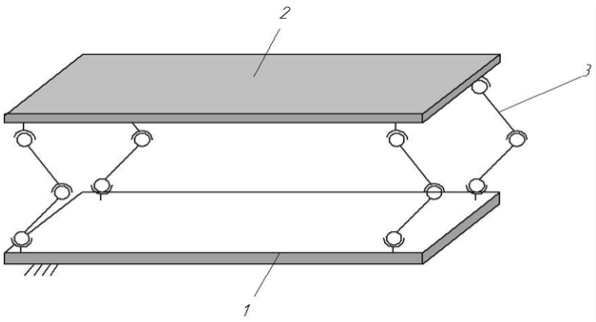


Рис. 1. Структурная схема приспособления для плоского шлифования заготовок из камня

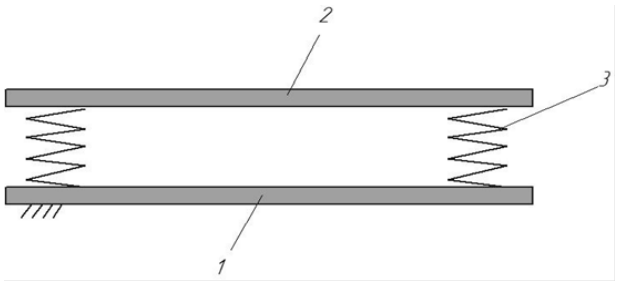


Рис. 2. Вариант реализации структурной схемы конструкции приспособления с упругими элементами

Для реализации колебаний в плоскости обработки заготовки предложено использование генератора ультразвуковых колебаний (УЗК), рис.3.

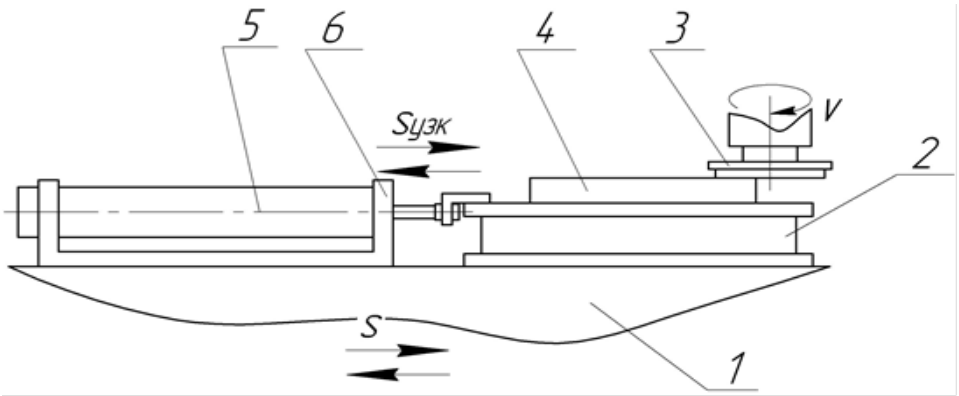


Рис. 3. Схема вибростола с генератором УЗК

Установка состоит из вибростола 2 и кронштейна 6, которые закрепляются на столе 1 технологического оборудования для шлифования изделия из гранита. Заготовка 4 устанавливается на верхней платформе вибростола 2. Генератор УЗК 5 крепится на кронштейне 6 и соединяется тягой с верхней платформой стола 2.

Обработка заготовки из камня ведётся абразивным кругом 3. В процессе обработки круг совершает вращательное движение *v*, стол станка совершает движение подачи *S*, при этом, на верхнюю платформу вибростола, сонаправлено движению подачи, подаются ультразвуковые колебания $S_{узк}$.

Для выбора частот колебаний генератора проведены исследования динамических характеристик вибростола, рис.4.

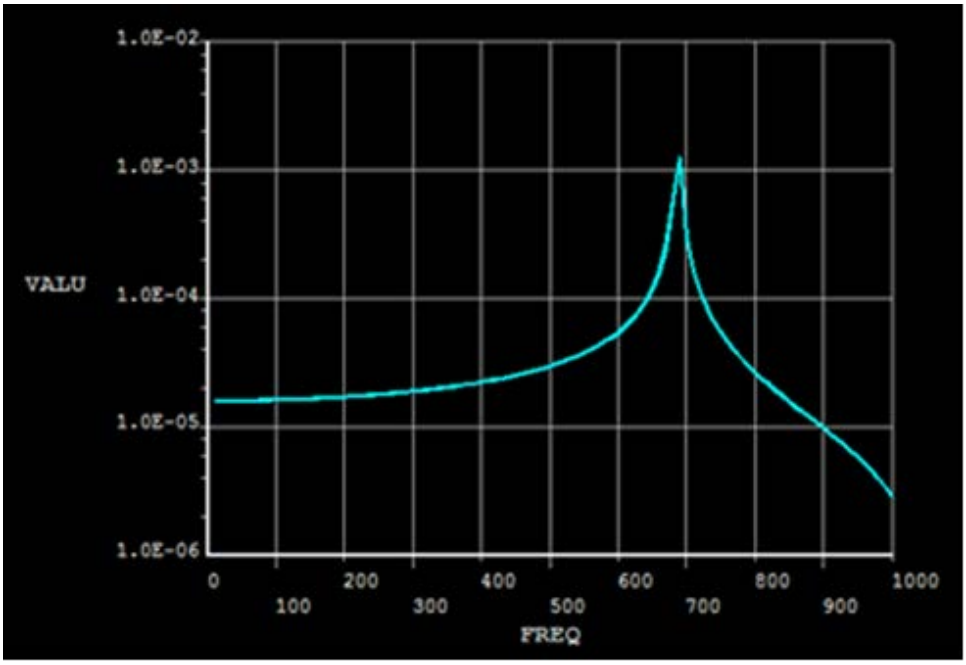


Рис. 4. Характер АЧХ разработанной конструкции вибростола

Анализ результатов теоретических исследований динамических характеристик приспособления выявил возможность использования УЗК частотой 2 кГц. Для создания УЗК осуществлён выбор возможных вариантов генераторов, в качестве которого предложен магнитострикционный преобразователь модели ПНС1-1.

Для подтверждения результатов теоретических исследований по возможности повышения производительности шлифования гранита при использовании УЗК были подготовлены и проведены экспериментальные исследования. Для этого были определены методы проведения экспериментальных исследований – натурной тензометрией, выбраны средства для проведения экспериментов, в качестве которых использовались станок модели 6М13П, алмазный шлифовальный круг АГШГ Д160мм АС50 400/315 М6-14.50% ТУ88, рис.5, специально разработанные головка для установки торцевого шлифовального инструмента и подачи СОЖ, измерительный инструмент [4,5].

Результат обработки экспериментального материала с доверительной вероятностью 0,95 подтвердил увеличение на 16,9 % производительности шлифования гранита с использованием УЗК, по сравнению с обработкой без применения вибраций.

Рис. 5 Вид вибростола с генератором УЗК на столе технологического оборудования

Выводы. Разработана структурная схема, модель конструкции вибростола с использованием упругих элементов. Проведённые исследования динамических характеристик разработанной конструкции вибростола позволили осуществить выбор частот внешних колебаний генератора УЗК. Выбран тип генератора ультразвуковых колебаний, в качестве которого принят генератор магнитострикционного типа модели ПНС 1-1 с частотой колебаний 2 кГц. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили результаты теоретических исследований по повышению производительности шлифования гранита с использованием УЗК.

Список литературы: **1.** Смирнов, А.Г. Добыча и обработка природного камня/ Под общ. ред. А.Г. Смирнова. – М.: Машиностроение, 1990. – 444с. **2.** Горобец, И.А. Направления повышения производительности обработки камня шлифованием/ И.А. Горобец, А.Н. Михайлов // Известия ТРТУ-ДонНТУ. Материалы Пятого Международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей шко-лы». В 2-х кн. – Таганрог: ТРТУ. Кн. 1, 2004, № 4. С. 137-146. **3.** Михайлов, А.Н. Повышение производительности шлифования изделий из природного камня / А.Н. Михайлов, И.А. Горобец, Н.В. Голубов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ООО «Лебедь», 2005. Вып. 29. С. 121-132. **4.** Горобец, И.А. Методика экспериментальных исследований процесса шлифования изделий из камня / И.А.Горобец, А.Н.Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ООО «Лебедь», 2004. Вып. 27. С. 82-88. **5.** Михайлов, А.Н. Экспериментальная установка для исследования процессов шлифования изделий из природного камня / А.Н. Михайлов, И.А. Горобец, А.В. Байков, Н.В. Голубов, А.Л. Ищенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство.– Донецк.: ДонНТУ. 2005. Вып. 92. - с. 164 – 174.

ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВО КАК ЛУЧШАЯ ФОРМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ, КОНКУРЕНТНОЙ И ДЕШЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

Григорьева Н.С., Шабайкович В.А.
(Луцкий национальный технический университет, г.Луцк, Украина)
Тел./Факс: +38 (063) 7141115; E-mail: vik_shabajkin@ukr.net

Abstract. *The features of entrepreneurship as the best form of manufacturing products are described. The basic elements of entrepreneurship are proactive creative work of staff, its private and open nature. Entrepreneurship is characterized by the interaction of three components: the subject of activity, the market environment, and the entrepreneurial structure. The principles of entrepreneurship are: free choice of activity, its independent formation, choice of material and technical support, suppliers and consumers of products, calculation and own risk, disposal of income, implementation of foreign economic activity. The impact of business taxation is important, which should be simplified*
Key words:*. entrepreneurship, components, principles, taxation.*

Предпринимательство это одна из лучших форм производственной деятельности, базируется на экономическом творчестве, в которое заложена новая коммерческо-творческая инициатива, новый метод и способ хозяйствования, самостоятельность и стратегическое видение [1].

Успешное проведение предпринимательства возможно лишь при условии твердого знания его основ, хотя сейчас наблюдается положительная ментальная ориентированность на предпринимательство. Одного желания мало, необходима соответствующая квалификация, которую нужно приобрести. Знание динамичности процессов, проходящих в предпринимательстве, является необходимым условием его успешности. Поэтому предпринимательство обязательно должно рассматриваться как процесс, успешность проведения которого зависит не только от желания им заняться, но и проведения анализа среды, наличия необходимой материально-технической базы, квалификации управленческого и рабочего персонала, действующего законодательства. Базовыми элементами предпринимательства считается инициативная творческая работа персонала. К основным препятствиям предпринимательства можно отнести нелепые законы, коррупцию, произвол, плохую среду, рэкет, клановость, преступность и т.п. Предпринимательство не возникло на пустом месте, а образовалось на основе артельщиков и цеховиков.

Предпринимательство характеризуется взаимодействием трех составляющих: субъекта деятельности, рыночной среды, что олицетворяет потребителей, конкурентов и контрагентов, предпринимательской структуры, как экономического субъекта на рынке. Принципами предпринимательства считаются: свободный выбор деятельности, самостоятельное ее формирование, выбор материально-технического обеспечения, поставщиков и потребителей продукции, наем персонала, коммерческий расчет и собственный риск, распоряжение доходами, осуществление внешнеэкономической деятельности, использование валютной выручки. При этом необходимо учитывать пандемию коронавируса, среду (экономическая и политическая ситуация, состояние общества, действующее законодательство и его выполнение, технологические, социально-культурные, физико-географические, институциональные среды), так и теневое влияние (коррупция, рэкет, кланы, преступность). Современными факторами влияния развития предпринимательства являются: глобализация экономики, интегральные процессы, информатизация общества, стоимостное мышление, развитие сферы услуг, рыночное новаторство, теневой сектор. Предпринимательству уделяется внимание не только, как производству на самостоятельной и независимой основе, но и его внутреннему характеру или интрапренерству. Это связано с переходом производственных структур на предпринимательскую форму организа-

ции производства. Причиной появления интрапренерства[1] стало использование новых конструкций и технологий. Возникновение интрапренерства обусловлено также объективными тенденциями социально-экономического развития общества, ведь оно развивается, когда в деятельности доминируют социальные факторы. Недооценка этих стремлений может привести к снижению интереса к выполняемой работе и потере предприятием наиболее способных и перспективных работников в поисках возможности для их самореализации и творчества. Реализация таких возможностей на действующих предприятиях позволяет решать указанные выше проблемы и обеспечивает их высокую конкурентоспособность.

Развитие интрапренерства обеспечивает эффективную деятельность предприятия, содействие в преодолении экономических трудностей. Поэтому на предприятии необходимо создать атмосферу поиска, поощрения выдвинутых идей, предложений, новых решений и т.п. Такая деятельность имеет организационно-производственные и ресурсные возможности по предпринимательской направленности. Организационно-производственные возможности - это производственно-техническое развитие и образование новых предпринимательских структур, ресурсные - коммерциализация ресурсов, развитие интеллектуального потенциала и повышение профессионализма.

Основами предпринимательства [2] являются его обоснованность, технология предпринимательского процесса, начало предпринимательской деятельности, организация предпринимательства, бизнес-план, выбор организационно-правовой формы деятельности, налогообложение деятельности. Технология предпринимательства требует выполнения взаимосвязанных этапов. Первым этапом является правильная идея предпринимательства как важного первоочередного условия успешного предпринимательства. Реальная идея должна быть связана с современностью продукции, возможностью ее изготовления и квалификацией персонала. Далее определяются вид деятельности, организационно-правовая форма, государственная регистрации, способ вхождения в бизнес, бизнес-план, прекращение деятельности. Здесь следует отметить значительные трудности и бюрократизацию этого процесса (сложности открытия деятельности, лицензирование, большая численность различных справок, согласований, взятки и дополнительная плата за все).

Организационно-правовые формы предпринимательства по характеру и содержанию деятельности это: предприятия, организации, учреждения, по форме собственности частные предприятия, действующими на основе частной собственности граждан или юридического лица, коллективной или смешанной формы собственности, коммунальные предприятия, государственные. По способу основания и формирования уставного фонда являются унитарными или корпоративными предприятиями, по виду деятельности производственными, коммерческими, финансовыми, по масштабу деятельности - малыми, средними, большими, по субъектам предприятия, юридическими, физическими лицами; по возможностям роста, мало-, средне- и высокопотенциальными. Полученные результаты заслуживают на скорейшее внедрение предпринимательства в производство [3].

На предпринимательство оказывает влияние налогообложение, куда входят общие принципы налоговой системы, которая является плохой по сравнению с зарубежными, виды общих налогов и их характеристика, виды местных налогов и сборов, упрощенная система налогообложения.

Литература: 1. Боброва, О. С. Настольная книга предпринимателя: практическое пособие / О. С. Боброва, С. И. Цыбуков, И. А. Бобров. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 330 с. **2**. Рубин, Ю.Б. Основы предпринимательства: Учебник / Ю.Б. Рубин. - М.: МФПУ Синергия, 2016. - 464 с. **3**. Григорьева Н.С., Шабайкович В.А. Малозатратное изготовление конкурентной продукции: Монография. -М.: Из-во: Palmarium academic publishing 2015. – 440 с.

[1] внутреннее инновационное предпринимательство

УДК 666.766

РАЗРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛЛАСТОНИТА ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЛИТЬЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Гусаров С.В., **Хорт Н.А.**, **Подболотов К.Б.**, *(Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)*
Тел./Факс:+375(017)36998762; E-mail: husarausv@mail.ru

Abstract: *The paper presents a possibility of obtaining ceramic materials for the manufacture of products used in the casting of aluminum alloys based on wollastonite and mullite-containing wastes. The dependences of the strength and density of ceramic materials on the ratio of the initial components, the type of a binder, as well as firing temperature, are established. It is shown that the composition with a content of 90% wollastonite, 10% mullite-containing wastes and 10-15% of refractory clay above of 100% of the mixture mass as a binder can be recommended for the manufacture of vibro cast wollastonite-based ceramic products.*
Key words: *wollastonite, mullite-containing wastes, alumina cement, refractory clay, compressive strength, aluminum melts.*

1. Введение

Основными требованиями, предъявляемыми к материалу в металлургической промышленности, является длительная стойкость в условиях циклического воздействия расплава и высокая механическая прочность. В настоящее время при получении расплава алюминиевых сплавов нашли широкое применение керамические изделия на основе волластонита, так как волластонит обладает инертностью к химическому взаимодействию с расплавом алюминия [1]. Для природного волластонита характерна игольчатая структура кристаллов, при раскалывании которых образуются зерна игольчатой формы, являющиеся микроармирующим элементом в керамической смеси и обеспечивают высокую термостойкость [2].

Формование керамических изделий на основе волластонита методом вибролитья позволит избежать технологических сложностей изготовления, обеспечить простоту и доступность изготовления штучных изделий сложной формы, а также произвести уплотнение смеси без разрушения и деформирования частиц заполнителя.

Для снижения затрат при производстве изделий разрабатывают составы, в которых осуществляют замену основных огнеупорных компонентов вторичным сырьем, а также вводят различные модифицирующие добавки, которые способствуют улучшению свойств изделия либо обеспечивают снижение температуры обжига.

На данный момент в Республике Беларусь отсутствует производство керамических изделий на основе волластонита, ввиду этого предприятия вынуждены приобретать импортную продукцию. В связи с этим, разработка технологии получения изделий на основе волластонита является одним из перспективных направлений в производстве керамических материалов.

Целью данной работы является разработка составов и технологии получения вибролитых керамических материалов на основе волластонита с минимальными затратами на сырье и энергоресурсы.

2. Материалы и методы

Для получения керамических материалов предназначенных для работы в контакте с алюминиевыми расплавами использовали следующие компоненты: волластонит молотый, огнеупорная глина марки ПГБ, глиноземистый цемент марки ГЦ-40, муллитсодержащие отходы машиностроительной отрасли в виде боя форм предназначенных для литья жаропрочных сплавов. Волластонит является основным компонентом, муллитсо-

держащие отходы являются добавкой улучшающей свойства изделия, а огнеупорная глина и глиноземистый цемент используются в качестве связующих компонентов.

Кажущуюся плотность, водопоглощение и открытую пористость испытуемых образцов определяли в соответствии с ГОСТ 2409. Прочность образцов на сжатие определяли согласно ГОСТ 4071.1. Усадку образцов при сушке и обжиге определяли в соответствии с ГОСТ 5402.

Сырьевую смесь готовили смешиванием исходных компонентов в сухом виде с последующим увлажнением массы до придания ей тиксотропных свойств. Образцы формовали в виде цилиндров высотой и диаметром 36 мм в пластмассовых формах методом вибролитья. Спекание производилось на воздухе при температурах 1000, 1100 и 1200 °С, со скоростью подъема температуры 5 °С/мин и выдержкой при максимальной температуре 1 ч после предварительной сушки при температуре 110 °С. Схема получения огнеупорных материалов представлена на рисунке 1.

Рис. 1 Схема получения огнеупорных материалов

3. Результаты и выводы

Для исследований были выбраны составы, содержащие 95–80 % волластонита, 5–20 % муллитсодержащих отходов, в качестве связующего компонента использовали 10–20 % глиноземистого цемента и 5 % огнеупорной глины сверх 100 % от массы смеси.

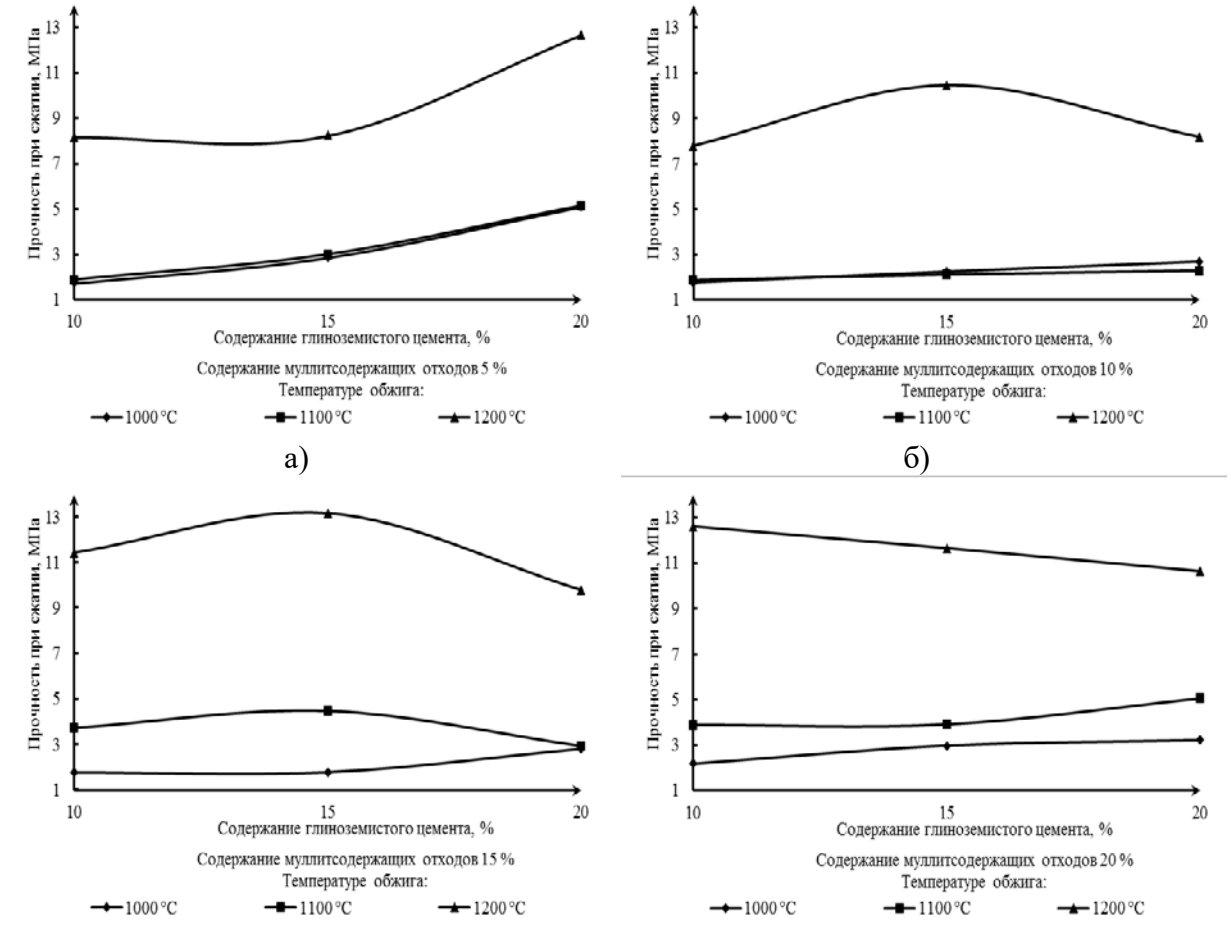
При проведении экспериментальной работы установлены зависимости прочностных характеристик от различного содержания отходов муллита и глиноземистого цемента, при температурах обжига 1000, 1100 и 1200 °С (рисунок 2).

Показано, что с увеличением температуры обжига прочность при сжатии образцов увеличивается, что объясняется структурно-фазовыми изменениями, протекающими в процессе спекания. Так предельная прочность при сжатии образцов обожжённых при температуре 1200 °С в 3-4 раза выше чем у образцов обожженных при температурах 1000 °С и 1100 °С. Увеличение содержания в составе смеси муллитсодержащих отходов способствует повышению механической прочности. Введение 5% огнеупорной глины к составу, содержащему 10 % муллитсодержащих отходов, позволяет повысить прочностные характеристики изделия более чем в 2 раза по сравнению с составом без огнеупорной глины (рисунок 3).

Для проведения исследований с использованием в качестве связующего компонента огнеупорной глины были выбраны составы, содержащие 90 % волластонита, 10 % муллитсодержащих отходов и 5–20 % огнеупорной глины сверх 100% от массы смеси.

В ходе работы установлены зависимости плотности и прочности материала от различного содержания огнеупорной глины и различных параметров термообработки (рисунок 4).

При увеличении температуры обжига прочность при сжатии и плотность образцов увеличивается, что объясняется структурно-фазовыми изменениями, протекающими в процессе спекания.



а – 5 % муллитсодержащих отходов; б – 10 % муллитсодержащих отходов;
в – 15 % муллитсодержащих отходов; г – 20 % муллитсодержащих отходов

Рис. 2. Зависимость прочностных характеристик материала от различного содержания муллитсодержащих отходов и глиноземистого цемента при температурах обжига 1000, 1100 и 1200 °С

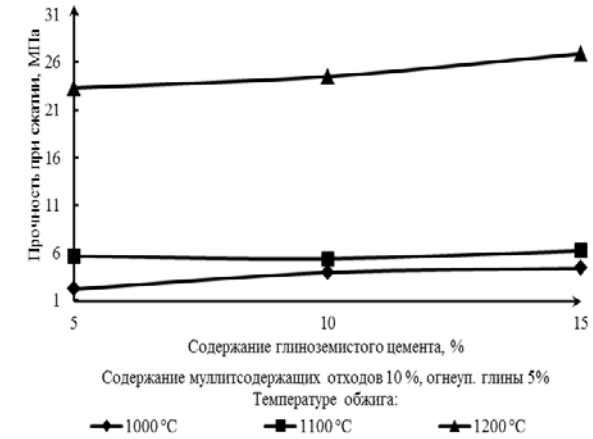
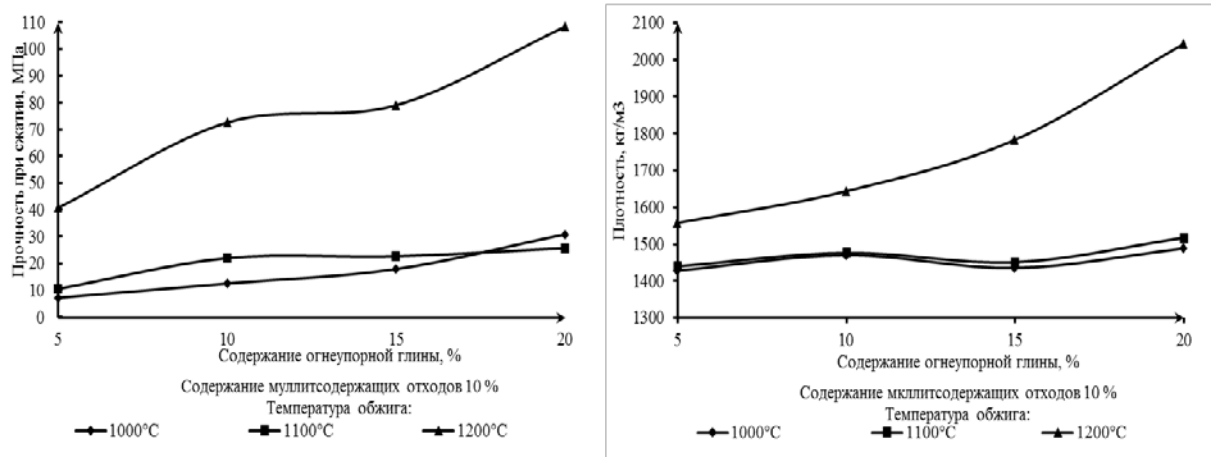


Рис. 3. Зависимость прочностных характеристик материала от различного содержания глиноземистого цемента и температуры обжига, при введении в состав смеси 10 % муллитсодержащих отходов и 5 % огнеупорной глины

Введение в качестве связующего компонента огнеупорной глины в 3-5 раз увеличивает прочностные характеристики изделия по сравнению с образцами, изготовленными с использованием глиноземистого цемента, что позволяет уменьшить температуру их обжига. Увеличение количества огнеупорной глины в состав смеси способствует увеличение плотности и прочности материала. Однако при содержании в составе более 20 % огнеупорной глины сверх 100% от массы смеси возрастает усадка изделий (более 4% после сушки), что в последующем, в процессе сушки, может привести к образованию трещин у тонкостенных изделий.



а) б)

а) прочность, МПа; б) плотность, %;

Рис. 4. Зависимость свойств огнеупорных изделий от содержания огнеупорной глины и различных параметров термообработки, при 10% муллитсодержащих отходов

Для изготовления вибролитых керамических изделий на основе волластонита предназначенных для работы в установках литья алюминиевых расплавов можно рекомендовать состав с соотношением компонентов: 90 % волластонита, 10 % муллитсодержащих отходов и в качестве связующего компонента 10-15 % огнеупорной глины сверх 100% от массы смеси. При температуре обжига 1200 °С данный состав позволяет получить керамический материал обладающий следующими свойствами: плотность 1650-1800 кг/м^3; открытая пористость 36-41 %; предел прочности при сжатии 72-79 МПа; водопоглощение 20-25 %, усадка после обжига 6,5-10,5 %.

4. Заключение

В работе показана возможность изготовления керамических материалов методом вибролитья на основе волластонита. Использование добавок муллитсодержащих отходов позволяет улучшить основные физико-химические свойства керамических материалов на основе волластонита.

При проведении экспериментальной работы установлены зависимости прочности и плотности материала от соотношения исходных компонентов и вида связующего. Показано, что наиболее эффективно использовать состав с содержанием 90 % волластонита, 10 % муллитсодержащих отходов и в качестве связующего компонента 10-15 % огнеупорной глины сверх 100% от массы смеси.

Получаемые керамические материалы на основе волластонита, обожженные при температуре 1200 ºС, обладают следующими свойствами: плотность 1650-1800 кг/м^3; открытая пористость 36-41 %; предел прочности при сжатии 72-79 МПа; водопоглощение 20-25 %, усадка после обжига 6,5-10,5 %.

Разработанные составы керамических материалов на основе волластонита методом вибролитья могут быть использованы в производстве изделий предназначенных для работы в установках для получения расплавов и сплавов алюминия.

Список литературы: 1. Волочко, А.Т. Теплоизолирующие керамические элементы при литье из алюминиевых сплавов / А.Т. Волочко. – Литье и металлургия, 2015. – №4(81). – С. 49-55. **2.** Керамика из природного волластонита для литейных установок алюминиевой промышленности / Л.Н. Русанова [и др.]. – Огнеупоры и техническая керамика, 2008. – №5. – С. 39-44.

ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

Гусев В.В., **Молчанов А.Д.**, **Моисеев Д.А.** *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел./Факс: +38 (062) 3010807; *E-mail:* msmo@fimm.donntu.org

Abstract: *The article establishes the kinematic input parameters for free-abrasive dressing of a grinding wheel on a metal bond. Results have been obtained that allow the development of a method for choosing the optimal parameters of straightening with a free abrasive according to technical criteria, depending on the processing conditions of technical ceramics.*
Key words: *dressing, grinding, ceramics, technique*

Выходные показатели технологической системы операции алмазного шлифования технической керамики – точность, качество обработанной поверхности, энергоемкость, производительность, расход инструмента определяется характеристикой инструмента и изменением состояния его рабочей поверхности круга (РПК) в процессе обработки. При шлифовании режущая способность шлифовального круга (ШК) уменьшается, силы резания возрастают в 1,7-2,5 раза, что приводит к снижению точности обработки и ухудшению структуры дефектного слояи как следствие к снижению прочности изделий [1,2]. Для восстановления рабочих характеристик шлифовального круга используют различные методы правкис целью восстановления его режущих способностей и требуемой геометрии инструмента.

Наиболее простым и эффективным управляющим воздействием является разновидность механического метода, к которому относится правка свободным абразивом [3,4,5]. Этот метод отличается, по сравнению с другими механическими методами правки, более мягким воздействием на алмазные зерна круга и большей избирательностью воздействия на связку круга. Метод правки свободным абразивом разрабатывается на кафедре «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ДонНТУ.

Процесс управляющих воздействий свободного абразива на РПК – можно представить как процессы абразивного износа связки ШК и притира. Сущность метода состоит в следующем. К вращающемуся на рабочей скорости кругу подводят до касания притир. Притиру задают возвратно-поступательное движение вдоль образующей инструмента. В зону контакта инструмента и притира подают свободный абразив, который путем шаржирования в притире и перекатывания по поверхности контакта в направлении вектора скорости вышлифовывает материал притира и связки инструмента. Интенсивность шлифования связки инструмента и материала притира определяется размером, подаваемых абразивных частиц и величиной зазора между инструментом и притиром. Длительность воздействия на РПК и его состояние зависит от правильного выбора начальных параметров и режима правки.

Цель исследований: установление кинематических входных параметров для правки свободным абразивом шлифовального круга на металлической связке.

Систему управления РПК можно представить состоящей из следующих подсистем: станка, шлифовального круга, устройства для правки, зоны контакта и подсистемы подачи в зону контакта СОТС. Подсистема СОТС оказывает влияние на температурный режим правки, физико-химические процессы в зоне контакта, которые в дальнейшем не будем рассматривать. Так как при воздействии на РПК абразивных зерен, температура в зоне контакта незначительна, то в дальнейшем тепловые процессы при правке не будем учитывать. Поэтому влияние подсистемы СОТС и взаимодействие ее с другими подсистемами не будем учитывать. Подсистема станка обеспечивает

компоновку системы управления РПК и оказывает влияние на процесс взаимодействия инструмента и притира через жесткость шпиндельного узла с кругом и угловую скорость последнего.

В качестве входных параметров подсистемы ШК перед правкой выступают геометрические размеры круга (радиус $R_{êð}$ и высота $B_{êð}$), форма и параметры характеризующие развитость режущего профиля исходного состояния РПК: характеристика круга (из которой прежде всего оказывают влияние твердость связки $HV_ê$ и средний размер алмазных зерен $\overline{d}_{à}$), средняя высота вылета зерен из связки РПК $\Delta\overline{R}_0$, среднее число зерен на единице поверхности $n_{ç0}$,плотность распределения вершин зерен по высоте РПК $f_0(u)$, а также режущая способность инструмента W_0. Режущую способность шлифовального круга определяли по упругой схеме с постоянным усилием поджима 40 Н на образце из ситалла АС-370 шириной 10 мм. При выполнении экспериментальных исследований использовали алмазный круг 1А1 250х10х5х76 А2 – 4 – М2-01. Состояние круга перед правкой определяется режимом шлифования заготовки, ее физико-механическими свойствами и объемом удаленного припуска.

Входные параметры на устройство для воздействия на РПК алмазного ШК задаются перед правкой и их можно назвать статично изменяемыми, так как мы не имеем возможности изменять их в процессе управления состоянием инструмента. К ним относятся форма и размеры притира, материал из которого он изготовлен, размер абразивных зерен, характеризуемый средним размером зерна $\overline{d}_{àá}$ и плотностью их распределения по диаметру $f(d_{àá})$, состав абразивной смеси (концентрация абразива $K_{àá}$, прочность абразивной смеси $\sigma_{àá}$). Выбор указанных параметров на процесс восстановления режущей способности алмазного инструмента был подробно рассмотрен в работах [6,7,8]. Для повышения режущей способности руга после правки необходимо, чтобы зернистость абразивного порошка превышала зернистость алмазного круга на 20…30%.

Частота f_o и амплитуда A_o осцилляции притира, радиальная к РПК скорость движения притира $V_{ïð}$, скорость подачи абразивной смеси $V_{àáð}$ являются входными параметрами устройства для подачи свободного абразива в зону правки. Абразивная смесь представляла брусок из 70% карбида кремниязеленого, зернистостью F70, и связующего гипса 30%. Прочность бруска на сжатие составлялаσ$_{сж}$≈ 1,5 МПа.

Амплитуда осцилляционного движения (A_o) и частота (f_o) выбирались из условия обеспечения прямолинейного профиля круга после правки и не оказывают влияние на изменение параметров РПК.

Удаление связки и наиболее слабо удерживаемых в связке алмазных зеренпри управляющем воздействии свободного абразива на рабочую поверхность алмазного круга, приводит к изменению числа алмазных зерен единице поверхности РПК и плотности распределения вершин зерен по ее высоте $\Delta R(\tau)$, которая изменяется от правостороннего распределения к нормальному распределению [9]. Характер изменение режущей способности круга от времени воздействия свободного абразива на РПК приведен на рис. 1.

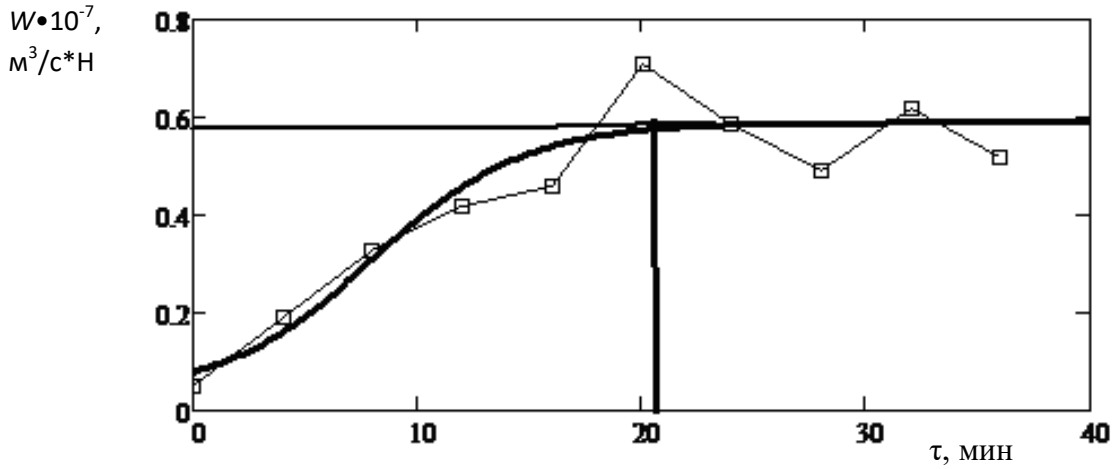


Рис.1. Влияние времени воздействия свободного абразива на РПК 1А1 250х10х5х76 А2 – 4 – М2-01 на его режущую способность *W*

Во время правки, на РПК происходит удаление зерен из связки ШК и дробление алмазных зерен прочно удерживаемых связкой, происходит линейный износ круга.Для достижения максимальной режущей способности круга после правки свободным абразивом необходимо обеспечить линейный износ алмазного круга (0,2..0,25)* $\overline{d}_{\text{à}}$, что превышает максимальное заглубление зерен в материал припуска при шлифовании. Это связано с тем, что при шлифовании керамики абразивным потоком разрушенного припуска повреждаются зерна непосредственно не участвующие в его удалении.

Для достижения максимально возможной режущей способности алмазного круга после правки необходимо определить рациональные кинематические параметры взаимодействия шлифовального круга и притира. Наиболее важным среди них является скорость шлифовального круга $V_к$.

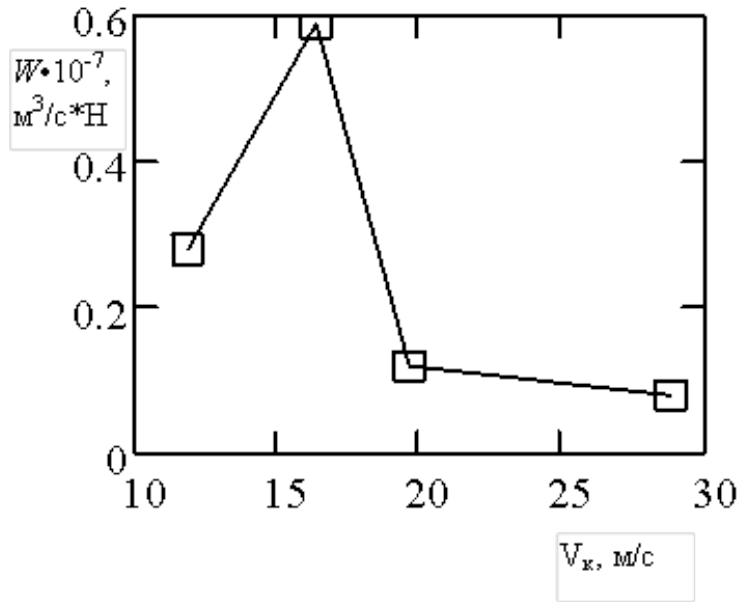


Рис.2 Влияние скорости шлифовального круга 1А1250х10х5х76 А2 250/200 –4 - М2-01 на режущую способность круга *W* при правке свободным абразивом

На рис.2 представлены результаты экспериментальных исследований влияния скорости шлифовального круга на максимально достижимую режущую способность алмазного круга при правке свободным абразивом. Максимально достижимая режущая способность алмазного круга при изменении его скорости при правке носит экстремальный характер с максимумом при $V_к$=16 м/с. При меньших значениях скоростей круга процесс затупления зерен круга протекает более

интенсивно, чем удаление связки. При больших значениях скоростей алмазного круга усилия на зерна круга от свободного абразива возрастают, что приводит к интенсификации процесса разрушения алмазных зерен и как следствие уменьшению режущей способности круга.

Другим важным кинематическим параметром, определяющим взаимодействие шлифовального круга и притира, является скорость притира. На рисунке 3 представлена зависимость необходимого времени управляющего воздействия свободного абразива для достижения максимально достижимой режущей способности от соотношения скоростей круга и притира *Vк/Vпр*. Наименьшее значение времени правки достигается при соотношении скоростей круга и притира *Vк/Vпр* = 1,1.. $1{,}6 \cdot 10^6$.При увеличении данного соотношения длительность правки возрастает, а режущая способность круга снижается. Таким образом, при скорости круга 16 м/сскорость перемещения притира должна составлять 18…25мкм/с.

Используя ранее полученные данные о соотношении скоростей (0,09) притира и абразивной смеси$V_{абр}$, можно рекомендовать скорость подачи абразивного бруска 200..275 мкм/с.

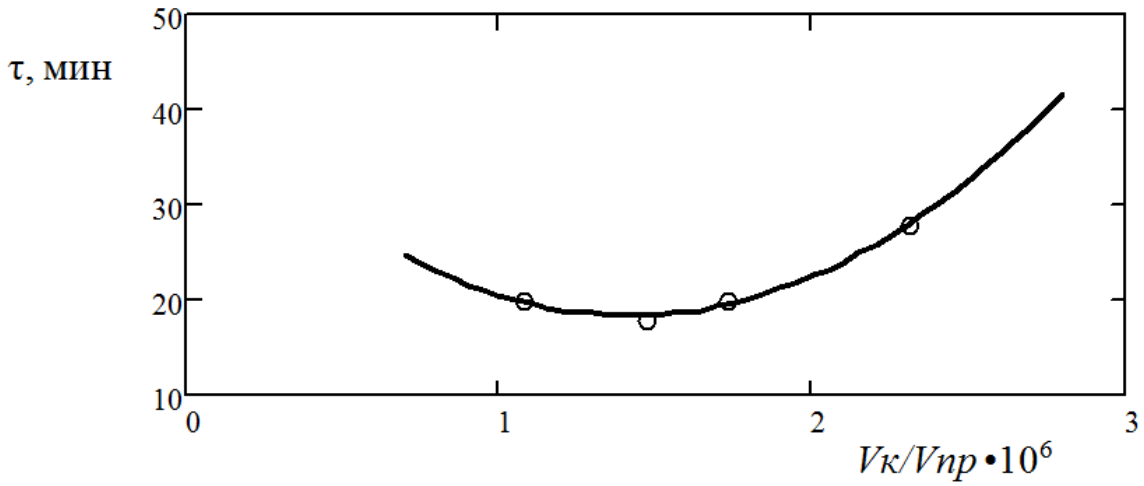


Рис. 3. Влияние отношения скоростей круга и притира *Vк/Vпр* на время правки для достижения максимально возможной режущей способности алмазного круга

Выводы.

При управляющих воздействиях свободного абразива на РПК необходимо тщательно выбирать входные параметры правки, которые непосредственно оказывают влияние на производительность восстановления режущей способности круга и ее предельно достижимое значение. Управляющие воздействия следует прекращать, когда режущая способность круга достигнет предельного уровня для выбранных условий, что позволит исключить чрезмерный расход алмазов и нерациональный расход правящего абразива. Для достижения максимальной режущей способности круга при правке свободным абразивом необходимо обеспечить линейный износ алмазного круга равный (0,2..0,25)* $\bar{d}_{\grave{a}}$.

Скорость круга при правке свободным абразивом не должна превышать 15 - 17 м/с.

Наименьшее значение длительности управляющих воздействий свободного абразива на РПК для достижения максимальной режущей способности его после

правки достигается при соотношении скоростей круга и притира *Vк/Vпр* = (1,1.. 1,6)•10^6. Отношение значений скоростей притира *Vпр* и абразивной смеси $V_{абр}$ должно бать равным 0,09.

Полученные результаты позволяют разработать методику выбора оптимальных параметров правки свободным абразивом по техническим критериям в зависимости от условий обработки технической керамики.

Список литературы: 1. Никитков, В.Б. Скоростная алмазная обработка деталей из технической керамики / Н.В. Никитков, В.Б. Рабинович, В.Н. Суботин, Н.Н. Шепилов. Под.ред. З.И. Кремня. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. – 131с. **2.** Гусев, В.В. Закономерности изменения состояния рабочей поверхности алмазного круга при шлифовании керамики / В.В. Гусев, А.Л. Медведев, В.В. Савельев// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Машинобудування і машинознавство». – Донецьк: ДонНТУ. – 2007. – Вип. №4 (124). – С.21-30. **3.**Бурмистров, В.В., Байков А.В. Способ правки абразивного инструмента // А.с. 1839393 СССР МКИ В 24 В 53/50. - Бюл. № 47-48. – 2 с. **4.** Пат. 4712334 USA, В 24 В 55/02 Anti-clogging device for grinding wheel / Yasuo Ikezaki, Tadashi Matsuoka, Kazuyuki Mitani; Заявитель и патентообладатель ToshibaTungaloyCo., Ltd.; Science&CreativeCo., Ltd., Toyomitsu Kogyo Co., Ltd. – 901198; заявлено 28.08.1986; опубл. 15.12.1987. – 3с. **5.** Пат. № 96351Украина, МПК В 24 В 53/00 Способ правки шлифовальных кругов свободным абразивом / В.В Гусев, Н.В. Вяльцев, А.Л. Медведев и др.; Заявитель и патенто обладатель ДонНТУ – а201001793; заявлено 19.02.2010; опубл. 25.10.2011, Бюл №20. **6**. Гусев, В.В. Влияние прочности удержания абразивных зерен в связке бруска для правки на режущую способность алмазного шлифовального круга / В.В. Гусев, Л.К. Савченко, А.Л. Медведев // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр.. Серія : Машинобудування та транспорт. – Севастополь : СевНТУ, 2011. - Вип. 118.- С. 27-31. **7.** Гусев, В.В. Выбор материала притира при правке свободным абразивом / В.В. Гусев, Лазарев Д.С., Моисеев Д.А// Международный сборник научных трудов Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк : ДонНТУ, 2018, - выпуск № 1 (60)' - С.25-29. **8.** Гусев, В.В. Теоретическое исследование механизма взаимодействия свободного абразива со связкой алмазного шлифовального круга при управлении состоянием его рабочей поверхности / В.В. Гусев, А.Л. Медведев //Вісник СевНТУ Збірник наукових праць Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь : СевНТУ, 2014. – Вип.. №150. – С.56-61. **9.** Гусев, В.В. Закономерности изменения режущей способности алмазных шлифовальных кругов при правке свободным и полусвязанным абразивом / В.В. Гусев, А.Л. Медведев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Машинобудування і машинознавство». – Донецьк: ДонНТУ. – 2009. – Вип. №6 (154). – С.41-48.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЙ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ (МКТ)

Гусев Е.Л. *(Институт проблем нефти и газа Федерального исследовательского центра «ЯНЦ СО РАН», Северо-Восточный федеральный университет, Институт математики и информатики, профессор кафедры прикладной математики, г. Якутск, Россия)*
E-mail: elgusev@mail.ru

Abstract: *Need of the motivation to long capacity to work composite materials and design of them raise urgency of the development of the efficient methods as short-term, so and fair-, and long-term forecasting defining features composites in extreme condition. In base of the development of the generalised models to longevity polymeric composite materials in extreme condition prescribed main positions modern molecular-kinetic theory. In accordance with worded by principle to multiplicity of the models of the forecasting and incorporated notion of the optimum models of the forecasting of the optimum structure and difficulties in variational production problem reconstruction vague parameter is worded as problem of searching for of the global minimum functional , valuing degree to adequacy to models, describing influence extreme factor external ambience on composite. Tthe comparative computing experiments are considered.*

Keywords*: composite materials, composite structures, generalised models of the forecasting, extreme factors of the external ambience, methods of the forecasting, remaining resource, longevity, model of the forecasting to optimum difficulty.*

Введение. Полимерные материалы (ПМ) и полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря разнообразию своих свойств получили самое широкое распространение во всех сферах человеческой жизни, в том числе, и при эксплуатации в экстремальных условиях [1-2]. При выборе материала для конкретного использования в промышленности, в строительстве, на транспорте, в быту из большого количества возможных вариантов подбирается такой состав, который обеспечит сочетание необходимых показателей при приемлемой стоимости. Важнейшим преимуществом материала становится его способность как можно дольше сохранять свою работоспособность, то есть, противостоять старению – совокупности физико-химических обратимых и необратимых превращений под воздействием агрессивных внешних факторов (температуры, влажности, солнечной радиации, механических напряжений и др. [3-5].

Совокупность требуемых показателей ПМ ,ПКМ при его приемлемой стоимости и способности противостоять старению являются основой для принятия решения об использовании материала. Доминируют ПМ и ПКМ, способные без замены функционировать 20-30, а в необходимых случаях и более 50 лет. Необходимость обоснования длительной работоспособности ПМ и ПКМ повышает актуальность разработки эффективных методов как краткосрочного, так и средне-, и долгосрочного прогнозирования определяющих характеристик композитов в экстремальных условиях. Важность разработки эффективных высокоточных методов долгосрочного прогнозирования определяющих характеристик композитов (остаточного ресурса, прочности, надежности, долговечности) , обуславливается тем, что композиционные материалы и конструкции из них являются неотъемлемой частью современной техники в таких областях, определяющих научно-технический прогресс, как авиа-, и космическая техника, судостроение, нефтяная и газовая промышленность и др. [6-14]. В

настоящее время важное значение имеет разработка подходов, направленных на поиск оптимальных вариантов из набора похожих материалов.

Роль и значение различных факторов, влияющих на долговечность композитов. Скорость и характер происходящих в материале изменений зависят от числа факторов, воздействующих на материал, и интенсивности воздействия. При этом существенной является продолжительность действия того или иного внешнего фактора. Из числа факторов, оказывающих существенное влияние на долговечность материала можно выделить агенты, непосредственно взаимодействующие с материалом, и активаторы, способствующие такому взаимодействию**.**

Наиболее распространенным и практически важным активатором, способствующим старению ПКМ, является температура. Температуру, как правило, следует рассматривать в качестве активатора процесса старения ПМ, однако в отдельных случаях она может рассматриваться и как агент непосредственно вызывающий старение. Выступая в роли агента старения, температура способствует развитию т.н. физического старения.

Влажность также как и температура, может играть роль и агента, и активатора старения. Действуя как агент старения, влага вступает в химическое взаимодействие с полимером, следствием которого является изменение свойств изделия.

Другим распространенным активатором старения является солнечная радиация (световое излучение) и, особенно, ее УФ-часть. Особое внимание, которое уделяют изучению действия радиации на ПКМ обусловлено тем, что УФ-часть солнечной радиации, поступающей на землю, настолько богата энергией, что способна разрушить практически любые встречающиеся в современных ПКМ связи. Применение ПКМ в авиационной и космической технике делает еще более актуальными исследования стойкости полимеров к излучению. Другим эффективным активатором старения является проникающая радиация, которая, в отличие от световой, способна инициировать превращения в объеме полимера.

К внешним активаторам процессов, приводящих к старению, следует отнести механические и электрические нагрузки. Перечисленные внешние факторы, являющиеся как активаторами, так и агентами старения полимеров, могут способствовать развитию химических, физических и смешанных процессов, результатом которых является изменение эксплуатационных свойств полимеров, а следовательно, и их способности выполнить «служебные функции» в различных условиях эксплуатации. Под воздействием активаторов и агентов старения ПКМ претерпевает различные превращения, обусловленные протеканием химических и физических процессов**.**

Химические превращения протекают в результате взаимодействия ПКМ с кислородом, водой, различными химическими соединениями. На химические превращения могут оказывать влияние примеси, содержащиеся в ПМ. Большинство химических превращений инициируется внешними факторами - температурой, световой и проникающей радиацией; механические и электрические воздействия в большинстве случаев способствуют ускорению химических превращений.

Химические превращения могут происходить как на межмолекулярном, так и на внутримолекулярном уровнях. На основе проведенных исследований была установлена связь между энергией активации протекающего при старении химического процесса и интенсивностью молекулярных движений в полимере. Это выражается в зависимости энергии активации от температуры и физического состояния полимера.

К числу внешних факторов, активизирующих физический процесс старения, относятся механические нагрузки, которые могут быть статическми или динамическими. Механические и электрические нагрузки могут также ускорять

химические превращения, протекающие под действием различных агентов старения. Установлено, что при эксплуатации в полевых условиях значительный вклад в изменение свойств изделия вносит солнечная радиация. Эффективность ее действия зависит от спектрального состава и типа функциональных групп, входящих в состав макромолекулы полимера, а также от содержащихся в материале добавок. В результате проведенных работ было сформулировано понятие «спектр активации». Под этим понимается та длина волны или сравнительно узкая область длин волн, которая, попадая на полимер, инициирует наиболее заметные изменения в его химическом составе или структуре.

Трудности разработки обоснованных подходов к прогнозированию изменения свойств ПКМ. Сложность разработки эффективных методов прогнозирования ПКМ объясняется, прежде всего тем, что механизм старения полимеров изучен недостаточно, не установлена количественная связь между влиянием различных видов внешних воздействий на скорость преобладающего процесса старения. Для удовлетворительного прогнозирования необходимо иметь простые и надежные соотношения между кинетическими параметрами физико-химических процессов и макросвойствами материала, определяющими их эксплуатационную пригодность.

Эти и другие вопросы составляют серьезную научную проблему, стоящую на пути создания обоснованных подходов к прогнозированию изменения свойств ПКМ при их хранении и эксплуатации. Важность и актуальность разработки эффективных методов прогнозирования изменения свойств ПКМ объясняется тем, что без данных о характере и скорости изменения механических, электрических, теплофизических свойств полимеров в условиях эксплуатации изделий невозможно обеспечить рациональный выбор материалов и повысить за счет этого надежность изделий .

Применение современных положений молекулярно-кинетической теории (МКТ). В основу разработки обобщенных моделей долговечности ПКМ в экстремальных условиях положены основные положения современной МКТ. В соответствии с основными положениями МКТ разработаны две современные теории, объясняющие кинетику протекания элементарных реакций: теория активных столкновений (ТАС) и теория активированных комплексов (ТАК). В рамках ТАС предполагается, что реакции осуществляются в моменты столкновения молекул, которые приводят к химическому превращению только в том случае, когда сталкивающиеся молекулы обладают большим запасом энергии. Большой запас энергии необходим для преодоления сил отталкивания для сближения молекул до малых расстояний, на которых возможно перераспределение химических связей в реагентах. В ТАК для любой элементарной реакции предполагается, что начальная конфигурация атомов переходит в конечную в результате непрерывного изменения межъядерных расстояний. В процессе непрерывного изменения межъядерных расстояний, между одними группами атомов расстояние уменьшается, а между другими группами – увеличивается. В процессе непрерывного изменения межъядерных расстояний непрерывно образуются промежуточные конфигурации, критические для данной реакции, в которых одни связи уже ослаблены, но еще не полностью разорваны, а другие связи уже начали образовываться. Продукты реакции могут появиться только при условии образования такой критической конфигурации (переходное состояние, активированным комплекс).

На основе современных положений МКТ установлено, что скорость химической реакции представляется уравнением Аррениуса вида $k=k_0\ exp(-E_a/RT)$. Фактор частоты k_0 характеризует частоту столкновений реагирующих молекул (число активных столкновений частиц в единице объема в реакционной смеси). Т.е. фактор k_0

выражает ту долю частиц, у которых энергия равна или больше энергии активации. Энергия активации E_a представляет собой избыток энергии по отношению к средней энергии частиц при данной температуре, который необходим для того, чтобы реагирующие частицы могли вступить в химическую реакцию и определяется свойствами реагирующих частиц, их энергетическим состоянием. Уравнение Аррениуса в дифференциальной форме может быть представлено в виде: $d\left(\ln k\right)/dT = E_a / RT^2$. Проведенный анализ уравнения Аррениуса в дифференциальной форме показывает, что чем больше энергия активации, тем быстрее увеличивается константа скорости реакции с возрастанием температуры.

Построение обобщенных моделей долговечности на основе современных положений МКТ. В общем случае на полимерные, композиционные материалы, композиционные конструкции могут воздействовать в различных комбинациях одновременно несколько различных факторов F_j, связанных с процессами упрочнения, воздействием солнечной радиации, влагонасыщением, воздействием УФ- излучения, и т.п. В предположении, что различные физические факторы оказывают на ПКМ воздействие, независимое от воздействия других факторов, и изменения, вызванные в композите, суммируются, можно принять что обобщенная модель, описывающая одновременное воздействие нескольких факторов может быть представлена в виде:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^{p} F_j\left(u_{j,1}, u_{j,2}, ..., u_{j,l_j}; t\right). \qquad (1)$$

В соответствии с современными положениями МКТ будем считать, что воздействие каждого из факторов F_j на композит активирует на микроуровне совокупность деструктивных элементарных процессов, протекающие химические реакции в которых могут быть описаны в виде суперпозиции уравнений Аррениуса. Каждое из составляющих суперпозицию уравнений Аррениуса описывает определенный вид химических реакций, с присущими ему параметрами - фактором частоты, характеризующим частоту столкновений реагирующих молекул (число активных столкновений частиц в единице объема ПКМ), и энергией активации, присущими для данной реакции. Пусть N_j – число элементарных деструктивных процессов, протекание химических реакций в которых активизируется при воздействии j-го фактора на композит. В соответствии со сформулированными положениями каждый фактор F_j может быть представлен в виде суперпозиции уравнений Аррениуса в следующей форме:

$$F_j\left(u_{j,1}, ..., u_{j,l_j}; t\right) = \sum_{k=1}^{N_j} \alpha_{kj}\left(u_{j,1}, ..., u_{j,l_j}\right)\left[\exp\left(\beta_{kj}\left(u_{j,1}, ..., u_{j,l_j}\right)t\right) - 1\right], \qquad (2)$$
$$j = 1, 2, ..., p; \quad 0 \le t \le T_{\max}$$

Здесь $u_{j,1}, u_{j,2}, ..., u_{j,l_j}$ - параметры, описывающие характер воздействия j-го фактора на композит. Параметры $\alpha_{kj} = \alpha_{kj}\left(u_{j,1}, ..., u_{j,l_j}\right)$ выражают долю частиц, у которых энергия больше или равна энергии активации, необходимой для инициирования k-ой элементарной химической реакции (k=1,2,…,N_j) при воздействии на композит фактора F_j; параметры $\beta_{kj} = \beta_{kj}\left(u_{j,1}, ..., u_{j,l_j}\right)$ связаны с энергией активации, т.е. с избытком энергии по отношению к средней энергии частиц при данной температуре, необходимого для того, чтобы реагирующие частицы могли инициировать

k-ую элементарную химическую реакцию (k=1,2,…,N_j) при воздействии на композит фактора F_j. Избыток энергии, связанный с энергией активации, определяется свойствами реагирующих частиц, их энергетическим состоянием.

Для оценки влияния на долговечность ПКМ экстремальных факторов F_j на длительный период времени была поставлена задача восстановления параметров химических реакций, приводящих к деструктивным изменениям в композитах и ухудшению их характеристик с течением времени. Поставленная задача заключается в том, чтобы на основе информации, полученной из краткосрочных физических экспериментов, проведенных на временном интервале ретроспекции [0,Tmin], предшествующем прогнозируемому временному отрезку [Tmin, Tmax] восстановить параметры деструктивных химических реакций в композите. Объективная оценка параметров деструктивных химических реакций в композите на основе проведенных физических экспериментов может позволить построить эффективные обобщенные модели долговечности на долгосрочный период, а также провести конструктивный анализ влияния отдельных факторов на долговечность композита, и дать сравнительную оценку степени влияния того или иного экстремального фактора на долговечность композита. Знание параметров деструктивных химических реакций в композите, инициированных действием экстремальных факторов внешней среды, их сравнительный конструктивный анализ, может также позволить разработать методику синтеза новых материалов с повышенной долговечностью.

Физические задачи восстановления параметров деструктивных химических реакций, инициированных действием экстремальных факторов внешней среды сформулированы в математической форме в рамках уточненных вариационных постановок обратных задач прогнозирования определяющих характеристик ПКМ. В соответствии со сформулированным принципом множественности моделей прогнозирования и введенным понятием оптимальных моделей прогнозирования оптимальной структуры и сложности в вариационной постановке [7 - 12], задача восстановления неопределенных параметров может быть сведена к нахождению глобального минимума функционала J, оценивающего степень адекватности модели, описывающей воздействие экстремальных факторов внешней среды на композит

$$J\left(\left\{\left(u^*_{j,1},u^*_{j,2},\ldots u^*_{j,l_j}\right)\right\}_{j=1}^{p}\right)=\min_{\{u_{jk}\}} J\left(\left\{\left(u_{j,1},u_{j,2},\ldots u_{j,l_j}\right)\right\}_{j=1}^{p}\right) \qquad (3)$$

Для построения глобального минимума в экстремальной задаче (3) разработаны комбинированные методы поиска глобального экстремума, основанные на комбинированном применении необходимых и достаточных условии экстремума и методов полного перебора. Приведены сравнительные вычислительные эксперименты. Разработанные комбинированные методы могут быть применены для эффективного восстановления параметров моделей в усложненных задачах прогнозирования долговечности композиционных конструкций при воздействии эксплуатационных нагрузок и экстремальных факторов внешней среды, поскольку позволяет находить существенно более эффективные решения по сравнению с существующим подходами.

Список литературы. **1.** Уржумцев Ю.С. Прогнозирование длительного сопротивления полимерных материалов - М. : Наука, 1982. - 222 с. **2.** Филатов И.С. Климатическая устойчивость полимерных материалов. М.: 1983. 216 с. **3.** Реутов А.И. Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов,

применяемых в строительстве // Вестник ТГАСУ, 2009, №2, с. 127-141. **4.** Степанов М.Н., Зинин А.В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2007. 392 с. **5.** Башкарев А. Я., Веттегрень В.И., Суслов М.А. Долговечность полимерных композитов, СППТУ, С-Птб, 2016. - 147 с. **6.** Гусев Е.Л., Бакулин В.Н. Оптимальное управление уменьшением интенсивности теплового поля на основе выбора структуры неоднородных конструкций в вариационной постановке // Доклады РАН, 2018, т.480, № 3, с.287-292. **7.** Gusev E.L. Using parallel procedures for the searching of the extremum for the decision of the inverse problems prediction of the defining characteristics of the composite materials// Material Physics and Mechanics, 2016, v.26, N 1 , p. 70-72. **8.** Гусев Е.Л., Бакулин В.Н. Вариационные постановки обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов // Доклады Академии наук, 2018, т. 482, №3. с. 281-286. **9.** Гусев Е.Л. Постановка и решение задач прогнозирования остаточного ресурса, долговечности композиционных материалов и конструкций при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды // Сб. трудов VII Межд. конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов, М., ИМЕТ РАН, 2017, с. 847-849. **10.** Гусев Е.Л. Методы решения обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов в уточненных вариационных постановках на основе принципа множественности моделей прогнозирования//В сб. трудов всероссийской конференции «Механические свойства современных конструкционных материалов», М., ИМЕТ, 2018, с. 53. **11.** Гусев Е.Л. Математические методы прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов и конструкций, основанные на принципе множественности моделей прогнозирования в вариационных постановках//Труды третьей Межд. конференции «Деформирование и разрушение материалов и конструкций» (Deformation and Failure of Composite Materials and Structures, DFCMS-2018), посвященной 80-летию ИМАШ РАН» , Москва, ИМАШ РАН, 2018, с. 37-39. **12.** Гусев Е.Л. Методы, связанные с выделением перспективных направлений поиска для решения обратных задач прогнозирования определяющих характеристик полимерных композитов при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды и эксплуатационных нагрузок // Сб. трудов Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», М., ИПРИМ РАН, 2015, с. 518-520. **13.** Гусев Е.Л., Бабенко Ф.И. Методы поиска экстремума с оптимальным выбором параметров для решения задач восстановления параметров моделей прогнозирования определяющих характеристик полимерных композитов // Сб. трудов «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике», М., ВИАМ, 2015, с.132-141. **14.** Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волокнистых композитов в результате климатического воздействия. Препринт, - Якутск, 1988. - 32 с.

ПРОФИЛАКТИКА ПРИХВАТОВ ХВОСТОВИКОВ ПРИ БУРЕНИИ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИН

Гусейнова Е. Л. *(Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском, Россия)*
Тел./Факс: +7 (34767) 66404; E-mail: info@of.ugntu.ru

Abstract: *The article analyzes the problems arising during well drilling and associated with liner tacking. The paper gives a general characteristic of the stuck and gives their classification. Described differential sticking, which is the cause of complications in most cases, and ways to eliminate it. A set of measures for the prevention of sticking has also been developed and proposed, which includes the use of the Rhino XC Tool borehole reamer and filters with plugs, the use of dry lubrication, and the use of an eccentric shoe.*
Keywords: *differential grip, Rhino XC Tool expander, filter with plugs, dry lubrication, eccentric shoe.*

1. Введение

Наиболее частым видом осложнений, происходящих при бурении наклонно направленных скважин с горизонтальным участком ствола, являются прихваты. Все прихваты можно разделить на две категории: прихваты, обусловленные механическим взаимодействием, и дифференциальные прихваты. Подавляющее большинство произошедших в бурении прихватов (80%) относятся к дифференциальным, причиной возникновения оставшихся 20% являются механическое воздействие или неисправность оборудования [1]. В большинстве случаев прихваты происходят при подъеме инструмента, наиболее частой причиной возникновения при этом являются наличие шлама или обвал породы, реже прихваты возникают во время спуска инструмента в скважину. Причиной возникновения прихватов может являться некачественная очистка ствола скважины или слабая устойчивость ее стенок, продолжительное прекращение циркуляции промывочной жидкости. Прихваты шламом или обвалившейся породой являются наиболее опасными, так как освобождение колонны, прихваченной шламом или обвалившейся породой, является более трудоемким процессом по сравнению с освобождением колонны, заклинившей на участках со сложной геометрией ствола или прихваченной под действием дифференциального прихвата. Ликвидации таких прихватов характеризуется потерей большего количества оборудования и более частой необходимостью бурения бокового ствола [2].

Вдавливание неподвижной обсадной колонны в фильтрационную глинистую корку, образовавшуюся на стенках скважины, является причиной возникновения дифференциальных прихватов, которые происходят под действием перепада давлений в скважине и проницаемом пласте [3]. Возникновению дифференциального прихвата способствует наличие: проницаемых пластов, репрессии, толстой фильтрационной корки, контакта колонны со стенкой скважины, неподвижного состояния колонны, времени, поперечной нагрузки, невнимательности буровой бригады. Перечисленные факторы оказывают влияние на силу, прижимающую колонну к стенке скважины с фильтрационной коркой и обусловленную дифференциальным давлением [4]. Дифференциального прихват встречается только в зоне проницаемой формации, например, песка. Существует несколько причин возникновения прихвата.

1. Прихват колонны возможен в случае контакта части колонны со стенкой ствола и прижатия ее к фильтрационной корке. На часть поверхности колонны, контактирующей с фильтрационной коркой, оказывает воздействие гидростатическое давление столба бурового раствора.

2. Градиент давлений столба бурового раствора и в формации воздействует на площадь колонны, которая находится в контакте с фильтрационной коркой стенки ствола скважины, и возникающая при этом сила удерживает колонну.

Вызванная прихватом дифференциального давления затяжка вычисляется как произведение дифференциального давления, площади контакта и фактора трения [4].

Для успешной ликвидации прихвата необходимо определить его причину. Огромную роль играет быстрое и правильное выполнение начальных действий, поскольку с течением времени любая ситуация только усложняется. Как показывают статистические данные, в течение первых четырех часов после возникновения прихвата удается освободить 50% всех прихваченных колонн, затем этот показатель снижается до 10%.

В случае возникновения прихвата шламом или обвалившейся породой: сбрасывается давление, причиной увеличения которого является образовавшаяся пробка, а затем создается небольшое давление, поскольку слишком большое давление может способствовать дальнейшему продвижении обсадной колонны в пробку. Небольшое давление восстанавливает циркуляцию промывочной жидкости в том случае, если удается сдвинуть колонну с места.

При попытке приподнять обсадную колонну, она может еще дальше продвинуться в пробку. Поэтому необходимо сместить обсадную колонну и восстановить циркуляцию, размыть пробку и вынести материал пробки на дневную поверхность. При восстановлении циркуляции расход промывочной жидкости увеличивают до максимального значения, при котором не наступает поглощения. Циркуляцию необходимо продолжать до очищения скважины.

2. Основное содержание и результаты работы

На месторождениях России, которые эксплуатируются не первый год и находятся на второй и третьей стадиях разработки, проблема прихватов хвостовика является актуальной.Согласно проведенным исследованиям, на месторождениях Красноярского края среднее пластовое давление пласта Нх-3-4 составляет 160 атм. При этом, принятая величина начального пластового давления пласта Нх 3-4 составляет 270 атм. Таким образом, коэффициент аномальности пластового давления равен 0,58. Поэтому очевидны риски возникновения аварийной ситуации в процессе строительства и реконструкций скважин методом ЗБС, возникновение дифференциальных прихватов, осыпание нестабильных глин и т д.

Учитывая необходимость сокращения фонда бездействующих скважин, используя опыт бурения боковых стволов в условиях низких пластовых давлений продуктивного пласта Нх 3-4 (до 60% от гидростатического), для успешной проводки ствола скважины и безаварийного спуска “хвостовика” предлагаются к реализации в комплексе следующие технико-технологические мероприятия:

1. Применение гидравлического расширителя Rhino XC Tool с возможностью расширения ствола скважины в процессе бурения с 155,6 до 165 мм до точки Т2.
2. Использование фильтра с заглушками (ФС) для возможности промывки скважины через низ хвостовика, в т. ч. и прокачка (при необходимости) кальматационных пачек бурового раствора после прохождения низа компоновки через интервал суперколлектора.
3. Использование сухой смазки STIK LESS. Перед спуском “хвостовика” устанавливается в зону высокой интенсивности ствола пачка с материалом, уменьшающим коэффициент трения, для лучшего доведения веса до башмака хвостовика, в процессе спуска.
4. Применение направляющего вращающегося башмака хвостовика.

Разработанный компанией Shlumberger расширитель Rhino XC Tool предназначен для увеличения ствола скважины, и основой его работы является гидравлическая активация дополнительных фрезов. Расширитель, проходя по стволу скважины, увеличивает ее

диаметр до 165 мм, что положительной особенностью данной технологии. Возможность активирования и деактивирования расширителя на любом этапе бурения скважины также является положительным фактором. Применение данной технологии способствует уменьшению площади контактирования фильтра хвостовика с горной породой.

Первая в России скважина с применением расширителя Rhino XC была пробурена в 2017 году на Ванкорском месторождении. Бурение с расширителем проводилось до проектного горизонта, далее расширитель был деактивирован.

Положительный опыт применения расширителя имеется и в других компаниях. Нефтяная компания SOCAR, принадлежащая Республике Азербайджан, использовала расширитель Rhino XC с гидравлическим приводом при строительстве скважины на Карадагском месторождении, применение расширителя позволило пробурить и расширить 989 метров верхней секции с 444,5 до 504 мм за одно долбление. В результате применения Rhino XC была пробурена скважина номинального диаметра, отличающаяся высоким качеством, что позволило максимально облегчить спуск обсадной колонны. Процесс бурения сопровождался активацией и деактивацией расширителя (восемь раз). Руководство компанией SOCAR планирует расширить опыт применения надежно зарекомендовавшего себя расширителя при бурении других скважин [5].

Также для предотвращения прихватов на месторождениях России нашла применение сухая смазка STIK LESS, которая представляет собой бесцветные микросферы размером от 500 до 800 мкм. Применение данной технологии обладает рядом преимуществ. Добавление микросфер в буровой раствор позволяет значительно улучшить смазывающую способность растворов на водной, нефтяной и синтетический основе. Лабораторные и практические исследования сухой смазки доказали, что ее использование значительно снижает момент на сдвиг при дифференциальном прихвате. Также значительно снижается вероятность возникновения прихвата труб при перепаде давления. Кроме того, микросферы не засоряют пласт и легко вымываются из скважины [6]. На Ванкорском месторождении, в мае 2018 года был проведен успешный спуск хвостовика с использованием сухой смазки STIK LESS.

В 2017 году на Ванкорском месторождении были проведены исследования по влиянию сухой смазки Alpine drill beard на подвижность буровой колонны. При бурении бокового ствола во время проведения последней шаблонировки в открытый ствол скважины была установлена пачка бурового раствора с Alpine Drill Beads, концентрацией 20 кг/м3. Для оценки эффективности использования Alpine Drill Beads было произведено сравнение веса при подъеме бурильного инструмента перед установкой пачки и после установки, а также сравнение веса на крюке при спуске хвостовика с расчетными параметрами. При спуске хвостовика была составлена дорожная карта, позволяющая наглядно увидеть, значительное понижение фактического веса КП при спуске хвостовика по сравнению с расчетным. В результате произведенного пересчета, учитывающего фактический вес КП при спуске хвостовика, коэффициент трения получился меньше 0,3, в то время как расчетный коэффициент был равен 0,4-0,5.

Компания ООО «РН-Уватнефтегаз» внедряла закачку пачки бурового раствора, содержащей «сухую смазку» в виде калиброванных стеклянных микросфер диаметром до 800 мкм, перед спуском эксплуатационной колонны в скважинах с отходами от вертикали более 3500 м. Пачку устанавливали в интервалы открытого ствола скважины, а именно на участке падения зенитного угла в S-образных наклонно направленных скважинах и в интервале набора зенитного угла в J-образном транспортном стволе горизонтальной скважины, в которых наблюдались наибольшие коэффициенты трения. Смазка применялась одновременно с полужесткими центраторами, что позволило уменьшить коэффициент трения при спуске обсадных колонн в глубоких скважинах в обсаженном

стволе до 0,20 и в открытом стволе до 0,30. Коэффициенты трения при применении стандартных технологий и оснастки составляют 0,25 и 0,40 [7].

Компания ООО «Газпромнефть-Хантос» начиная с октября 2016 года на Южно-Приобском месторождении пробурила 10 горизонтальных скважин, в которых для бурения горизонтального ствола применялся буровой раствор без наработанной активной твердой фазы с добавлением микросфер или «микрошаров». Использование данной технологии позволило снизить риск получения осложнений при увеличении плотности раствора, обусловленных прихватами хвостовиков [8].

При бурении горизонтальных скважин крепление хвостовика, который имеет заранее перфорированную часть и цементируется выше фильтра, может сопровождаться недохождением хвостовика до забоя без промывки через башмак, также может происходить некачественное удаление глинистого раствора и шлама в интервале фильтра и заколонном пространстве хвостовика [9]. Одним из способов снижения риска прихвата при спуске хвостовика является применение фильтров с заглушками ФС114-6000х0,3-10х64-КЦ132. Данные фильтра применяются в нефтяных, газовых и водозаборных скважинах любой конструкции и работают в среде минерализованной пластовой воды, нефти, природного газа, конденсата и других скважинных флюидах. Фильтры предназначены для предотвращения разрушения слабосцементированных коллекторов и попадания в скважину песка и других механических примесей. Фильтр устанавливается в нижней части колонны обсадных труб посредством свинчивания с ней по резьбе. После цементирования и промывки скважины обсадной колонны у фильтра типа ФС114-6000х0,3-10х64-КЦ132 срезают герметизирующие заглушки устройством для сбития заглушек с отслеживанием выхода их на устье скважины. Предлагаемая технология позволяет производить спуск инструмента с хвостовиком до забоя с качественной промывкой и без осложнений; и прокачку кольматационных пачек.

Еще одним способом снижения риска возникновения прихватов является использование башмака колонного вращающегося – БК- Вр 114. Башмак колонный с возможностью вращения БК-Вр предназначен для оборудования низа обсадной колонны, с целью направления ее по стволу скважины и прохождения осложненных зон (каверны и зоны сужения ствола) без посадок, что осуществляется за счет преодоления эксцентрическим наконечником башмака уступов и огибания преград. В горизонтальном стволе скважины посадка и последующая остановка движения обсадной колонны, как правило, всегда связаны с тем, что перед башмаком нагребается шлам, который находится на нижней образующей ствола скважины. Для более наглядного представления процесса движение обсадной колонны можно сравнить с трелевкой бревна по земле. Оснащение бревна вращающейся полусферической эксцентричной головкой позволяет значительно улучшить скольжение его по любой неровной поверхности. Подобный принцип реализован в новой конструкции вращающегося башмака. Башмак БК-Вр имеет конструктивные особенности: направляющая пробка башмака выполнена со скосом 20 – 30° и эксцентричным смещением вершины округлого конуса относительно оси башмака. БК-Вр 114 используется в скважинах, в которые спускаются обсадные колонны условным диаметром 114 мм. Областью применения устройства являются вертикальные, наклонно- направленные и скважины с горизонтальным окончанием. В комплектацию башмака колонного БК-Вр 114 входит эксцентричная насадка из алюминиевого сплава с одним центральным и четырьмя боковыми промывочными отверстиями, закрепленная в муфте и имеющая подшипник скольжения.

В мае 2018 года на Ванкорском месторождении для успешной проводки ствола скважины и безаварийного спуска “хвостовика” были применены предлагаемые в статье технологии. Был успешно пробурен боковой ствол с горизонтальным окончанием, при строительстве скважины использован опыт бурения стволов в условиях низких пластовых

давлений продуктивного пласта Нх 3-4. Применение расширителя Rhino xc позволило увеличить диаметр ствола, что нашло отражение в полученных результатах кавернометрии. С целью снижения коэффициента трения при спуске обсадной колонны «хвостовика» был использован реагент STICK LESS 20. Кроме того, компоновка «хвостовика» включала направляющий вращающийся башмак совместно с фильтрами с заглушками (ФС).

5. Заключение.

Скважина предназначена для длительной эксплуатации и является дорогостоящим капитальным гидротехническим сооружением. Поэтому применение передовых современных технологий при строительстве скважин будет способствовать уменьшению осложнений и аварий при строительстве и более качественной их эксплуатации. Проведенный анализ использования описанных технологий на различных месторождениях позволяет сделать вывод, что применение комплекса мероприятий для предотвращения прихватов, включающего использование расширителя ствола скважины Rhino XC Tool, фильтров с заглушками, направляющего вращающегося башмака и «сухой смазки» позволяет рекомендовать данные технико-технологические мероприятия к использованию.

Список литературы: 1. Гусейнова Е.Л. Технология бурения многоствольных скважин / Е.Л. Гусейнова, Э.М. Гусейнова// Современные технологии в нефтегазовом деле – 2017: сборник трудов международной научно-технической конференции в 2-х т. / отв. ред. В.Ш. Мухаметшин. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 239-242. **2.** Гусейнова Е.Л. Комплекс мер по предотвращению прихватов хвостовика / Е.Л. Гусейнова, Э.М. Гусейнов // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2018: сборник трудов международной научно-технической конференции в 2-х т. (Октябрьский, 30 марта 2018 г.) / коллектив авторов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 299-302. **3.** Substantiation of lubricant selection for drilling technology / F.N. Yangirov, A.R. Yakhin, T.S. Mustafin, T.D. Dikhtyar // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2018. – Vol. 329. – № 1. – Pp. 51-58. **4.** Третьяк А.Я., Рыбальченко Ю.М., Лубянова С.И., Турунтаев Ю.Ю. Способы борьбы с дифференциальными прихватами // «Технологии добычи и использования углеводородов» 2016. № 1(6) URL: http:// http://tp-ning.ru/img/06/09.pdf / (дата обращения: 27.02.2018). **5.** Rhino XC. Расширение верхней секции скважины за одно долбление URL: https: //www.slb.ru/library/projects/well_construction_cs/burovoe-oborudovanie-i-servisy/rhino-xc-rasshirenie-verkhney-sektsii-skvazhiny-za-odno-dolblenie/ (дата обращения: 11.03.2018). **6.** The use of «dry lubricant» for reducing the risk of sticking during liner running for multistage/ D. Makhmutov, A. Yakunov, S. Lozhkin, A. Khristenko, S. Cherevko, M. Syroegin, // Drilling and Oil. – 2017. – № 2. – URL: https://burneft.ru/archive/issues/2017-02/44 **7.** Технология бурения и заканчивания скважин: доступ к запасам в действии // Научно-технический вестник ОАО «НК «Ростнефть» 2014. № 2 URL: https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_publication/177205/attach_2-2014.pdf (дата обращения: 12.03.2018). **8.** «Газпромнефть-Хантос» подвел производственные итоги первого полугодия 2017 года // Национальный отраслевой журнал «Нефтегазовая вертикаль» URL: http://www.ngv.ru/pr/gazpromneft-khantos-podvel-proizvodstvennye-itogi-pervogo-polugodiya-2017-goda/?sphrase_id=9591010 (дата обращения: 11.03.2018). **9.** Никулин В.А., Мухамадиев А.М., Галимов Р.М. Технология цементирования хвостовиков // Специализированный журнал «Бурение и нефть» 2010. № 1 URL: http://burneft.ru/archive/issues/2010-01/15 (дата обращения: 11.03.2018).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Косякова И.М., Болдуева А.А.
(*(БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)*
Тел./Факс: +375 (17) 3310045; E-mail: scvdmed@bntu.by

Abstract: *Experimental data on the processes of laser alloying of gray SCH20 cast iron with tungsten carbide using a continuous CO2 laser have been obtained. The experimental results of the research will be used in the development of the technological process of laser alloying of parts of automotive equipment. The development of the technology will increase the strength, wear-resistant and operational properties of the parts of the tractor "Belarus".*
Key words: *laser alloying, tungsten carbide, microhardness, phase composition, gray cast iron.*

Особенностями метода лазерного легирования, определяющими его место среди широкого ряда методов поверхностного упрочнения, являются: 1) возможность концентрации в локальной зоне поверхности высоких плотностей мощности, практически недостижимых другими методами, что позволяет достигать сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения тонкого поверхностного слоя и обеспечивать формирование за счет этого слоев сверхбыстрой закалки с повышенным комплексом свойств за счет высокой степени метастабильности структуры; проводить локальную обработку только рабочих поверхностей деталей без значительного их объемного разогрева; 2) возможность точного управляемого энергетического воздействия на заданную точку поверхности при широком диапазоне его варьирования, что дает предпосылки для стабильного управления структурой и свойствами упрочняемой поверхности в процессе обработки. Для термообработки больших площадей наиболее экономичным считается непрерывный CO_2-лазер [1].

Лазерное термоупрочнение чугунов-процесс эффективный, широко используемый для повышения эксплуатационных характеристик тракторной техники.

Целью работы является исследование процесса лазерного термоупрочнения тормозных колодок трактора «Беларус» из серого СЧ20 непрерывным CO_2-лазером.

Методика исследований

Для исследования были использованы образцы серого СЧ-20 после литья в формы. Лазерное поверхностное упрочнение проводили на непрерывном лазере Комета-2 мощностью N = 1000 Вт.

Исследовали влияние параметров лазерной обработки на микротвердость поверхности образцов из серого СЧ20 чугунов методом полнофакторного эксперимента.

Так как число варьируемых факторов невелико, оказалось возможным реализовать полную реплику, в которой число опытов равно 2 в степени, равной числу факторов: $N = 2^k$, позволяющую в ходе эксперимента варьировать одновременно несколькими параметрами различной физической природы и получать раздельную, независимую оценку коэффициентов, что невозможно, например, при реализации дробной реплики. При этом необходимо, чтобы все независимые переменные изменялись на максимальном и минимальном уровнях. На первом этапе выбирали основные входные параметры (скорость и диаметр луча лазера), сильно влияющие на параметр оптимизации (микротвердость). Затем определяли пределы их изменения, и составляли таблицу исходных данных. Серия состояла из четырех основных опытов, полученная модель считалась линейной и учитывала взаимодействие факторов.

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 \ , \qquad (1)$$

где Y_i – параметры оптимизации,

X_i – варьируемые факторы,

B_{ij} – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметр оптимизации.

Технологические факторы выбирались исходя из возможности их изменения при условии точного измерения их величин, а также исходя из их независимости (ортогональности).

X_1 - диаметр луча лазера в месте соприкосновения с поверхностью материала, мм.

X_2 – скорость перемещения лазерного луча (фактически производилось перемещение образца под лучом), мм/мин.

Математические модели рассчитывали для следующих параметров оптимизации:

Y_1 - микротвердость упрочненной поверхности, мм.

Диаметр луча меняли в пределах 1…2 мм, а скорость от 200 до 600 мм/мин.

Для оценки достоверности и адекватности модели повторные опыты проводили дважды на основном уровне.

Проверяли гипотезу об однородности дисперсий с помощью критерия Кохрена, значимость коэффициентов уравнения с помощью критерия Стьюдента и адекватность уравнения выбранной математической модели - критерия Фишера.

По полученным уравнениям получали расчетные данные переменной в зависимости от параметров лазерной обработки.

Следует отметить, что данное уравнение согласно теории планирования эксперимента можно использовать в $\sqrt{3}$ большем по размаху диапазоне параметров лазерной обработки, чем тот, в котором производился эксперимент.

По полученным уравнениям строили графики.

Исследовали влияние параметров лазерной обработки на размерные параметры зоны обработки: ширину и глубину расплавленной зоны, зону термического влияния. По данным исследований проводили корреляционный анализ на ПЭВМ с помощью программы «Approximator». Для каждой пары факторов рассчитывали коэффициенты парной корреляции по всем возможным вариантам взаимодействий согласно таблице 1. Строили графики парного взаимодействия с наибольшим коэффициентом корреляции.

Таблица 1 - Виды функций корреляции

Номер кода	Уравнение корреляции	Номер кода	Уравнение корреляции
1	$Y = A + BX$	9	$Y = A \cdot X^B$
2	$Y = 1/(A + BX)$	10	$Y = A = B \cdot \ln(X)$
3	$Y = A + B/X$	11	$Y = A = B \cdot \lg(X)$
4	$Y = X/(A + D/X)$	12	$Y = A/(B + X)$
5	$Y = A \cdot B^X$	13	$Y = A \cdot X/(B + X)$
6	$Y = A \cdot e^{(BX)}$	14	$Y = A \cdot e^{(B/X)}$
7	$Y = A \cdot 10^{(BX)}$	15	$Y = A \cdot 10^{(B/X)}$
8	$Y = 1/(A + B \cdot e^{(-X)})$	16	$Y = A = B \cdot X^N$

Программа «Approximator» запрограммирована по следующей методике:

Вычисляют коэффициенты парной корреляции (теснота связи) следующим образом [2,3]:

$$r_{xy} = \frac{\sum^{n}(X_i - \overline{X}) \cdot (Y_i - \overline{Y})}{\sum (X_i - \overline{X})^2 \sum (Y_i - \overline{Y})^2}, \qquad (2)$$

где X_I, $\overline{X}$ - текущее и среднее значение одного параметра (параметра оптимизации, например, шероховатости);

Y_I, $\overline{Y}$ - то же для другого параметра (входной параметр, например, скорость лазерного луча).

Находят средние значения обоих параметров:

$$\overline{X} = \frac{\sum^{n} X_{1u}}{n} \quad \overline{Y} = \frac{\sum^{n} Y_{1u}}{n} \tag{2}$$

где n –число опытов; u – номер опыта.

Коэффициенты выбранного уравнения определяют по формуле:

$$A = \frac{\sum(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sum(X_i - X)^2} \tag{3}$$

$$B = \overline{Y} - b_1 X \tag{4}$$

Программа проверяет адекватность полученного уравнения по критерию Фишера.

Обсуждение результатов

К особенностям строения поверхностных слоев, формируемых при лазерном легировании, относится высокая степень метастабильности фаз, заключающаяся в значительной степени пересыщения твердых растворов и увеличении дюрометрических и трибологических характеристик [4].

Рис. 1. Микростукрура поперечного сечения серого чугуна

На рисунке 1 представлена микроструктура поперечного сечения чугуна СЧ-20 после лазерного легирования карбидом вольфрама при скорости обработки 200 мм/мин.

Необходимо отметить, что такая картина сохраняется во всем диапазоне скоростей от 200 до 600 мм/мин. Зона обработки состоит из нескольких слоев: верхний слой (закалка из жидкого состояния), зона термического влияния (закалка в твердой фазе), основной металл. У серого чугуна кристаллизация идет по метастабильной диаграмме состояния системы «железо – цементит», и первый слой приобретает структуру доэвтектического белого чугуна [4]. В фазовый состав поверхностного слоя входят дендриты слаботравящегося метастабильного аустенита, размер которых не зависит от скорости обработки и мощности излучения. Лазерная обработка приводит к уменьшению расстояний между ветвями дендритов в 4 раза, а среднего диаметра осей – более, чем в 60 раз, что свидетельствует о высокой скорости охлаждения верхнего слоя. Междендритные расстояния заполнены мелкодисперсным ледебуритом, обладающим повышенной износостойкостью [5].

Графитные пластины успевают раствориться полностью и высокая твердость, прочность и износостойкость достигается за счет его отбела в условиях высоких скоростей охлаждения. Содержание углерода в аустените достигает запредельных значений и на порядок уменьшает скорость коррозии [6].

Микротвердость поверхностного слоя чугуна СЧ20 составляет 2,0 – 3,2 ГПа до и 11 – 13,4 ГПа после лазерного легирования.

Микротвердость поверхностного слоя $H_{\mu 100}$ линейно коррелирует (коэффициент корреляции составляет 0,85) со скоростью обработки, изменяясь от 7,6 – 8,2 в исходном состоянии до 12,8 – 13,5 в зависимости от скорости обработки (рисунок 2). Причем, корреляция отрицательная. С увеличением скорости обработки микротвердость падает.

Глубина упрочненной зоны h, состоящей из зоны оплавления и зоны термического влияния (ЗТВ) (рисунок 3). Скорость перемещения луча и глубина зоны упрочнения хорошо коррелируют – коэффициент корреляции 0,87. При этом между скоростью обработки и глубиной зоны упрочнения наблюдается отрицательная корреляция – чем больше скорость обработки, тем меньше глубина упрочненного слоя.

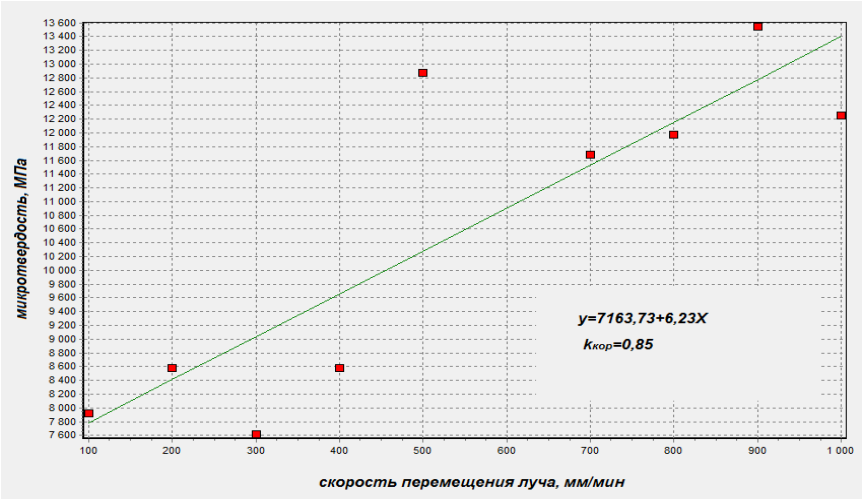


Рис. 2. Влияние скорости перемещения лазерного луча на микротвердость серого чугуна СЧ20

Результаты определения фазового состава серого чугуна после лазерного легирования карбидом вольфрама представлены в таблице 1. В случае лазерного легирования скорость луча лазера, его диаметр были взяты на максимальном и минимальном уровне. Соответственно: V_1=100 мм/мин, V_2=600 мм/мин, d_1 =1·10^{-3}м, d_2 = 2·10^{-3} м.

Легирование чугуна карбидом вольфрама не привело к установлению четкой корреляционной зависимости между скоростью и количеством α - и γ-железа. Количество упрочняющей фазы с увеличением плотности мощности и скорости возросло с 31 до 42 %.

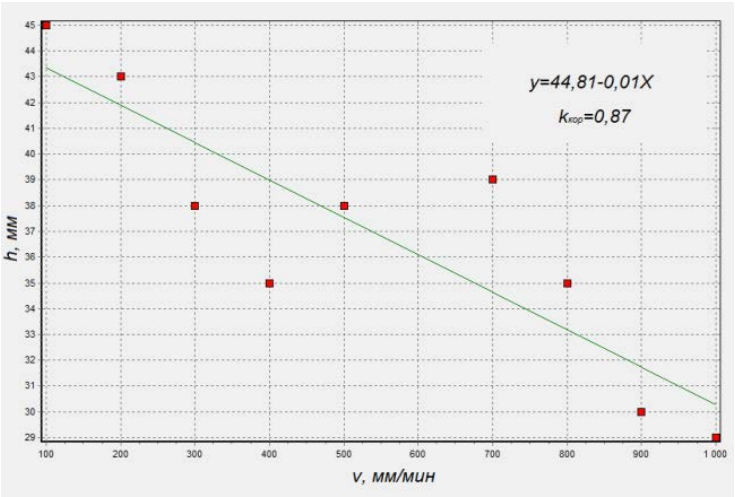


Рис. 3. Влияние скорости обработки лазерного луча на глубину зоны проплава серого СЧ20 чугуна

Результаты фазового анализа показывают, что в поверхностном при скоростях луча лазера 100 мм/мин и 600 мм/мин образовалась мелкодисперсная структура α-фазы с небольшим количеством остаточного аустенита (2 – 5 % γ-фазы). Наличие последнего свидетельствовало о дополнительном насыщении решетки железа углеродом и легирующими элементами.

На рисунке 4 представлено влияние режимов лазерной обработки на количество твердого раствора.

Как видно из рисунка, максимальное количество твердого раствора наблюдается при скорости перемещения луча 100 мм/мин и диаметре луча 1 мм. С увеличением скорости перемещения луча лазера количество твердого раствора уменьшается.

Таблица 1. Состав фаз лазерного легирования WC

Фазы	Режимы обработки			
	V=100 мм/мин *d*=1 мм	*V*=600 мм/мин *d*=1 мм	*V*=100 мм/мин *d*=2 мм	*V*=600 мм/мин *d*=2 мм
α-Fe, γ –Fe, W	25,6	15,7	18,6	15,9
Карбид Fe и W	32,9	35,4	32,6	25,2
Оксиды	15,9	24,1	24,2	28,9
W_2Fe_3, WFe_2	9,1	6,6	9,3	6,3
Углерод	6,7	6,6	4,1	5,5

Таблица 2. Зависимость фазового состава покрытия от режимов лазерного легирования WC

Фаза	Уравнения регрессии	Количество вещества
α-Fe, γ –Fe, W	$Y_1 = 19{,}575-3{,}525X_2+1{,}975X_1X_2$	15,9 – 25,6
Карбид Fe и W	$Y_2 = 29{,}6125-4{,}0625X_1$	25,2 – 35,4
Оксиды	$Y_3 = 21{,}5+3{,}575X_1+3{,}175X_2$	15,9 – 28,9
W_2Fe_3, WFe_2	$Y_4 = 8{,}05-1{,}55X_2$	6,3 – 9,3
Углерод	$Y_5 = 5{,}9625-0{,}7375X_1$	4,1 – 6,7

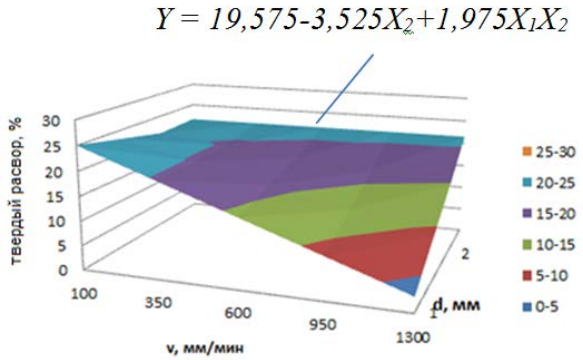


Рис. 4. Влияние режимов лазерной обработки на количество твердого раствора

Выводы: Получены экспериментальные данные процессов лазерного легирования карбидом вольфрама серого СЧ20 чугунов с использованием непрерывного CO_2-лазера. Экспериментальные результаты исследований будут использованы при разработке технологического процесса лазерного легирования деталей автотракторной техники. Освоение технологии позволит увеличить прочностные, износостойкие и эксплуатационные свойства деталей трактора «Беларус». Широкое внедрение в производство лазерного легирования непрерывным CO_2-лазером требует дополнительных исследований.

Список литературы: 1. Скрипченко А.И., Медвецкий В.М., Попов В.А. Тестирование процесса закалки сталей излучением волоконных лазеров. – М.: РИТМ, 2007, №3, - С. 52-54. **2.** Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Планирование промышленных экспериментов. – М.: 1971.с. 36 **3.** Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981, – 264 с. **4.** Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В.С. Коваленко, Л.Ф. Головко, В.С. Черненко– К.: Техника, 1990. – 192 с. **5.** Дубняков В.Н., Кащук О.Л./ МиТОМ-1986. - №9. – С. 35 – 39. **6.** Влияние лазерной обработки на коррозионные свойства чугуна// В.Ю. Васильев, Н.В. Еднерал, Т.Г. Кузьменко и др.//Защита металлов. – 1982. – Т.18, - С. 123 – 127.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ВАЛИКОВ ИЗ БРОНЗЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И., Артюкевич А.В.
(БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)
Тел./Факс: +375 (17) 3310045; E-mail: scvdmed@bntu.by

Abstract: *The advantages and the capabilities of laser cladding are analyses for used laser cladding for applying multimodal coatings from heterogeneous metal work materials. Results of microhardness investigations in cross section of cladding tracks from Al-bronze are exhibited. The influence of cladding velocity on microhardness are examined.*
Key words: *Laser cladding, multimodal coatings, microhardness, cladding tracks, parameters of cladding.*

Наличие высоких скоростей и нагрузок стало характерной чертой современных машин и механизмов. Этот фактор влияет на рост потребности в высоко-износостойких материалах. Однокомпонентные материалы уже практически исчерпали возможности упрочнения. Поэтому внимание исследователей направлено на изучение композиционных материалов, позволяющих значительно улучшить износостойкость, коррозионную стойкость и другие свойства. Такой вид композиционных покрытий, как мультимодальные покрытия показывает особенно высокие физико-механические свойства [1, 2]. Модой является значение какого-либо признака (размера частиц упрочняющей фазы, пористости, вида материала), который встречается наиболее часто. Если имеется несколько значений признака, имеющих одинаковую частоту повторения, то покрытие считается мультимодальным. Известные свойства лазерной наплавки [3] позволяют наносить заранее сконструированные покрытия, состоящие из чередующихся валиков из разнородных материалов, которые по определению будут являться мультимодальными. Такая технология проектирования и нанесения мультимодальных покрытий может использоваться как для упрочнения поверхностей новых деталей, так и для восстановления их изношенных поверхностей с хорошими прочностными свойствами [4, 5].

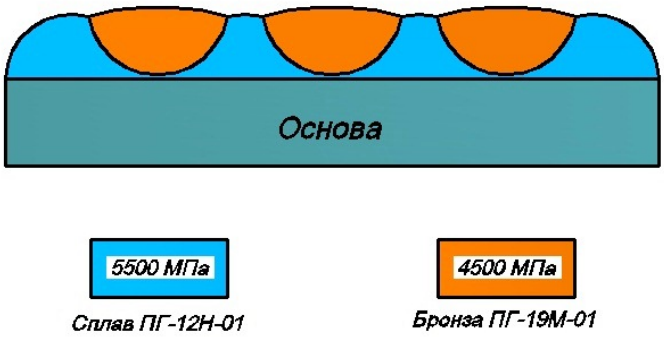


Рис. 1. Схема поперечного сечения мультимодального покрытия, полученного чередованием валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля и бронзы

На рисунке 1 показана схема поперечного сечения мультимодального покрытия, в котором чередуются валики из разнородных материалов.

Нанесение мультимодальных покрытий из разнородных материалов требует тщательной отработки режимов лазерной наплавки единичных валиков из предполагаемых компонентов мультимодального покрытия и исследования свойств материалов валиков. В

настоящей работе нами предпринята попытка исследовать распределение микротвердости в единичных валиках из бронзы ПГ-19М-01 и установить влияние режимов лазерной наплавки на величину микротвердости.

Для выполнения исследований применялся лазерный технологический комплекс, включавший газовый CO_2 лазер непрерывного действия типа «Комета 2» с мощностью излучения 1000 Вт и координатную систему с числовым программным управлением, обеспечивавшую необходимое перемещение наплавочной головки относительно наплавлявшихся образцов. Лазерная наплавка производилась при мощности излучения лазера 1000 Вт, дистанциях наплавки 10, 12 и 14 мм, скоростях наплавки 100, 150, 200, 250 и 300 мм/мин, величине подачи порошка 12 г/мин. Наплавка выполнялась на образцы, изготовленные из стали 45, имевшие размеры 20х30х8 мм. В качестве наплавочного материала использовался порошок алюминиевой бронзы – ПГ-19М-01, имевший грануляцию 20-80 мкм.

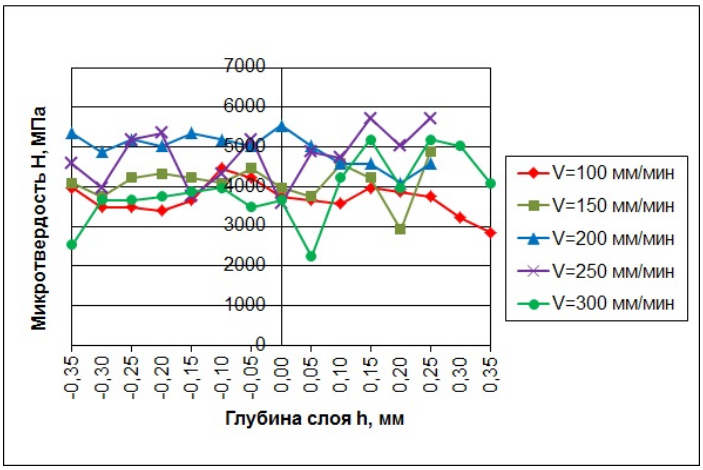


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине валика из бронзы ПГ-19М-01 при дистанции наплавки 10 мм

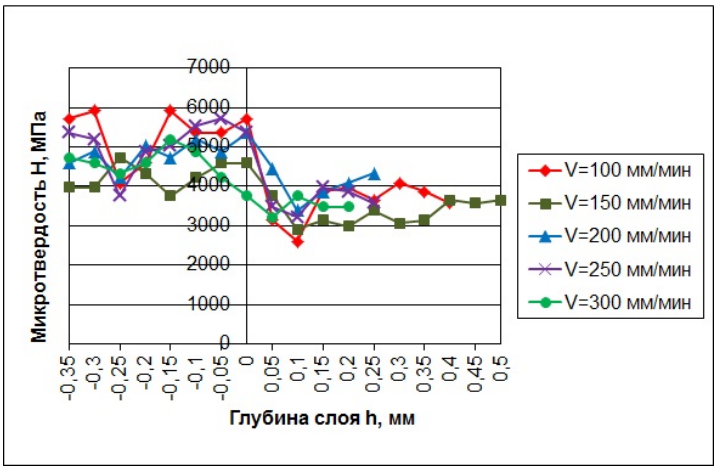


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине валика из бронзы ПГ-19М-01 при дистанции наплавки 14 мм

После наплавки образцы разрезались в направлении перпендикулярном валикам наплавки, шлифовались и заливались в специальные оправки. Затем изготавливались поперечные шлифы валиков наплавки и производился замер микротвердости по глубине валиков. Измерения микротвердости производились при помощи микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г по линии симметрии валиков из основы к поверхности покрытия с шагом 0,05 мм. Результаты приведены на рисунках 2-3.

Полученные результаты позволяют отметить следующее:

- При переходе из основы в покрытие наблюдается некоторое снижение микротвердости, которое увеличивается с увеличением дистанции наплавки, что свидетельствует о том, что величина переходной зоны уменьшается при росте дистанции наплавки. Металлургическая связь покрытия с подложкой при этом сохраняется;

- По глубине наплавленных валиков из бронзы ПГ-19М-01 микротвердость распределена достаточно равномерно при всех дистанциях наплавки, что говорит о равномерном перемешивании наплавляемого материала покрытия в ванне расплава. Небольшие колебания микротвердости по глубине валиков из бронзы

свидетельствуют также о равномерном распределении фаз в покрытии. Другими словами, после лазерной наплавки покрытие из бронзы ПГ-19М-01 по всему объему состоит в основном из α-твердого раствора меди, эвтектики α-Fe+γ-Fe, алюминидов меди и алюминидов железа;

- Наблюдается некоторое снижение микротвердости в валиках из бронзы ПГ-19М-01 при увеличении дистанции наплавки, что связано с изменением положения фокуса лазерного излучения относительно поверхности наплавки и разными условиями нагрева-охлаждения;

- Наивысшая микротвердость (5300 Мпа) отмечается при скорости наплавки 250 мм/мин и дистанции наплавки 10 мм. При скорости наплавки 100 мм/мин и дистанции наплавки 14 мм уровень микротвердости достаточно низок и составляет порядка 3000 Мпа.

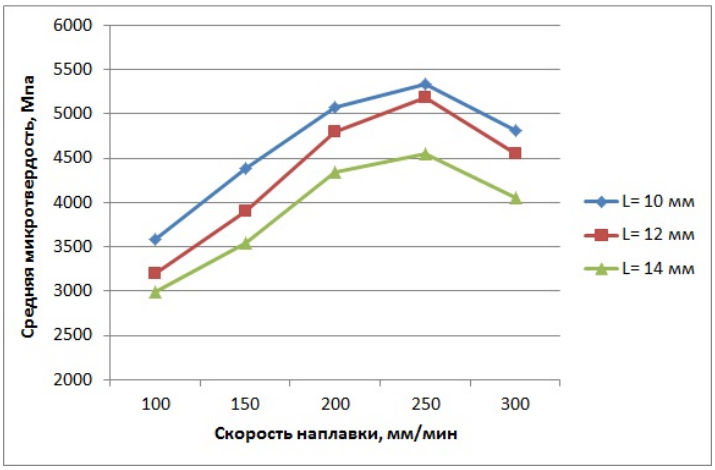


Рис. 4. Зависимость средней микротвердости в валиках из бронзы ПГ-19М-01 от скорости наплавки

На рисунке 4 приведена зависимость средней микротвердости в валике бронзы ПГ-19М-01 от скорости наплавки. Из рисунка 4 видно, что наиболее низкая микротвердость при всех дистанциях наплавки наблюдается при скорости наплавки 100 мм/мин. В диапазоне скоростей наплавки 100-250 мм/мин наблюдается увеличение микротвердости. При дальнейшем росте скорости наплавки до 300 мм/мин, микротвердость валиков бронзы уменьшается. При малых скоростях наплавки и, соответственно, большом энерговкладе в валиках из бронзы образуется достаточно крупнозернистая структура с низкой микротвердостью. С ростом скорости наплавки и уменьшением энерговклада в валики, величина зерна уменьшается, а микротвердость растет. При скорости наплавки 250 мм/мин формируется оптимальная зернистость структуры и наблюдается максимальная микротвердость. С увеличением скорости наплавки из-за уменьшения энерговклада в покрытие в нем создаютя условия неполного сплавления материала валиков по границам зерен. Таким образом, в диапазоне скоростей наплавки 250-300 мм/мин средняя микротвердость материала валиков из бронзы ПГ-19М-01 уменьшается.

На рисунке 5 показаны зависимости средней микротвердости в валиках из бронзы ПГ-19М-01 от дистанции наплавки. При дистанции наплавки 10 мм, когда фокус лазерного излучения находится под поверхностью покрытия, порошок прогревается хорошо, основа при этом проплавляется максимально. Из-за большого количества материала основы, попавшего в валики бронзы, средняя микротвердость последних достаточно высока. При дистанции 12 мм, когда фокус лазерного луча находится на поверхности основы, порошок прогрет удовлетворительно, а основа достаточно качественно оплавлена. Из-за меньшего, чем в предыдущем случае, попадания материала основы в валики из бронзы и достаточно крупнозернистой структуры, микротвердость валиков из бронзы ПГ-19М-01 снижается. При дистанции наплавки 14 мм, когда фокус лазерного луча находится над поверхностью основы, порошок прогревается хуже, а основа проплавляется плохо. Материал основы попадает в валики

бронзы в минимальном количестве, а материал валиков недостаточно сплавляется по границам зерен, что приводит к сравнительно низкой микротвердости последнего.

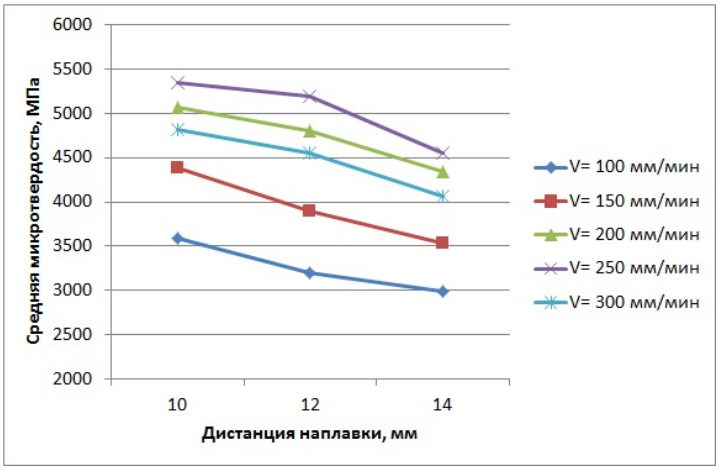


Рис. 5. Зависимость средней микротвердости в валиках из бронзы ПГ-19М-01 от дистанции наплавки

Выводы:

- Валики, полученные лазерной наплавкой алюминиевой бронзы ПГ-19М-01, отличаются равномерным распределением микротвердости по глубине валика. Максимальная величина средней для всех использовавшихся режимов микротвердости составляет 5300 Мпа, а минимальная – 3000 Мпа.

- Величина переходной зоны между покрытием и подложкой для валиков из бронзы ПГ-19М-01 зависит от скорости наплавки. При малой скорости наплавки переходная зона достаточно большая. С увеличением скорости наплавки переходная зона уменьшается. Тем не менее, при всех скоростях наплавки сохраняется металлургическая связь материала валиков с подложкой.

- Зависимости средней микротвердости материала валиков от скорости наплавки показывают, что максимальная микротвердость достигается при скорости наплавки 250 мм/мин. При больших и меньших скоростях наплавки микротвердость материала валиков уменьшается.

- Приемлемой дистанцией наплавки, с точки зрения наивысшей микротвердости следует считать дистанцию наплавки 10 мм.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при нанесении мультимодальных покрытий из разнородных материалов методом лазерной наплавки.

Список литературы: **1.** Ratajski, J. Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings/ J. Ratajski , A. Gilewicz, P. Bartosik, L. Szparaga// Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. - I. 2. – P. 35-45. **2.** Gilewicz, A. The properties of multi-module and gradient coatings base on CrN/CrCN deposited on nitride 4140 steel/ A.Gilewicz, R. Olik, L. Szpraga, J. Ratajski// Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems. – 2014. – I. 3. – P. 27-43. **3.** Vilar, R. Laser cladding/ R. Vilar// Journal of laser applications. – 1999. – V. 11. – I. 2. - P. 64-79. **4.** Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок/ Под ред. В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с. **5.** Шишковский, И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий/ И.В. Шишковский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, - 424 с.

СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСОВ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ ТЕРМОВАКУУМНЫХ РЕЖИМОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Добровольский Г.И., Инютин Н.В., Сидоренко Д.М., Борисов А.Е., Белов Р.В.
(НПО Группа компаний машиностроения и приборостроения, г. Брянск, Россия)
Тел./Факс: +7(4832)581-966; E-mail:gkmp@gkmp32.com

Abstract: *The article deals with the creation and technological support of space simulators on earth.*

В современном мире изучение и освоение космического пространства является приоритетной, стратегической задачей государства. Летательные аппараты и технологические комплексы обеспечения должны отвечать высоким требованиям по качеству и стабильности работы на околоземной орбите как в автоматизированном, так и в автоматическом режимах. Для отработки сборочных единиц, узлов и изделий летательных аппаратов на отказ их производитель стремиться провести испытания проконтролировать его работоспособность в условиях близких к реальным условиям эксплуатации изделия в целом, и чем крупнее будет сборочная единица, подвергнутая натурным испытаниям, тем надежней будет себя вести изделие в работе.

Для обеспечения достоверности и качества испытаний своих изделий, заводы изготовители космической техники и научно-исследовательские лаборатории, создают так называемые «Имитаторы космического пространства». Имитаторы космического пространства – это вид испытательного оборудования, представляющий из себя разновидность вакуумных объемов- камер, предназначенных для проведения испытаний и исследования изделий с использованием имитации солнечного излучения, инфракрасного излучения, в условиях глубокого вакуума и отрицательных температур. Конечно, же это наземные испытательные комплексы и к сожалению, они лишены одного физического фактора космического пространства, а именно -невесомости. Имитаторы космического пространства позволяют испытывать агрегаты и узлы космических аппаратов, спутников, систем и подсистем, пилотируемых и непилотируемых космических кораблей, элементы конструкций ступеней ракет-носителей, ракетные двигатели, электронику и т.д.

ООО НПО «ГКМП» имеет многолетний опыт сотрудничества с ведущими предприятиями и фирмами РФ, заинтересованными в использовании в своих технологических процессах имитаторов космического пространства. Так как испытательные, исследовательские комплексы такого типа являются единичными и индивидуальными для каждого производителя, то и подход к их созданию является сугубо индивидуальный. Начиная с разработки технического задания, основных расчетов, и технического проекта, где со специалистами Заказчика обговариваются все нюансы и тонкости технических параметров, которыми должен обладать исследовательский комплекс, создается рабочая конструкторская документация и изготавливается новое изделие. Опыт специалистов, технические и технологические наработки в проектировании изготовлении и гарантийном обслуживании таких комплексов позволяет ООО НПО «ГКМП» браться за любые задачи по созданию имитаторов космического пространства и выполнять их качественно и в срок.

Имитаторы космического пространства, в зависимости от конфигурации, могут иметь в своем составе различное оборудование и системы. Основными элементами являются:

- вакуумная камера;
- внутрикамерные платформы и технологическая оснастка;
- криогенная система и система азотообеспечения;
-излучатели тепловых потоков;
- излучатели световых потоков;

- коллиматор;
- фокальный узел;
- система управления комплексом и сбора данных.

В зависимости от конфигурации и состава оборудования, имитаторы космического пространства позволяют оценить следующие параметры объектов испытаний:

-стойкость к низким и высоким температурам и циклическим воздействиям температуры в условиях вакуума;

- герметичность в условиях вакуума;
- точность позиционирования в процессе полета;
- стойкость к ультрафиолетовому и инфракрасному излучению.

Вакуумная камера — это основа испытательного комплекса. От ее габаритов, геометрии, надежности механических узлов, качества материалов из которого она изготовлена зависят возможности испытания в целом.

По размерам, конечно-же, камера должна быть приближена к испытуемому изделию. Технологические особенности, используемые ООО НПО «ГКМП» и принцип-: «не изделие на станок, а станок на изделие…» позволяют изготавливать узлы камер и камеры практически любых размеров и геометрии. Единственное ограничение в габарите составных частей камеры это максимальный габарит, разрешенный к провозу авто и ж/д транспортом. По геометрическим параметрам камеры зависят от веса испытуемого изделия и могут быть цилиндрические, прямоугольные, сборные из нескольких отсеков, вертикальные горизонтальные одно дверные, проходные, с вертикальной и фронтальной загрузкой. При изготовлении камер ООО НПО «ГКМП» имеет следующие преимущества:

- использование полированного материала для изготовления корпуса камеры (Ra=0.8…1.2 мкм) с толщиной листа до 30мм и толщиной фланцев 300 мм, сварные швы не хуже Ra=2.5 мкм;
- поузловое изготовление отдельных частей камеры, окончательная сборка и финишная обработка стыков и фланцев камеры на площадке Заказчика;
- возможность проведения технологической операции «отпуск», «старение» в вакуумной печи с габаритами садки диаметром 6500мм, высотой 4000мм при температуре до 1250°С;
- возможность проведения «Вибрационного отпуска» металлоконструкции готовой камеры с помощью механических вибраторов;
- 100% контроль сварных швов и уплотнений с помощью капиллярного, масспектрометрического, ультразвукового, рентгеновского контроля (по требованию заказчика);
- для гарантированного обеспечения герметичности при циклическом открывании -закрывании технологических дверей и люков камеры используется многорядное уплотнение фланцев с откачкой атмосферы между ними;
- автоматическое, точное и плавное открывание дверей, крышек и люков;

Следующий, один из основных параметров имитаторов космоса это вакуум. Для создания сверхнизкого вакуума ($5x10^{-9}$ мм рт.ст) воздух откачивается каскадным способом. Первой ступенью откачки выступают механические насосы. На последующих ступенях вакуумирования используются ртутные или масляные диффузионные насосы и криогенные насосы, форвакуумные и турбомолекулярные насосы, способные поддерживать необходимый вакуум. Суммарная не герметичность обычно задается в пределах 45л.мкм. рт. ст./с. ООО НПО «ГКМП» является дистрибьютером компании «Atlas Copco» и имеет возможность использовать современные средства обеспечения «качественным» вакуумом, системами управления вакуумированием и разгермитизации.

Собственная разработка и изготовление криогенной системы, крио емкостей, трубопроводов с экранно-вакуумной изоляцией, сепараторов, киноэкранов позволяет

учесть все требования заказчиков, работать с температурами минус 190±5°С и тепловой нагрузкой 1,5кВт/м^2 и иметь следующие преимущества:

- за счет использования специальной схемы азотообеспечения и соответствующего оборудования имеется возможность рекуперации азота и его значительная экономия;
- собственное изготовление криоемкостей и трубопроводов позволяет иметь минимальные участки без экранно-вакуумной изоляции;
- собственное изготовление криоэеранов позволяет изготавливать их сложной геометрической формы;
- применение специальных конструкций и технологии изготовления экранов уменьшает приток тепла от корпуса камеры до стенок экранов;
- схема обеспечения азотом позволяет работать без крионасосов;
- захолаживание камеры может проходить равномерно или по любому другому сценарию за счет автоматического управления клапанами.

Надежность и долговечность — это основные параметры излучателей тепловых потоков. Оптимальная, собственная конструкция тепловых излучателей, правильно подобранные материалы для их изготовления позволяют отвечать этим высоким требованиям. Использование современных комплектующих компонентов в реализации электрической схемы блоков питания гарантируют бесперебойную работу, удобство в эксплуатации и обслуживании оборудования в целом.

Система управления и сбора данных имитаторов космического пространства так-же является индивидуальной и самостоятельной системой для каждого комплекса.

Система управления реализовывает следующие функции:

-дистанционное и местное управление оборудованием;

-прием и первичную обработку значений технологических параметров и состояния оборудования;

-сбор и хранение полученной информации в базе данных;

-графическое отображение информации о выполнении технологического процесса и состоянии оборудования;

-формирования отчетных документов о ходе технологического процесса;

-протоколирование действий пользователя;

-аварийная сигнализация и управление тревожными сообщениями;

-обеспечение технологических защит;

-редактор для разработки человеко-машинного интерфейса;

-управление процессом проведения термовакуумными испытаниями;

-масштабируемость (наращивание системы);

-подвод мощности к световым и резистивным нагревательным элементам по 260 каналам до 2,5 кВт, переменным напряжением до 220 В;

-измерение температур на объекте исследования по 260 каналам измерения (термометры сопротивления). Погрешность измерения температуры должна составлять по каналу в целом не более ±0,5°С;

-измерение давления в камере по 2-м каналам с датчиков, установленных снаружи вакуумной камеры.

СУ обеспечивает управление процессами испытаний не менее чем с двух рабочих мест операторов, обеспечивает электроснабжением составные части систем и полностью безаварийный, безопасный режим испытаний, непрерывно производит самодиагностику с уведомлением оператора.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Дуйшеналиев Т.Б., Журавлев О.В., Хохлов В.А., Хроматов В.Е. *(НИУ«МЭИ», г. Москва, Россия)*
Тел.: +7 916 498 6250; E-mail: DuyshenaliyevT@mpei.ru

Abstract: *The proposed approach to determining the displacements of rod systems is based on the non-classical solution of boundary value problems of statics. Here, the domain of definition of the equations of equilibrium and compatibility of deformations, as well as boundary conditions, is the final state of equilibrium, which is assumed to be given, and not sought. It is shown that with this approach, the application of the theorem and Betty's formulas for determining the displacements becomes mathematically correct.*

Keywords: *boundary value problem, Betty's theorem, elastic rod, equilibrium state, Mohr's formula, displacement.*

Введение.

В работах [3,4] предлагается решать статическую краевую задачу в строгом соответствии с ее общепризнанной постановкой [8,9]:

1. положение тела, находящегося в равновесии с заданными силами в объеме и на поверхности, является исходным;
2. областью определения уравнений равновесия и совместности деформаций, а также граничных условий, служит конечное состояние равновесия;
3. конечное состояния считается заданным, а не искомым, иначе невозможно указать положения сил, распределенных в объеме и на поверхности тела.

Задача решена, если найдено поле напряжения σ_{ij}, которое удовлетворяет уравнениям совместности деформаций и уравновешивает внешние силы внутри области и на ее поверхности. Из него, через обобщенный закон Гука [3,5,8,9], определяются деформации:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{\mathrm{E}}(-\nu\,\delta_{ij}\,\sigma_{kk} + (1+\nu)\,\sigma_{ij}), \qquad (1)$$

где E - модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Далее, перемещения $U_i(x)$ определяются по преобразованным формулам Чезаро [3]:

$$U_i(x) = U_i(x^0) + \omega_{ij}(x^0)(x_j - x_j^0) +$$
$$+\int_L -\frac{\nu}{E}\delta_{ik}\sigma_{tt} + \frac{1+\nu}{E}\sigma_{ik} + (x_j - y_j)(-\frac{\nu}{E}\delta_{ki}\sigma_{tt,j} - \delta_{kj}\sigma_{tt,i}) +$$
$$+\frac{1+\nu}{E}(\sigma_{ki,j} - \sigma_{ki,j}))dy_k \qquad (2)$$

где L - линия в области V; x^0 – начальная точка этой линии.

В этом выражении $U_i(x^0)$, $\omega_{ij}(x^0)$ - произвольные постоянные. Они соответствуют не вызывающим деформации перемещениям (параллельному переносу и жесткому повороту тела). Можно исключить из рассмотрения такие перемещения.

Как показано на рис. 1, векторы:

$$z_i = x_i - U_i(x),\ x_i \in V, \quad z_i = x_i - U_i(x),\ x_i \in S \qquad (3)$$

определяют некоторую область V_0 и ее поверхность S_0. Очевидно, что (V_0,S_0) - состояние равновесия без внешних сил. Далее, для краткости, (V_0,S_0) назовем сравниваемым состоянием статической краевой задачи.

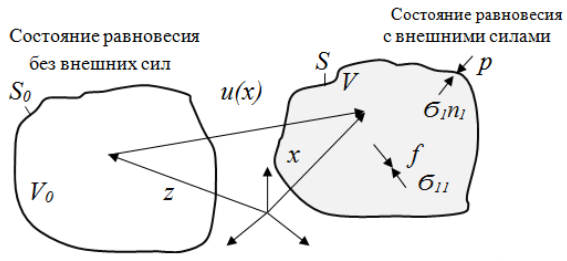


Рис. 1. Состояние равновесия и сравниваемое состояние

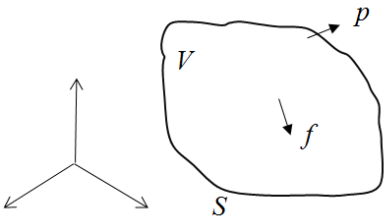


Рис. 2. Тело с массовыми силами f в объеме V и условиями (5) находится в равновесии

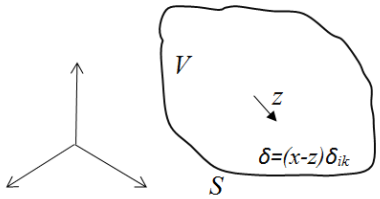


Рис. 3. Тело с условиями (7) на своей поверхности находится в равновесии

Определение перемещений.

Пусть тело, занимающее область V с поверхностью S, находится в равновесии под действием заданных массовых и поверхностных сил (рис. 2). Назовем его первым состоянием. Здесь должны удовлетворяться уравнения [3,8,9]:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu)\, u_{j,ji} + f_i = 0\,, \quad x_i \in V \qquad (4)$$

и один из типов граничных условий, к примеру

$$\sigma_{ji} n_j = p_i\,, \; x_i \in S_\sigma; \quad u_i = 0, \; x_i \in S_u; \quad S = S_\sigma + S_u \qquad (5)$$

Введем второе состояние с массовыми силами, равными нулю

$$\mu u'_{i,jj} + (\lambda+\mu) u'_{j,ji} = 0, \quad x_i \in V \qquad (6)$$

и одной сосредоточенной единичной силой в точке z поверхности S и имеющей направление оси x_k (рис. 3)

$$u'_i = 0\,, x_i \in S_u, \; \sigma'_{ji} n_j = p'_i = \delta(x\text{-}z)\delta_{ik}, \; x_i \in S_\sigma \qquad (7)$$

В обоих состояниях тело занимает одну и ту же область и находится в равновесии. Это совпадает с условием легитимности соотношения Бетти и дает:

$$u_k(z) = \int_V \sigma_{ij}\, \varepsilon'_{ij}\, dv = \int_V \sigma'_{ij}\, \varepsilon_{ij} dv. \qquad (8)$$

Для вычисления интегралов правой части (8) нужно знать поля деформаций и напряжений обоих состояний. Такое определение довольно трудоемко, интегралы (8) дают только одно перемещение. Для определения перемещения в другой точке единичную силу (7) надо разместить в ней и все повторить опять [3,8,9].

Перемещения проще определять с помощью уравнения (2) [3,4], не требующего знания поля деформаций второго состояния. Однако уравнение (8) широко используется в задачах сопротивления материалов, строительной механики и носит название формулы Мора [8,9] для определения перемещений. В этих дисциплинах уравнение (8) представляется через интегральные характеристики усилий, действующих в поперечных сечениях. Для дальнейшего, важно выяснить условия, при которых это преобразование проводится.

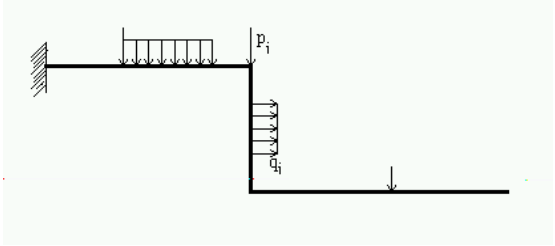


Рис. 4. Состояние равновесия с внешними силами (состояние p)

На рис. 4 и 5 приведены два состояния стержневой системы: "грузовое" p и "единичное" k. В "грузовом" имеются сосредоточенные $p_1, p_2, \ldots, p_n$ и распределенные $q_1, q_2, \ldots, q_m$ силы, а в "единичном"- только одна сила k=1.

Состояния p и k стержневой системы должны быть аналогичны состояниям (4), (5), (6) и (7), что необходимо для примене-

ния уравнения (8). Эта аналогия имеет место, если p и k являются состояниями равновесия и имеют одну и ту же конфигурацию и поперечные сечения.

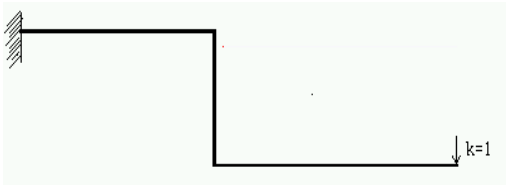


Рис. 5. Состояние с единичной силой (состояние k)

Найдем перемещения, которые привели "грузовое" состояние к данной конфигурации. В каждом стержне поместим начало координат в центре поперечного сечения какого-либо его конца и ось x_1 направим вдоль стержня, а ось x_2 перпендикулярно к плоскости рисунка. Выражение (8) можно написать в виде:

$$\Delta_{kp} = u_k(z) = \sum \int dx_1 \iint \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^k \, dx_1 dx_2 \,, \tag{9}$$

где ε_{ij}^k - компонента деформации единичного состояния, $\sum$- суммирование по всем стержням системы. Двойной интеграл берется по площади поперечных сечений стержней.

Выделим один и тот же элемент стержня из обоих состояний (рис. 6 и 7) и приложим к крайним сечениям интегральные характеристики усилий, действующих в поперечном сечении грузового состояния:

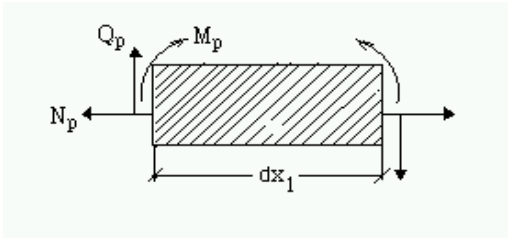


Рис. 6. Элемент стержня из нагруженного внешними силами состояния (состояние p)

$$M_p = \iint_F \sigma_{11} x_3 dx_2 dx_3 \,,$$
$$Q_p = \iint_F \sigma_{13} dx_2 dx_3 \,, \tag{10}$$
$$N_p = \iint_F \sigma_{11} dx_2 dx_3 .$$

и единичного состояния:

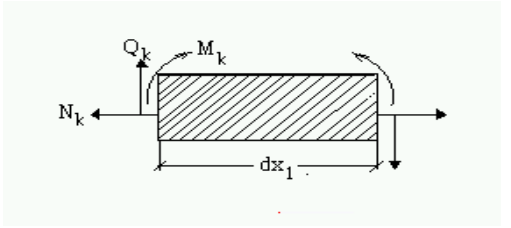


Рис. 7. Элемент стержня из нагруженного единичной силой состояния (состояние k)

$$M_k = \iint_F \sigma_{11}^k x_3 dx_2 dx,$$
$$Q_k = \iint_F \sigma_{13}^k dx_2 dx_3, \tag{11}$$
$$N_k = \iint_F \sigma_{11}^k dx_2 dx_3.$$

Эти интегральные усилия определены из условия равновесия левой или правой отсеченных частей системы.

Внешние силы проходят через центры поперечных сечений стержней и расположены на плоскости x_1, x_3. Это дает повод к игнорированию напряжениями σ_{12}. К тому же в строительной механике и сопротивлении материалов широко пользуются гипотезой плоских сечений Бернулли [3,8,9]. Полагаясь на нее, здесь также будем считать, что крайние сечения элемента dx_1 были плоскими и до деформации.

Состояния p и k на рис. 5 и 6 являются состояниями равновесия и имеют одинаковые размеры. M, Q, N для этих состояний являются внешними силами. Соотношение Бетти здесь применимо и оно дает:

$$M_p \delta_{mk} + N_p \delta_{nk} + Q_p \delta_{qk} = M_k \Delta_{mp} + N_k \Delta_{np} + Q_k \Delta_{qp} =$$
$$= \iint_F \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^k dx_1 dx_2 dx_3 = \iint_F \sigma_{ij}^k \varepsilon_{ij} \, dx_1 dx_2 dx_3, \tag{12}$$

где Δ_{mp}, Δ_{np}, Δ_{qp} - суммарные перемещения крайних сечений соответственно по направлениям момента, продольной и поперечной сил в грузовом состоянии;

δ_{mk} , δ_{nk} ,δ_{qk} - то же, в единичном состоянии.

Перемещения Δ_{mp}, Δ_{np}, Δ_{qp} определяются выражениями

$$\Delta_{mp} = \frac{M_p}{\mathrm{EI}} dx_1 \ , \ \Delta_{np} = \frac{N_p}{\mathrm{E}F} dx_1 \ , \ \Delta_{qp} = \frac{Q_p}{GF} \eta dx_1,$$

а перемещения δ_{mk} , δ_{nk} ,δ_{qk} -

$$\delta_{mk} = \frac{M_k}{EI} dx_1, \quad \delta_{nk} = \frac{N_k}{EF} dx_1, \ \delta_{qk} = \frac{Q_k}{GF} \eta dx_1,$$

где E, G - модули упругости и сдвига,

I - момент инерции поперечного сечения относительно оси x_2,

η - коэффициент формы сечения.

Подставим эти значения Δ_{mp}, Δ_{np}, Δ_{qp} в уравнение (12) и напишем его в виде:

$$\iint\limits_F \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^k dx_2 dx_3 = \frac{M_k M_p}{EI} + \frac{N_k N_p}{EF} + \frac{Q_k Q_p}{GF} \eta \qquad (13)$$

Подставляя это значение интеграла

$$\iint\limits_F \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^k dx_2 dx_3$$

в (9), окончательно получим:

$$\Delta_{kp} = \sum \int \ (\frac{M_k M_p}{EI} + \frac{N_k N_p}{EF} + \frac{Q_k Q_p}{GF} \eta) dx_1 \ . \qquad (14)$$

Такой вид принимает уравнение (8) для стержневой системы. Это весьма часто используемое уравнение. В связи с этим особое внимание должно быть обращено на следующее обстоятельство.

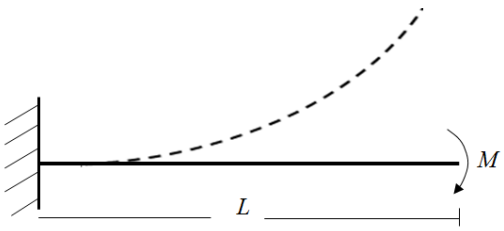


Рис. 8. Состояние равновесия прямолинейного стержня под действием приложенного к правому концу изгибающего момента (состояние p)

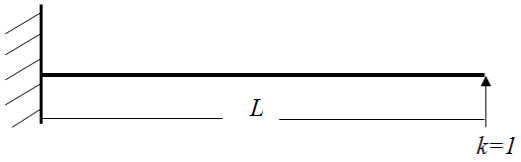


Рис. 9. Состояние равновесия прямолинейного стержня под действием приложенного к правому концу единичной силы (состояние k)

В (8) оба состояния занимали одну и ту же область и являлись конечными состояниями равновесия. Аналогично обстоит дело и в (14). Здесь стержневая система имеет одну и ту же конфигурацию и находится в конечном состоянии равновесия. Эти условия для краткости назовем условиями легитимности уравнений (8), (14).

Если эти условия нарушены, то уравнения (8) и (14), естественно, теряют силу. В сопротивлении материалов, строительной механике это обстоятельство упускается из виду. Рассмотрим, наконец, стержневую аналогию задачи об изгибе призмы, решенной в [3]. На рис. 8 и 9 приведены грузовые p и единичное k состояния балки длины L прямоугольного сечения.

Балка имеет одну и ту же прямоугольную форму в обоих состояниях, являющихся конечными состояниями равновесия. Это делает легитимным уравнения (14). Вычисляя интегралы правой части этого уравнения, находим перемещение правого конца балки:

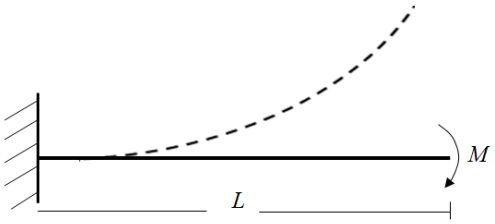


Рис. 10. Состояние равновесия прямолинейного стержня под действием приложенного к правому концу изгибающего момента (состояние *p*)

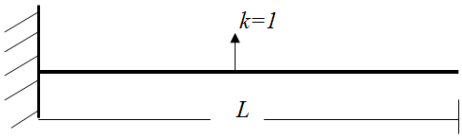


Рис. 11. Состояние равновесия прямолинейного стержня под действием единичной силы в середине пролета (состояние *k*)

$$\Delta_{kp} = -\frac{L^2}{2EJ} \quad .$$

Для определения перемещения середины оси балки нужно пользоваться уравнением (4) для следующих двух состояний, показанных на рис. 10 и 11.

Эти состояния также являются конечным состояниями равновесия. Уравнение (14) дает:

$$\Delta_{kp} = -\frac{L^2}{8EJ} \quad .$$

Определяя таким же способом перемещения остальных точек грузового состояния, можно указать положение начального состояния стержня.

Если разгрузить конечное состояние (прямая линия на рис. 8 и 10), то балка возвратится в начальное состояние (пунктирная линия на тех же рисунках).

Выводы.

Способ определения перемещений элементов стержневых систем, основанный на предлагаемом в работе [3] неклассическом решении краевой задачи статики, позволяет математически корректно пользоваться теоремой Бетти и формулами Мора.

Список литературы: 1. A. Alexeyeva, T.B.Duishenaliyev, B.T.Sarsenov. Dinamics of an Elastic Punsh on an Elastic Half-Plane wich Crack Formaion. Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2020, Vol. 60, №9, pp. 1499-1517. **2.** Дуйшеналиев Т.Б., Хроматов В.Е. Определение функций перемещения по элементам тензора Коши. Материалы Международной конференции «Современная математика и ее приложения», Уфа, 18-20 мая 2017 г. Часть 1. – Уфа, 2017. – С. 313-318. **3.** Дуйшеналиев Т.Б. Неклассические решения механики деформируемого тела. – М.: Издательство МЭИ, 2017. – 400 с. **4.** Дуйшеналиев Т.Б., Дуйшембиев А.С., Хроматов В.Е., Щугорев В.Н. Неклассический подход к решению статических краевых задач. Материалы 25-ой Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера 21 века». – Севастополь, 2018. – С. 139-145. **5.** Дуйшеналиев Т.Б., Мекенбаев Б.Т., Щугорев В.Н., Цой В.Э. Неклассическое толкование опытных диаграмм осевого растяжения (сжатия) цилиндрических образцов. Материалы 12 Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Т. 3. – Уфа, 2019. – С. 1178-1180. **6.** Дуйшеналиев Т.Б., Хроматов В.Е., Аскарбеков Р.Н., Дуйшембиев А.С., Орозбаев А.А. Преобразование материальных поверхностей и конечные деформаций упругих тел**.** // Известия КГТУ им. И.Раззакова, №2 (50), 2019 Часть 1. – С. 292-302. **7.** T.B. Duishenaliev, S.V. Ushanov, M.S.Salimov . Boundary – value static problem and modeling of elastic deformations of structures. Published in: 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Date of Conference: 11-13 March 2021 **8.** Лурье А.И. Теория упругости / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1970. – 939 с. **9.** Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 872 с.

ЗАКАЛКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВ ИЗ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Егоров Н.Т. *(ДонНТУ г.Донецк ДНР)*
Тел. +38 071-334-94-86; E-mail: fm@fizmet.donntu.org

Abstract: *The features of structural transformations during quenching of large-sized plates from low-carbon low-alloy steels of mass use are investigated. It is shown that after thick plate quenching, it is most preferable to have a bainite-martensite structure without excess ferrite. The maximum permissible amount of ferrite in the structure of hardened steel in the production of thick plate products of increased and high strength has been established.*
Key words: *hardening, plate, structure, bainite, martensite, ferrite, strength.*

В настоящее время, несмотря на кризис во многих металлопотребляющих отраслях промышленности, по прежнему сохраняется достаточно высокий спрос на термоупрочненную толстолистовую сталь. Наиболее востребованными на рынке черных металлов являются крупногабаритные листы из малоуглеродистых низколегируемых сталей повышенной и высокой прочности, подвергаемые закалке с отпуском.

В работе приведены результаты исследований по изучению влияния закалки и отпуска на структуру и свойства малоуглеродистых низколегированных сталей 10ХСНД и 17Г1С, широко используемых при производстве толстолистового проката.

Образцы размером 10х60 мм, вырезанные из горячекатаных листов толщиной 16 мм производства Алчевского металлургического комбината, нагревали до температур 920-930°С с последующей закалкой в воде и масле. Отпуск закаленных образцов осуществляли при температурах 550, 650 и 700°С. Продолжительность нагрева образцов при закалке составила 2 мин на 1 мм их толщины, что соответствовало реальным режимам термообработки листов в промышленных условиях. Длительность выдержки при отпуске изменялась от 10 до 100 мин с последующим охлаждением на воздухе.

Микроструктуру стали исследовали на микроскопах «Neophot-21» и JEM-200A. Количество продуктов распада переохлажденного аустенита определяли методом секущих с погрешностью, не превышающей 3 %.

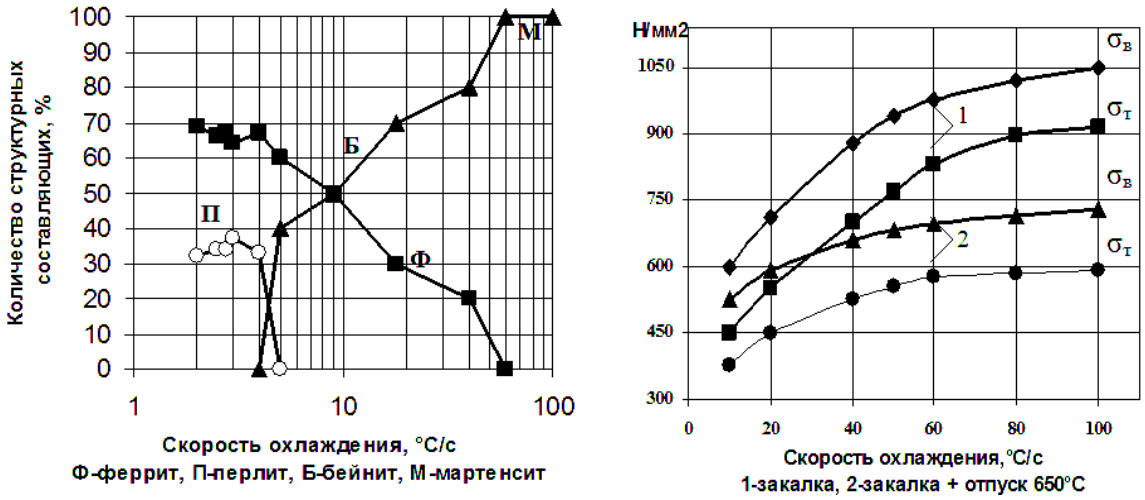
Механические свойства стали после различных режимов закалки и отпуска определяли при испытании на растяжение цилиндрических образцов по ГОСТ 1497. Испытания на ударный изгиб проводили на стандартных образцах 1-го типа при температурах от +20 до -70°С.

На рис. 1 приведены данные о влиянии скорости охлаждения при закалке на структуру и свойства стали 10ХСНД.

Исследования показывают, что закалка стали в воде со скоростью охлаждения 100°С/с обеспечивает получение преимущественно мартенситной структуры с небольшим (около 10 %) количеством нижнего бейнита, а при закалке в масле (скорость охлаждения 40°С/с) в структуре закаленной стали присутствует 80 % бейнита и 20 % полигонального феррита.

Полученные данные согласуются с результатами изучения термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита данной стали, которые показывает, что для образования бейнито-мартенситной структуры без избыточного феррита скорость охлаждения при закалке должна быть не менее 70-80°С/с, а для получения полностью мартенситной структуры – более 130°С/с [1].

Временное сопротивление разрыву стали после закалки в воде на 160 Н/мм^2 выше по сравнению с закалкой в масле, а предел текучести соответственно выше на 200 Н/мм^2. Относительное удлинение при закалке в масле увеличивается с 12 до 16 % (абс).



а б

Рис. 1. Структура (а) и прочностные свойства (б) стали 10ХСНД в зависимости от скорости охлаждения при закалке

Отпуск значительно снижает прочностные характеристики закаленной стали. Однако разупрочнение стали при отпуске после различных режимов закалки происходит с различной интенсивностью. Наиболее интенсивное разупрочнение наблюдается у стали после ее закалки в воде с получением структуры мартенсита и нижнего бейнита по сравнению со сталью, охлажденной в масле и имеющий после закалки структуру, состоящую из смеси верхнего, нижнего бейнита и 20 % полигонального феррита. При этом после отпуска 650°С с длительностью выдержки 60 мин прочностные свойства стали после закалки в воде со скоростью 100°С/с и масле со скоростью 40°С/с отличаются незначительно, а относительное удлинение для стали закаленной в масле выше на 2 % (абс).

Ударная вязкость после отпуска закаленной стали с охлаждением в масле выше, чем у стали после охлаждения ее в воде. С увеличением температуры и длительности отпуска ударная вязкость возрастает, однако наблюдаемое различие после закалки в воде и масле при этом сохраняется (табл. 1).

Таблица 1. Ударная вязкость стали 17Г1С после закалки в воде (числитель) и масле (знаменатель) в зависимости от температуры и длительности отпуска

Длительность выдержки при отпуске, мин	Ударная вязкость, $KCU^{-40°C}$, Мдж/м^2 после отпуска при температурах, °С					
	550		650		700	
	+20	-70	+20	-70	+20	-70
Без выдержки	0,35 / 0,52	0,30 / 0,44	0,38 / 0,58	0,32 / 0,47	0,40 / 0,55	0,33 / 0,49
20	0,48 / 0,65	0,38 / 0,50	0,52 / 0,71	0,35 / 0,59	0,62 / 0,85	0,42 / 0,65
40	0,55 / 0,67	0,40 / 0,54	0,65 / 0,78	0,46 / 0,58	0,71 / 0,80	0,50 / 0,68
60	0,59 / 0,71	0,43 / 0,60	0,68 / 0,78	0,48 / 0,55	0,75 / 0,79	0,66 / 0,68
100	0,34 / 0,65	0,40 / 0,50	0,65 / 0,70	0,45 / 0,51	0,72 / 0,76	0,55 / 0,54

Заслуживает внимание тот факт, что максимальные значения ударной вязкости после всех режимов отпуска наблюдается при длительности выдержки 60 мин, а дальнейшее ее увеличение приводит к снижению ударной вязкости, особенно при температуре испытания -70°С. В частности, ударная вязкость стали после закалки в воде и масле при отпуске 700°С с длительностью 100 мин в этом случае снижается на 0,11 – 0,14 Мдж/м^2 по сравнению с длительностью отпуска 60 мин.

Более низкие характеристики ударной вязкости стали со структурой отпущенного мартенсита и нижнего бейнита объясняется особенностью выделения и расположения карбидных частиц в процессе отпуска.

Отпуск закаленной в воде стали с мартенситной или мартенситно-бейнитной структурами приводит к образованию достаточно большого количества мелких карбидов, располагающихся преимущественно по границам бывших мартенситных и бейнитных кристаллов. Такое ориентированное скопление карбидов облегчает распространение хрупких трещин и снижает ударную вязкость термоупрочненной стали [2]. Повышение ударной вязкости после отпуска стали с бейнитной структурой обусловлено уменьшением количества мелкодисперсных карбидов и их более равномерным распределением в ферритных зернах отпущенного бейнита.

Основными проблемами при закалке крупногабаритных толстых листов является недостаточная их интенсивность и равномерность охлаждения, что определяется, с одной стороны, удельным расходом воды, подаваемой на охлаждаемую поверхность, а с другой – прокаливаемостью сталей. Исследованиями [3] установлено, что максимальные значения прокаливаемости сталей 10ХСНД и 17Г1С достигаются при закалке с удельным расходом воды соответственно 200-250 и 80-90 м^3/м^{2}ч. Дальнейшее увеличение расхода воды при закалке приводит к заметному повышению скорости охлаждения только поверхностных слоев металла и практически не оказывает влияния на интенсивность охлаждения сердцевины листов толщиной 16 мм и более.

Низкая прокаливаемость толстолистовых низколегированных сталей является их характерной особенностью. Изучение микроструктуры образцов после торцевой закалки показало, что даже при очень интенсивном охлаждении с удельным расходом воды 1030 м^3/м^{2}ч, которое практически не достигается в реальных промышленных условиях, глубина закаленного слоя с мартенситно-бейнитной структурой не превышает 3-5 мм. Это означает, что такую прокаливаемость можно ожидать только на листах толщиной не более 10 мм. В остальных случаях наличие полигонального феррита в структуре закаленных листов неизбежно.

В таблице 2 приведены механические свойства термоупрочненных толстых листов после их закалки в закалочном прессе Алчевского металлургического комбината (АМК) и роликовой закалочной машине (РЗМ) комбината «Азовсталь».

Из приведенных данных видно, что практические режимы закалки толстых листов с использованием существующего на металлургических предприятиях закалочного оборудования далеки от классических представлений о закалке с образованием мартенсита. В структуре закаленных листов, наряду с продуктами закалки (бейнитом, мартенситом), присутствуют полигональный феррит, количество которого изменяется от 13 до 49 %.

С увеличением количества полигонального феррита в структуре закаленной стали прочностные характеристики снижаются, а пластические свойства возрастают. Следует отметить, что отрицательное влияние феррита, выделяющегося при закалке, проявляется не только в снижении прочности стали, но и ее ударной вязкости.

Таблица 2. Механические свойства листов толщиной 16-18 мм из стали 10ХСНД после закалки (числитель) и отпуска при 680°С (знаменатель) в промышленных условиях

Предприятие, оборудование для закалки	Расход воды при закалке $м^3/ч$	Скорость охлаждения, °С/с	Количество феррита в структуре, %	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ_5, %	$KCU^{-40°C}$, $Мдж/м^2$
				$Н/мм^2$			
«Азовсталь» РЗМ	1200	17	33	875 / 570	707 / 467	16 / 25	– / 0,87
	2400	42	13	914 / 597	758 / 480	17 / 24	– / 0,93
АМК закалочный пресс	1900	10	49	672 / 506	461 / 332	21 / 28	– / 0,76

Уровень прочностных свойств термоупрочненных толстых листов определяется не только содержанием полигонального феррита в структуре стали, но и процессами карбидообразования при отпуске. Электронномикроскопические исследования показали, что при содержании в структуре закаленной стали около 50 % полигонального феррита после отпуска при 650°С с длительностью выдержки 60 мин ферритные зерна бейнитной матрицы и их границы остаются свободными от карбидных выделений. Уменьшение количества полигонального феррита в структуре закаленной стали с 50 до 30 % и ниже изменяет кинетику карбидообразования. В этом случае наблюдается выделение большого количества карбидов в ферритных зернах отпущенного бейнита и это способствует дополнительному повышению прочностных свойств термоупрочненной стали.

Таким образом, результаты исследований показывает, что содержание полигонального феррита в структуре закаленной низколегированной стали не должно превышать 30 % при производстве термоупрочненного толстолистового проката повышенной и высокой прочности по ГОСТ 19282. Наиболее предпочтительно после закалки иметь бейнито-мартенситную или бейнитную структуры без избыточного феррита, что гарантировано обеспечивает получение сбалансированных значений прочности, пластичности и ударной вязкости при производстве высокопрочных свариваемых сталей. Установленные закономерности структурных превращений при закалке малоуглеродистых низколегированных сталей позволяют разрабатывать новые и совершенствовать существующие технологии упрочняющей термообработки толстых листов на основе эффективного управления процессами структурообразования.

Список литературы: 1. Романов П.В. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении стали / П.В. Романов, Р.П. Радченко // Атлас термокинетических диаграмм. – Новосибирск, АН СССР, 1960. – 270 с. **2.** Марченко Б.А. Особенности превращения и свойства низколегированной марганцово-бор-ванадиевой стали со структурой мартенсита и нижнего бейнита / Б.А. Марченко, Н.И. Карчевская, А.В. Рудченко, М.В.Пирусский // Физика металлов и металловедение, 1980, том 50, вып. 1 – С. 79-85. **3.**ЕгоровН.Т. Влияние условий охлаждения при закалке на прокаливаемость толстолистовых низколегировнных сталей / Н.Т. Егоров, В.Г. Оноприенко, В.Г.Катрич // Машиностроение и техносфера в XXI веке. Сб. тр. междунар. конф. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – С. 30-33.

УДК 621.187.124

ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ ДЕАЭРАТОРА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВОГО КОТЛА ЦЕХА ПРОИЗВОДСТВА КАРБАМИДА

Егоров П.В., Чупраков М.В., Сухоруков Ю.Г., Эрнандес А.Д., Шарапова Н.Е., Жукова В.С. *(ОАО «НПО ЦКТИ»*
г. Санкт-Петербург, Россия)
Тел./Факс:+7 (812)5788800; E-mail: deaerator@ckti.ru

Abstract: *a thermal deaerator of atmospheric pressure with a capacity of 100 t/h has been upgraded for the preparation of feed water in the steam boiler of the carbamide fabrication. The experience of using a small-sized deaeration column and a flooded bubbling device in a deaeration tank is shown. Based on the positive results of operation, it is advisable to develop proposals for the technical re-equipment of similar deaerators installed at domestic chemical industry enterprises.*

Деаэраторы атмосферного давления широко применяются в схемах приготовления воды систем промышленных энергоустановок, в том числе и в химической промышленности. Они предназначены для удаления из воды коррозионно-агрессивных газов - кислорода и свободной углекислоты. ОАО «НПО ЦКТИ» имеет большой опыт создания, освоения, модернизации, реконструкции и технического перевооружения термических деаэраторов всех видов и назначений, является разработчиком нормативно-технических документов в области стандартизации и расчетов деаэраторов.

В последние годы в отечественной химической промышленности наметилась необходимость экономии пара среднего и высокого давления, используемого для технологических процессов производства карбамида и аммиака при одновременном увеличении мощностей.

В 2019 г. перед специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» по заказу одного из крупнейших производителей азотных удобрений и аммиака в России была поставлена задача по техническому перевооружению существующего деаэратора атмосферного давления производительностью 100 т/ч импортного производства (КНР) с учетом следующих технических условий.

Для выработки пара высокого давления в цехе производства карбамида использовалась глубокообессоленная вода в количестве до 50 м^3/ч и температурой до 45 °С, а также турбинный конденсат в количестве до 30 м^3/ч и температурой до 90 °С. Расход пара на деаэратор находился в пределах 6,0 – 8,0 т/ч. При этом содержание растворенного кислорода в деаэрированной воде не превышало 10 мкг/дм^3.

С целью экономии пара, дефицит которого существует особенно в осенне-зимний период года, на предприятии была реализована проектная схема предварительного подогрева глубокообессоленной воды до температуры 65 °С в водо-водяном теплообменнике. При включении в работу вышеуказанной схемы расход пара сократился на 3,0 – 4,0 т/ч, но при этом было выявлено существенное увеличение содержания растворенного кислорода в воде на выходе из деаэратора до 40-60 мкг/дм^3 (при норме не более 10 мкг/дм^3). Увеличенный расход гидразин-гидрата для связывания остаточного кислорода также не обеспечил нормативных показателей.

По результатам анализа эксплуатационных данных и конструкции внутренних устройств деаэратора было выявлено, что все исходные потоки воды и пара подаются непосредственно в деаэрационную колонку. Обработка воды паром в объеме бака деаэратора не осуществляется. Деаэраторный бак выполнял только функцию бака запаса воды. При минимальных и максимальных режимах тепловой и гидравлической нагрузок деаэратор не в полной мере удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям.

Принципиальная схема деаэратора атмосферного давления импортного производства производительностью 100 т/ч приведена на рис.1.

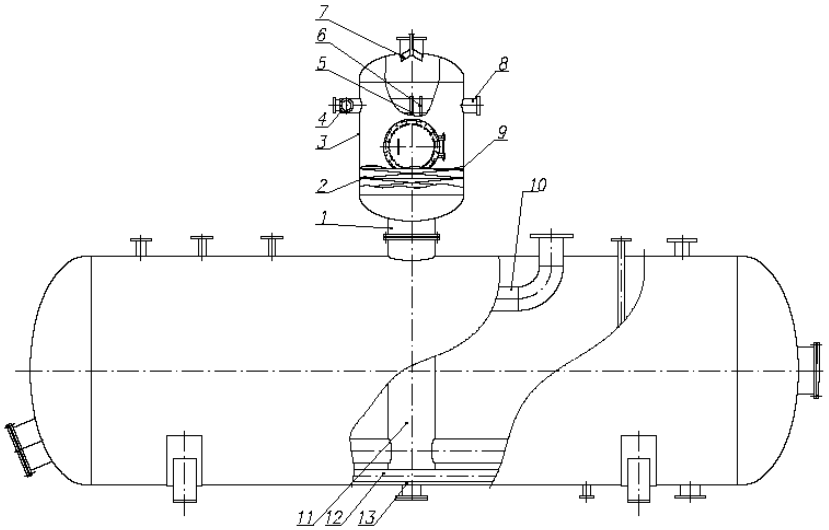


Рис. 1. Деаэратор атмосферного давления импортного производства производительностью 100 т/ч: 1 - водяная труба; 2 - набивка; 3 - корпус; 4 - блендерная труба; 5 - труба завихрителя; 6 - двухходовая соединительная труба; 7 - сепаратор; 8 - труба для осмотра; 9 - камера, образованная юбкой водяной мембраны; 10 - паровая труба; 11 - водоподводящая труба; 12 - кипятильная труба; 13 - корректирующая доска быстрого вращения

На начальном этапе ОАО «НПО ЦКТИ» разработало два варианта технического перевооружения существующего деаэратора:

- замена только внутренних рабочих устройств деаэрационной колонки;
- замена существующей деаэрационной колонки новой современной конструкции.

В обоих вариантах предполагалось, что:

- будет применяться двухступенчатая (струйно-барботажная) схема обработки воды;
- в качестве деаэрирующих элементов в деаэрационной колонке будут использоваться низконапорное водораспределительное устройство (гидравлическая форсунка) и струйные тарелки;
- в деаэраторном баке будет предусмотрено «затопленное» барботажное устройство;
- принятая схема обработки воды должна обеспечить практически одинаковые тепловую эффективность и повышенные требования к качеству деаэрированной воды.

По результатам предварительных теплогидравлических и прочностных расчетов и по согласованию с Заказчиком, было принято решение о замене, существующей деаэрационной колонки новой и установке в баке деаэратора затопленного барботажного устройства. К преимуществам этого варианта конструкции деаэратора следует отнести:

- применение трех струйных ступеней в колонке и «затопленного» барботажного устройства в баке позволяет надежно гарантировать необходимый нагрев и деаэрацию воды в заданных режимах работы деаэратора;
- создание дополнительной поверхности контакта водяной и паровой фаз для улучшения тепломассообмена;
- повышение эффективности работы деаэрационной колонки;
- уменьшение вертикального габарита и массы деаэрационной колонки.

Устройство деаэратора после технического перевооружения должно обеспечивать заданные технические характеристики, гидравлические и тепловые нагрузки, возможность осмотра, очистки и ремонта внутренних устройств.

В деаэраторе применена двухступенчатая схема деаэрации: 1-ая ступень-струйно-капельная (в колонке), 2-ая ступень – барботажная (в баке).

Конструкция деаэратора базируется в основном на известных и проверенных в эксплуатации решениях, применяемых также в новых деаэраторах повышенного давления для АЭС и ТЭС [1, 2, 3, 4].

Деаэратор состоит из одной малогабаритной вертикальной деаэрационной колонки, установленной на деаэраторном баке геометрической ёмкостью 44 м^3.

Использование струйной форсунки в верхней части колонки в качестве низконапорного водораспределительного устройства позволяет создать дополнительную развитую поверхность контакта водяной и паровой фаз для интенсификации процессов тепломассообмена и, тем самым, повысить эффективность работы деаэрационной колонки. Применение струйных ступеней в колонке и «затопленного» барботажного устройства в баке позволяет надежно гарантировать необходимые нагрев и деаэрацию воды во всех заданных режимах работы деаэратора.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема деаэратора, модернизированного специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» в 2019 г.

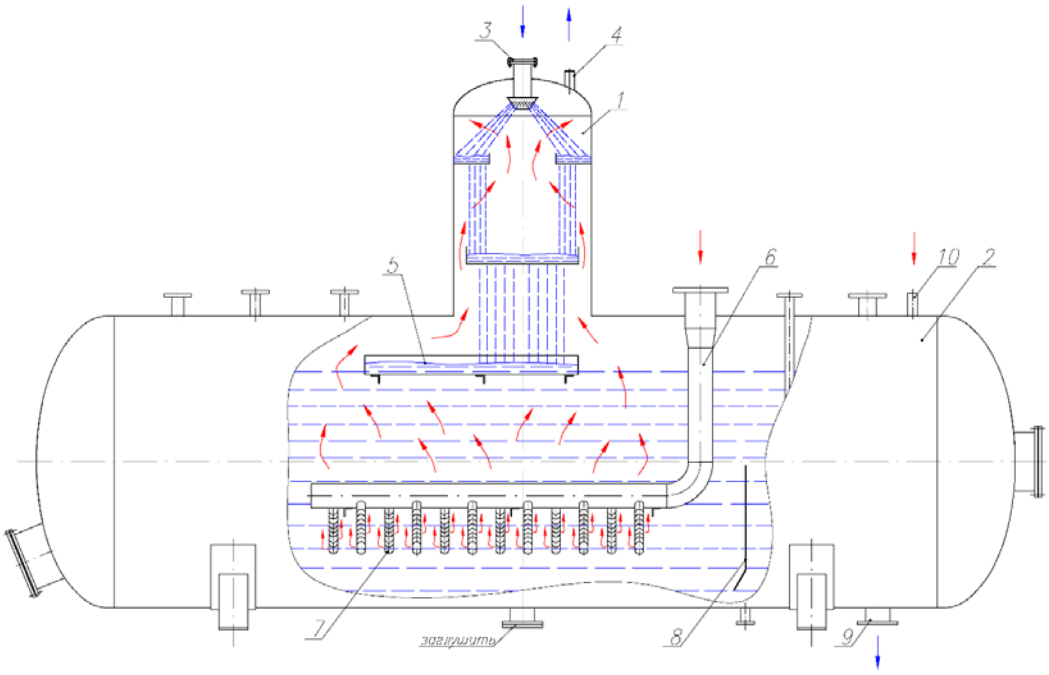


Рис. 2. Деаэратор атмосферного давления современной конструкции производительностью 100 т/ч. 1 - колонка деаэрационная; 2 - бак; 3 – водораспределительное устройство (форсунка); 4 – штуцер отвода выпара; 5 – лоток; 6 – штуцер подвода пара на барботаж; 7 – барботажное устройство; 8 – перегородка;9 – штуцер отвода деаэрированной воды; 10 – штуцер подвода пара

В 2020 г. деаэратор был включен в эксплуатацию. Специалистами эксплуатационных и наладочных организаций были проведены совместные режимно-наладочные испытания.

В процессе испытаний определялись дегазационные показатели и теплогидравлические характеристики работы деаэратора при изменении его производительности, температуры, расхода теплоносителя на барботажное устройство и в паровой объем, давления и нагрева воды в деаэраторе в соответствии с эксплуатационными условиями на период проведения испытаний. Контроль значений рабочих параметров в процессе испытаний производился штатными средствами измерения. Проверка содержания в деаэрированной воде растворенного кислорода и свободной углекислоты осуществлялась приборами автоматического контроля и химическим (ручным) способом в соответствии с действующими на предприятии методами.

Результаты испытаний и данные эксплуатации деаэратора показали следующее:

- новый деаэратор работает устойчиво без заметной вибрации и гидравлических ударов в широком диапазоне нагрузок и эксплуатационных режимов;

- деаэратор удовлетворяет требованиям [5, 6] и требованию Заказчика по остаточному содержанию растворенного кислорода в деаэрированной воде;

- величина содержания растворенного кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора при максимальном расходе исходных потоков 75 т/ч составила 1 ÷ 2 мкг/кг при заданной проектной величине 10 мкг/кг.

Основные технические характеристики деаэратора до и после технического перевооружения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики деаэратора до и после технического перевооружения

Наименование	Единица измерения	До технического перевооружения		После технического перевооружения
Давление рабочее абсолютное	МПа ($кгс/см^2$)	0,12 (1,2)		0,12 (1,2)
Расход пара на деаэратор	т/ч	6,0 ÷ 8,0	3,0 ÷ 4,0	3,0 ÷ 4,0
Температура деаэрированной воды на выходе из деаэратора	°С	104,0		104,25
Содержание растворенного кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора	мкг/кг	10	40 ÷60	1 ÷ 2

Выводы

1. Специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» проведена модернизация деаэратора атмосферного давления зарубежной поставки с установкой новой малогабаритной деаэрационной колонки и внутрикорпусных устройств в баке.

2. Применение трех струйных ступеней в колонке и «затопленного» барботажного устройства в баке позволяет надежно гарантировать необходимый нагрев и деаэрацию воды в заданных режимах работы деаэратора.

3. Проведенные специалистами эксплуатационных и наладочных организаций совместные режимно-наладочные испытания показали, что модернизированный деаэратор работает надежно и эффективно в проектном диапазоне гидравлических и тепловых нагрузок, гарантированно обеспечивая заданные требования по содержанию растворенного кислорода в деаэрированной воде.

4. На основании полученных результатов, указанные выше технические решения рекомендуются к применению при модернизации существующих и изготовлении новых деаэраторов атмосферного и повышенного давления в схемах промышленных энергоустановок химической, нефтегазовой и других отраслях промышленности.

Список литературы: 1. Гиммельберг А.С., Михайлов В.Г., Григорьев Г.В., Хоменок Л.А., Егоров П.В., Шилова Н.Е., Соколов Б.М. Деаэратор с малогабаритной деаэрационной колонкой для энергоблоков мощностью 300 МВт. Электрические станции, 2006, №4. **2.** Григорьев Г.В., Гиммельберг А.С., Егоров П.В., Шилова Н.Е., Михайлов В.Г., Баева А.Н. Укрупненные термические деаэраторы с горизонтальной колонкой для мощных энергоблоков АЭС. Теплоэнергетика, 2008, № 2. **3.** Егоров П.В., Гиммельберг А.С., Михайлов В.Г., Чупраков М.В., Баева А.Н. Деаэратор повышенного давления для энергоблока 300 МВт. Электрические станции, 2016, № 1. – с.39. **4.** Егоров П.В., Чупраков М.В., Гиммельберг А.С., Михайлов В.Е., Штыков Е.С., Тарасов И.В., Петров М.Ю. Новый деаэратор атмосферного давления для системы теплоснабжения ГТУ-ТЭЦ ЭС-1 Центральной ТЭЦ Санкт-Петербурга. Энергетик, 2019, № 3 – с.31. **5.** ГОСТ 16860-88. Деаэраторы термические. – М.: Стандартинформ, 2007. **6.** Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М.: Омега-Л, 2003.

УДК621.793.7

ИСПЫТАНИЕ ПОРОШКОВОГО СПЛАВА ПГ-Ж40 С БОРИДОМ ХРОМА CrB_2 НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ И АДГЕЗИЮ

Ермеков Д.К.[1], Поветкин В.В.[1], Нурмуханова А.З.[1], Букаева А.З.[2] (*[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, [2]Каспийский государственный университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, г. Актау, Казахстан*)
Тел. 8 (727) 221-15-43; E-mail: vv1940_povetkin@mail.ru

Abstract: *To date, there are many self-fluxing powder alloys based on nickel, copper and others obtained by different methods. The paper considers a research process on the basis of self-fluxing alloy PG-Zh40 with chrome boride CrB_2 hardening additives can create coatings with high hardness by adding chrome borides to the alloy before gas-powder surfacing which ensures maximum wear resistance of coating characterized by uniform distribution of hardening crystals over the entire cross section and achieved by melting of coating layer at temperature 1000-1100^{0}C.*
Key words: *powders, gas-flame, plasma coatings, adhesion, strength, wear resistance, plasmatron, corrosion.*

Наиболее высокопроизводительным газопламенным способом является плазменный, основанный на создании электрической дуги, в которой нагревается газ (воздух, аргон и другие). В наших исследованиях из газопламенных способов наплавки (напыление) износостойких порошков более экономичным является плазменный, нашедший в промышленности очень широкое применение (резка сталей, разрушение различных материалов, газоплазменной наплавки) [1, 2].

Плазматрон для напыления предназначен для плазменного напыления металлических и керамических порошковых материалов на металлические и неметаллические поверхности.

Основным инструментом для напыления и наплавки порошковых материалов, также был использован плазменный способ.

При проведении лабораторных испытаний было применено следующее оборудование: пистолет для газопламенного напыления защитных покрытий Р3177, гидропресс ДБ 2432, камера абразивно-струйная КСО-130-И-ФВ-М, штангенциркуль по ГОСТ 166-89.

В качестве источника питания плазмотрона используется источник постоянного тока с напряжением холостого хода не менее 300 В и установленной мощностью не менее 80 кВт [3-5]. В таблице 1 представлена техническая характеристика плазматрона.

Таблица 1. Техническая характеристика плазматрона

Наименование параметра	**Норма**
Рабочий ток, А	70÷250
Рабочее напряжение на плазмотроне (при работе на воздухе), В	180÷270
Мощность плазмотрона, кВт, не более	70
Режим работы, ПВ, %	100
Расход воды на охлаждение плазмотрона (при давлении на входе в плазмотрон 5кгс/см^2), г/с, не менее	270
Производительность по напыляемому материалу, кг/ч, не более:	
По оксиду алюминия (Al_20_3)	10
По металлическим порошкам	30
Коэффициент использования порошкового материала при напылении на стальной образец типа “Лист” размером 300х300х3мм, не менее	0,7
Масса плазмотрона без ЗИПа и коммуникаций, кг	3

На рисунке 1 представлен стенд для плазменного напыление металлических порошков, выполненный на базе токарного станка с подвижной кареткой, на которой установлен плазматрон. Напыляемая деталь закреплена в патроне станка и задней бабке.

Рис. 1. Экспериментальный стенд для наплавки металлических порошков
1 - токарный станок, 2 - подвижная каретка станка, 3 - трехкулачковый патрон, 4 задняя бабка, 5 – обрабатывающий деталь, 6 – плазматрон, 7 – рычаги управление

На рисунке 2 представлены полученные детали в процессе обработки на плазматроне.

Рис. 2. Полученные детали в процессе обработки на плазматроне

Для обеспечение плазменной наплавки полученного состава воздушно-плазменной горелкой:

- напряжение холостого хода – 320 В ± 5 %;
- пределы регулирования рабочего тока – от 200 до 500 А;
- рабочее напряжение на дуге – 270 В;
- плазмообразующий газ – воздух;
- охлаждение выпрямителя – воздушно-принудительное;
- охлаждение плазмотрона – водяное;
- расход воды – 6 л/мин;
- расход наплавочного нового сплава – 120 г/мин;

– толщина наплавочного слоя – 1-3 мм.
– расстояние от сопла до детали – 15-17 см.

В таблице 2,3 приведены режимы напыления металлических и керамических материалов. Сейчас практически все металлические порошки напыляют при расходе плазменного газа 3 г/сек. В основном керамику напыляют при расходе плазменного газа 1,5 г/сек.

При работе на воздухе используется катод с гафниевой или циркониевой рабочей вставкой; при работе на азоте, аргоне, водороде, гелии - с вольфрамовой вставкой.

Таблица 2. Режимы напыления металлических материалов

Расход плазм. газа, г/сек	Среднемассовая температура плазмы, град. К.	Среднемассовая скорость струи плазмы, м/сек	Скорость звука при температуре плазмы, м/сек
1,5	6750	1490	1840
2	6500	1919	1740
2,5	6300	2207	1690
3	6000	2415	1608

Таблица 3. Режимы напыления керамических материалов

Расход плазм. газа, г/сек	Среднемассовая температура плазмы, град. К.	Среднемассовая скорость струи плазмы, м/сек	Скорость звука при температуре плазмы, м/сек
1	7000	708	1914
1,5	6750	970	1840
2	6500	1225	1740

Учитывая требования по экологическим, технологическим и экономическим показателям, данное научно-исследовательское направление, в частности, современные методы нанесения покрытий, методы их испытаний подлежат стандартизации и сертификации этих процессов. Необходимость стандартизации процедур сварки (нанесения покрытия) появилось в связи с введением международных и европейских стандартов системы менеджмента качества, в которых сварка считается специальным процессом, «В котором подтверждение соответствия конечной продукции затруднено» (ИСО 9000:2000).

В требованиях стандарта ИСО 9001:2008 записано: «Организация должна подтверждать все процессы производства и обслуживания, результаты которых нельзя проверить посредством последовательного мониторинга или измерения, вследствие чего их недостатки становятся очевидными только после начала использования продукции или после предоставления услуги».

Подробные требования к качеству сварки (нанесения покрытия) определяет серия стандартов ИСО 3834 по обеспечению качества в сварочном производстве.

Так для выявления качественных и количественных показателей порошкового сплава ПГ-Ж40 были проведены испытания сплава на коррозионную стойкость и адгезию [6].

Порошковый сплав ПГ-Ж40 в своем составе имеет следующие химические элементы в соответствующем процентном соотношении: Fe=38%; Cr=15,0%; Si=3,1%; B=2,9%; Ni=33%; Cu=4%; V=4,0%.

Для определения свойств порошкового сплава ПГ-Ж40 были проведены следующие испытания на стандартных образцах по ГОСТ 1050-80 (марка СТ 3) с нанесенным покрытием:

1) **Испытание на коррозионную стойкость**. При проведении испытаний в качестве агрессивной среды выбрали 30%-ный раствор H_2SO_4. Плотность раствора при температуре 20^0C, ρ =1,83 г/см^3. Образцы №1,2.

Размеры:

образец №1	образец №2
длина H=48 мм	H=46 мм
ширина W=33 мм	W=32 мм
высота B=9 мм	B=10 мм
площадь S=4812 мм^2	S=4504 мм^2
масса m_1=109,73 гр	m_2=103,077 гр

По результатам испытаний были определены: изменения массы образцов; скорость коррозии; коррозионная стойкость образцов (таблица 4).

Таблица 4. Сводная таблица результатов испытаний

№ образца	Материал	Коррозионная среда	Масса образца, гр		Изменение массы, гр	Потеря от коррозии	Коррозионная стойкость
			до исп.	после исп.			
1	ПГ-Ж40	30% H_2SO_4	109,73	109,21	0,52	0,000074	3 балла
2	ПГ-Ж40	30% H_2SO_4	103,077	102,38	0,697	0,000082	4 балла

2) **Испытание в коррозионных средах**.

При проведении испытаний были применены средства измерения для определения скорости коррозии Моникор-2М, агрессивные среды сероводородной H_2S, серной H_2SO_4 кислоты (кислотных сред).

Результаты испытаний:

1. Получены следующие результаты коррозионных испытаний сплава в сероводородной среде H_2S (образец №3) (таблица 5):

Таблица 5. Результаты коррозионных испытаний сплава в сероводородной среде H_2S

Внешний вид покрытия	светло-серый
Адгезия покрытия	не менее 50-80 МПа
Микротвердость покрытия	не менее 500 HV
Массовый показатель коррозии покрытия	0,089 мм/год
Глубинный показатель коррозии покрытия	0,101 мм/год
Показатель циттинговой коррозии	0,014 г/м^3*час
Электрохимический потенциал коррозии	-0,190 В

2. Получены следующие результаты коррозионных испытаний сплава в серной кислоте H_2SO_4 (образец №4) (таблица 6):

Таблица 6. Результаты коррозионных испытаний сплава в серной кислоте H_2SO_4

Внешний вид покрытия	светло-серый
Адгезия покрытия	не менее 55-82 МПа
Микротвердость покрытия	не менее 500 HV
Массовый показатель коррозии покрытия	0,08 мм/год
Глубинный показатель коррозии покрытия	0,115 мм/год
Показатель циттинговой коррозии	0,02 г/м^3*час
Электрохимический потенциал коррозии	-0,23 В

3) **Испытание по определению на прочность сцепления покрытии к основе**.

Были получены следующие результаты испытания (образцы №5,6):

- твердость основы образцов – HRC 57;
- микротвердость покрытия – HV 1330;
- абразивно-струйная обработка, мкм – 63;
- нарезка рваной резьбы, мм – 1,28;
- средний диаметр пор, мм – 0,1 – 0,15.

4) **Испытание по определению влияния толщины покрытия на внешних цилиндрических поверхностях на адгезию покрытия к основе**.

При проведении испытаний было применено следующее оборудования: Пистолет для газопламенного напыления защитных покрытий Р3177, Гидропресс ДБ 2432, камера абразивно-струйная КСО-130-И-ФВ-М, штангенциркуль по ГОСТ 166-89 [7].

Получены следующие результаты испытания (образцы №7,8 и 9):

- твердость напыления образца HRC 42 –46;
- микротвердость покрытия HV (1560 – 1670);
- пористость шлифованной поверхности, пор/см^2 – 1-3;
- адгезия покрытий образцов, кгс/см^2: № 7 – 11,7; № 8 – 14,6; № 9 – 17,2.

5) **Испытание по определению влияния дистанции напыления на адгезию покрытия к основе**.

При проведении испытаний было применено следующее оборудования: Пистолет для газопламенного напыления защитных покрытий Р3177, Гидропресс ДБ 2432, камера абразивно-струйная КСО-130-И-ФВ-М, штангенциркуль по ГОСТ 166-89.

Результаты испытаний (образцы № 10, 11):

- твердость основы образца, HRC – 43-45;
- микротвердость покрытий, HV – 1640-1680;
- пористость шлифованной поверхности (средний диаметр пор, мм – 0,05).

Среднее количество пор на 1 см^2 поверхности в зависимости от расстояния L от сопла до образца (рисунок 3-5) [8]:

90 мм – 3-5; 80 мм – 1-3;

- адгезия покрытий (по методу среза в зависимости от L, кгс/мм^2):

90 мм – 2,06; 80 мм – 3,16.

Выводы:

Рис. 3. Образцы с нанесенным покрытием до проведения коррозионных испытаний

1) На основе самофлюсующихся сплава ПГ-Ж40 с ведением в состав упрочняющих добавок борида хрома CrB_2 можно создать покрытия с повышенной твердостью, добавляя в сплав перед газопорошковой наплавкой бориды хрома что, обеспечивает максимальную износостойкость покрытия, характеризуется равномерным распределением упрочняющих кристаллов по всему сечению, что достигается оплавлением слоя покрытия при температуре 1000-1100^{0}С.

Рис 4. Образцы с нанесенным покрытием после проведения коррозионных испытаний

2) Новое наноструктурированное антикоррозионное защитное покрытие коррозионностойкое к сероводородной (H_2S), серной (H_2SO_4) кислотам (кислотным средам) и по шкале коррозионной стойкости металлов составляет 3 балла «Весьма стойкие», причем его уровень составляет не менее уровня V NACE MR 0175 ISO 15156;

3) Наплавленное наноструктурированное антикоррозионное защитное покрытие сопоставимо с нержавеющей сталью с подслоем типа 12Х18Н9Т и имеет:

- твердость основы образцов – HRC 57;
- микротвердость покрытия – HV 1330;
- абразивно-струйная обработка – 0,45;
- средний диаметр пор, мм – 0,1 – 0,15.
- наличие пор, пор/см2 – 1-3;
- адгезия покрытия образцов, кг*с/см2: № 7 – 11,7; № 8 – 14,6; № 9 – 17,2.

Рис. 5. Образцы с отчищенной поверхностью от следов коррозии

Список литературы: 1. Ермеков Д.К., Поветкин В.В., Рутkуниене Живилье. Влияние коррозионной среды на физико-химическое изнашивание деталей оборудования с износостойким покрытием//Вестник Казахстанско-Британского технического университета, - Алматы. - №2(53). 2020, - 15-21 с. **2.** Povetkin V.V., Khandozhko A.V., Bukayeva A.Z., Nurymov Y.K. Study of the application high velocity thermal spraying tools used in technological processes and production // News of the academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. - Almaty, 2017. - №5. - P.190-201. **3.** Костицына И.В. Коррозионная стойкость трубных сталей в агрессивных средах нефтяных и газовых месторождений: дис. … канд. нехн. наук: 02.00.04: Челябинск, 2014 – 147 с. **4.**ГОСТ 21.602-2003 Система проектной документации для строительства (СПДС). Правила выполнения рабочей документации отопления, вентиляции и кондиционирования. **5.**Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий: учебное пособие / Б.С. Зенин, А.И. Слосман; Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 120 с. **6.** Seitkhanov A., Povetkin V., Bektibay B., Tatybayev M., Bukayeva A. Improvement of the design of hydraulic transport devices for the transport of hydroabrasive media in the enrichment industry//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, - №5/1 (101), 2019, - P. 6-16. ISSN 1729-3774. **7.** Povetkin V.V., Kerimzhanova M.F., Orlova Y.P., Bukayeva A.Z. Improvement of equipment for transport of slurry in mineral processing production // Mining Informational and Analytical Bulletin. - № 6, 2018, - Moscow, ISSN 0236-1493, - p.161-169. **8.** Yermekov, D., Povetkin, V., Rutkuniene, Z., Nurmukhanova, A., Bukayeva, A. (2021). Development of a technology of gas-flame application of powders to increase wear resistance and adhesion strength . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(12 (111), 14–24.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗОПЛАМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВКЛЮЧЕНИЕМ БОРИДА ХРОМА CrB_2

Ермеков Д.К.[1], Поветкин В.В.[1], Нурмуханова А.З.[1], Букаева А.З.[2]
(*[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан,*
[2]Каспийский государственный университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, г. Актау, Казахстан)
Тел. 8 (727) 221-15-43; E-mail: vv1940_povetkin@mail.ru

Abstract: *The paper considers the research process of gas-flame deposition of powders for wear resistance and their adhesion strength. Experimental studies to determine the optimum composition of CrB2 ligature introduced into the cladding alloy PG-Zh40 have been carried out; it was found that to obtain hardness of the clad metal within 450-600 NV, it is necessary to introduce CrB2 into the coating composition, within 10% of the total mass. The developed new iron-based self-fluxing powder surfacing material with a hardening additive will be used for restoration of machine parts and equipment operating under conditions of abrasive wear, corrosion and elevated temperatures or aggressive media.*
Key words: *powders, gas-flame, plasma coatings, adhesion, strength, wear resistance, plasmatron, corrosion.*

Введение.

Ежегодно потери мировой экономики, по причине износа и коррозии составляют, примерно, 80 миллиардов долларов, хотя при целенаправленной профилактической защите от износа, этих потерь можно избежать. Сюда относится, наряду с покрытием новых деталей, восстановление изношенных частей конструкции и их возврат в экономический кругооборот.

В настоящее время широко используется различные технологические методы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей с учетом заданных условий их эксплуатации: рабочих нагрузок, температуры нагрева, окружающей среды, продолжительности физико-химического воздействия.

Химико-термические и термические поверхности-упрочняющие методы обработки (поверхностная закалка, цементация, азотирование, алитирование, борирование и т, д.) позволяют резко изменить физико-химическое состояние поверхностного слоя деталей и обеспечить требуемые эксплуатационные свойства (износостойкость, сопротивление усталости, жаростойкость и др.).

Эффективным методом поверхностного упрочнения деталей машин является порошковое напыление (наплавка) материалов с высокими эксплуатационными свойствами. Этот метод экономичен, так как наплавке подвергают только те поверхности, которые работают в условиях интенсивного изнашивания и, как правило, масса наплавленного материала составляет малую долю от массы детали. Долговечность упрочненных деталей определяется свойствами наплавленного материала, поэтому наносимый материал или сплав выбирают с учетом условий эксплуатации детали и применяемого метода наплавки [1,2].

Анализ литературных данных и постановка проблемы

В данное время существует много наплавочных самофлюсующихся порошковых сплавов на основе никеля, меди, получаемых разными методами, занимающих ведущее место среди промышленно выпускаемых материалов различными фирмами мира NACA, JNCO, Battelle, Cabot, BBC, Vienna, KRUPP и др. Для придания наплавленной поверхности различной твердости разработаны сплавы с заданной твердостью от 35 до 55 HRC типа: ПСР-2, ПСР-3, ПСР-4 и др. [3]. Все эти сплавы разработаны на основе кобальта, никеля и меди с различными карбидообразующими добавками, обеспечивающими необходимые физико-механические свойства наплавленного (нанесенного) покрытия [4,5].

Проблема упрочнения и защиты от коррозий деталей оборудования нефтегазовой промышленности, в настоящее время, является одной из важнейших проблем данных отраслей, успешное решение которой позволит резко сократить расход черных металлов, повысить качества и долговечность работы машин и механизмов, производительность труда, сэкономить материальные, энергетические и трудовые ресурсы [6].

В связи с этим актуальным является упрочнение и восстановление изнашиваемых деталей оборудования с приданием им свойств, значительно превосходящих свойства не обработанных деталей, прежде всего способности сопротивления к коррозии и физико-химическому изнашиванию [7,8].

Целью данной работы является разработка технологии получения нового сплава, на основе ранее разработанного самофлюсующегося порошкового наплавочного сплава ПГ-Ж40, с введением в его состав упрочняющей добавки борида хрома. Исследование формирования структуры, фазового состава и свойств газопламенных покрытий. Для отработки технологии получения нового сплава с лигатурой CrB_2 использовали самофлюсующийся порошковый наплавочный сплав марки ПГ-Ж40 с фракцией 50-160 мкм, который имеет следующий химический состав: Fe=38%; C=15,1%; Si=3,0%; B=2,9%; Ni=33%.

Методика проведения исследований

В качестве исходных реагентов для создания самофлюсующегося наплавочного порошка использовались порошки Fe, Ni, Cr, Si, Cu, B, C и упрочняющая добавка лигатура CrB_2. Медь вводилась с целью повышения жидкотекучести расплава, а также для повышения стойкости сплава против коррозии. Ванадий введен для повышения хладостойкости сплава, образуя с углеродом упрочняющие фазы, ванадий повышает износостойкость сплава. Повышение содержания углерода необходимо для образования карбидов, которые, выделяясь из жидкого раствора при газопорошковой наплавке, становятся центрами кристаллизации и способствуют измельчению структуры, что, в свою очередь, увеличивает прочность сплава.

Разработка композиционного материала проводилась механохимическим методом с помощью аттритора [9,10], полученный порошок гранулировался на планетарном грануляторе для создания порошка требуемого гранулометрического состава. Структуру наплавочного сплава, его физико-механические и эксплуатационные свойства определяли стандартными методами. В частности, анализ структуры в поверхностных слоях наплавочного сплава на основе железа проводился с помощью металлографического анализа, а также растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Для определения фазового состава образцов применялся метод рентгеноструктурного анализа. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 методом статического вдавливания. Исследование на прочность сцепления наплавочного слоя производилось на разрывной машине марки ЦДМ10/91. Исследование на твердость наплавленного слоя проводили на приборе ТП-7Р-1 для измерения твердости материалов и сплавов по методу Виккерса. Технологические свойства полученной гранулированной порошковой смеси проверяли с помощью газопламенной наплавки на различных образцах стали.

Для определения фазового состава нового наплавочного сплава использовался дифрактометр Д8 Advance (BRUKER). Микроанализ шлифа проводился на металлографическом микроскопе Neophot-2 при увеличениях в х 200, 500 и 1000 крат [11, 12].

Экспериментальная часть.

Для отработки технологии получения нового сплава с лигатурой CrB_2 использовали самофлюсующийся порошковый наплавочный сплав марки ПГ-Ж40, с фракцией 50-160 мкм, который имеет следующий химический состав: Fe=38%; Cr=15,0%; Si=3,1%; B=2,9%; Ni=33%; Cu=4%; V=4,0%.

В качестве упрочняющей добавки применнена лигатура CrB_2 следующего химического состава: Ti=0,08%; Fe=0,47%; Ni=0,52%; B=15%; Cr=83,43%. Лигатуру CrB_2 измель-

чали в течении 5 минут в лабораторной планетарной мельнице в среде спирта, используя размольные тела (шары шарикоподшипников 5-8 мм, с соотношением массы порошковой смеси и шаров 1:3). После размола средний размер частиц CrB_2 составил 10-30 мкм.

Для экспериментальных работ были подготовлены 2 варианта шихты.

Первый вариант шихты это новый наплавочный сплав ПГ-Ж40,а второй вариант ПГ-Ж40 с упрочняющей добавки CrB_2 . Шихта представляет собой механическую смесь компонентов исходного состояния нового сплава марки ПГ-Ж40 и упрочняющей добавки CrB_2, подвергающуюся механическому легированию в аттриторе. Механохимическая активация шихты проводилось в аттриторе. Перед механохимической активацией в аттриторе в шихту добавляли 1% стеарата цинка для предохранения от налипания шихтового материала на шары и на внутреннюю поверхность барабана. Обработку шихты в аттриторе проводили при следующих режимах:

- скорость вращения мешалки – 340 об/мин;
- диаметр шаров – 5 мм;
- соотношение массы шихты к массе шаров – 1/18;
- время обработки – 2ч.

После проведения механического легирования были получены композиционные порошковые материалы с размером частиц 10-20 мкм [13,14]. Для получения конгломерированного порошкового наплавочного материала, исходный порошковый материал, полученный в аттриторе, смешивали с органической связкой 2-3% спиртового раствора фенольного лака ФЛ-98 с последующим спеканием в камерной печи модели LH15/12 при температуре 700°С.

После спекания конгломерированный материал измельчали и просеивали через набор сит для отбора фракций размером 50-160 мкм. Подготовка к испытанию экспериментальных составов порошков с боридным упрочнением для газопорошковой наплавки производилась по ГОСТ 21448-75 «Порошки из сплавов для наплавки».

Наплавка производилась пропано-кислородной горелкой с наконечником №5, изготовленной по ТУ 200 Каз. ССР 210-84, согласно патента №1276 РК. При наплавке использовались сжатые газы: кислород по ГОСТ 5583-78 и пропан по ГОСТ 20448-2018. Стандартный образец был изготовлен из стали 45 по ГОСТ 1050-88, размером 30х45х11 (мм). Газопорошковая наплавка произведена нанесением наплавочного слоя 1,2-1,5 мм при следующих режимах:

- давление кислорода на входе в горелку - 0,9 МПа;
- давление пропана на входе в горелку - 0,12 МПа;
- расход кислорода – 750 л/ч;
- расход пропана – 700 л/ч;
- расход наплавочного нового сплава-50 г/мин;
- толщина наплавочного слоя – 2-3 мм.

Поверхность наплавочного слоя обработана абразивным инструментом из зеленого карбида кремния. Покрытие не имеет пор и шлаковых включений.

Промышленные испытания порошкового сплава на качественной и количественной показателей.

На рисунке 1 представлено микрофотографии полученного наплавочного порошка, из полученных микрофотографии можно сделать следующие выводы, размер порошка 50-160 мкм, а форма частиц шаровидная или овальная.

Химический состав (рисунок 2), структуру порошков и композиционных покрытий исследовали с помощью спектрометра. Используемый спектрометр не определяет бор и углерод, кремний поэтому на графике представлены исходные данные их содержания в рассматриваемых сплавах. Остальные элементы в сплаве соответствуют их со-

держанию в исходном порошке. Влияние добавки CrB_2 на изменения химического состава сплава на основе ПГ-Ж40 приведено на рисунке 2.

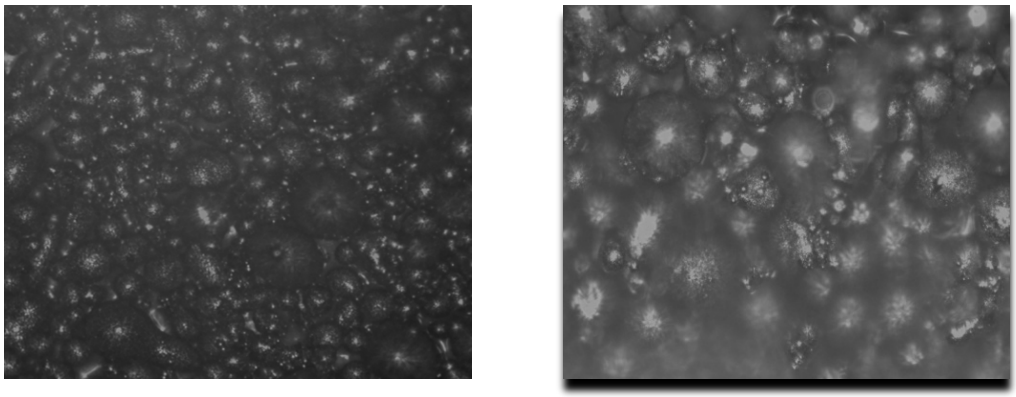


Рис. 1. Микрофотографии порошка с увеличением х200 и х500

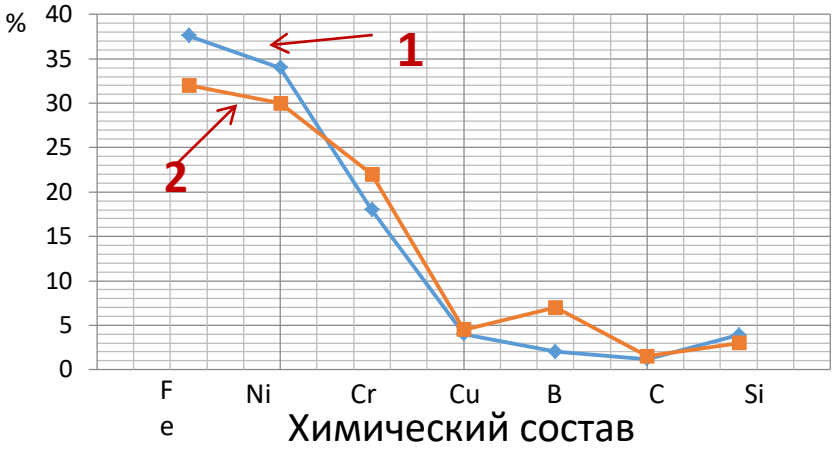


Рис. 2. Химический состав наплавочного порошка
1 - порошковый сплав ПГ-Ж40 – 100%; 2 - порошковый сплав ПГ-Ж40 90%+10% CrB_2

По результатом рентгеноструктурного анализа (рисунок 3) установлено, что структура сплава представляет собой композицию, состоящую из относительно прочной и пластичной железоникелевой матрицы и упрочняющих фаз в виде карбидов и боридов типа FeB; Cr_2B; Cr_2B_2; Cr_3C_2; Cr_5B_3; Cr_7C_3; $Cr_{23}C_6$; Fe_3C; Cr_7BC_4; Fe_3C, никелид кремния Ni_2Si_5. Представленный материал является железоникелевым низколегированным сплавом, с типичной двухфазной структурой. Следует так же отметить увеличение на 12,1% содержания хрома в двухфазной структуре Fe-Cr сплава ПГ-Ж40+10% CrB_2 по сравнению с аналогичной структурой сплава ПГ-Ж40.

Также была измерена микротвердость по шкале Виккерса для отдельных двух сплавов и диффузионной зоны, где показано значение твердости на стальной подложке в диффузионной зоне и на поверхности исследуемого порошкового конгломерированного сплава. Полученные значения микротвердости наплавленной поверхности в зоне сплавления исследуемого образца приведены в таблице 1.

Следует отметить увеличение микротвёрдости в направлении к наплавленной поверхности исследуемого образца.

По распределению значений микротвердости в покрытиях наблюдается равномерное изменение без явных разбросов по твердости. Уровень значений колеблется в пределах 400…500 МПа, что позволяет судить о равномерном распределении боридов и карбидов, гомогенности структуры по всему объему наплавочного покрытия (Рисунок 4).

Микротвердость покрытия определялась на шлифах образцов №1, №2 с тольщиной 2 мм по 4-7 измерениям диагонали отпечатка.

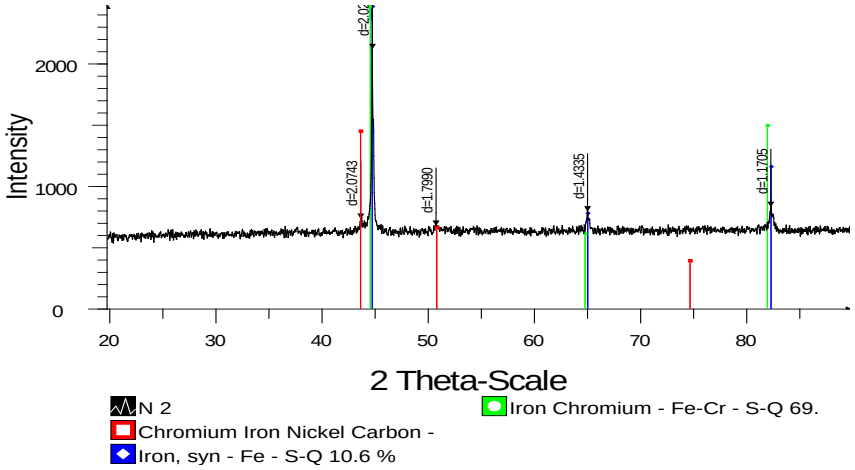


Рис. 3. Результаты рентгеноструктурного анализа ПГ-Ж40+10% CrB_2

Таблица 1. Результат замеров микротвердости исследуемого образца

Отпечатки	Твердость по Виккерсу, HV 10 кгс		
	Стальная подложка	Диффузионная зона	Материал образца, 90% ПГ-Ж40+10% CrB_2
1	382,72	381,40	456,72
2	362,75	426,57	470,63
3	375,41	428,62	530,29
4	359,34	443,42	485,18
Сред.	HV = 370,34	HV =420,00	HV =485,70

Полученные значения микротвердости наплавленной поверхности образца приведены в таблице 2.

По результатом полученных измерений микротвердости наблюдается увеличение среднего значения микротвердостиобразца наплавленного сплавом с боридным упрочнением на 54,41 ед. HV по сравнению с исходным сплавом, полученным при наплавке материалом ПГ-Ж40.

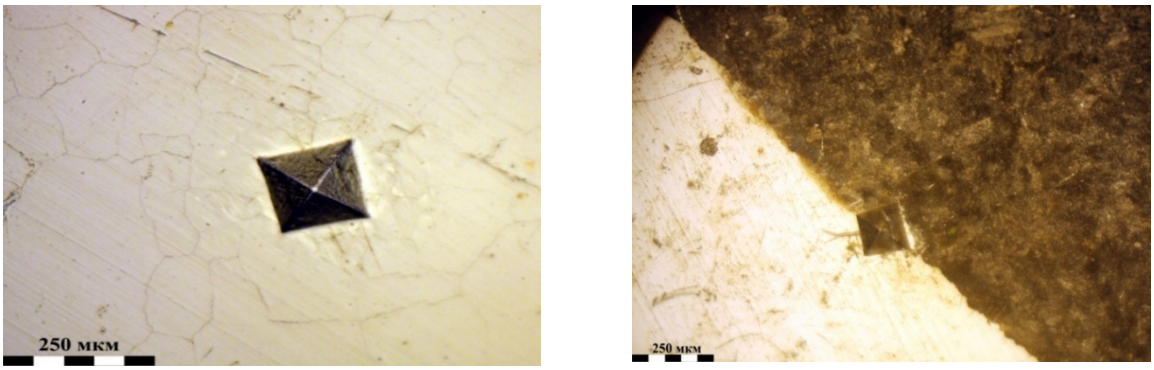


Рис. 4. Размер отпечатка на шлифе образца а-ПГ-Ж40, б- ПГ-Ж40+10% CrB_2

На рисунке 6 приведены результаты оценки износа образцов с наплавленной поверхностью и закаленной до твердости 55HRC поверхностью в паре с колодками из стали 20ГЛ. Это позволило предположить, что при работе деталей в узлах трения

можно не опасаться снижения их долговечности в результате износа детали, восстановленной наплавкой сплавом ПГ-Ж40 +10% CrB_2.

Таблица 2. Результаты замеров микротвердости шлифа образца №1 наплавленного сплавом ПГ-Ж40

Отпечатки	Твердость по Виккерсу HV 10кгс	
1	482,71	563,64
2	519,13	546,15
3	487,67	542,09
4	492,71	547,96
Сред.	**HV=495,55**	**HV=549,96**

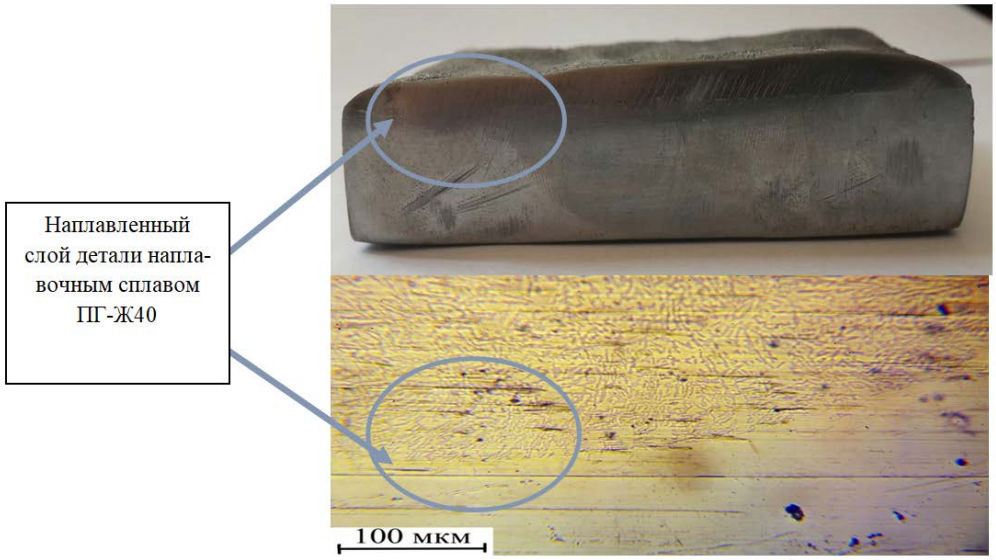


Рис. 5. Микроструктура наплавленного металла (ПГ-Ж40+10% CrB_2) с основным металлом, х500

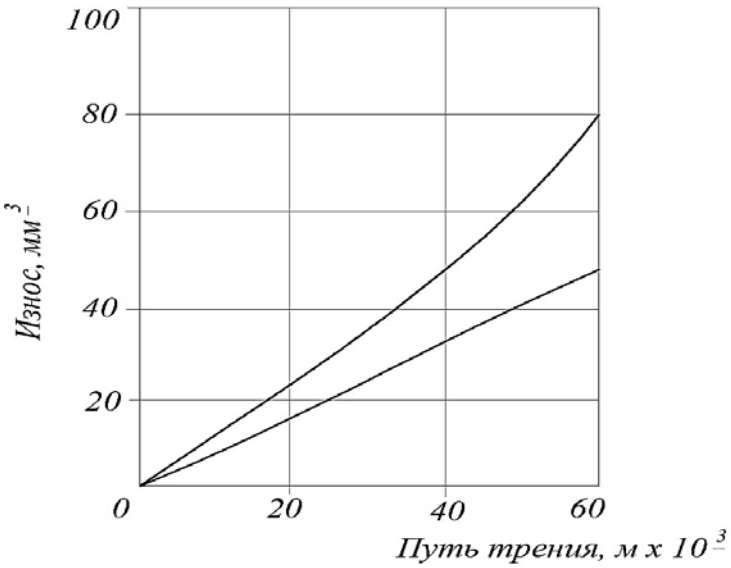
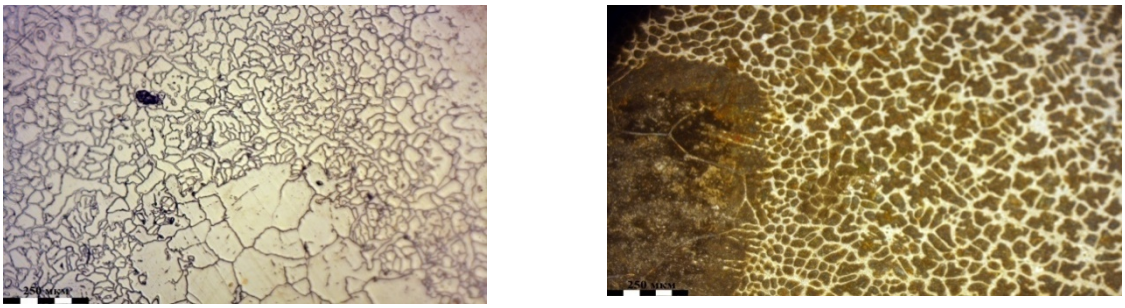
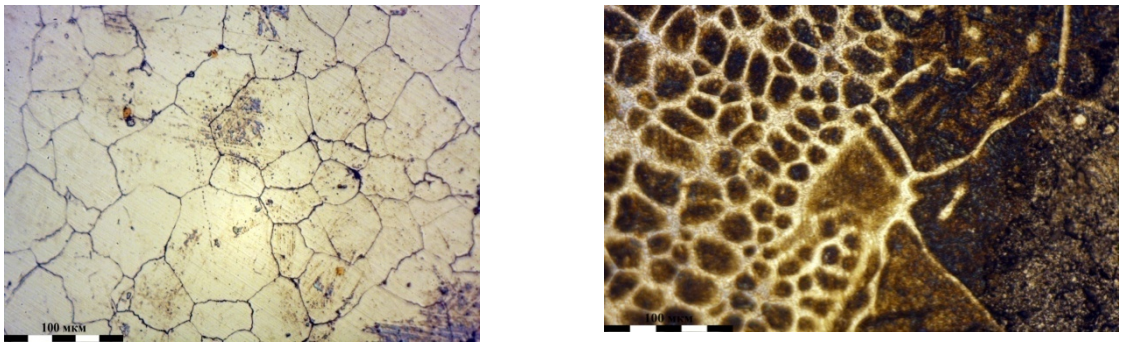


Рис. 6. Интенсивность изнашивания нового сплава и стали: 1-новый сплав, марки ПГЖ-40+10% CrB_2; 2-сталь 45, твердость 55 HRC

Металлографического анализ был проведен для образца №1 наплавленного сплавом ПГ-Ж40 и для образца №2 наплавленного сплавом ПГ-Ж40+10% CrB_2. Микроанализ проводился на металлографическом микроскопе Neophot-32 при увеличениях в х 200, х 500 крат.



Увеличение Х200



Увеличение Х500

Рис. 7. Микроструктура наплавленного слоя сплавом ПГ-Ж40 (а) и +10% CrB_2

Как показано на рисунке 7 на поверхности можно увидеть однородную полиэдрическую, равноосную блочную структуру с переходящей зоной из крупнозернистой в мелкозернистую структуру, местами имеются частички твердого раствора меди. Вдоль границ зёрен наблюдаются цепочки многочисленных выделений избыточных фаз двух типов – тёмных и реже – светлых, возможно, это карбиды железа и хрома.

Как видно из рисунка 7, в микроструктуре сплава наблюдаются крупные зерна, которое состоят из ультрамелкозернистых субзерен. Полиэдрические зёрна феррита – твёрдый раствор углерода в α – железе и перлит –возможно это эвтектоидная смесь феррита с карбидом железа и хрома.

Фазы, сформированные в основном внутри зерен и по границам зерен, на отдельных участках увеличиваются в размерах до 1 мкм, образуя блочную структуру. Из полученных данных можно, сделать следующие выводы, полученный наплавочный порошок с добавкой ПГ-Ж40 +10% CrB_2 имеет хорошую твердость и лучшие качества по сравнению с наплавочным порошком ПГ-Ж40.

Выводы:

1) Разработана методика проведения испытаний газопламенной наплавки деталей машин на экспериментальном стенде для газопламенной наплавки стандартных образцов;

2) Предложен технологический процесс газопламенного сверхзвукового напыления покрытий из металлических порошков и порошковых сплавов на детали оборудования, с целью повышения или восстановления их работоспособности, а также придания напыляемой поверхности коррозионно-износостойких и адгезионно-прочных защитных свойств;

3) Определен оптимальный состав лигатуры CrB2, вводимый в состав нового наплавочного сплава ПГ-Ж40, установлено, что для получения твердости наплавленного металла равной в пределах 450-600 НВ, необходимо ввести в состав покрытия в пределах 10%, от общей массы, %.

4) По данным рентгеноструктурного анализа установлено, что композиционный наплавочный сплав ПГ-Ж40 с введением 10% хром-бора после механического легирования и расплавления состава выглядит в виде железоникелевой матрицы с равномерно распределенными боридами и карбидами железа, хрома, никеля, что подтверждается увеличением микротвердости наплавленного металла от 495,55 до 549,96 ед. HV.

Список литературы: 1. Ермеков Д.К., Поветкин В.В., Руткуниене Живилье. Влияние коррозионной среды на физико-химическое изнашивание деталей оборудования с износостойким покрытием//Вестник Казахстанско-Британского технического университета, - Алматы. - №2(53). 2020, - 15-21 с. **2.** Костицына И.В. Коррозионная стойкость трубных сталей в агрессивных средах нефтяных и газовых месторождений: дис. … канд. нехн. наук: 02.00.04: Челябинск, 2014 – 147 с. **3.** ГОСТ 21.602-2003 Система проектной документации для строительства (СПДС). Правила выполнения рабочей документации отопления, вентиляции и кондиционирования. **4.** Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий: учебное пособие / Б.С. Зенин, А.И. Слосман; Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 120 с. **5.** Капсаламова Ф.Р., Кенжалиев Б.К., Миронов В.Г. и др. Распределение элементов в объеме порошка системы Fe-Ni-Cr-Cu-Si-B-C в зависимости от времени механохимического легирования // Комплексное использование минерального сырья. – № 2. – 2016. – С. 64-68. **6.**Тополянский П.А. Исследование ионно-плазменных износостойких покрытий на инструментальных сталях. Металлообработка. 2004, №1 (19), с. 24-30. **7.** Seitkhanov A., Povetkin V., Bektibay B., Tatybayev M., Bukayeva A. Improvement of the design of hydraulic transport devices for the transport of hydroabrasive media in the enrichment industry//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, - №5/1 (101), 2019, - P. 6-16. ISSN 1729-3774.. **8.** Handbook of thermal spray technology / ed. by J. R. Davis. 2d ed., ASM International, 2005. 339 p. **9.**Патент №27499 РК. Способ получения порошкового наплавочного сплава для газотермического покрытия / Кенжалиев Б.К., Миронов В.Г., Шилов Г.Т., Сулейменов Э.Н., опубликован 09.2012 г. **10.** Патент №2038406 РФ. Горячев О.Н., Тютерев В.В. Смесь для нанесения покрытий. Опубл. 27.06.1995. **11.** Хокинг М. Металлические и керамические покрытия. Получение, свойства и применение. // Пер. с анг. под ред. Г.А. Андриевского. М.: Мир. 2006. 518 с. **12.** Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов / – М.: Машиностроение, 1979. – 134 с. 14. Горелик С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ, – М.: Металлургия, 1970. – 338 с. **13.** В.А. Попов, В.А. Зайцев, А.С. Просвиряков и др. Исследование процессов механического легирования при получении композиционных материалов с наноразмерными упрочняющими частицами //Наноструктурированные материалы и фонкциональные покрытия, - 2010 г, - №1, С. 48-52. **14.** Борисов Ю.С., Борисова А.Л. и др. Получение порошков для газотермических покрытий методами механического синтеза и механического легирования // «Сварочное производство», - 2010 г,- №12,- с.18-21.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ефименко С. В., **Черноруцкий И. Г.**, **Сметанкин А. И.** *(СПбГУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)*
Тел. +79522241954; E-mail: Falcon.sergey@yandex.ru

Abstract: *In article, results of construction of models of reliability of difficult technical systems on samples of small volume are presented. The role of average characteristics of the random observers aggregate is hard to overestimate. They are often used as reliability indicator. However, the identification of the law of operating time distribution is a separate problem itself, especially in the condition of small quantity of observations. Therefore, for complex objects, average values are used as indicators characterizing reliability properties. In this case, inevitably there are problems associated with the asymmetry of the distributions and the presence of anomalous observations in samples of small volume. Let us consider possible solutions to these problems.*

Keywords: *reliability models, difficult technical systems, samples of small volume*

При построении моделей надежности сложных технических систем способ усреднения показателей (данных из совокупности случайных наблюдений) является очень важным. Исследование совокупности случайных наблюдений используется в качестве основы для построения системы показателей надежности. Если известны законы распределения наработки до наступления события (отказ, предельное состояние и т.д.), то для объектов используются показатели типа гамма-процентной наработки [1]. Обычно гамма-процентная наработка (или ресурс) – это наработка, в течение которой событие (отказ, предельное состояние и т.д.) не наступит с вероятностью γ, выраженной в процентах. В таких случаях (особенно в условиях малого числа наблюдений) нужно учитывать, что идентификация закона распределения наработки представляет самостоятельную сложную проблему. Для сложных изделий в качестве показателей, характеризующих свойства надежности, часто используются средние значения. При этом неизбежно возникают задачи, связанные с несимметричностью распределений и наличием аномальных наблюдений в выборках малого объема. В нашей работе рассматриваются возможные пути решения этих задач.

Допустим, известно, что для распределений с несимметричной плотностью медиана является более предпочтительной оценкой, чем среднее значение [2]. По определению медиана Me – это характеристика распределения, для которой существует некоторая вероятность [3]. В случае симметричного и имеющего моду распределения (т.е. модального распределения) медиана совпадает и с математическим ожиданием, и с модой.

$$\mathrm{P}(X < Me) = \mathrm{P}(X > Me). \qquad (1)$$

Если функция распределения $F(x)$ непрерывна и строго возрастающая, то медиана однозначно определяется решением уравнения $F(Me) = 0{,}5 = 0{,}01\gamma_{50}$. Иными словами, *медиана в характеристиках надежности* – это 50%-ная наработка.

На рисунке 1 изображена зависимость относительного отклонения

$$\Delta = \frac{m - Me}{Me} \cdot 100\%, \qquad (2)$$

где m – математическое ожидание;

Me – медиана, для гамма-распределения с плотностью

$$f(x) = \frac{\beta^{-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right), \qquad (3)$$

где α – параметр формы;

β – параметр масштаба, при $\beta = 1$.

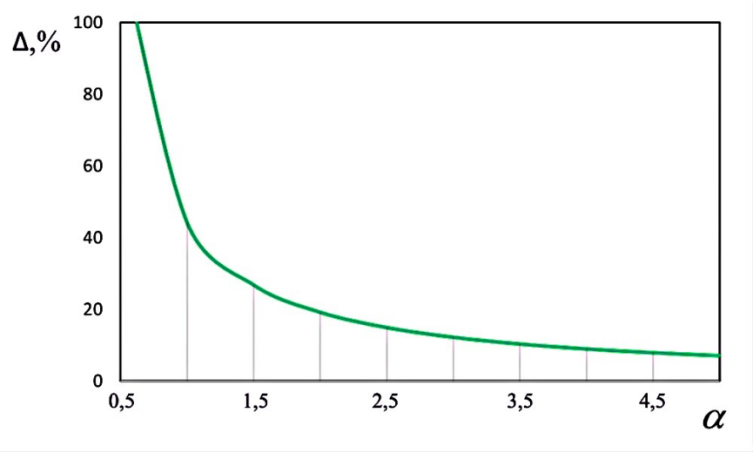


Рис. 1. Отклонение медианы от среднего значения

Из рисунка видно, что при параметре формы $0{,}5 < \alpha < 1{,}5$ (класс распределений, используемых для описания свойств надежности) Δ изменяется от 27% до ∞. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что отождествлять понятия среднего, математического ожидания и медианы для оценки надежности, по меньшей мере некорректно. При решении задачи определения ресурса сложного технического объекта нельзя допускать смешение этих понятий.

В таблице 1 приведены значения наработки изделия (скоростного редуктора манипулятора робота) до проявления основных неисправностей.

Таблица 1. Данные по наработке изделий

Данные по наработке изделия до отказа, *час*											
	Порядковый номер изделия										
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	257	2279	251	218	417	206	2948	571	240	181	547
2	169	420	150	249	263	107	997	827	461	531	68
3	433	410	666	150	110	180	2197	325	5	338	-
4	101	451	253	126	203	370	1518	1192	456	228	-
5	120	276	1387	496	182	183	696	528	69	12	-
6	297	489	436	288	275	416	3264	434	17	142	-
7	318	163	220	288	157	171	248	1025	265	102	-
8	177	86	112	288	180	217	324	9	264	858	-
9	129	238	341	341	143	172	481	323	621	93	-

Статистической базой для наших исследований являются данные по наработке (в часах) редукторов одного типа, т.е. – полностью идентичных. Крайний левый столбец содержит порядковый номер условного межремонтного периода, т.е. такого промежут-

ка времени, в течение которого изделие функционировало до момента проявления каких-либо неисправностей. Верхняя горизонтальная строка содержит условный порядковый номер изделия. Вертикальный столбец под порядковым номером изделия содержит данные о количестве часов наработки до момента появления первых признаков неисправности. Данному редуктору установлен гарантийный ресурс 500 часов. Из таблицы хорошо видно, что 80% неисправностей возникли в пределах этого ресурса. Исходя из значений таблицы можно показать, что математическое ожидание имеет значение $m = 439$ часов, а медиана $Me = 265$ часов, относительное отклонение $\Delta = 66\%$. В то время, как учет значений медианы при установлении ресурса, снизил бы число гарантийных случаев ремонта до 50%, математическое ожидание в этом случае имеет более высокий показатель. Иными словами - *использование медианы вместо средней наработки дает более реалистичный результат* там, где использование гамма-процентных показателей невозможен. По определению, долговечность характеризуется наступлением износовых отказов. Для описания таких отказов часто используется логарифмически нормальный закон распределения [4], поэтому возможно применить следующее:

$$\text{- среднее} \quad M(x) = \exp\left\{m + \frac{1}{2}\sigma^2\right\}; \tag{4}$$

$$\text{- медиана} \quad Me = e^m.$$

То есть, медиана, в отличие от среднего, не зависит от дисперсии и меньше него в $\exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)$ раз. На рисунке 2 изображен характер зависимостей среднего $M(x)$, медианы Me и их отношения от σ.

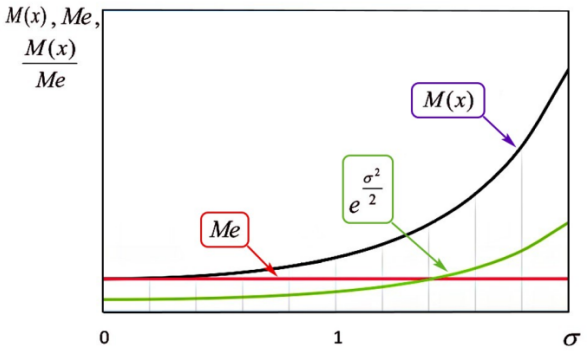


Рис. 2. Зависимость среднего, медианы и их отношения от σ

Из рисунка 2 видно, что использование медианы дает робастный (более устойчивый к выбросам) результат [2], что особенно актуально при выборках малого объема.

При рассмотрении второй задачи, то необходимо отметить, что несмотря на сравнительно давнюю историю исследований малых выборок, разработанные методы недостаточно касаются области аномальных наблюдений в выборках малого объема. Пусть необходимо обработать результаты наблюдений, когда одно из них аномально (например, наработка t_n много больше любой из наработок, составляющих выборку $t_1 \le t_2 \le \ldots \le t_i \le \ldots << t_n$). В таком случае, особенно когда n довольно мало, исследователь стоит перед выбором: считать t_n аномальным результатом и исключить его из дальнейшего анализа или считать t_{n-1} наработкой до цензурирования и применять

соответствующий метод обработки. Особенно остро данный вопрос встает в случае при $n = 2$, когда:

а) нет оснований считать какое-либо из наблюдений аномальным и, более того,

б) отбросив одно из наблюдений, мы ликвидируем выборку как объект исследования.

С информационной точки зрения необходимо отметить, что наибольшую полезность приносят сообщения об априорных, наименее вероятны событиях [5]. Таким образом, аномальный результат целесообразнее использовать, применяя специальные методы, нежели отбрасывать. Говоря иначе, не следует отказываться от любой информации.

Теперь, применительно к теории надежности, рассмотрим предельный случай, когда наблюдаются два изделия $(n = 2)$. Одно $(m = 1)$ после некоторой наработки отказало и не восстанавливалось. Другое, $(k = 1)$, не отказав ни разу, было снято с испытаний (или испытания завершились по каким-либо другим причинам). Задача: необходимо определить вероятность отказа изделия. Необходимо отметить, что подобные задачи встречаются в социологии, биологии, медицине и т.п. областях знаний, которые имеют дело с так называемыми «цензурированными выборками» [6]. Их формализация в технической области закреплена в «Методических указаниях» [7]. В основе «Методических указаний» находятся методики решения в различных типовых ситуациях, с использованием специально рассчитанных таблиц, которые облегчают вычисления или аппроксимируют функцию биномиального распределения.

$$P\left\{R \le \frac{m}{n}\right\} = \sum_{k=0}^{m} C_n^k \, p_{отк}{}^k (1 - p_{отк})^{n-k}, \qquad (5)$$

где n – объем выборки; m – число отказавших изделий; $p_{отк}$ – вероятность отказа, которая означает вероятность того, что в случайно извлеченной выборке объемом n окажется не более m отказавших изделий. Для заданных условий задачи

$$P = P\left\{R \le \frac{1}{2}\right\} = 1 - p_{отк}^2, \qquad (6)$$

это парабола, вид которой изображен на рисунке 3.

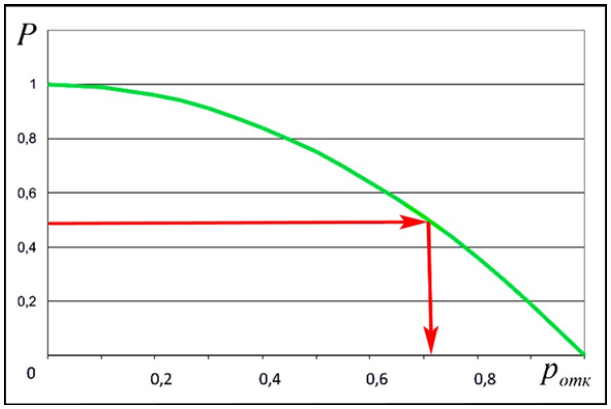


Рис. 3. Значения функции распределения P от $p_{отк}$

Минимальное число изделий n для оценки безотказности при самых жестких условиях Таблицы 28 [7] равно 7. Поэтому, для малых выборок ($n < 7$) уравнение (5) приходится *решать численным способом*. В частности, для условий задачи, решая

уравнение (6) относительно $p_{отк}$ при $P = \frac{m}{n} = 0{,}5$, получим (положительный корень) $p_{отк} = 0{,}71$. Это означает: учет факта, что одно из двух изделий отказало, а другое отработало безотказно (в настоящей статье не рассматривается случай, когда одно изделие из двух отказало), позволил «поднять» оценку безотказности изделия с 0,5 до 0,71. Очевидно, что для малой цензурированной выборки относительная разница в оценке безотказности в 42% весьма существенна.

Решая аналогичным образом пример 10 [7], получим $p_{отк} = 0{,}524$. Для нахождения оценки средней наработки до отказа постулируем экспоненциальное распределение наработки. Тогда, обращая формулу для вероятности отказа

$$p_{отк} = 1 - \exp\left(-\frac{\hat{t}_{ср}}{\hat{T}_{ср}}\right),$$

получим выражение для искомой оценки

$$\hat{T}_{ср} = -\frac{\hat{t}_{ср}}{\ln(1 - p_{отк})}, \qquad (7)$$

где $\hat{t}_{ср}$ – выборочное среднее значение наработки (оценка) по наработкам до отказа и до цензурирования примера 10. Подставив $p_{отк} = 0{,}524$ и $\hat{t}_{ср} = 100{,}75$ в (7), получим $\hat{T}_{ср} = 135{,}5$, что на 1,1% отличается от решения $\hat{T}_{ср} = 134$ непараметрическим методом при неизвестном законе распределения [7]. То есть – в современных условиях наличия вычислительных средств целесообразнее использовать ***численные методы решения***, что особенно актуально для выборок малого объема. Согласно приведенным в статье примерах осуществлена проверка данного подхода путем проведения вычислительного эксперимента (10 серий по 500 испытаний в каждой при различных задаваемых $T_{ср}$). В ходе таких имитаций контролировалась относительная разница чисел, отказавших и не отказавших (т.е. цензурированных) изделий, которая не превысила 10%. Отметим здесь особо - для серийного производства в методике [7] относительная ошибка ε установлена равной 0,1, что свидетельствует о достаточной сходимости результатов, для практического применения метода.

Таким образом, для оценки надежности, в условиях ограниченного числа наблюдений, предпочтительнее использовать медиану (50%-ную наработку) вместо среднего значения.

Список литературы: 1. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. **2.** Реброва О. Среднее или всё же медиана? М.: Троицкий вариант-наука, № 90, 25 октября 2011 года, с. 13. **3.** Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. – 576с. **4.** Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816с. **5.** Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Госиздат физмат. литературы, 1962. – 564с. **6.** Скрипник В.М. и др. Анализ надежности технических систем по цензурированным выборкам. – М.: Радио и связь, 1988 – 184с. **7.** РД 50-690-89. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – М.: Изд-во стандартов, 1990.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЕКТОРИАЛЬНОГО РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Зайдес С.А., Хо Минь Куан *(ИрНИТУ, г. Иркутск, Россия)*
Тел./факт: +7 902 569 9600; +7 904 820 0854;
E-mail: zsahaus@mail.ru, minhquanho2605@gmail.com

Abstract*. The purpose of this work is to determine the influence of the sectorial radius of the working tool on the stress-strain state in the center of elastic-plastic defloration and residual stresses in the hardened zone of the surface layer of cylindrical parts. To achieve this goal, the finite element method based on the ANSYS computer program was used to construct a mathematical model of local loading, which makes it possible to determine the values of temporary, residual stresses and deformations depending on the sectorial radius of the working tool. The results of modeling and determining the influence of the sectorial radius of the working tool on the stress-strain state of the surface layer, including the determination of temporary and residual stresses, the depth of the plastic zone are presented.*
Key words: *plastic surface deformation, elastic-deformed state, working tool, temporary stress, residual stress, working tool, modeling.*

На сегодняшний день в машиностроительном производстве поверхностное пластическое деформирование (ППД) применяется преимущественно для повышения качества и улучшения механических свойств поверхности деталей. После проведения отделочно-упрочняющей обработки ППД увеличивается износостойкость поверхностного слоя и стойкость к коррозионным воздействиям, усталостная прочность, герметичность и др. Также практика показала, что использование ППД способствует повышению запасов прочности изделий, работающих при переменных нагрузках, в 1,5-3 раза, а срока службы – в десятки раз [1-4].

Однако, при упрочнении длинномерных и маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей традиционными методами обработки ППД возникают определенные ограничения по технологическим возможностям, так как даже при низкой производительности не обеспечивается заданная точность диаметральных размеров и стабильность геометрической формы нежестких цилиндрических деталей. Также одной из существенных проблем при изготовлении таких деталей, является искажение их прямолинейной оси [4]. Это приводит к тому, что выпускаемые продукции не соответствуют установленным требованиям и в ходе дальнейшей эксплуатации таких деталей часто возникают отказы и их выходы из строя.

Таким образом, при механической обработке ППД нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей сложно получить заданное качество деталей, так как высокая радиальная нагрузка от рабочего инструмента приводи к искажению формы детали и не обеспечивает стабильность механических свойств по длине заготовки. Если снизить радиальную нагрузку, то сложно получить необходимое качество поверхностного слоя при приемлемой производительности процесса.

Одним из путей решения проблемы является интенсификация напряженного состояния в очаге деформации, которая позволит получить необходимую степень упрочнения при постоянном радиальном натяге. Авторами разработана новая конструкция рабочего инструмента для ППД на основе секториального маятника, влияние которого на НДС поверхностного слоя необходимо оценить.

Целью данной работы является определение влияния секториального радиуса рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние в очаге упруго-

пластической дефлорации и остаточные напряжения в упрочненной зоне поверхностного слоя цилиндрических деталей.

Анализ известного решения. В Иркутском национальном исследовательском техническом университете был разработан новый способ отделочно-упрочняющей обработки, основанный на осциллирующем выглаживании деталей типа валов и осей [5]. Способ основан на использовании осциллирующего движения деформирующего инструмента, представляющий собой плоскую пластину с радиусом скругления (рис.1). Несмотря на ряд неоспоримых достоинств, способ имеет существенный недостаток, если необходимо упрочнять детали малой жесткости. Причиной является достаточно высокая радиальная нагрузка на обрабатываемую заготовку, что приводит к ее искривлению. Для снижения этой нагрузки можно уменьшить величину радиального натяга, но это резко снижает производительность упрочняющей обработки.

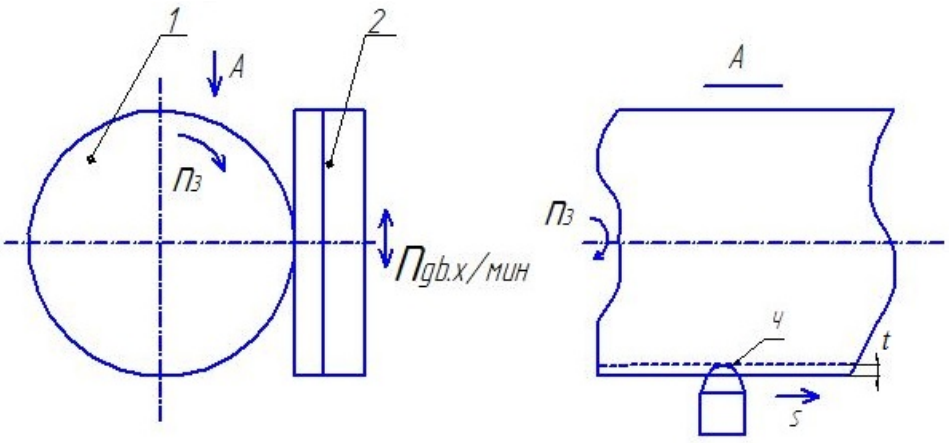


Рис. 1. Схема осциллирующего выглаживания [5]
1–заготовка, 2–рабочий инструмент

Анализируя схему контакта рабочего инструмента с заготовкой (рис. 2), было установлено, что при постоянной величине радиального натяга (t) плоский инструмент имеет наибольшую зону контакта (L), а, следовательно, и площадь пластического отпечатка будет наибольшая. Если же геометрию рабочего инструмента изготовить криволинейной, то площадь контакта уменьшается, а давление в зоне контакта возрастает.

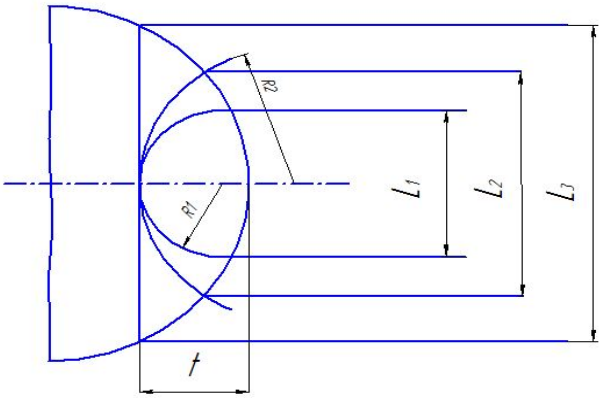


Рис. 2. Схема влияния кривизны рабочей части индентора на размер зоны контакта

Особенности моделирования методом конечных элементов. Известно, что в настоящее время для определения значений временных, остаточных напряжений и анализа напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при упрочнении различными способами ППД успешно применяется компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко применяемых программ, реализующих МКЭ, является ANSYS [6], которая и была использована в данной работе.

В ходе моделирования упрочняющей обработки и протекающих процессов в зависимости от сложности движения как деформирующего инструмента, так и заготовки выбирается вид моделирования, который делится на статическое и

динамическое [7]. Так как в данной работе деформирующий инструмент, являющийся круговым сектором с радиусом скругления не совершает сложного движения, было применено статическое моделирование, которое представляет собой метод получения статических данных о процессах, происходящих в моделируемой системе [8]. При этом, время и его деление; способ построения сетевых моделей и их параметры являются основными факторами для получения правильной оценки характеристик моделируемой системы [9].

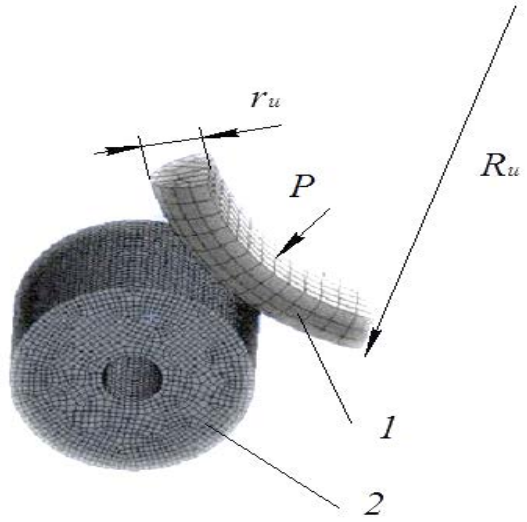


Рис. 3. Конечно-элементная модель при нагружении цилиндра секториальным инструментом
1 – круговой сектор с радиусом скругления r_u; 2 – цилиндр диаметром $D_{заг}$

Для проведения расчетов при статическом нагружении построена геометрическая модель в виде цилиндра и кругового сектора с радиусом скругления на цилиндрической поверхности (рис.3).

Характеристики образца: в качестве заготовки был использован цилиндр диаметром $D_{заг}$ = 20мм; материал – сталь45 – упругопластический, упрочняющийся, модуль упругости E= 2.10^5 МПа; Коэффициент Пуассона μ = 0,3; диаграмма деформирования материала – билинейная (предел текучести σ_T = 360 МПа, модуль упрочнения E_T= $1{,}45.10^3$ МПа)

Характеристики инструмента: круговой сектор с радиусом скругления на цилиндрической поверхности; материал – ВК8, модуль упругости E = 6.10^5 МПа, Коэффициент Пуассона μ = 0,3; Коэффициент трения в зоне контакта рабочего инструмента с образцом f = 0,1; Рабочий радиус инструмента $r_и$ = 5 мм.

Для оценки напряженного состояния в разных точках цилиндрических образцов необходимо определить интенсивность напряжений (von – Mises) и остаточные напряжения по осям O_z (осевые $\sigma_z^{ост}$), O_x (радиальные $\sigma_r^{ост}$), O_y (тангенциальные $\sigma_\varphi^{ост}$). При этом, напряженное состояние цилиндра по Мизесу при использовании главных напряжений определяется по интенсивности напряжения σ_i [10,11,12]

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}.[(\sigma_z^{ост} - \sigma_\varphi^{ост})^2 + (\sigma_\varphi^{ост} - \sigma_r^{ост})^2 + (\sigma_r^{ост} - \sigma_z^{ост})^2]} \quad (1.1)$$

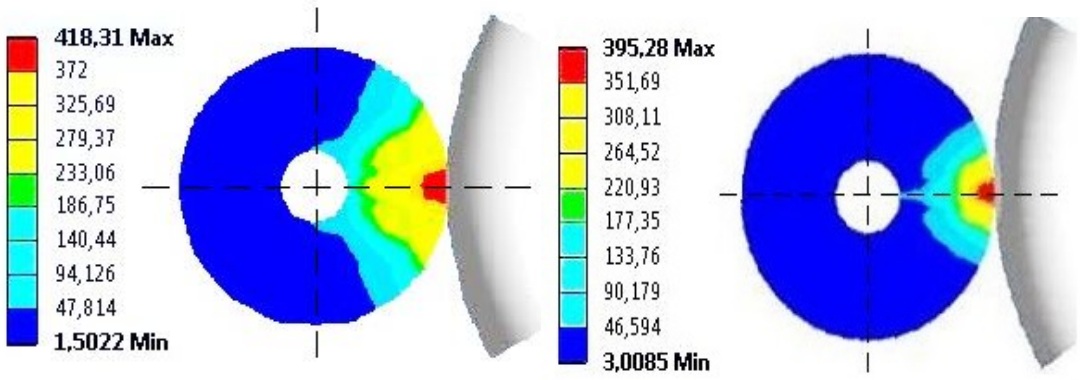
Для оценки напряженного состояния в зоне деформации и сравнения закономерности изменения временных и остаточных напряжений в поверхностном слое при увеличении радиуса рабочего сектора были выбраны следующие базовые режимы:

Таблица 1. Базовые режимы моделирования

Частота вращения заготовки $n_З$, об/мин	Частота вращения инструмента $n_и$, об/мин	Натяг t, мм	Диаметра заготовки $D_{заг}$, мм	Радиус рабочего сектора $R_и$, мм	Рабочий радиус инструмента $r_{и,}$ мм
0	0	0,1	20; 40; 60	25; 50; 75; 100; 125; ∞	5

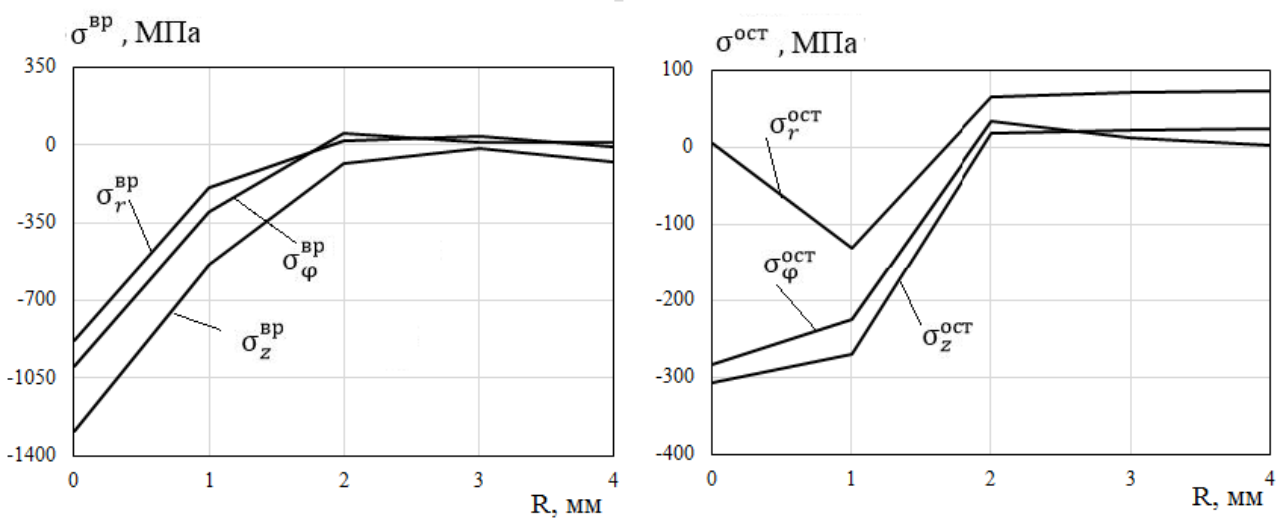
Результаты моделирования. Напряжённое состояние материала при ППД подразделяется на временное и остаточное. При этом, временное напряжение возникает при действии внешних сил, а остаточное – при их отсутствии. Временные напряжения оказывают влияние на энергосиловые характеристики процесса и глубину упрочненного слоя, давления в зоне деформации, также на прочность и износостойкость деформирующего инструмента; а остаточные напряжения – на усталостную прочность, процессы разрушения, износостойкость, коррозию и другие эксплуатационные свойства изделий [13-16].

На рис. 4 приведены примеры полей распределения интенсивности временных и остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра в момент непосредственного внешнего воздействия (см. рис.4.а,) и при его отсутствии (см. рис.4.б). Рабочий инструмент с секториальным радиусом $R_и$ = 25мм воздействует на поверхность образца диаметром $D_{заг}$ = 20мм при нагружении базовыми режимами. На рис. 5 показаны компоненты, временных и остаточных напряжений вдоль радиуса образца диаметром $D_{заг}$ = 20мм.



а) б)

Рис. 4. Зона распределения интенсивности временных (а) и остаточных (б) напряжений в поперечном сечении образца после нагружения и разгрузки



а) **б)**

Рис. 5. Распределение компонент временных (а) и остаточных (б) напряжений вдоль радиуса образца

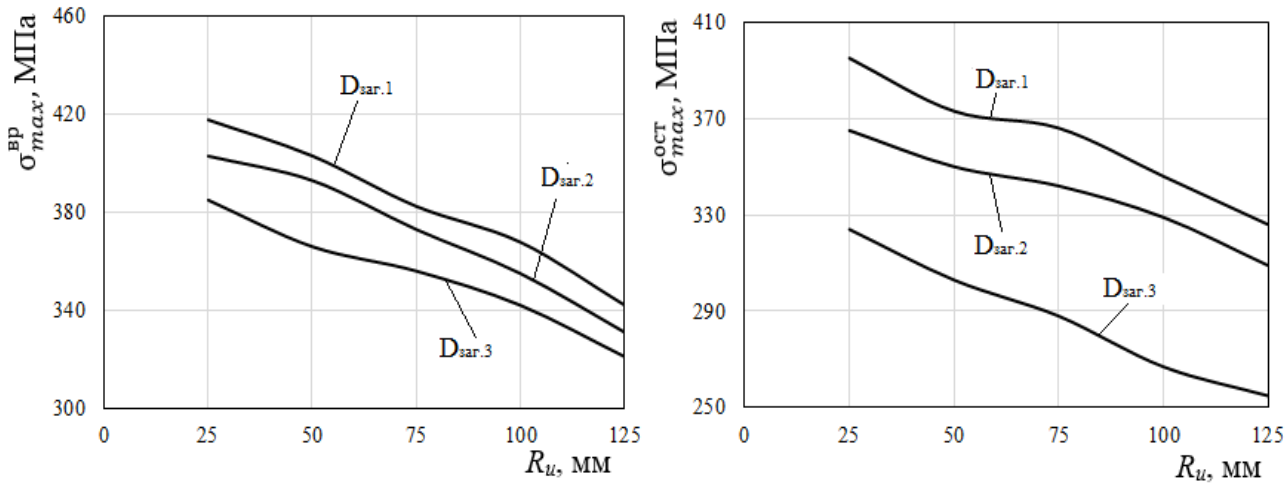
В процессе ППД при воздействии секториального рабочего инструмента возникают остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое и остаточные напряжения растяжения в центральной зоне. Максимальные осевые и тангенциальные остаточные напряжения сжатия формируются на поверхности деталей [17,18]. Радиальные остаточные напряжения на поверхности детали равны нулю.

Полученные максимальные значения временных и остаточных напряжений образца при воздействии деформирующего инструмента в виде кругового сектора с разными радиусами представлены в таблице 2:

Таблица 2. Значения максимальных временных и остаточных напряжений при разных значениях секториального радиуса рабочего инструмента

Значения максимальных напряжений, МПа / Радиус рабочего сектора $R_и$, мм		25	50	75	100	125	∞
$D_{заг}$ = 20мм	$\sigma_{max}^{вр}$	418,31	403,91	382,46	367,81	342,71	285,24
	$\sigma_{max}^{ост}$	395,28	373,46	363,02	346,96	327,47	266,86
$D_{заг}$ = 40мм	$\sigma_{max}^{вр}$	403,45	393,67	373,78	355,32	331,88	264,98
	$\sigma_{max}^{ост}$	365,22	350,58	342,38	329,76	309,88	228,12
$D_{заг}$ = 60мм	$\sigma_{max}^{вр}$	385,43	366,11	356,45	342,99	321,55	233,67
	$\sigma_{max}^{ост}$	324,11	303,77	288,55	267,06	255,32	199,85

По данным таблицы 2 (за исключение $R_и$ =∞) были построены графики (рис. 6) показывающие зависимость максимальных временных и остаточных напряжений от секториального радиуса деформирующего инструмента для заготовок разных диаметров.



а) **б)**

Рис. 6. Влияние радиуса рабочего сектора на интенсивность максимальных временных(а) и остаточных (б) напряжений: $D_{заг.1}$ = 20мм; $D_{заг.2}$ = 40мм; $D_{заг.3}$ = 60мм

Влияние секториального радиуса рабочего инструмента ($R_и$). В данном случае радиус рабочего сектора (секториальный радиус рабочего инструмента) представляет собой важный элемент механики процесса деформирования и структурообразования, который должен быть оптимальным для обеспечения интенсификации деформационного процесса. Можно отметить, что с увеличением радиуса рабочего сектора значения соответствующих временных и остаточных

напряжений убывают (см. рис 6). Это закономерность связана с тем, что с возрастанием радиуса рабочего сектора площадь контакта увеличивается. Вследствие этого, напряжения снижаются при одинаковых значениях натяга *t*.

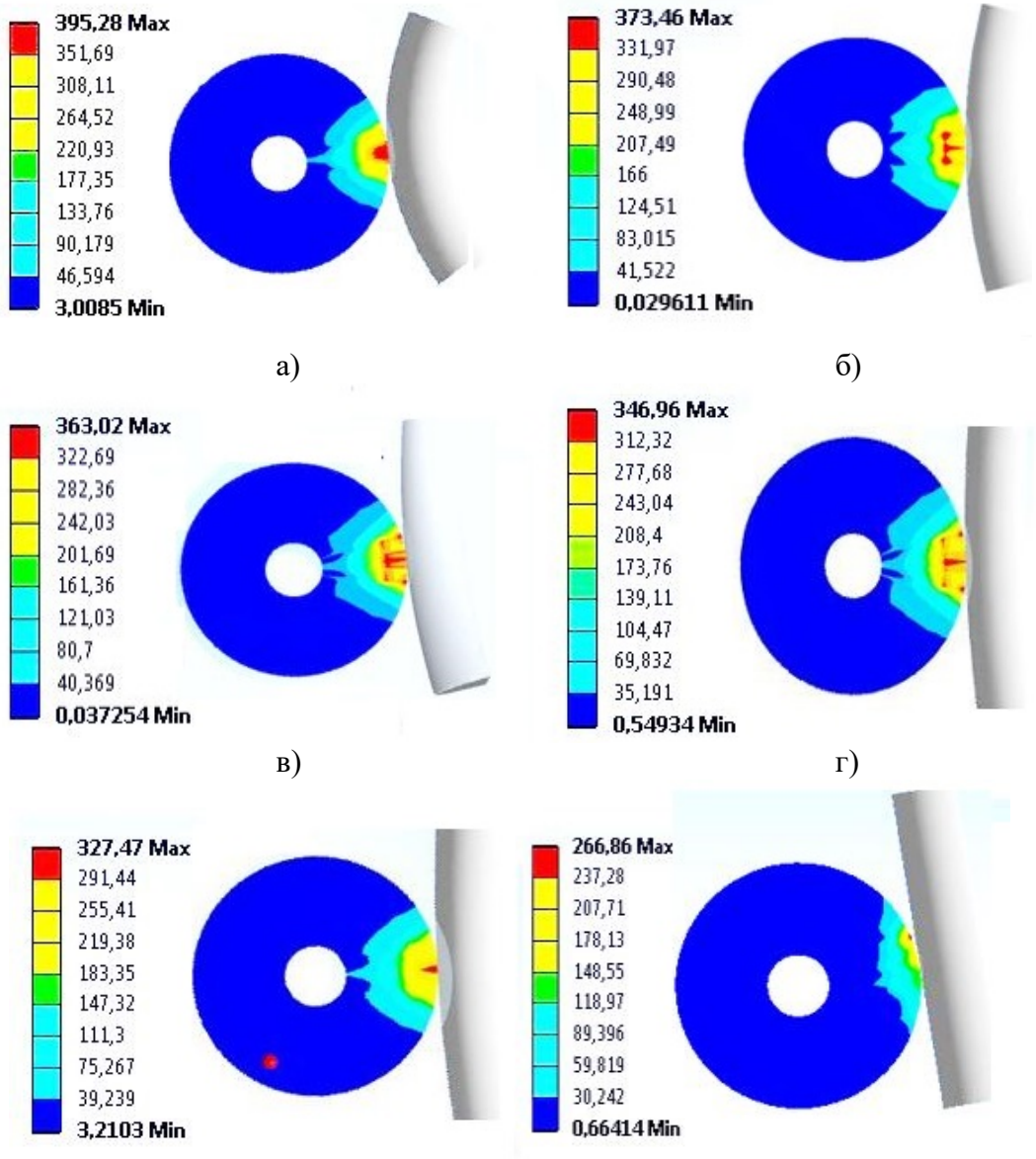


Рис. 7. Поля распределения интенсивности максимальных остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра при базовых режимах нагружения:

а) $R_и$ =25мм; б) $R_и$ =50мм; в) $R_и$ =75мм; г) $R_и$ =100мм; д) $R_и$ =125мм; ж) $R_и = \infty$

На рис. 7 показаны поля распределения интенсивности максимальных остаточных напряжений в зависимости от величины секториального радиуса, а в таблице 3 приведены значения компонент максимальных временных и остаточных напряжений для образца диаметром $D_{заг}$ = 20 мм.

При воздействии плоской пластины в качестве рабочего инструмента (см. рис. 7, ж) на цилиндрическую поверхность заготовки в зоне контакта происходит минимальное искажение микроструктуры с формированием наименьшей интенсивности максимальных напряжений.

С уменьшением секториального радиуса (см. рис. 7, б, в, г, д) рабочего инструмента остаточные напряжения увеличиваются за счет изменения площади контакта в зоне деформации. В результате применения рабочего инструмента с наименьшим секториальным радиусом ($R_и$ =25 мм) металл поверхностного слоя детали испытывает значительную пластическую деформацию (см. рис. 7, а) с накоплением большого числа искажений, которое оказывает значительное влияние на качество упроченных деталей. При этом площадь, в которой происходит интенсивная пластическая деформация, концентрируется в локальной зоне контакта с деформирующим инструментом, следовательно максимальные напряжения увеличиваются.

Глубина пластической зоны. Пластические зоны, образующиеся в результате нагруженного воздействия рабочего инструмента на поверхность заготовки**,** являются связующим звеном между структурой и механическими свойствами материала и отражают особенности его поведения в конкретных условиях нагружения [19]. При ППД создаются различные пластические зоны как по форме, так и по размерам. Это оказывает существенное влияние как на разрушение металлических материалов, так и на сопротивлении развитию трещины [20,21]. При этом информация о эффективной глубине проникновения пластической деформации является источником для оценки физико-механических и эксплуатационных свойств упрочненных деталей ППД. На рис.8 представлена глубина пластической деформации (h) при моделировании в условиях базовых режимов воздействия, а в табл.3 приведены значения глубины наклепа при разных секториальных радиусах рабочего инструмента.

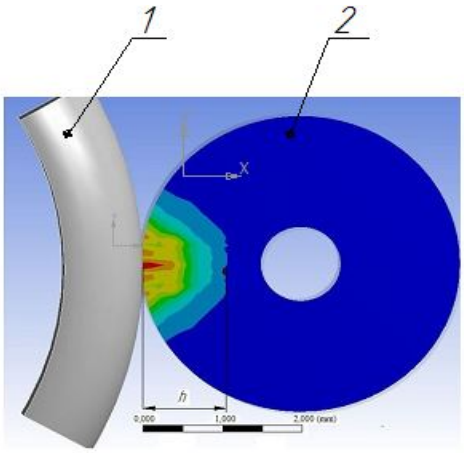


Рис. 8. Поля распределения пластической деформации в поперечном сечении образца при базовых режимах нагружения:

1 – рабочий сектор; 2 – заготовка

Таблица 3. Влияние секториального радиуса рабочего инструмента на глубину пластической зоны и величину радиально напряжения в зоне деформации

$R_и$,мм	$\sigma_r^{вр}$, МПа	h, мм
25	-859,69	2,55
50	-837,65	2,25
75	-813,93	1,95
100	-774,51	1,80
25	-738,31	1,65
∞	-512,45	1,05

В Результате компьютерного моделирования выявлено, что с уменьшением радиуса рабочего сектора инструмента повышается глубина упрочненного слоя. При этом величина радиального напряжения в зоне контакта является основным фактором, от которого зависит глубина пластической зоны. Кроме того, образованная глубина пластической зоны в случае нагружения плоской пластины ($R_и = \infty$) имеет наименьшее значение по сравнению с результатами нагружения круговым сектором.

Проведенные исследования показали, что секториальный радиус рабочего инструмента оказывает значительное влияние на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя цилиндрических деталей при обработке ППД по сравнению с результатами упрочнения рабочим инструментом в виде плоской пластины с рабочим радиусом.

Таким образом, концепция моделирования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя цилиндрических деталей позволяет предложить перспективное направление способов ППД с целью обеспечения повышения качества упрочненных деталей за счет применения нового деформирующего инструмента, отличающегося от использованного ранее рабочего инструмента прямолинейной формы.

Выводы

Полученные результаты исследования закономерности изменения значений временных и остаточных напряжений на основе применения программы моделирования ANSYS при базовых режимах нагружения позволяют сделать следующие выводы:

1. При постоянной глубине внедрения рабочего инструмента с уменьшением секториального радиуса рабочего инструмента от 125 до 25 мм происходит возрастание (в пределах 4-7%) значений временных максимальных и составляющих компонент напряжений.

2. При прекращении внешнего воздействия рабочего инструмента формируются остаточные напряжения, величина которых так же повышается (в пределах 2-6%) с уменьшением величины секториального радиуса рабочего инструмента. При этом существует оптимальный секториальный радиус (в данном исследовании $R_и$ = 25мм), обеспечивающий формирование максимальных остаточных напряжений, которые не превышают предела прочности выбранного материала.

3. Обратно пропорциональная зависимость глубины пластической зоны от радиуса рабочего сектора подтверждает возможность получения более эффективного процесса пластической деформации при ППД за счет рационального выбора геометрических параметров кругового сектора.

4. Выполнена оценка напряженного состояния при воздействии на поверхностный слой изделия деформирующих инструментов с разной формой рабочего контура. При этом, с уменьшением радиуса рабочего сектора от 125 до 25 мм значение максимальных временных, остаточных напряжения по сравнению с плоским инструментом увеличивается в 1,2-1,5раз, а глубина пластической зоны в 1,5-2,4 раза. В случае воздействия плоским рабочим инструментом максимальные временные и остаточные напряжения имеют наименьшие значения.

Список литературы: 1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с. **2.** Зайдес С.А., Забродин В.А., Мураткин В.Г. Поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2002. 304 с. **3.** Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. Москва: Машиностроение, 2000. 320 с. **4.**

Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. Москва: Машиностроение, 2007. 399 с. **5.** Патент: Способ поверхностного пластического деформирования/SU № 2657263, МПК B24B 39/04, опубликовано 09.06.2018. **6.** Баков К.А., ANSYS. Справочник пользователя, М.:ДМК Пресс, 2005. 650 с. **7.** Saiaf Bin Rayhan, Md Mazedur Rahman,Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer, Procedia Structural Integrity,Volume 28,2020, Pages 1892-1900, https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012. **8.** Iryna Ablieieva, Leonid Plyatsuk, Ihor Roi, Oleh Chekh, Sabina Gabbassova, Kseniia Zaitseva, Serhii Lutsenko. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling // Journal of Environmental Management, Volume 287, 2021, 112347, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347. **9.** Букатый А.С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2017, т. 16, № 6(2), с. 374–377. **10.** Бруяка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я. В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Самара: Самар. гос.техн. ун-т, 2013. – 109 с. **11.** Izhan Wu, Huaiju Liu, Peitang Wei, Qinjie Lin, Shuangshuang Zhou, Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel, International Journal of Mechanical Sciences,Volume 183,2020,105785, ISSN 0020-7403, https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785 **12.** Shen Li, Do Kyun Kim, Simon Benson,The influence of residual stress on the ultimate strength of longitudinally compressed stiffened panels,Ocean Engineering,Volume 231,2021,108839,ISSN 0029-8018, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108839 **13.** Поляк М.С. Технология упрочнения. В 2 т. Т. 2. Москва, Машиностроение,1995.688 с. **14.** Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения. Упрочняющие технологии и покрытия, 2016, № 10,с. 6 – 9. **15.** V. Wildemann, E. Lomakin, M. Tretyakov. Postcritical deformation of steels in plane stress state Mechanics of Solids, 1 (2014), pp. 18-26. **16.** Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. Москва, Машиностроение, 2002. 300 с. **17.** M. Syrigou, R.S. Dow. Strength of steel and aluminium alloy ship plating under combined shear and compression/tension Eng. Struct., 166 (2018), pp. 128-141. **18.** Бубнов А.С. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием монография / И.Р. Асланян, А.С. Бубнов [и др.] ; под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск : Изд во ИрГТУ, 2014. – 560 с. **19.** Changping Zhou, Fengchun Jiang, De Xu, Chunhuan Guo, Chengzhi Zhao, Zhenqiang Wang, Jiandong Wang,A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment, Journal of Materials Processing Technology, Volume 280,2020, 116599, ISSN 0924-0136, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599. **20.** Chi Ma, Sergey Suslov, Chang Ye, Yalin Dong, Improving plasticity of metallic glass by electropulsing-assisted surface severe plastic deformation,Materials & Design,Volume 165,2019,107581,ISSN 0264 1275, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107581. **21.** Вулых Н.В. Анализ упругого напряженно-деформированного состояния моделируемых микронеровностей упрочняемых поверхностей / Н.В. Вулых, И.И. Щадов // Жизненный цикл конструкционных материалов : материалы IV Всероссийской науч.-техн. конференции с международным участием. – Иркутск, 2014. – С. 290–297.

КОРРЕЛЯЦИЯ ПОЛЕЙ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ И ВОДОРОДНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Звягинцева А.В. *(ВГТУ, г. Воронеж, Российская Федерация)*
Тел./Факс: 89507501062; E-mail: zvygincevaav@mail.ru

Abstract: *The hydrogen permeability of a metal is considered depending on the level and nature of the distribution of internal stresses. The analysis of diffusion flows through the outer surface of a hollow cylinder, depending on the sign of internal stresses, is carried out. The corresponding analytical dependences for the concentration field of hydrogen atoms are obtained. It is shown that the hydrogen permeability of a hollow cylinder primarily depends on the nature of the distribution of internal stresses (tensile and compressive). The results of mathematical modeling of diffusion processes have shown the possibility of controlling the hydrogen permeability of metals*
Keywords: *hydrogen permeability, mathematical model, internal stresses, electrochemical systems.*

1. Введение

Среди основных особенностей взаимодействия водорода с металлами ведущее место занимают вопросы диффузионной миграции атомов водорода в металлах. Ключевым вопросом водородной энергетики является создание принципиально новых материалов для хранения и беспрепятственного использования водорода в качестве альтернативного топлива. В перспективе необходимо разработать такие материалы, которые легко принимали бы и отдавали водород при незначительных изменениях внешних условий (например, температура и давление) [1-3]. Здесь явно высвечивается возможность управления водородной проницаемостью металлов путем всевозможных структурных изменений. Такие структуры должны откликаться на изменение внешних условий, то есть ускорять или замедлять диффузионную миграцию атомов водорода. Поскольку при размещении водорода в металлах увеличивается параметр кристаллической решетки, то наиболее эффектным способом управления водородной проницаемостью металлов является использование внутренних напряжений различной физической природы [4-6]. Уровень и характер распределения последних в каждом конкретном случае должен отвечать меняющейся структуре материала [7].

2. Теория процесса. Математическое моделирование водородной проницаемости металлов при наличии внутренних напряжений различной физической природы

Физическая природа различных типов внутренних напряжений в конечном итоге определяет водородную проницаемость металлов. Эти напряжения создают давление в объеме твердого тела и потому взаимодействуют с атомами водорода. Внутренне давление описывается соотношением $\sigma_u/3$, где σ_u – первый инвариант тензора внутренних напряжений. К числу наиболее важных типов внутренних напряжений относятся температурные, концентрационные, остаточные, в окрестностях структурных несовершенств металла. В качестве конструктивной схемы рассматривается цилиндрическая оболочка.

Температурные напряжения возникают вследствие неоднородного распределения температуры по объему материала [1]. Для решения задач диффузионной кинетики ограничимся стационарным распределением температуры, которое находится из решения задачи:

$$\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}r^2}+\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r}=0, \quad r_0<r<R, \tag{1}$$

$$T=T_1 \text{ при } r=r_0,\ T=T_2 \text{ при } r=R,\ T_1>T_2,$$

где T_1 и T_2 – температуры внутренний и внешней поверхностей полого цилиндра. Решение задачи (1) дает распределение температуры в полом цилиндре:

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\ln\dfrac{R}{r_0}} \ln\frac{r}{r_0}. \qquad (2)$$

Для решения задач диффузионной кинетики важен первый инвариант тензора термонапряжений, который имеет вид [2]:

$$\sigma_u = \frac{2\alpha\mu(T_1 - T_2)(1+\nu)}{(1-\nu)\ln\dfrac{R}{r_0}} \left\{ 1 + 2\ln\frac{r}{R} + \frac{2\left(\dfrac{r_0}{R}\right)^2}{1-\left(\dfrac{r_0}{R}\right)^2} \ln\frac{r_0}{R} \right\}, \qquad (3)$$

где α – коэффициент линейного расширения, μ – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона. Диффузия атомов водорода определяется величиной σ_u .

Появление концентрационных напряжений обусловлено неоднородным распределением концентрации атомов примеси. Коэффициенту термического расширения ставится в соответствие изменение параметра кристаллической решетки за счет единичной концентрации атомов примеси. Его первый инвариант по аналогии с выражением (3) имеет вид:

$$\sigma_u = \frac{2\beta(c_1 - c_2)(1+\nu)}{(1-\nu)\ln\dfrac{R}{r_0}} \left\{ 1 + 2\ln\frac{r}{R} + \frac{2\left(\dfrac{r_0}{R}\right)^2}{1-\left(\dfrac{r_0}{R}\right)^2} \ln\frac{r_0}{R} \right\}. \qquad (4)$$

где c_1 и c_2 – концентрации атомов примеси на поверхности полого цилиндра ($c_1 > c_2$), $\beta(c_1\text{-}c_2)$ – неоднородная концентрационная деформация. Физический смысл коэффициента β поясним на примере системы Ni-B-H [4, 7].

Коэффициент показывает изменение объема металла при замещении одного атома Ni, например атомом бором. Концентрационные напряжения оказывают влияние на кинетику диффузии атомов водорода. Это существенно при низких температурах, так как при повышении температуры концентрационная неоднородность «расплывается» и напряжения исчезают. Однако при комнатных температурах неоднородная концентрация примесей замещения остается неизменной и оказывает заметное влияние на диффузию атомов водорода. Это обусловлено тем, что при комнатных температурах коэффициент диффузии атомов водорода в металлах на несколько порядков превышает эту характеристику для примесей замещения и других примесей внедрения.

Физическая сущность процесса образования остаточных напряжений заключается в следующем. Если величина напряжений при внешней нагрузке (силовой или температурной) превышает предел текучести материала, то в материале начинается пластическое течение. Первый инвариант σ_u имеет логарифмическую зависимость от радиальной координаты:

$$\sigma_u = \frac{\mu\omega(1+\nu)}{2\pi(1-\nu)} \left\{ 1 + 2\ln\frac{r}{R} + \frac{2\left(\dfrac{r_0}{R}\right)^2}{1-\left(\dfrac{r_0}{R}\right)^2} \ln\frac{r_0}{R} \right\}, \qquad (5)$$

где ω – угол поворота берегов разреза полого цилиндра.

Водородная проницаемость полого цилиндра (цилиндрической оболочки) зависит от каждого типа рассмотренных внутренних напряжений. Эти напряжения могут входить в уравнения диффузионной кинетики с разными знаками. Отсюда возникает принципиальная возможность управления напряженным состоянием с целью уменьшения

водородной проницаемости. Например, можно создать концентрационные напряжения противоположного знака: концентрация примесей замещения большого атомного радиуса на внешней поверхности превышает соответствующее значение на внутренней поверхности полого цилиндра. В общем виде задача определения концентрации атомов водорода с учетом внутренних напряжений различной физической природы математически формулируются следующим образом:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{D}\frac{\partial c}{\partial t} = \Delta c + \frac{\nabla\left(c\nabla V\right)}{kT}, \quad r_0 < r < R, \\ &c\left(r,0\right) = 0, \quad c\left(r_0,t\right) = c_0, \quad c\left(R,t\right) = 0, \end{aligned} \tag{6}$$

где D – коэффициент диффузии атомов водорода, c_0 – концентрация атомов водорода на внутренней поверхности полого цилиндра, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, V – потенциал взаимодействия атома водорода с различными типами внутренних напряжений. Для иллюстрации рассмотрим внутренние напряжения, определяемые соотношениями (3), (4) и (5). После несложных математических преобразования получим более простой (в математическом отношении) вариант задачи (6):

$$\begin{aligned} &\frac{1}{D}\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial^2 c}{\partial \mathrm{r}^2} + \frac{1-\alpha_1-\alpha_2-\alpha_3}{\mathrm{r}}, \quad r_0 < r < R, \\ &c\left(r,0\right) = 0, \quad c\left(r_0,t\right) = c_0, \quad c\left(R,t\right) = 0. \end{aligned} \tag{7}$$

Постоянные α_1, α_2 и α_3 характеризуют отношение энергии связи атома водорода с полем внутренних напряжений к энергии теплового движения. Для принятых типов внутренних напряжений безразмерные параметры имеют вид:

$$\alpha_1 = \frac{4\alpha\left(\mathrm{T}_1-\mathrm{T}_2\right)\mu\left(1+\nu\right)\delta\upsilon}{3kT\left(1-\nu\right)\ln\dfrac{R}{r_0}}, \quad \alpha_2 = \frac{4\beta\left(\mathrm{c}_1-c_2\right)\mu\left(1+\nu\right)\delta\upsilon}{3kT\left(1-\nu\right)\ln\dfrac{R}{r_0}}, \quad \alpha_3 = \frac{\omega\mu\left(1+\nu\right)\delta\upsilon}{3kT\pi\left(1-\nu\right)}. \tag{8}$$

Рассмотрим два предельных случая распределения внутренних напряжений. В первом случае на внутренней поверхности полого цилиндра имеются только сжимающие напряжения, которые плавно переходят в напряжения растяжения на внешней поверхности. Второй случай описывает противоположную ситуацию: напряжения растяжения на внутренней поверхности сменяются напряжениями сжатия на внешней стороне. Это сводится к изменению знака безразмерных параметров задачи (7). Если $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$, то из уравнения (7) получаем:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{D}\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial^2 c}{\partial r^2}, \quad r_0 < r < R, \\ &c\left(r,0\right) = 0, \quad c\left(r_0,t\right) = c_0, \quad c\left(R,t\right) = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

В этом предельном случае внутренние напряжения изменяют закон образования концентрационного поля из атомов водорода: профиль концентрации в полом цилиндре образуется по закону для полосы. Таким путем внутренние напряжения ускоряют процесс формирования концентрации атомов водорода. Если на внутренней поверхности полого цилиндра все рассмотренные напряжения являются растягивающими, а на внешней поверхности сжимающими, то для $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ получим:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{D}\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{\mathrm{r}}\frac{\partial c}{\partial r}, \quad r_0 < r < R, \\ &c\left(r,0\right) = 0, \quad c\left(r_0,t\right) = c_0, \quad c\left(R,t\right) = 0. \end{aligned} \tag{10}$$

И снова внутренние напряжения изменяют закон образования поля концентрации атомов водорода: концентрационный профиль в полом цилиндре формируется по закону для полой сферы. Скорость образования концентрационного профиля уменьшается. Это непосредственно видно из уравнения (7).

Решение задач (9) и (10) запишем в следующем виде:

$$c = c_0 f(r,t) \quad \text{(а)},$$

$$c = c_0 \frac{r}{r_0}(r,t) \quad \text{(б)}, \tag{11}$$

Процесс формирования концентрационных полей из атомов водорода согласно соотношениям (11 (а)) и (11 (б)) протекает одинаково во времени. Однако при прочих равных условиях скорость изменения концентрации атомов водорода согласно (11 (б)) замедлена по сравнению с (11 (а)).

Отношение эти потоков характеризует водородную проницаемость полого цилиндра в зависимости от знака внутренних напряжений при условии $f(R, t)=0$:

$$\frac{|j_1|}{|j_2|} = \frac{R}{r_0}. \tag{12}$$

где $|\bar{j}_1|$ и $|\bar{j}_2|$ – диффузионные потоки атомов водорода для соотношений (11 (а)) и (11 (б)).

В рамках принятой модели водородная проницаемость полого цилиндра в зависимости от знака внутренних напряжений определяется отношением R/r_0 [8, 9].

3. Выводы.

Результат математического моделирования диффузионных процессов представляет определенный интерес для водородной энергетики, а также для разработки материалов покрытий с целью удержания атомов водорода.

Список литературы: 1. Боли Б., Уэйнер. Дж. Теория температурных напряжений. Пер. с англ., М.: Мир, 1964, 517 с. **2.** Драгунов Ю.Г., Власов Н.М., Иванов С.Д., Федик. И.И. Самоуравновешенные внутренние напряжения. М.: МГОУ, 2010, 391с. **3.** Власов Н.М., Звягинцева А.В. Математическое моделирование водородной проницаемости металлов /Монография. Воронеж: ВГТУ, 2012. 247 с. **4.** Zvyagintseva A.V., Shalimov Yu.N., Lutovats M.V. To the feature of behavior of hydrogen in the metals and alloys, got electrolysis, and possibility of their application in alternative energy sources / Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 21 (185). С. 107-111. **5.** Шалимов Ю.Н., Звягинцева А.В., Помигуев А.В., Руссу А.В. Электрохимические технологии реализации систем безопасного хранения водорода / Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 163-170. **6.** Звягинцева А.В. Математическая модель процесса управления водородной проницаемостью металлов с внутренними напряжениями с учетом образования и распада неподвижных комплексов /Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 9. С. 1290-1292. **7.** Звягинцева А.В. Математическая модель водородной проницаемости металлов с примесными ловушками при наличии внутренних напряжений различной физической природы /Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2019. № 19-21 (303-305). С. 29-44. **8.** Zvyagintseva A.V. Boron - impurity trap in electrochemical nickel systems for the hydrogen atoms. International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies 1 (2014) 55-62. **9.** Звягинцева А.В., Шалимов Ю.Н. Легирование электролитических сплавов компонентами, повышающими степень водородопоглощения. Ученые записки Таврического национального университета им. В.И.Вернадского. Серия «Биология, химия». Том 24 (63). №3. Симферополь: ТНУ. 2011. С. 96 – 102.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Звягинцева А.В. *(ВГТУ, г. Воронеж, Российская Федерация)*
Тел./Факс: 89507501062; E-mail: zvygincevaav@mail.ru

Abstract: *A variant of a hydrogen battery based on electrochemical systems is investigated. Nix-By-H(D)z composites have been synthesized by electrochemical method, in which, with an increase in the boron content, the solubility of the included hydrogen improves. The studies were carried out in the range of changes in the concentrations of atomic boron in nickel from 5 at. % up to 10 at. % , while the hydrogen content of about 600 cm3/100 g was recorded while maintaining the monolithic structure of the sample (without transition to the powder state). Boron, as an impurity trap for hydrogen atoms, causes structural changes in nickel and creates conditions for the formation of structural traps for hydrogen atoms that reduce the hydrogen permeability of the metal. The thermal desorption spectra of deuterium implanted with various ion doses at T~100 K in samples of the Ni–B electrochemical system were studied.*

Keywords: *hydrogen, deuterium, nickel, boron, metal hydrides, accumulation, storage, structural defects, impurity and structural traps of hydrogen atoms, vacuum extraction, ion implantation.*

1. Введение

В течение последних десятилетий были изучены многие современные материалы, такие как сложные гидриды металлов [1], гидриды металлов [2], металлоорганическая структуры (MOC) [3] и модифицированные углеродные наноструктуры для разработки эффективного хранения водорода [4], но, ни один из них не может удовлетворить всем требованиям [5]. Комплексные гидриды металлов (например, $NaAlH_4$, $LiAlH_4$, $LiBH_4$, $Mg(BH_4)_2$, $LiNH_2$) в настоящее время считаются одним из перспективных материалов для хранения водорода главным образом потому, что они имеют высокую водородную емкость и несложны в производстве накопителей водорода, представлены в таблице. Типичная структура сложных гидридов металлов содержит катион щелочной металл (Me^{n+}) и анион гидриды (AlH_4^-, BH_4^-, NH_2^-) с электронной структурой с закрытой оболочкой.

Таблица 1. Доступные технологии хранения водорода и соответствующие рабочие температуры

Состояние	Жидкий водород	Сжатый водород	Металло-органические структуры материала	Наноструктурированные материалы	Гидриды металлов	Комплексные или сложные гидриды металлов
Температура, ^0C	-253 ^oC	25 ^oC	-200 ^oC	25 ^oC	330 ^oC	>185 ^oC

Препятствием для использования сложных металлогидридов в качестве бортовых материалов для хранения водорода является их относительно высокая температура десорбции водорода, низкая кинетическая скорость адсорбции десорбции и водорода, а также низкая циклическая устойчивость (фактически – время эксплуатации). Возьмем в качестве примера: $Mg(BH_4)_2$. Возможный процесс десорбции водорода из $Mg(BH_4)_2$ - MgB_2 изображается следующими уравнениями (1) - (3) [6]:

$$6Mg(BH_4)_2 \leftrightarrow 5MgH_2 + MgB_{12}H_{12} + 13H_2 \quad (1)$$

$$5MgH_2 \leftrightarrow 5Mg + 5H_2 \quad (2)$$

$$5Mg + Mg_{12}H_{12} \leftrightarrow 6MgB_2 + 6H_2 \quad (3)$$

На первой стадии (уравнение (1)) с энтальпией и энтропией 39 кДж/моль H_2 образуются два термодинамически стабильных интермедиата, $Mg(B_{12}H_{12})$ и MgH_2. Реакции десорбции водорода, уравнения (2) и (3), имеют эндотермичность 75 и 87 кДж/моль H_2. Поэтому уравнения (2) и (3) реализуются только при высокой температуре, 572 К (уравнение (2)) и 643 К (уравнение (3)). Кроме того, стабильное промежуточное соединение обычно приводит к термодинамической ловушке, в которую попадает большое количество водорода. Дженсен и другие обнаружили, что в режиме (~ 400 °C и ~ 950 бар) по уравнениям (2)-(3) также осуществляются реакции выделения/поглощения водорода [7]. Однако для практического применения эти условия неприемлемы.

Целью работы является исследование способности электрохимических систем Ni-B к окклюзии водорода за счет изменения их структуры (создания структурных и примесных ловушек).

2. Экспериментальная часть. Результаты и их обсуждение

Рассмотрим формирование материалов на основе никеля в качестве накопителей энергии. Поскольку для стационарных установок использование легких конструкционных материалов не является обязательным, то для хранения водорода предпочтительнее использовать металлы, не обладающие высокой стоимостью, но достаточно хорошо распространенные в природе. Кроме того, обязательным условием является сохранение в металлах устойчивых дефектов структур, при изменении температуры экстракции водорода в довольно широких пределах, например, от 150 до 250 ^{0}C. По этим признакам наиболее предпочтительно использовать металлы и сплавы на основе никеля, поскольку этот металл устойчив в водных щелочных растворах, что необходимо при процессах электролитического аккумулирования водорода. В тоже время, сплавы никеля обладают достаточно хорошим магнитострикционным эффектом, а это позволит при соответствующих конструкторских доработках увеличить эффективность зарядных устройств, повысить скорость и степень аккумулирования водорода.

В работе исследовались образцы композитов Ni-B в форме плёнок, синтезированных электрохимическим методом и обладающих повышенной степенью дефектности, синтез осуществлен по методике, описанной в работе [8]. На рисунке показана зависимость содержания водорода в электрохимических композитах Ni–B-H от концентрации бора, определенного методом вакуумной экстракции. Установлено (рисунок), что при добавлении в Ni малых количеств бора до 2,1 ат. процента, объемное количество водорода в металле уменьшается [9, 10], а при увеличении концентрации бора более 4 ат. процентов, содержание водорода возрастает [12, 13]. При относительно малой концентрации до 2-3 ат. процентов бора, бор, внедряясь в ГЦК решетку никеля, концентрируется по границам кристаллитов и дефектам решетки никеля, блокирует их, и это тормозит включение водорода. При концентрации бора более 7 ат. % наблюдается переход от кристаллической структуры к аморфной, возникают дополнительные дефекты в ГЦК решетке никеля, которые являются основой для включения водорода, достигающего при содержании бора 9 ат. % порядка 600 см^3/100г. Увеличение содержания водорода в Ni-B связано с захватом водорода в окружение бора и их большим взаимодействием, чем с никелем, и, как

результат, – с последующим образованием комплексов [14, 15]. Бор является примесной ловушкой для атомов водорода, моделирование процессов диффузии проведено в монографиях [15, 16].

Проведенные исследования согласуются с литературными данными: при поглощении водорода никелем происходит образование гидрида, распадающегося при низкой температуре 46 ^{o}C с выделением водорода: $3NiH_2 \rightarrow Ni + 2NiH + 2H_2$ [17].

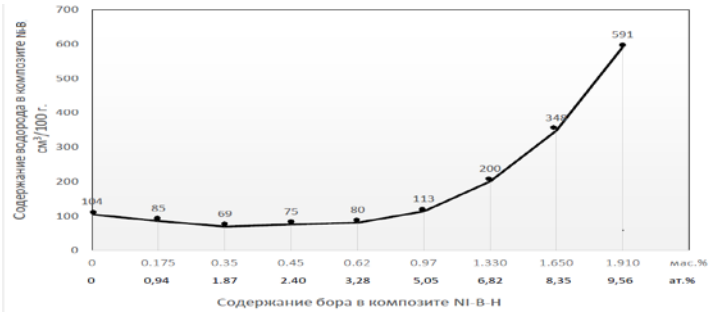


Рис. 1. Зависимость содержания водорода в электрохимических композитах Ni–B-H от концентрации бора. Режимы электролиза: i_k = 2 А/дм^2; $t_{эл-та}$ = 40 ºС; pH = 4,0; d = 4 мкм; основа - медь марки М-1

Кинетика развития спектра десорбции дейтерия из образцов никеля и композита никель-бор с содержанием бора 1 мас. % (5 атом. %) в зависимости от дозы имплантированного дейтерия исследовалась с использованием метода термодесорбционной масс-спектрометрии, в работе [13]. Установлено, что структура спектра термодесорбции дейтерия из образцов никеля и никель-бор, предварительно имплантированных различными дозами ионов дейтерия при T~100 К, является функцией имплантационной дозы. Для композита никель-бор спектр термодесорбции имеет сильно размытый пик при температуре 325 К и наблюдается широкая область десорбции дейтерия в диапазоне температур 250-500 К. Содержание дейтерия для никеля соответствует соотношению Ni:D = 1:1, а для композита Ni-B количество удерживаемого дейтерия на 25 % больше. Водородный пик смещается в область низких температур.

Поскольку одним из компонентов нашей электрохимической системы является бор, то в целом система рассматривается как 3-х компонентная Ni-B-H. Влияние бора теоретически можно оценить, используя температурную зависимость внутреннего трения для чистого бора, приведенного в работе [18]. Исследование температурной зависимости внутреннего трения для бора в интервале температур от комнатной до 850 ^{o}C показало, что при ~ 250 ^{o}C возникает ярко выраженный пик внутреннего трения необычно большой высоты [18]. Энергия активации, рассчитанная по температурному смещению пика, равна 83,8±8,38 кДж/моль. Сопоставляя характер температурной зависимости внутреннего трения для бора и температурной зависимости экстракции водорода из электрохимического композита Ni-B-H можно объяснить причину свободного течения водорода из данной системы при комнатной температуре [11, 13, 14]. Удаление водорода при относительно низких температурах из образца, по-видимому, связано с проявлением ярко выраженных релаксационных процессов в электрохимической системе Ni-B-H в условиях комнатных температур. Интервал температур экстракции водорода, будет зависеть от концентрации бора в исследуемом композите Ni-B-H [15, 16].

3. Заключение

Повышение концентрации легирующего компонента бора в никеле увеличивает дисперсность, выравнивает микропрофиль поверхности и способствует формированию

структур наноразмерного диапазона. В качестве примесных ловушек следует рассматривать атомы бора. К структурным ловушкам можно отнести краевые дислокации, вершины микротрещин и клиновые дисклинации [14-16].

Список литературы: 1. Jain IP, Jain P, Jain A. Novel hydrogen storage materials: A review of lightweight complex hydrides. J Alloys Compd. 2010 Aug 6; 503(2): 303-39. **2.** Graetz J. New approaches to hydrogen storage. ChemSoc Rev. 2009; 38: 73-82. **3.** El-Kaderi HM, Hunt JR, Mendoza-Cortes JL, Cote AP, Taylor RE, O'Keeffe M, et al. Designed Synthesis of 3D Covalent Organic Frameworks. Science. 2007;316:268-72. **4.** Berseth PA, Harter AG, Zidan R, Blomquist A, Araujo CM, Scheicher RH, et al. Carbon Nanomaterials as Catalysts for Hydrogen Uptake and Release in $NaAlH_4$. Nano Lett. 2009; 9(4): 1501-5. **5.** Felderhoff M, Weidenthaler C, von Helmolt R, Eberle U. Hydrogen storage: the remaining scientific and technological challenges. Phys ChemChem Phys. 2007 Jun 7;9(21):2643-53. **6.** Li HW, Yan YG, Orimo S, Zuttel A, Jensen CM. Recent Progress in Metal Borohydrides for Hydrogen Storage. Energies. 2011 Jan;4(1):185-214. **7.** Matsunaga T, Buchter F, Mauron P, Bielman A, Nakamori Y, Orimo S, et al. Hydrogen storage properties of Mg(BH4)2. J Alloys Compd. 2008 Jul 14;459(1-2):583-8. **8.** Li HW, Kikuchi K, Nakamori Y, Ohba N, Miwa K, Towata S, et al. Dehydriding and rehydriding processes of well-crystallized Mg(BH4)2 accompanying with formation of intermediate compounds. ActaMaterialia. 2008 Apr;56(6):1342-7. **9.** Severa G, Ronnebro E, Jensen CM. Direct hydrogenation of magnesium boride to magnesium borohydride: demonstration of > 11 weight percent reversible hydrogen storage. ChemCommun. 2010;46(3):421-3. **10.** Звягинцева А.В. Взаимосвязь структуры и свойств гальванических никелевых покрытий, легированных бором, в изделиях электронной техники //Гальванотехника и обработка поверхности. 2007, т.XV, №1, с. 16-22. **11.** Zvyagintseva, A.V. Interaction peculiarities of hydrogen and Ni-B galvanic alloys /A.V. Zvyagintseva //Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems. - Springer, 2008. - P. 437 – 442. **12.** Звягинцева А.В. Способность материалов на основе никеля наноразмерного диапазона к аккумулированию водорода. Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». - Саров: НТЦ «ТАТА», 2015. - №21 (185). - С. 150-155. **13.** Zvyagintseva A.V. Hydrogen permeability of nanostructured materials based on nickel, synthesized by electrochemical method /Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2017). – IEEE Catalog Number: CFP17F65-ART. - Part 2. - 02NTF41-1-02NTF41-5. **14.** Звягинцева А.В. Гибридные функциональные материалы, формирующие металлические структуры с оптимальной дефектностью для хранения водорода в гидридной форме /Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – Саров: Изд-во «Научно-технический центр «ТАТА», 2017. – Номер: 16-18 (228-230). С. 89-103. **15.** Звягинцева А.В. Структурные и примесные ловушки для точечных дефектов: монография /А.В. Звягинцева. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. 216 с. **16.** Власов Н.М., Звягинцева А.В. Математическое моделирование водородной проницаемости металлов/Монография. Воронеж: ВГТУ, 2012.247 с. **17.** Шрейдер А.В. Водород в металлах. М,: Знание. 1979.-63 с. **18.** Тавадзе Ф.Н., Цагарейшвили Г.В. Исследование внутреннего трения в кристаллическом боре / Релаксационные явления в твердых телах (обзоры). М.: «Металлургия», 1968. 695 с. - (с. 363-364).

УДК 62-822

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОПЕРЕЧИН МОЩНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

Зуев Е.А., Воробьёв А.К. *(Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва; ООО «Надёжность ТМ», г. Москва)*
Тел./Факс: +7 (915) 3597950; E-mail: ZuevEuA@gmail.com, VorobyevAK93@gmail.com

Abstract: *This article describes the causes of the occurrence and development of fatigue cracks in the beds and crossbars of powerful hydraulic presses. The results of calculating the stress-strain state in the program for finite element analysis are presented. To ensure the durability of the base parts, control compliance with the design operating modes and track the initiation and growth of fatigue cracks in the stress concentration zones, it is proposed to use the stress state monitoring and diagnostics system.*
Keywords: *hydraulic press, crossbeam, base, architrave, movable traverse, fatigue failure, crack initiation, stress-strain state.*

1. Введение.

Мощные гидравлические прессы, осуществляющие процессы обработки давлением, развивают самые большие, среди технологических машин, усилия. Эти усилия создаются и воспринимаются базовыми деталями (гидравлическими цилиндрами, поперечинами, элементами рамных станин). В отличии от колонн и гидравлических цилиндров [1], которые в большей степени являются телами вращения, поперечины и станины – сложные геометрические конструкции, чаще всего имеющие несколько плоскостей симметрии.

Из-за сложной формы в станинах во время расчётов часто обнаруживаются концентраторы напряжений, наличие которых недооценивалось во время их проектирования. Для обеспечения неограниченной долговечности станин и поперечин необходимо научиться выявлять и контролировать зоны с опасными концентраторами.

2. Характерные случаи разрушений главных станин и поперечин.

Появление и рост усталостных трещин в зонах концентраторов напряжений поперечин при воздействии циклической нагрузки является одной из основных причин отказов мощных гидравлических прессов. Практика проведения обследований и ремонтов показывает, что основное количество усталостных трещин появляется в зонах технологических отверстий вертикальных ребер.

В качестве примера рассмотрим станину пресса силой 100 МН, производства «УЗТМ», в отверстиях вертикальных ребер которой обнаружились усталостные трещины. Расчёт выполнялся в соответствии с методикой, описанной в статье [2].

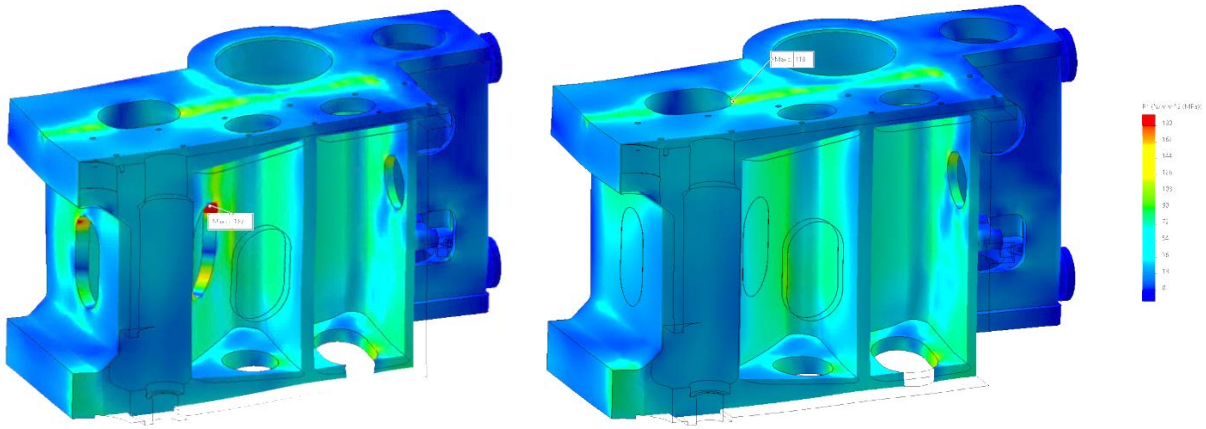
Станина пресса 100 МН выполнена из стали 35Л, коэффициент запаса по усталости равен:

$$n_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_1^{max}} = \frac{190}{182} = 1{,}04.$$

Хотя для тяжелых машин не рекомендуется запас прочности меньше, чем $[n] = 1{,}2$, с коэффициентом запаса более единицы не должно возникать усталостных трещин, если соблюдается проектный режим работы. Но, так как проектный режим не соблюдался из-за повреждения резьбы под внешнюю гайку и появления

эксцентриситета, то в зонах концентраторов напряжений началось усталостное разрушение (рисунок 1 а).

Для восстановления работоспособности пресса и устранения концентраторов напряжений было предложено заварить технологические отверстия в станине, что привело к существенному снижению напряжений как в расчёте (Рисунок 1 б), так и в реальной конструкции.



а) б)

Рис. 1. Напряженное состояние четверти основания (отсеченный вид), σ_1 Мпа а) – до проведения модернизации б) – после модернизации, с заваренными технологическими окнами

В результате произведенной модернизации, коэффициент запаса по усталости:

$$n_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_1^{max}} = \frac{190}{118} = 1{,}61,$$

что должно дать неограниченную долговечность основания, при соблюдении рабочих режимов работы пресса.

Сравнение рисунка 1-а и 1-б поможет дать оценку номинальным напряжениям, которые практически не изменяются в конструкции основания. На основании этого сравнения можно обобщить результаты для других расчётов даже при достаточно низких номинальных напряжениях в поперечинах; в отверстиях продольных или поперечных рёбер, а также местах соединения участков различной жесткости могут возникать повышенные, опасные для прочности, напряжения.

3. Система постоянного контроля напряженно-деформированного состояния и предупреждения разрушений базовых деталей.

Для контроля нагружения, распределения усилий и предупреждению эксцентриситета на гидравлическом прессе предлагается использовать систему контроля, аналогичную методике, описанную в статье [3], но модифицированную для постоянной работы в стационарном режиме.

Основная задача такой системы – слежение за соблюдением проектных режимов пресса, отслеживая напряженно-деформированное состояние и равномерность нагружения колонн гидравлического пресса.

Помимо контроля равномерности, система может контролировать достаточность предварительной затяжки. Для этого дополнительный датчик устанавливается на каждый колонный стакан, и программа, анализируя графики нагружения, определяет синхронность работы колонны и колонного стакана. При синхронной работе стык затянут, при изменении графика усилия колонного стакана, и выходе его на постоянное значение, означает что стык раскрылся при усилии выхода на постоянное значение напряжений.

В течении долгого времени не существовало предложений по контролю напряженно-деформированного состояния поперечин. Поскольку поперечины имеют сложную трёхмерную форму и в большинстве – уникальную конструкцию, невозможно предложить универсальную схему расположения датчиков. Однако, проведя анализ рабочих состояний методом конечных элементов, описанный в предыдущей главе, можно определить зоны контроля нагружения. Для конструкций, для которых невозможно добиться неограниченной долговечности и появление усталостных трещин в которых неизбежно, появляется возможность контролировать зарождение и первоначальный рост усталостных трещин, благодаря специальным датчикам, таким как KYOWA KV серии Crack Gages (Рисунок 2). Каждый датчик имеет специальный «триггерный» провод, разрыв которого позволяет зафиксировать начало роста трещины, разрыв этого провода переводит режим работы с определения деформаций на измерение длинны трещины.

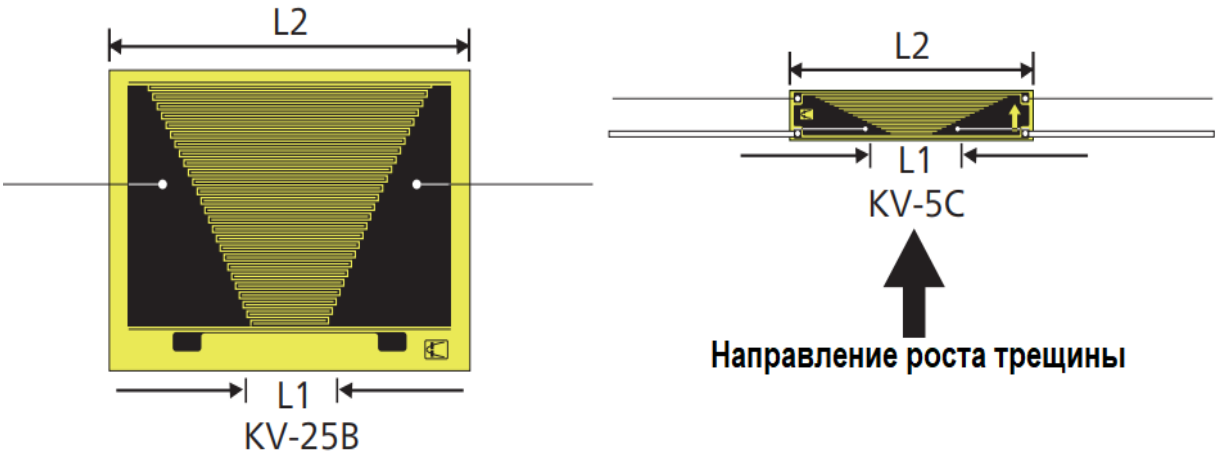


Рис. 2. Тензорезистор контроля роста трещины KYOWA KV

Например, при увеличении рабочего усилия пресса Schloemann P-350 с 15 МН до 20 МН, в архитраве, совмещенном с главным цилиндром, могут возникать опасные напряжения, значения которых близки к допускаемым, а запас прочности по усталости становится равен значению немного больше единицы. Контролировать напряженное состояние архитрава, а также отслеживать появление и рост усталостных трещин, предлагается с помощью системы контроля поперечин.

Для развёртывания системы, предварительно определяется ее напряженно деформированное состояние, и определяются зоны, в которых возможно зарождение усталостных трещин (Рисунок 3). В такие места последовательно наклеиваются цепочки датчиков Crack Gages, которые передают замеренные напряжения в систему контроля. При зарождении трещины часть датчика повреждается, сопротивление увеличивается и на дисплее отображается предупреждение о зафиксированной трещине. Расчеты показывают, что при протяженности трещины более 10 мм,

напряжения превышают σ_T, поэтому при продолжении работы поперечина может разрушиться. Учитывая уникальность мощных гидравлических прессов, в цехах не храниться запасных базовых деталей и при поломке одной из них производственная линия может остановиться от 3-4 месяцев до нескольких лет, ожидая изготовления и поставки новой базовой детали.

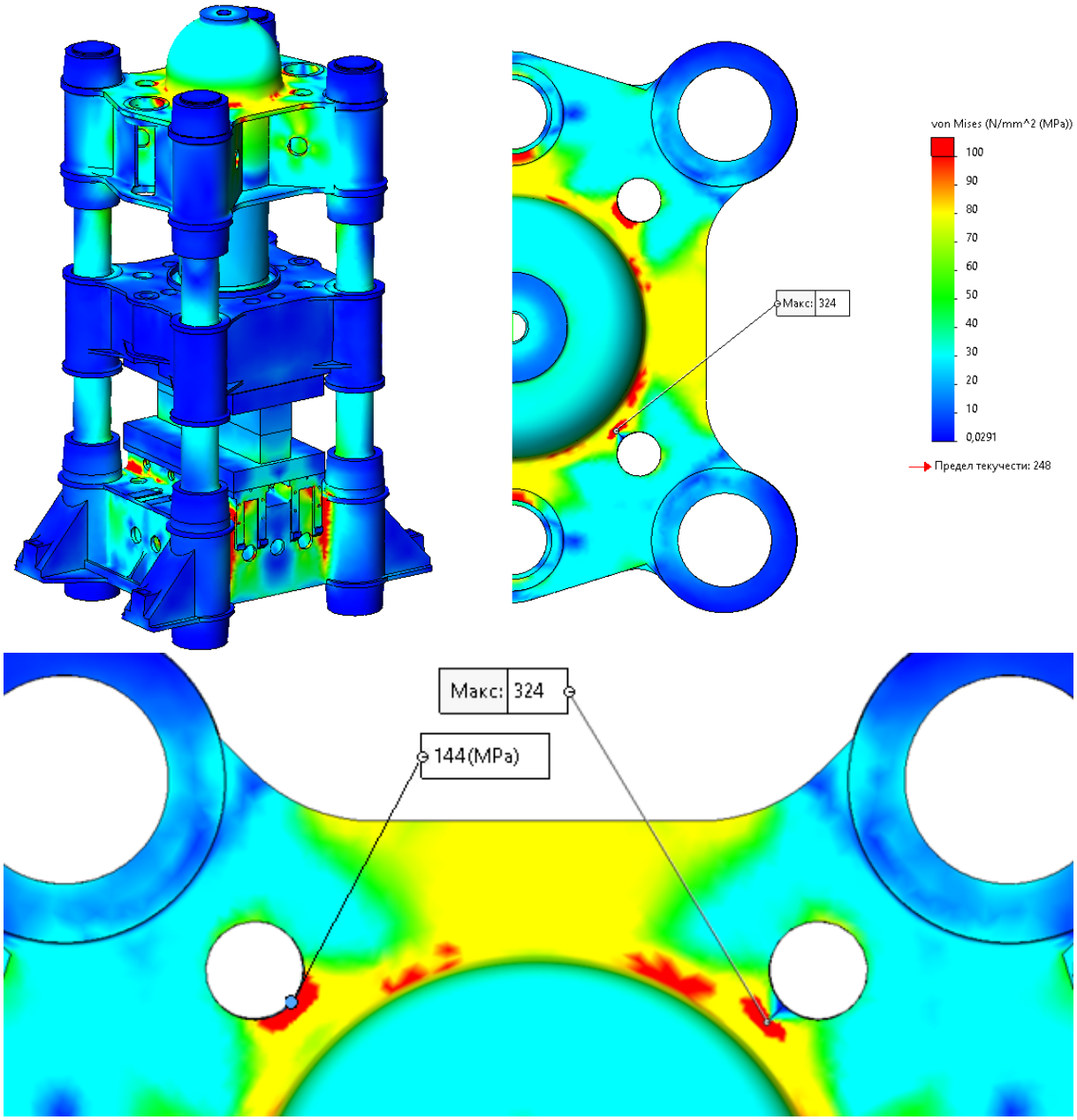


Рис. 3. Архитрав пресса Schloemann P-350 силой 1570 тс с возможной усталостной трещиной

4. Заключение

Бóльшая часть механических и гидравлических прессов, а также прокатных станов, работающих на металлургических заводах России, находится в эксплуатации более 30-50 лет. При столь длительных сроках службы оборудование устаревает как морально, так и физически, перестает соответствовать современным технологическим запросам и требованиям по предупреждению аварийных ситуаций, связанных с его

разрушением. Замена целого парка прессов или прокатных станов с длительными сроками службы является практически невыполнимой задачей для 90% предприятий, и не может быть осуществлена в короткие сроки.

Значительное количество отказов базовых деталей гидравлических прессов по сравнению с базовыми деталями машин других назначений обычно связывают со случайными причинами, обусловленными особенностями технологического процесса, условий эксплуатации и конструкции. Закономерности случайного характера устанавливаются теорией надежности на основе статистики эксплуатационных отказов или результатов испытаний на надежность опытных машин или партий машин. Рассматриваемые нами машины уникальны, поэтому на стадии проектирования конструктор не располагает данными об отказах.

Для большинства производств отказ тяжелой машины становится «внезапным» исходя из отсутствия понимания истинного запаса прочности. Поэтому, при проведении плановых ремонтов, рекомендуется контролировать все базовые детали методами неразрушающего контроля на предмет образовавшихся усталостных трещин или других дефектов, возникших в результате работы. Это позволит значительно уменьшить риск аварийной остановки оборудования и избежать значительных финансовых затрат.

Методы обследования, расчёта и прогнозирования надежности машиностроительного оборудования, упомянутые в этой статье, внедрены и используются в компании «Надежность Тяжёлых Машин», специализирующейся на экспертизе, ремонте и контролю механических и гидравлических прессов.

Высокие цены на зарубежную продукцию и возможность увеличения экспорта в условиях санкционной политики и направления импортозамещения, требуют поддержания высокого качества продукции и надежности как уже использующегося, так и нового машиностроительного оборудования [4].

Список литературы: 1. Воробьев А.К., Зуев Е.А. Причины разрушений главных цилиндров и технические решения, принятые для их предупреждения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, 2020. № 2(69).С.3-8. **2.** Волков А.Ю., Воробьёв А.К., Зуев Е.А. Выбор метода расчёта напряженно-деформированного состояния гидравлических прессов, Научный журнал. 2018. № 9 (32). С. 30-33. **3.** Зуев Е.А., Зуева М.Н. Определение напряженно-деформированного состояния колонн гидравлических прессов методом электротензометрии. Издательский дом «Спектр» "Справочник. Инженерный журнал", №08(269) август 2019, стр. 27 – 30. **4.** Воробьев А.К., Зуев Е.А., Сурков И.А. Обновление тяжелых машин в период экономических санкций на основе инновационных проектов // Тяжелое машиностроение. 2019.№ 5-6.С.11-13.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК В СЦЕПКАХ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ШАХТНЫХ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

Игнаткина Е.Л., Аликина А.Д., Македонский А.А.
(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)
Тел.: +7 908 495 39 16; E-mail: sel_post@mail.ru

Abstract: *The mathematical model of braking of the mine rolling stock is given elevated monorail. The feasibility of using a brake system distributed along the length of the rolling stock is justified, which will increase the safety of monorail transport operation.*
Keywords: *Elevated monorail, rolling stock ,split ,hitching ,dynamic force.*

Использование шахтного монорельсового транспорта в подземных условиях позволяет значительно сократить время доставки, грузов различного характера, особенно крупногабаритных [1 - 3]. Во время торможения подвижного состава возникают тормозные и инерционные силы, направленные вдоль монорельса, и продольные колебания подвесной монорельсовой дороги (МД), что приводит к появлению динамических нагрузок, воздействующих на соединительные элементы (сцепки) подвижного состава, монорельс, его подвеску, на крепь горной выработки [4 - 7].

На рис.1 представлена схема подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги (ШПМД) с упругодемпфирующими связями (сцепками).

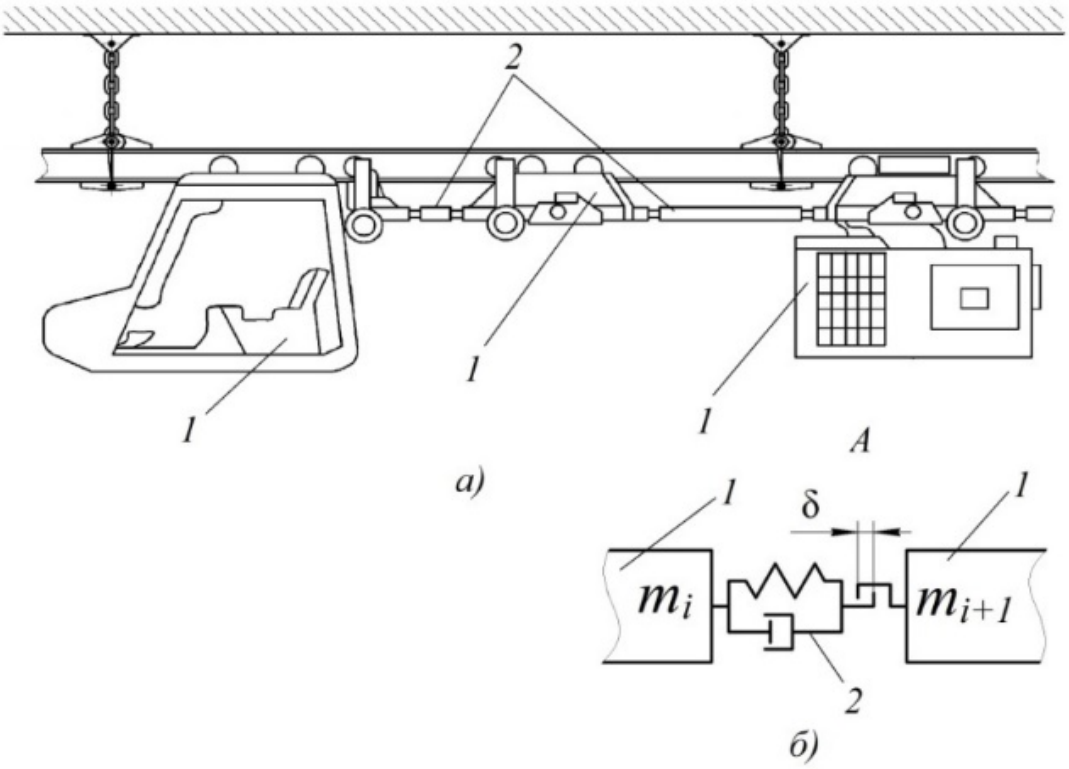


Рис. 1. Подвижные единицы ШПМД (а) и схема упругодемпфирующей связи (б): 1 – подвижные единицы; 2 – соединительные элементы (сцепки); δ – зазор соединительного элемента (сцепки)

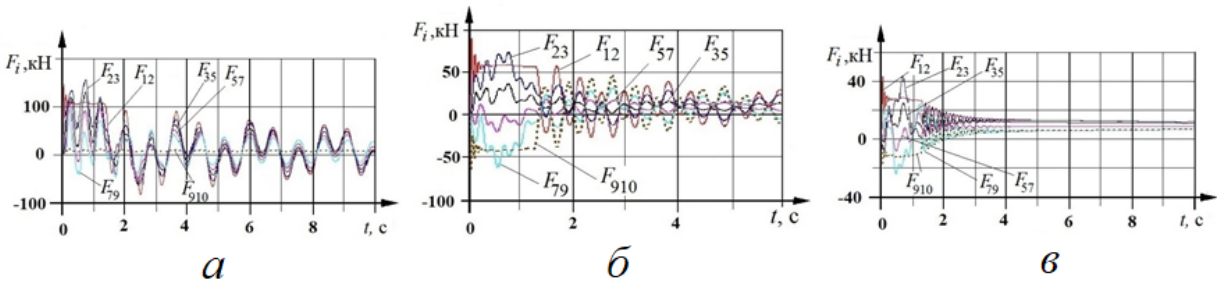
Математическая модель [8,9] торможения подвижного состава МД имеет вид:

$$
\begin{cases}
m_1\ddot{x}_1 + T_{q1}(t) + c_{12}(x_1 - x_2 + \delta) + b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0; \\
m_2\ddot{x}_2 - c_{12}(x_1 - x_2 + \delta) - b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_{23}(x_2 - x_3 + \delta) + b_{23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + F_q(t) = 0; \\
m_3\ddot{x}_3 - c_{23}(x_2 - x_3 + \delta) - b_{23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + c_{35}(x_3 - x_5 + \delta) + b_{35}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5) + m_4 g / h_c(x_3 - x_4 + \delta) = 0; \\
\ddot{x}_4 - g / h_c(x_3 - x_4 + \delta) = 0; \\
m_5\ddot{x}_5 - c_{35}(x_3 - x_5 + \delta) - b_{35}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5) + c_{57}(x_5 - x_7 + \delta) + b_{57}(\dot{x}_5 - \dot{x}_7) + m_6 g / h_c(x_5 - x_6 + \delta) = 0; \\
\ddot{x}_6 - g / h_c(x_5 - x_6 + \delta) = 0; \\
m_7\ddot{x}_7 - c_{57}(x_5 - x_7 + \delta) - b_{57}(\dot{x}_5 - \dot{x}_7) + c_{79}(x_7 - x_9 + \delta) + b_{79}(\dot{x}_7 - \dot{x}_9) + m_8 g / h_c(x_7 - x_8 + \delta) = 0; \\
\ddot{x}_8 - g / h_c(x_7 - x_8 + \delta) = 0; \\
m_9\ddot{x}_9 - c_{79}(x_7 - x_9 + \delta) - b_{79}(\dot{x}_7 - \dot{x}_9) + c_{910}(x_9 - x_{10} + \delta) + b_{910}(\dot{x}_9 - \dot{x}_{10}) + F_q(t) = 0; \\
m_{10}\ddot{x}_{10} - c_{910}(x_9 - x_{10} + \delta) - b_{910}(\dot{x}_9 - \dot{x}_{10}) + T_{q10}(t) = 0,
\end{cases}
$$

где: m_1, m_{10} – приведенные массы тормозных тележек;m_2, m_9 – приведенные массы тяговых тележек (устройств); m_3, m_5, m_7 – массы ходовых тележек с приведенной массой частью сцепки; m_4, m_6, m_8 – приведенные массы подвесных элементов подвижного состава с учетом приведенной массы груза; x_1, x_2, …,x_{10} – координаты перемещения центров тяжести указанных масс; c_{c12}, c_{c23}, c_{c35}, c_{c57}, c_{c79} и c_{c910} – коэффициенты жесткости сцепок, для стыкуемых между собой тележек; b_{c12}, b_{c23}, $b_{c35}b_{c57}$, b_{c79} и b_{c910} – коэффициенты демпфирования сцепок, соответственно; ψ_4, ψ_6 и ψ_8– углы отклонения подвесных элементов подвижного состава от вертикали. Здесь и далее индексы параметров соответствуют индексам масс составных элементов МД; h_c – расстояние между центрами тяжести тележек и перевозимых грузов по вертикали; $F_q(t)$, $T_{q1}(t)$ и $T_{q10}(t)$ – тормозные силы, создаваемые тяговыми и тормозными тележками, соответственно; δ – зазор в соединениях сцепок подвижного состава; g – ускорение свободного падения.

При исследовании процесса торможения подвижного состава массы m_1, m_{10} принимались равными между собой и составляли 0,2 т; аналогично массы m_2, m_9 – 4,0 т; m_3, m_5, m_7 – 2,0;m_4, m_6, m_8 – 8,0 т. Тормозная сила, развиваемая каждой тормозной тележкой или тяговым устройство составляла 100,0 кН. Коэффициенты жесткости сцепок c_{c12}, c_{c23}, c_{c35} c_{c57}, c_{c79}, c_{c910} – 1600,0 кН/м, а коэффициенты демпфирования сцепки b_{c12}, b_{c23}, $b_{c35}b_{c57}$, b_{c79}, b_{c910}– 5,0 кН·с/м. Расстояние между центрами масс тележек и перевозимых грузов h_c = 1,0 м, зазор в сцепках δ = 5 мм.Зависимости усилий в сцепках F_i от времени приведены на рис. 2.

Результаты исследований при торможении только передней тележкой, когда T_1 = 100 кН показаны на рис. 2,*а*. Аналогичные результаты получены для случая, когда торможение происходит только одной задней тележкой. При усилии торможения T_{10} = 100 кН.



а *б* *в*

Рис. 2. Зависимости: а, б – фазовые диаграммы; в – x_i = f(t); г – V_i = f(t); д – F_i = f(t); е – ψ_i = f(t) для масс m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8, m_9 и m_{10}

Результаты численного моделирования и графическое решение системы уравнений, иллюстрирующее изменение параметров движения для случая, когда торможение

подвижного состава осуществляется одновременно передней и задней тормозными тележками показано рис.2а. График иллюстрирует максимальное значение усилий во всех сцепках подвижного состава F_{ij}= 150кН во время первых 2 секунды процесса торможения. Последующее время процесса торможения, усилия принимают характер затухания.

Во время торможения подвижного состава тремя тележками, когда T_1 = 35 кН, T_5 = 35 кН и T_{10} = 35 кН, наблюдается увеличение разницы между усилиями в сцепках. При этом усилия F_{35} и F_{57} на протяжении всего процесса торможения составляют не более 75 кН, F_{12} и F_{910} не превышают 25 кН, а F_{23} и F_{79} – 40 кН. Из графика на рис. 2б следует, что наибольшие усилия в сцепках подвижного состава формируется за первые 1…1,5 секунды. Максимальное значение усилия F_{12} = 90 кН возникает в сцепке между первой тормозной тележкой (масса m_1) и тяговым устройством (масса m_2). При этом усилие F_{910}, которое формируется в сцепке между второй тормозной тележкой (масса m_{10}) и тяговым устройством (масса m_9), не превышает значение F_{12} и составляет 70 кН.

На рис. 2,*в* показаны результаты исследований при торможении пятью тележками, а именно – первой, третьей, пятой, седьмой и десятой. При этом тормозные усилия T_1, T_3, T_5, T_7 и T_{10} равны между собой. Суммарное усилие прижатия составляет 100 кН.

Для случая торможения подвижного состава осуществляемого пятью тележками, максимальное значение усилий возникающих в сцепках, достигает 43 кН в самом начале процесса торможения с последующим снижением значений до 17 кН. Таким образом, с точки зрения снижения динамических нагрузок наиболее предпочтительным вариантом является размещение тормозных механизмов на пяти подвижных единицах.

Исходя из проведенных исследований, для снижения динамических усилий в сцепках целесообразно выполнять распределенную тормозную систему вдоль всего подвижного состава и тормозные устройства располагать на каждой ходовой тележке. Кроме того, указанное конструктивное исполнение позволит исключить самопроизвольное скатывание отдельных подвижных единиц на наклонных участках монорельсового пути, что позволит повысить безопасность эксплуатации шахтных подвесных монорельсовых дорог.

Список литературы: 1. Зиборов К. А., Процив В. В., Шляхов Э. М. Опыт создания и построения семейства секционных шахтных локомотивов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2014. №13. С.69-76. **2.** Процив В. В. Моделирование торможения шахтного поезда рельсовыми тормозами. – Д.: Национальный горный университет, 2011. – 180 с. **3.** Буялич Г.Д., Тарасов В. М., Тарасова Н. И. Повышение эффективности работ на монорельсовом транспорте // Горный инженер. 2013. № 1. С.202-207. **4.** Сердюк А. А., Моня А. Г. Торможение шахтного локомотива дисковым тормозом с многосекторным диском // ГИАБ. 2004. №4. С. 241-246.**5.**Коптовец А.Н., Шибалов С.Ф., Новицкий А.В. Исследование тормозной эффективности шахтных поездов // Горная электромеханика и автоматика. 2004. Вып. 203. С. 56-61. **6.** Поляков Ю.И., Мерзляков П.Е. Теория проявления опасности (ТПО): допустимая норма замедления шахтного подвесного дизелевоза // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2008. №1. С. 69-73. **7.**Szewerda K., Tokarczyk J., PytlikA. Suspended monorail emergency braking trolley computational model verification based on bench tests // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol.261(1). P.012052. **8.**Гутаревич В. О., Игнаткина Е. Л. Обоснование оптимального режима пуска и торможения шахтной подвесной монорельсовой дороги // ГИАБ. 2016. №9. С. 29-36**. 9.**Гутаревич В. О., Игнаткина Е. Л. Исследование режима торможения подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги с учетом зазоров в сцепках // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 5. С. 108–115.

КЛАССИФИКАЦИЯ ШАХТНЫХ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ

Игнаткина Е.Л., Пашанина А.Д., Шмелев Д.А.
(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)
Тел.: +7 908 495 39 16; E-mail: sel_post@mail.ru

Abstract: *The article provides a classification of mine suspended monorail. The advantages of mine suspended monorail and their design features are given.*
Keywords: *mine suspended monorail, features, locomotive, rolling stock, traction trolley.*

Шахтные подвесные монорельсовые дороги (ШПМД) в качестве вспомогательного транспорта горных предприятий применялись еще в середине XX века. В настоящее время этот вид транспорта используется на угольных предприятиях Австралии, Китая, Польши, России, Украины, Чили, а также Южной Африки.

Одним из главных достоинств ШПМД является возможность транспортирования крупногабаритных грузов (например – секции крепи механизированного комплекса) по искривленным горным выработкам со знакопеременным профилем. При этом исключаются промежуточные перегрузки, а грузы перевозятся в подвешенном состоянии и без тары. Разгрузку подвижного состава можно реализовать непосредственно возле рабочего места без дополнительных средств механизации. [1-3]

Основными элементами монорельсовых дорог являются: монорельсовый путь, подвижной состав с грузоподъемными и другими вспомогательными устройствами, а также тяговыми устройствами. В зависимости от расположения центра тяжести подвижного состава относительно опорной поверхности монорельсового пути различают подвесные и навесные монорельсовые дороги. При этом подвижной состав может иметь точки опоры сверху монорельса или снизу. Для угольных шахт подвижной состав подвешивают и перемещают по нижним полкам монорельса.

Монорельсовый путь состоит из опорных, несущих и соединительных элементов. К опорным элементам в подземных условиях относятся крепь, кровля и почва выработок; к несущим элементам относят монорельс, к соединительным – скрепления, узлы подвески, стрелочные переводы и другие средства соединения пути.

В настоящее время существует несколько исполнений ШПМД. На рис. 1 приведена их классификация [4-9].

Широкое применение нашли ШПМД с индивидуальной тягой, используя фрикционные передачи, когда приводные колеса прижимаются к монорельсу по бокам с двух сторон. Каждая пара прижимаемых колес с приводом образует модуль – тяговое устройство. При этом источником энергии является дизельный двигатель во взрывозащищенном исполнении, а само тяговое устройство может перемещаться по монорельсовому пути на ходовых колесах

Канатная тяга нашла ограниченное применение, поскольку такие ШПМД имеют ограниченную длину транспортирования и не могут обслуживать разветвленные выработки. Сам канат, расположенный вдоль всей трассы транспортирования, имеет низкий срок службы и является источником повышенного травматизма и аварий. Кроме того, для ориентации каната в выработке монорельсовый путь дополнительно снабжается поддерживающими и отклоняющими роликами, что значительно усложняет конструкцию ШПМД.

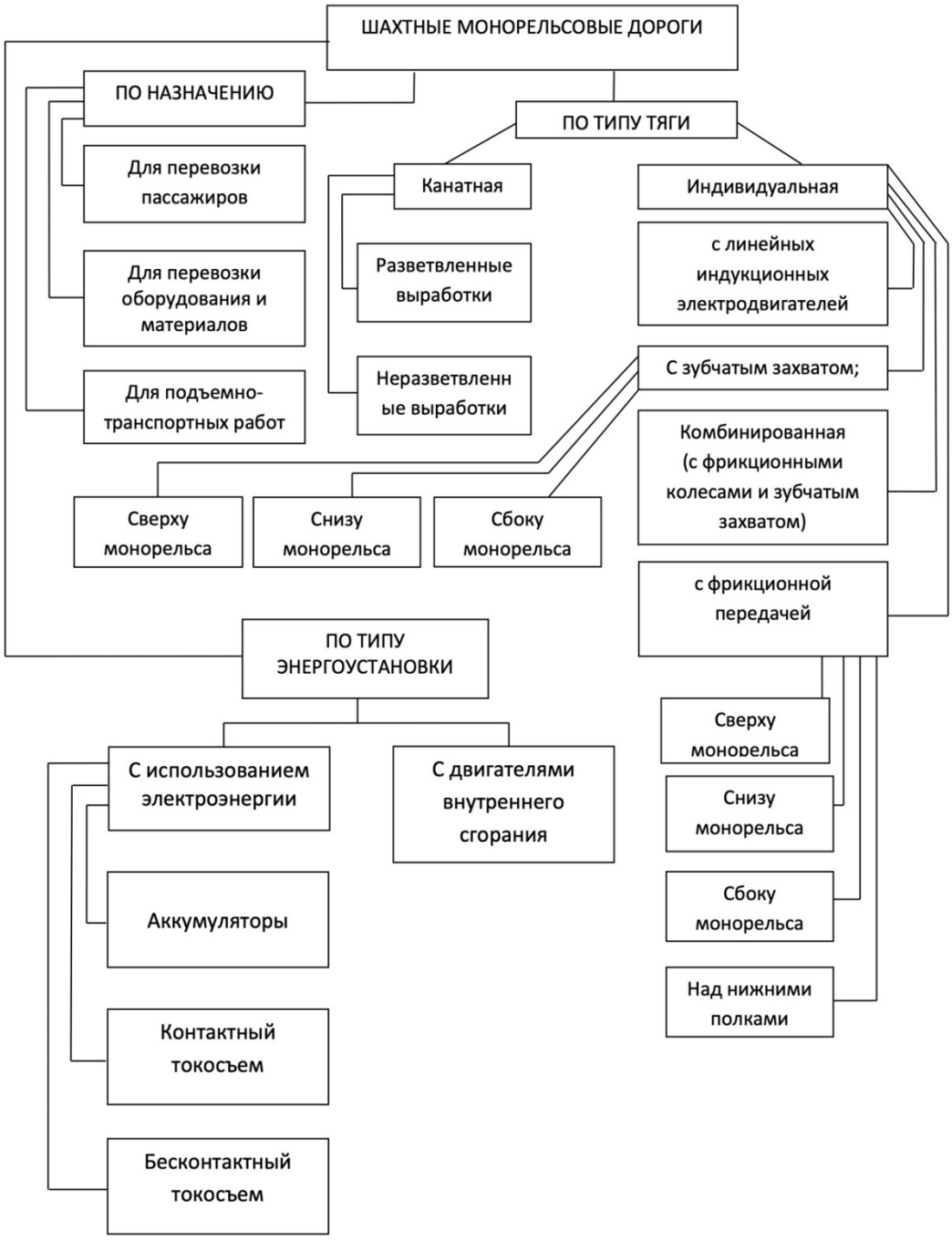


Рис. 1. Классификация шахтных подвесных монорельсовых дорог

Подвижной состав ШПМД представляет собой шарнирно-сочлененную систему, составленную по модульному принципу, что дает возможность изменять количество подвижных единиц состава и тяговых устройств. В общем случае подвижной состав состоит из головной и хвостовой кабин управления, обязательно оборудованных тормозными устройствами. Обычно между ними располагаются от двух до пяти тяговых устройств (модулей), на которые также устанавливают тормозные устройства. Кроме этого, для перевозки грузов между кабинами располагаются силовая секция, тележки с

грузоподъемными балками, поддонами или контейнерами, а для перевозки людей – пассажирские вагонетки или платформы с сидениями.

Все единицы соединяются жесткими сцепками, позволяющими подвижному составу перемещаться по горизонтальным и вертикальным закруглениям монорельсового пути.

Обычно скорость движения подвижного состава устанавливается конструкцией и технической документацией ШПМД. Как правило, она составляет не более 2 м/с и в редких случаях может достигать до 2,6 м/с. Перевозка длинномерных и других крупногабаритных грузов осуществляется при скорости не более 1 м/с.

ШПМД является одним из перспективных видов шахтного транспорта, который в силу своих преимуществ будет находить все более широкое применение в горной промышленности.

Список литературы: 1. Авдеев, А. М. Рельсовые транспортные средства для сложных горно-геологических условий [Текст] / А. М. Авдеев, А.В. Большунов, Г. В. Соколова // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов : сб. науч. ст. / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под общей ред. В. Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2013. – С. 51–55. **2.** Беккер, Ф. Модернизация логистической инфраструктуры объединённой шахты «Борыня-Зовьюфка» (Польша) посредством применения высокопроизводительной транспортной техники и интегрированной системы управления и коммуникации [Текст] / Ф. Беккер // Уголь. – 2012. – № 5. – С. 81–85. **3.** Гутаревич, В. О. Общие логистические подходы к формированию процесса перевозки грузов подвесной монорельсовой дорогой / В. О. Гутаревич, Е.Л. Игнаткина // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы международной научно-технической конференции (17-19 октября 2018 г.). В 2 ч. – Петропавловск-Камчатский :КамчатГТУ – 2019. – Ч. 2. – С.61-63. **4.** Даубер, К. Разработка и опробование автоматизированного дизелевоза монорельсовой подвесной дороги [Текст] / К. Даубер, Т. Гиссельман // Глюкауф. – 2007. – № 3. – С. 13–19. **5.** Дедов, А. Н. Монорельсовый электропоезд МЭП-1 [Текст] / А. Н. Дедов, П. Д. Кийко, В. Е Антонов // Механизация и автоматизация горных работ. – 1971. – Вып. 7. – С. 89–93. **6.** Денищенко, А. В. Шахтные канатные дороги [Текст] : монография / А. В. Денищенко. – Днепропетровск: НГУ, 2011. – 172 с. **7.** Буялич, Г. Д. Повышение эффективности работ на монорельсовом транспорте / Г. Д. Буялич, В. М. Тарасов, Н. И. Тарасова // Горный инженер. – 2013. – № 1. – С. 202–207. **8.** Гутаревич, В. О. Динамика шахтных подвесных монорельсовых дорог [Текст] : монография / В. О. Гутаревич. – Донецк : ЛАНДОН-XXI, 2014. – 205 с. **9.** Гутаревич, В. О. Исследование закономерностей движения шахтной подвесной монорельсовой дороги [Текст] / В. О. Гутаревич // Способы и средства безопасной эксплуатации электромеханического оборудования в шахтах : сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка, 2011. – Вып. 2(28). – С. 150–158.

ПЕРЕДВИЖНЫЕ АЗОТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДОБАВОК ИЗ СТВОРОК МИДИИ ТИХООКЕАНСКОЙ

Иодис В.А., Безруков В.А., Сарайкина И.П.
(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)
E-mail:iodisva@mail.ru, aleksandrbezrucov24102000@mail.ru

Abstract: *The article discusses the design of mobile nitrogen for the production of biologically active additives. The production is based on the use of the refrigeration potential of liquid and gas nitrogen during quickly cooling of pacific mussel shell and their crushing.*
Key words: *mobile nitrogen complex, pacific mussel, liquid and gas nitrogen, biologically active additives.*

Современные БАДы – биологически активные добавки, которые своим составом (аминокислоты, минералы, витамины и витаминоподобные вещества) дополняют и обогащают пищу современного человека для нормальной жизнедеятельности организма. Одним из инновационных направлений – это их производство из объектов нерыбного промысла. Однако в технологических способах производства БАД применяют химически вредные, длительные и высокозатратные операции, такие как гидролиз соляной кислотой, сублимационная сушка, замораживание сырья погружными способами хладагентом [1 – 7].

Предлагается разработать проект передвижного азотного комплекса для производства биологически активных добавок получения БАД из створок мидии тихоокеанской.

Технологический процесс проектируемого передвижного азотного комплекса будет включать такие операции как чистку раковин мидии тихоокеанской, конвекционную сушку до содержания влаги не более 6 – 8 %; укладывание створок раковин в загрузочный лоток аппарата для получения БАД (см. рис. 1, 2), в которой происходит понижение температуры створок до температуры минус 80 ÷ 100 °С путем распыления непосредственно на слой раковин жидкого азота; измельчение створок в шнековой дробилке до частиц диаметром 2 ÷ 3 мм (I - я стадия измельчения); измельчение частиц, используя измельчитель с лопастным ножом до размера частиц 600 – 800 мкм (II - я стадия измельчения).

В связи с достаточной удаленностью мест культивирования мидии тихоокеанской (в большинстве случаев) от населенных пунктов возникает необходимость в разработке непрерывной технологической цепи переработки моллюсков, а именно передвижного азотного комплекса для переработки створок мидий и доставки его непосредственно потребителю.

Передвижной азотный комплекс планируется разместить в одном 40-а футовом изотермическом контейнере на базе контейнеровоза типа «МАЗ», способных быстро принимать сырец моллюсков у мест культивирования, перерабатывать и доставлять готовую упакованную продукцию.

Подготовительные операции включают мойку собранных с коллекторов и садков мидий, выдерживание в морской воде, отделение тел моллюсков от раковин, удаление бисусной нити. Мясо мидий проходит варку, охлаждение проточной морской водой, мойку, расфасовку и замораживание в азотном скороморозильном аппарате [8 – 12].

Створки проходят очистку на столах для очистки раковин и конвекционную сушку в специальных шкафах, после чего загружаются в загрузочный лоток аппарата производства БАД (см. рис. 2). В аппарате створки охлаждаются, разбиваются потоком азота, измельчаются в шнековой дробилке и в измельчителе с лопастным ножом. Полученные

БАД упаковывают в полиэтиленовые контейнеры, затем в ящики, маркируют и через дверь для выгрузки готовой продукции направляют на хранение.

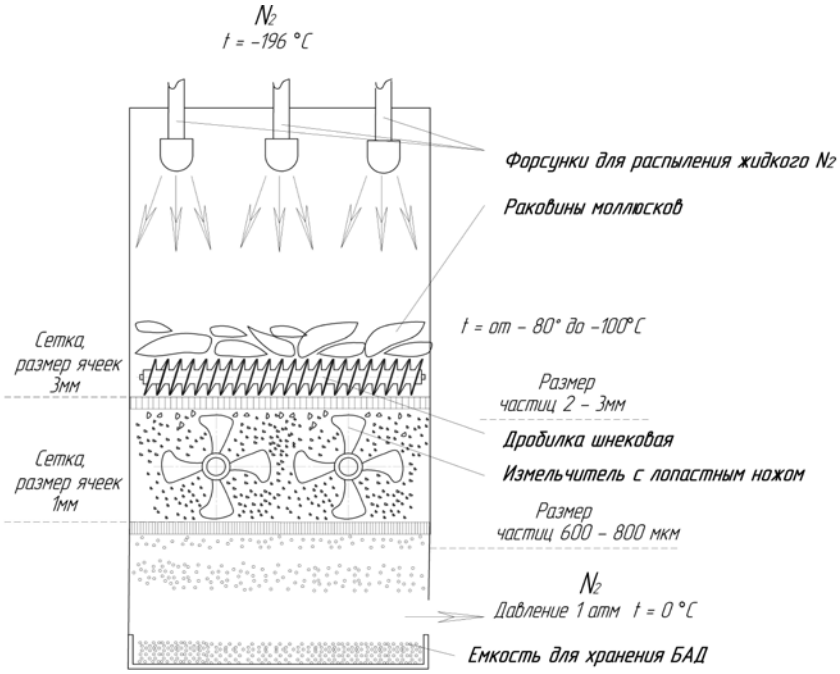


Рис. 1. Принципиальная схема аппарата производства БАД из створок мидии тихоокеанской

Для обеспечения автономной работы комплекса предусмотрено использование автономного дизель-генератора отечественного производства марки ПСМ-АД-30, требуемой мощности 25 кВт.

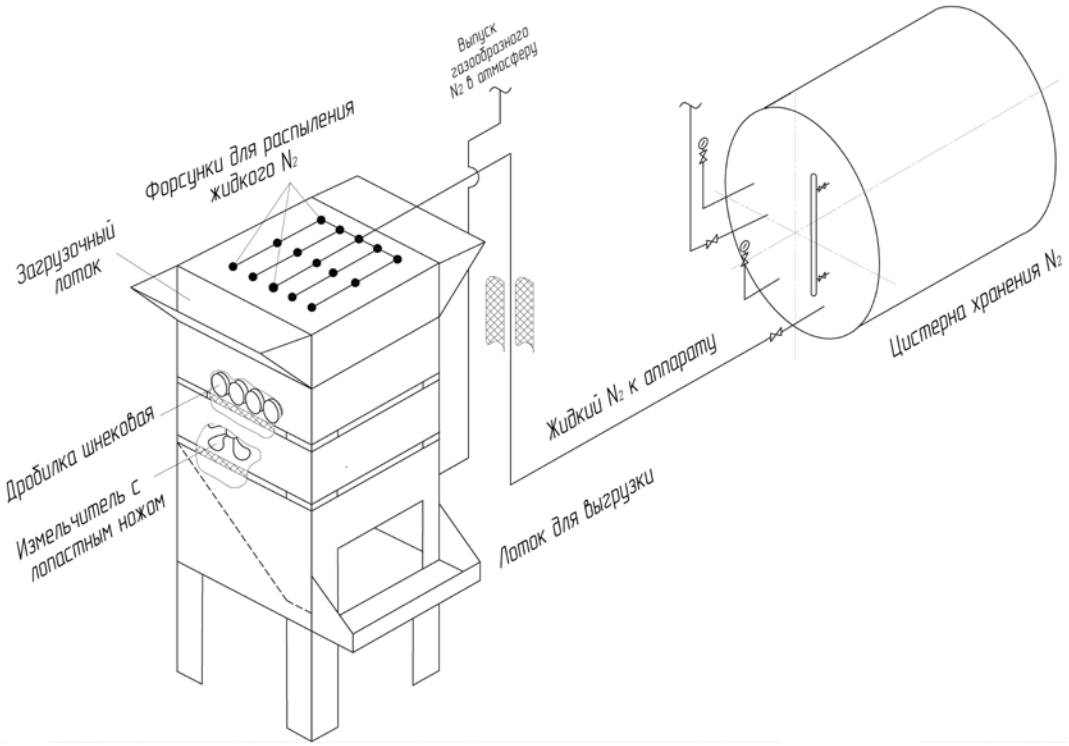


Рис. 2. Аксонометрическая схема получения БАД из створок мидии тихоокеанской с использованием холодильного потенциала жидкого и газообразного азота

Таким образом, разработанный передвижной азотный комплекс получения БАД из створок мидии тихоокеанской, позволяет:

– создать непрерывную технологическую цепь переработки моллюска, его хранения и доставки потребителю;

– начать культивирование-добычу и переработку мидии тихоокеанской в труднодоступных бухтах Дальнего Востока, ранее недоступные для этого;

– повысить биологическую активность получаемых БАД из створок мидии тихоокеанской, в следствии их высокой удельной поверхности, что положительно влияет на скорость протекания биохимических реакций в организме человека, а также более низкая агрегация, карамелизация и слеживаемость частиц;

– снизить удельный расход жидкого азота на охлаждение 1 кг створок раковин моллюска;

– существенно упростить технологический процесс, снизить эксплуатационные затраты, повысить биологическую активность получаемых БАД.

Список литературы: 1. Груздева А.Е., Потемкина Е.В., Гришатова Н.В. Способ получения биологически активной добавки к пище из растительного сырья (варианты) // Патент РФ №2176894. 2001. **2.** Ковбасенко В.М., Крук Ю.Б., Пайдай А.Е., Семенец В.А. Способ производства кормовой добавки из мидий // Авторское свидетельство СССР №935062. 1982. Бюл. № 22. **3.** Алексанян Р.П. Способ приготовления корма для птиц // Авторское свидетельство СССР №1561945. 1990. Бюл. № 17. **4.** Груздева А.Е. Способ получения биокорректоров из натурального сырья // Патент РФ №239929. 2010. **5.** Ковбасенко В.М., Барабаш В.С., Гуркало С.Я. Кормовая добавка для коров // Авторское свидетельство СССР №1479050. 1991. Бюл. № 3. **6.** Груздева А.Е., Потемкина Е.В., Гришатова Н.В., Крот А.Р. Способ получения пищевой добавки из растительного сырья // Патент РФ №2110194. 1998. **7.** Груздева А.Е., Гришатова Н.В., Потемкина Е.В., Тимофеева Е.А. Способ получения биологически активной добавки к пище из натурального сырья // Патент РФ №2183413. 2002. **8.** Иодис В.А., Балыкова Л.И., Жуков С.А. Передвижной азотный скороморозильный комплекс для производства варено-мороженой мидии на базе судна МРТК типа "Балтика" / Материалы II Международной научно-практической конференции: в 2 частях. Сборник: Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана, 2012. С. 197-201. **9.** Иодис В.А., Балыкова Л.И. Мобильная холодильная цепь переработки двухстворчатых моллюсков / Вестник Камчатского государственного технического университета. 2012. № 21. С. 10-14. **10.** Иодис В.А. Передвижные азотные скороморозильные комплексы для переработки моллюсков В сборнике: Техническая эксплуатация водного транспорта: Проблемы и пути развития // Материалы международной научно-технической конференции: в 2-х частях. Ответственный за выпуск О.А. Белов. 2019. С. 77-81. **11.** Ипаткин П.В., Иодис В.А. Получение биологически активных добавок из створок мидии тихоокеанской с использованием холодильного потенциала твердой углекислоты / В сборнике: Техническая эксплуатация водного транспорта: Проблемы и пути развития // Материалы Второй международной научно-технической конференции. Ответственный за выпуск О.А. Белов. 2020. С. 189-191. **12.** Щербаков В.Н., Иодис В.А. Передвижные углекислотные комплексы для получения биологически активных добавок из створок мидии тихоокеанской / В сборнике: Техническая эксплуатация водного транспорта: Проблемы и пути развития // Материалы Второй международной научно-технической конференции. Ответственный за выпуск О.А. Белов. 2020. С. 210-213.

РАЗРАБОТКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРНОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПРИХВАТОВ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН В ОСЛОЖННЁНЫХ УСЛОВИЯХ

Каракозов А.А., Рязанов А.Н., Парфенюк С.Н., Паршков А.В.
(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР)
E-mail: karakozov@donntu.org, artur.a.karakozov@mail.ru

Abstract: *The classification of impact mechanisms for the freeing stuck drill pipe is presented. The results of the development of a hydraulic impact mechanism that uses the hydrostatic pressure of a liquid column in a drill string and is designed to free stuck pipe in exploration wells in conditions of catastrophic losses of drilling fluid.*
Keywords: *well drilling, sticking, classification of impact mechanisms, hydraulic impact mechanism, working cycle.*

Бурение скважин на угольных месторождениях постоянно осложняется техногенными зонами поглощений, обусловленных наличием старых горных выработок. Эти зоны, чаще всего, характеризуются катастрофическим поглощением промывочной жидкости и значительным падением её уровня в скважине, что нередко приводит к прихватам бурового снаряда. Анализ видов прихватов и методов их ликвидации показывает, что около 70% этих аварий может успешно ликвидироваться при использовании ударных механизмов – как самостоятельном, так и в комбинации с другими способами воздействия на прихваченный снаряд [1, 2].

При создании новых конструкций ударных механизмов для ликвидации прихватов бурового снаряда (УМЛП) большое значение имеет их классификация, основанная на чётко определенных критериях систематизации и разработанная с учетом анализа реальных конструктивных схем и ближайших перспектив развития буровой техники.

Предложена уточненная классификация ударных механизмов для ликвидации прихватов, базирующаяся на следующих критериях систематизации (рис. 1):

1. Специфика эксплуатации;
2. Особенности воздействия на прихваченный снаряд;
3. Особенности воздействия на зону прихвата;
4. Вид исполнительного элемента механизма;
5. Особенности накопления потенциальной энергии в системе «скважина – бурильная колонна – УМЛП»;
6. Вид накапливаемой потенциальной энергии в системе «скважина – бурильная колонна – УМЛП»;
7. Способ накопления энергии в системе «скважина – бурильная колонна – УМЛП»;
8. Способ фиксации исполнительного элемента при накоплении энергии в системе;
9. Способ активизации исполнительного элемента.

Анализ классификационных признаков показывает, что в настоящее время одними из наименее используемых механизмов являются УМЛП, в рабочем цикле которых используется гидростатическое давление жидкости. Подобные механизмы могут эффективными вследствие следующих преимуществ: высокие энергетические показатели; улучшенные условия эксплуатации бурильных труб; регулирование энергетических параметров в широких пределах; простота изготовления, монтажа и применения. Для их успешной эксплуатации необходимо создать разность гидростатических давлений в скважине и полости бурильной колонны. Это может достигаться тремя путями (см. рис.1): за счет создания разности уровней жидкости в скважине и бурильной колонне; за счет создания разности плотностей жидкости в скважине и бурильной колонне; за счет создания разности уровней и плотностей жидкости в скважине и бурильной колонне.

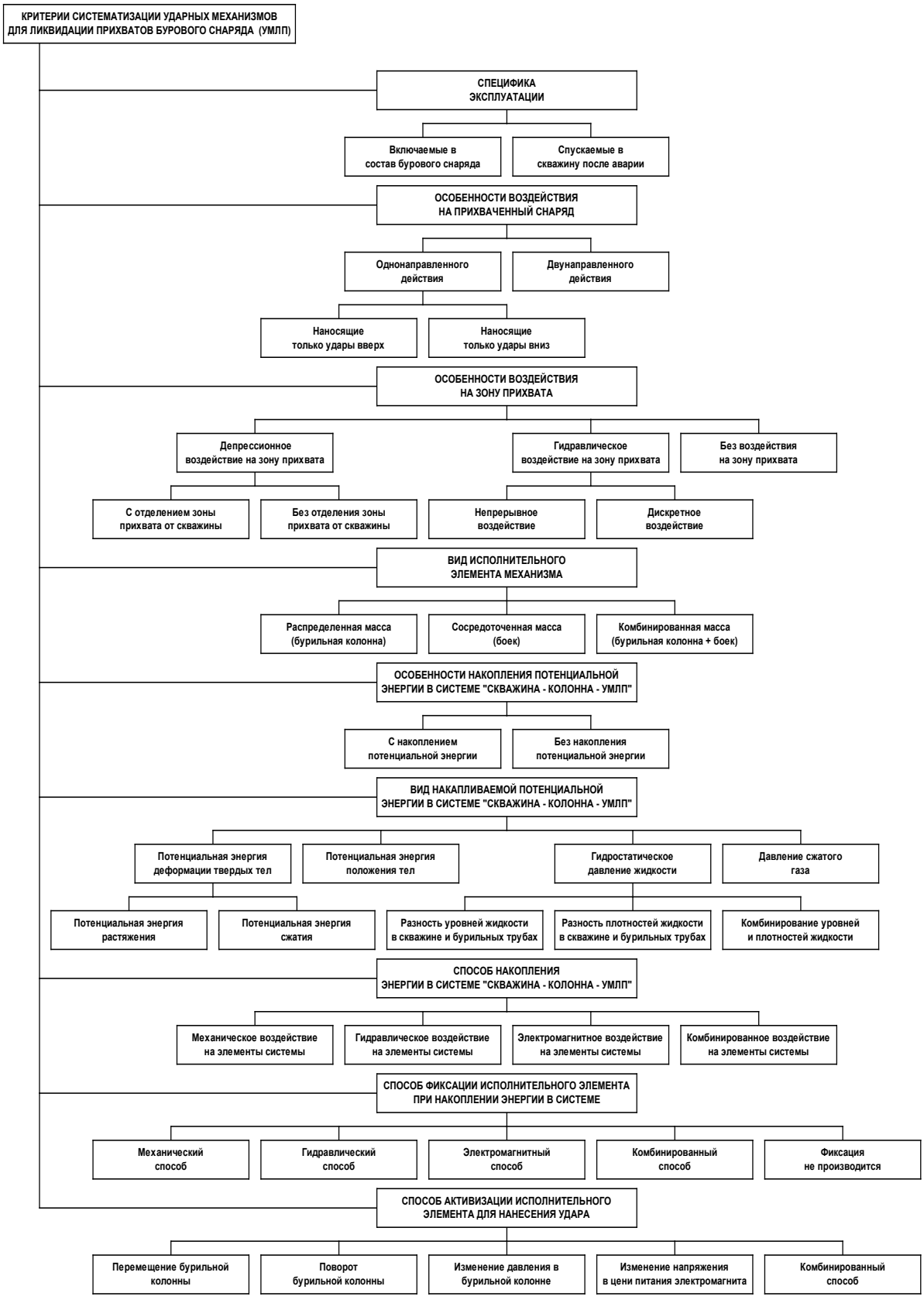


Рис. 1. Критерии систематизации ударных механизмов для ликвидации прихватов

Кроме того, в зависимости от применяемой технологии бурения могут быть предложены два принципиально различных вида этих УМЛП: 1. Работающие при

большем давлении в скважине; 2. Работающие при большем давлении в бурильной колонне. Поэтому возможно четыре основных технологических схемы применения подобных УМЛП (рис. 2).

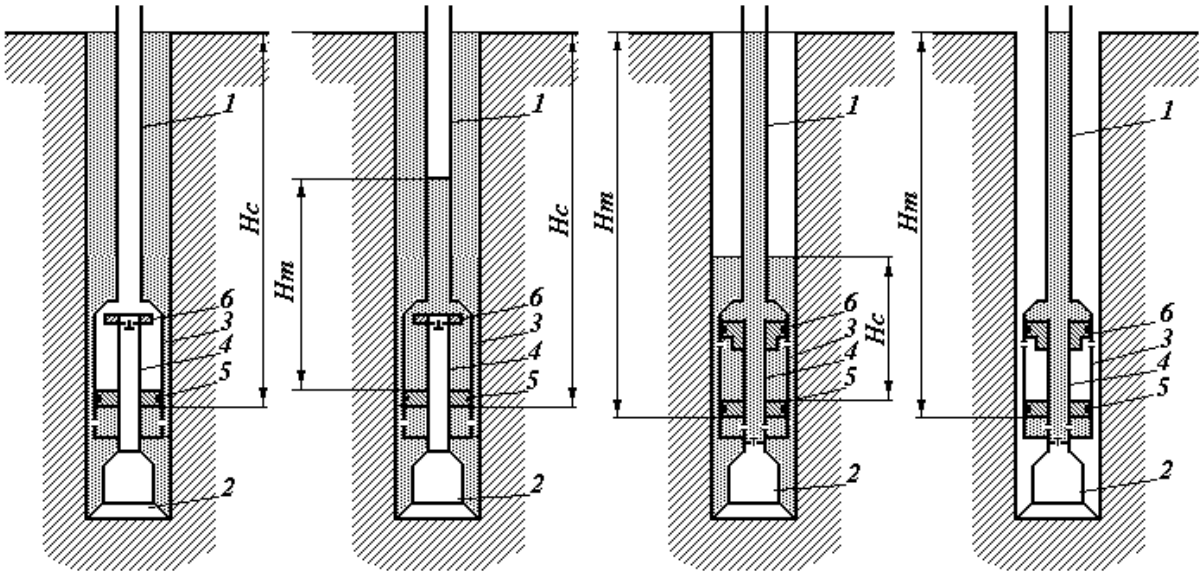


Рис. 2. Схемы применения УМЛП в скважинах: а – при заполненной скважине и частично заполненной бурильной колонне; б – при заполненной скважине и пустой бурильной колонне; в – при частично заполненной скважине и заполненной бурильной колонне; г – при пустой скважине и заполненной бурильной колонне: 1 – бурильная колонна; 2 – прихваченный снаряд; 3 – корпус УМЛП; 4 – шток; 5 – поршень-боек; 6 – наковальня; *Hc, Hm* – соответственно уровни жидкости в скважине и бурильных трубах

Если для первых двух схем разработаны рекомендации для нормальных условий бурения [3], то две другие схемы могут быть рекомендованы для использования в осложнённых условиях, когда из-за поглощения промывочной жидкости в скважине поддерживается столб жидкости ограниченной высоты или скважина практически пустая. Следовательно, использование этих технологических схем и разработка механизмов для их реализации при бурении скважин в Донбассе являются весьма актуальными. Следует отметить, что на практике возможно также осуществление вариантов всех четырёх технологических схем, отличающихся использованием промывочных жидкостей разных плотностей в скважине и бурильных трубах.

Для работы по двум последним схемам (рис. 2 б,в) в ДонНТУ был предложен ударный механизм, реализующий для разгона бойка давление столба жидкости в бурильных трубах [4, 5, 6]. В состав устройства для ликвидации прихватов бурового снаряда [6] входят (рис. 3) корпус 1 с радиальными отверстиями 2, верхним и нижним переходниками 3 и 4 и уступом 5 на внутренней поверхности. С корпусом 1 соединены наковальня 6 и перегородка 7 с клапаном 8. Шток 9 с ограничителем 10 и радиальными отверстиями 11 установлен в осевых отверстиях наковальни 6 и перегородки 7. Радиальные отверстия 11 в исходном положении размещены ниже перегородки 7. Между уступом 5 и ограничителем 10 установлен поршень-боек 12. В нижнем переходнике 4 установлено седло 13 обратного клапана 14. В верхней части штока 9 выполнена резьба 15 для соединения с бурильными трубами, а в нижнем переходнике 4 – резьба 16 для соединения с прихваченным снарядом. Между штоком 9 и верхним переходником 3 имеется шлицевое соединение 17.

УМЛП может включаться в состав бурового снаряда или спускаться в скважину

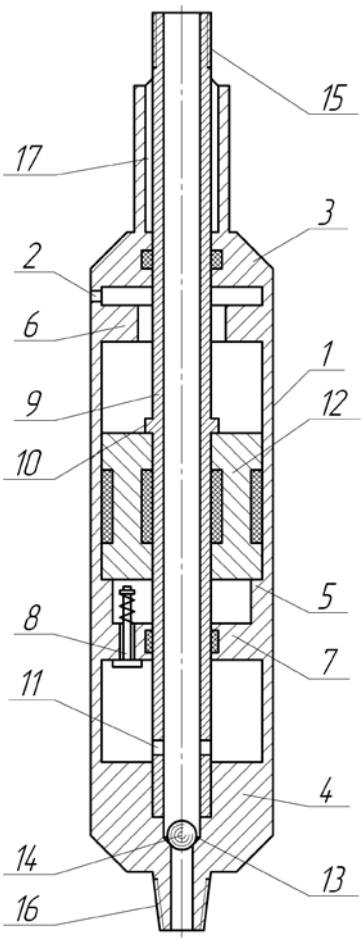


Рис. 3. Конструктивная схема УМЛП [6]

после аварии, соединяясь с прихваченным снарядом. При этом скважина остается пустой или частично заполненной жидкостью вследствие катастрофического поглощения.

При использовании после возникновения прихвата в скважине, УМЛП спускается к прихваченному объекту на бурильных трубах, соединенных со штоком 9. При этом обратный клапан 14 может отсутствовать, и промывка забоя скважины осуществляется через осевые каналы устройства. Устройство соединяется с прихваченным буровым снарядом нижним переходником 4, к которому может дополнительно крепиться ловильный инструмент. Затем по бурильным трубам сбрасывается обратный клапан 14, который садится в седло 13 и перекрывает осевой канал в нижнем переходнике 4. Бурильные трубы заполняют промывочной жидкостью так, чтобы уровень жидкости в них был значительно выше, чем в скважине.

Для нанесения удара дают натяжение бурильным трубам и поднимают шток 9 в крайнее верхнее положение. Радиальные отверстия 11 поднимаются выше перегородки 7 и соединяются с полостью под поршнем-бойком 12, в которую поступает жидкость из бурильных труб. Поскольку давление под поршнем-бойком 12 увеличилось, то он перемещается вверх и наносит удар по наковальне 6. При этом жидкость из полости над поршнем-бойком 12 вытесняется в скважину через отверстия 2.

Для нанесения повторного удара бурильные трубы подаются вниз. Ограничитель 10 давит на поршень-боек 12 и перемещает его вниз до уступа 5. При этом жидкость из-под поршня-бойка 12 вытесняется в полость бурильных труб через отверстия 11. Когда они сравняются с перегородкой 7, жидкость из-под поршня-бойка 12 будет вытесняться в бурильные трубы через клапан 8.

Аварийный снаряд освобождается от прихвата под воздействием ударных нагрузок и пульсаций давления промывочной жидкости в зоне работы механизма.

Устройство также может включаться в состав бурового снаряда. Тогда в процессе бурения скважины крутящий момент на забой передается шлицевым соединением 17, осевая нагрузка – ограничителем 10 на поршень-боек 12 и уступ 5 корпуса 1. В случае прихвата обратный клапан 14 сбрасывают в бурильные трубы, и он садится в седло 13. Дальнейшая работа УМЛП аналогична вышеописанной.

Основным параметром, определяющим эффективность работы устройства, является скорость его бойка в момент удара. Поэтому для определения энергетических характеристик механизма в конкретных условиях эксплуатации установлены закономерности изменения скорости бойка во времени в зависимости от конструктивных и технологических факторов, основанные на детальном анализе рабочего цикла УМЛП.

В табл. 1-2 приведены расчётные зависимости для устройства, предназначенного для эксплуатации в скважинах диаметром 93 мм (бурильная колонна СБТМ-50; промывочные жидкости – вода и глинистый раствор с параметрами: ρ=1150 кг/м^3, τ_0=2 Па, η=0,007 Па·с).

Таблица 1. Значение максимальной скорости бойка (м/с) в зависимости от массы бойка (*m*) при различных уровнях жидкости в трубах (*h*)

m, кг	Ньютоновская жидкость			Неньютоновская жидкость		
	h=100 м	*h*=300 м	*h*=500 м	*h*=100 м	*h*=300 м	*h*=500 м
20	0,43	2,76	4,81	0,44	2,74	4,70
30	0,39	2,72	4,77	0,4	2,7	4,67
40	0,35	2,68	4,74	0,37	2,67	4,64
50	0,31	2,64	4,7	0,33	2,64	4,61
60	0,27	2,6	4,66	0,3	2,6	4,58
70	0,24	2,56	4,63	0,27	2,57	4,55

Таблица 2. Значение максимальной скорости бойка (м/с) в зависимости от уровня жидкости в скважине (*H*) при различных уровнях жидкости в трубах (*h*)

H, м	Ньютоновская жидкость			Неньютоновская жидкость		
	h=150 м	*h*=200 м	*h*=300 м	*h*=150 м	*h*=200 м	*h*=300 м
25	1,21	1,8	2,93	1,24	1,82	2,93
50	0,91	1,5	2,64	0,92	1,51	2,64
75	0,61	1,19	2,34	0,62	1,21	2,34
100	0,31	0,89	2,04	0,32	0,9	2,05
125	0,02	0,6	1,75	0,03	0,6	1,76

Из полученных данных (табл. 1) следует, что с увеличением массы бойка его скорость снижается практически прямолинейно, хотя энергия удара изменяется незначительно. При этом, с увеличением уровня жидкости в бурильных трубах, влияние массы бойка на значение его максимальной скорости в расчётных пределах резко снижается. Из табл. 2 видно, что повышение уровня жидкости в скважине (*H*) резко снижает скорость бойка, уменьшая ее, в конечном итоге, до нулевой величины. Из табл. 1-2 также видно, что скорость бойка для случая использования неньютоновской жидкости всегда несколько выше, чем при работе с водой, что объясняется большей плотностью глинистого раствора, обеспечивающей более высокое гидростатическое давление в бурильных трубах.

Приведенные данные иллюстрируют возможность оценки энергетических показателей УМЛП и проектирования его конструкции по заданным параметрам для конкретных условий эксплуатации.

Список литературы: 1. Пустовойтенко, И. П. Предупреждение и ликвидация аварий в разведочном бурении / И. П. Пустовойтенко. – М.: Недра, 1988. – 279 с. **2.** Kemp G. Oilwell Fishing Operation: Tools and Techniques. – Gulf Publishing Company, Book Division, 1986. – 96 p. **3.** Каракозов А. А. Разработка и исследование ударных механизмов для ликвидации прихватов в скважине: дисс. … канд. техн. наук: 05.15.14: защищена 16.06.1993 / Каракозов Артур Аркадьевич. – Донецк, 1993. – 168 с. **4.** Каракозов, А. А. Перспективы создания ударных механизмов для ликвидации прихватов при бурении скважин в сложных условиях / А. А. Каракозов // Сб. Труды ДонГТУ. Серия «Горно-геологическая». – Донецк, ДонГТУ, 2002. – Вып. 45. – С. 54 – 59. **5.** Устройство для ликвидации прихватов бурового снаряда : Декларационный патент №63101 UA E21B 31/113 / А.А. Каракозов, О.И. Калиниченко. – Опубл. 15.01.2004, Бюл. №1. **6.** Устройство для ликвидации прихватов бурового снаряда : Патент на изобретение №96491 UA E21B 31/113 / А.А. Каракозов, С.Н. Парфенюк, А.Н. Рязанов, И.Д. Сагайдак, Д.А. Дерягина. – Опубл. 10.11.2011, Бюл. №21.

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ И СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, УПРОЧНЕННОГО КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ, НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ.

Кардаполова М.А., Девойно О.Г., Косякова И.М., Николаенко В.Л.
(БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)
Тел./Факс: +375 (17) 3310045; E-mail: scvdmed@bntu.by

Abstract: *In this article, we consider a variant of combined processing for the formation of wear-resistant coatings, which includes a combination of preliminary laser processing and subsequent electric spark alloying. The optimal modes providing the minimum stresses in the surface layers due to the superposition of stresses and their mutual reduction are determined. The residual stresses of the I-th series were measured in the metal component of the coatings by X-ray diffraction analysis. At the same time, the phase composition of the coatings was studied.*

Key words: *Wear-resistant coatings, X-ray diffraction analysis, electric spark alloying, laser processing.*

В данной статье рассматривается вариант комбинированной обработки для формирования износостойких покрытий, включающий в себя сочетание предварительной лазерной обработки и последующего электроискрового легирования.

В результате воздействия лазерного излучения на поверхности образуются параллельно расположенные упрочненные дорожки, которые ложатся с определенным коэффициентом перекрытия. Кроме того, лазерная обработка приводит к насыщению структуры металла двойниками и дислокациями, уменьшению балла зерна, измельчению карбидов.

Последующая обработка поверхности методом электроискрового легирования твердосплавным электродом с расположением упрочняющих дорожек перпендикулярно направлению следов лазерной обработки способствует получению слоистых высокоизносостойких слоев с перекрытием неупрочненных зон. Сплошность покрытия при этом составляет 90-100 % и регулируется. Суммарная глубина упрочненного слоя в зависимости от режимов находится в пределах 300-500 мкм.

Основными причинами, вызывающими ограничение глубины упрочненного слоя, являются: накопление внутренних напряжений, в том числе за счет образования в легированном слое новых фаз с различными коэффициентами термического расширения; образование ультрадисперсной структуры [1]. В процессе лазерной обработки и электроискрового легирования фазовые и структурные превращения, происходящие в металлах и сплавах, сопровождаются значительными объемными изменениями и, как следствие, возникают остаточные напряжения [1]. Чаще всего при электроискровом легировании возникают растягивающие напряжения. С увеличением толщины в легированном слое возникают трещины, обусловленные остаточными напряжениями в покрытии [1,2].

Поэтому были проведены исследования образцов, упрочненных ступенчатым способом с целью определения оптимальных режимов, обеспечивающих минимальные напряжения в поверхностных слоях за счет наложения напряжений и взаимного их уменьшения.

Целью работы является изучение зависимости остаточных напряжений в упрочненном комбинированной обработкой слое от фазового состава.

Методика исследований

Для исследований использовались образцы стали Х12М в закаленном состоянии [2]. После низкого отпуска при температуре 160°С была получена мартенситная

структура. Твердость поверхностного слоя 62…63 HRC, сердцевины 40…45 HRC. Лазерная обработка проводилась на непрерывном лазере Комета-2 с последовательным увеличением энерговклада. Электроискровое легирование осуществляли на установке ЭФИ – 46А. Установка работает на шести режимах, оснащена генератором импульсов. Для исследований был выбран твердый сплав ВК – 8 .

Режимы обработки выбирались исходя из рекомендаций [3], где отмечено, что упрочнение инструментальных сталей наблюдается в интервале плотностей энергии 0,5·103 - 2·103 Дж/см^2.

Остаточные напряжения I-го ряда измеряли в металлической составляющей покрытий методом рентгеноструктурного анализа. Одновременно изучали фазовый состав покрытий. Расчет остаточных напряжений производили по формуле простой обратной съемки:

$$(\sigma_1 + \sigma_2) = -\frac{\Delta \ddot{\upsilon}}{\ddot{\upsilon}} \cdot \frac{E}{\mu} = \frac{\ddot{\upsilon}_{\acute{\upsilon}\varsigma.} - \ddot{\upsilon}_{\nu\beta o\pi.}}{\ddot{\upsilon}_{\acute{\upsilon}\varsigma.}} \cdot \frac{E}{\mu},$$

где $\sigma_1 + \sigma_2$ — сумма главных напряжений в плоскости, параллельной поверхности покрытия, МПа; $\ddot{\upsilon}_{\acute{\upsilon}\varsigma.}$, $\ddot{\upsilon}_{\nu\beta o\pi.}$— экстраполированный период решетки ненапряженного эталона и твердого раствора γ -*Ni* в покрытии, нм; E — модуль Юнга, μ— коэффициент Пуассона твердого раствора.

Таким образом, результатом расчета явились величины главных напряжений, действующих в объеме, не превышающем глубины поглощения рентгеновских лучей (не более 10 мкм), в плоскости, параллельной поверхности образца. При этом можно оценить изменение напряженного состояния в зависимости от направления движения лазерного луча.

Расчет периода решетки производили методом экстраполяции с использованием метода наименьших квадратов по программе PERCUB, входящей в состав пакета программ «ARSANAL». Средняя квадратичная погрешность составляла ± 0,01 нм, таким образом, напряжения определены с погрешностью ± 30…40 МПа.

Смещение линий на рентгенограмме наблюдалось под действием двух факторов: остаточных напряжений и легирования твердого раствора в процессе комбинированного упрочнения. Ненапряженным эталоном мог бы служить только материал каждого из исследуемых покрытий, отделенный от подложки, приведенный в ненапряженное состояние, но полностью сохранивший отличия своего состава от прочих. Поэтому плоский торец цилиндрического образца после термообработки подвергали обточке твердосплавным резцом таким образом, чтобы периферийная часть покрытия шириной 4 мм была превращена в хрупкую стружку, которую просеивали через сито с ячейкой 0,2 мм для исключения в эталоне крупных частиц пластически деформированного металла.

Съемку производили на дифрактометре Дрон -3,0 в медном излучении с графитовым монохроматором при угловой скорости счетчика 1 градус/мин. Образцы снимали до получения линий на задних углах (Θ свыше 76 град).

Обсуждение результатов.

В таблице 1 приведен фазовый состав упрочненных слоев при различных видах обработки. Из результатов фазового анализа упрочненных образцов видно, что в приповерхностном слое присутствуют фазы, характерные для электроискрового легирования твердыми сплавами группы ВК - С, W_2C. Значительное количество в поверхностном слое составляют карбиды хрома Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$. Наибольшее количество карбидных фаз выявлено в образцах? подвергнутых лазерной обработке с последующим электроискровым легированием.

Сопоставление полученных данных позволяет сделать вывод о том, что последовательное упрочнение лазером и электроискровое легирование приводит к образованию непосредственно у поверхности высоколегированного слоя, состоящего в основном из карбидов вольфрама WC, W_2C и карбидов хрома Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$.

Таблица 1. Фазовый состав после различных видов обработки

Виды упрочнения образцов	Природа фаз	Сумма интенсивностей, мм	Содержание фазы % по объему
1	2	3	4
Объемная термическая обработка (закалка + низкий отпуск)	Твердый раствор на основе α– Fe Cr_7C_3 Cr_3C_2 $Cr_{23}C_6$	721 245 7 15	73 24,8 0,7 1,5
Электроискровое легирование (ЭИЛ) сплавом ВК-8	α– Fe $Cr_{23}C_6$ α – кобальт Cr_7C_3 WC M_3C (легиров. цементит)	216 97 63 328 810 33	14 6,3 4,1 21,2 52,4 2
ЭИЛ и лазерная обработка V= 13 мм/с $q = 0,1x10^9$ Вт/м^2	α-Fe Cr_7C_3 $Cr_{23}C_6$ Cr_3C_2 M_3C	753 303 43 20 24	65,9 26,5 3,8 1,7 2,1
ЭИЛ и лазерная обработка V= 13 мм/с, $q = 0,2x10^9$ Вт/м^2	α-Fe Cr_7C_3 Cr_3C_2 WC M_3C	183 303 12 276 47	22,3 36,3 1,5 33,6 5,7
Лазерная обработка и ЭИЛ V = 13мм/с, $q = 0,05x10^9$ Вт/м^2	Cr_7C_3 WC Cr_3C_2 $Cr_{23}C_6$ M_3C	513 146 402 58 32 76	41,8 11,9 32,8 4,7 2,6 6,2
Лазерная обработка и ЭИЛ V= 13 мм/с $q = 0,1x10^9$ Вт/м^2	α – железо M_3C Cr_7C_3 WC $Cr_{23}C_6$	104 12 346 248 135	12,3 1,5 40,9 29,3 16
Лазерная обработка и ЭИЛ V = 13 мм/с, $q = 0,15x10^9$ Вт/м^2	α – Fe $Cr_{23}C_6$ W_2C Cr_7C_3 WC M_3C	41 38 6 401 255 81	5 4,6 0,7 48,8 31 9,9
Лазерная обработка и ЭИЛ V = 13 мм/с, $q = 0,2x10^9$Вт/м^2	α – Fe $Cr_{23}C_6$ W_2C WC Cr_7C_3 M_3C	86 37 5 289 325 105	10,2 4,4 0,6 34,1 38,4 12,3

Увеличение количества карбидов хрома объясняется тем, что в процессе лазерной обработки поверхности происходит значительная активация поверхности, образуется энергонасыщенный слой с множеством вакансий и дислокаций. Это создает хорошие условия для прямой и обратной диффузии. В результате в процессе электроискрового легирования кроме обычной диффузии элементов электрода в активированную подложку наблюдается активная диффузия хрома в зону микрорасплава при электроискровом легировании с образованием карбидов хрома, имеющих текстурованную кристаллическую решетку.

При фазовом анализе обнаружена важная особенность структуры - аксиальная кристаллографическая текстура, то есть преимущественная ориентировка определенного кристаллографического направления большинства кристаллитов покрытия (таблица 2). У фазы Cr_7C_3 к поверхности образца ориентирована плоскость (331), а у карбида $Cr_{23}C_6$ - плоскость (531), как обычно у кубических структур, нормально поверхности ориентировано направление с теми же индексами (531). Обнаруженное явление аналогично текстуре, обнаруживаемой в диффузионных хромокарбидных слоях после диффузионного хромирования высокоуглеродистых сталей.

Известно, что между степенью совершенства аксиальной кристаллографической текстуры и рабочими свойствами поверхностей (например износостойкостью) существует положительная корреляция.

Таблица 2. Степень совершенства аксиальной текстуры

Вид упрочнения образца	(531) P_t $Cr_{23}C_6$	(331) P_t $Cr_{23}C_6$
Электроискровое легирование (ЭИЛ) сплавом ВК-8	14,5/0,62	34,9/0,62
ЭИЛ и лазерная обработка $q = 0{,}2x10^9$ Вт/м^2	22,7/0,96	31,8/0,57
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}1x10$Вт/м^2	22,1/0,93	48,3/0,86
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}15x10^9$Вт/м^2	21,4/0,90	39,9/0,65
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}2x10^9$Вт/м^2	15,9/0,67	48,4/0,87

Все исследованные снимки содержали 6 линий твердого раствора на основе железа, что позволило рассчитать методом экстраполяции период кубической решетки α - фазы. Данные приведены в таблице 3.

Таблица 3. Период решетки Fe-α

Вид упрочнения	Экстраполированный период α, A^0
Объемная термическая обработка (закалка + низкий отпуск)	2,8760
Электроискровое легирование (ЭИЛ) сплавом ВК – 8	2,8625
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}05x10^9$ Вт/м^2	2,8708
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}1x10^9$ Вт/м^2	2,8595
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}15x10^9$ Вт/м^2	2,8843
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}2x10^9$ Вт/м^2	2,8639

Период кубической решетки чистого железа $\alpha_{табл.} = 2{,}8664$ A^0

Таким образом, лишь в одном случае из восьми значение периода решетки близко к табличному. Объяснить увеличение периода решетки α - твердого раствора

несложно: это – следствие растворения в железе легирующих элементов по механизму замещения. Расчет по программе VEGARD показывает значения концентраций примесей, приведенные в таблице 4.

Как видно из результатов, ступенчатая обработка способствует введению в твердый раствор хрома и вольфрама в незначительных количествах.

Кроме железа во всех исследованных образцах в значительных количествах содержатся карбиды вольфрама и хрома. Был произведен расчет периодов гексагональной решетки карбида Cr_7C_3. Результаты расчета и анализ причин их отклонений приведены в таблице 5.

Таблица 4. Концентрация примесей в твердом растворе на основе α– Fe

Вид упрочнения образца	Природа возможной примеси	Концентрация примеси в %
Объемная термическая обработка	хром	1,79
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}05x10^9$ Вт/м^2	хром или вольфрам	3,92 5,50
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}15x10^9$ Вт/м^2	хром и вольфрам	7,32 5,50

Таблица 5 Расчет периода решетки Cr_7C_3 и вероятная причина отклонения от табличных данных

Вид упрочнения образца	Периоды решетки Cr_7C_3 A^0		Вероятная причина отклонения от табличных значений	
		C		
	табличные значения		легирование железом, % ат	Дефицит углерода в решетке, % ат
	14,016	4,524		
1	2	3	4	5
Объемная термическая обработка	10,2154	4,7536	216	60
Электроискровое легирование	11,0889	4,5990	180	50
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}05x10^9$ Вт/м^2	11,2611	4,4725	176	53
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}1x10^9$ Вт/м^2	13,3104	4,2442	75	21
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}15x10^9$ Вт/м^2	14,1138	4,4689	Нет	нет
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}2x10^9$ Вт/м^2	13,8794	4,4731	15	4

Таким образом, наиболее вероятная причина уменьшения периодов решетки карбида хрома – значительный дефицит углерода. Обращает на себя внимание то, что в случае лазерной обработки отклонения периодов решетки Cr_7C_3 – это не карбидная фаза стали (в этом случае его состав был бы аналогичен полученному на образцах без покрытия), а новая фаза, образовавшаяся в результате лазерной обработки и электроискрового легирования.

Были исследованы остаточные напряжения в поверхностном слое по оригинальной методике. Результаты представлены в таблице 6.

Результаты показывают, что напряжение во всех упрочненных образцах имеют положительный знак (растягивающие). Напряжения являются результатом неблагоприятного сочетания упругих деформаций, вызванных быстрым охлаждением, фазовыми превращениями и другими факторами.

Таблица 6 – Остаточные напряжения упрочненного слоя, вызванные фазовыми превращениями.

Вид упрочнения образцов	Остаточные напряжения, МПа
Электроискровое легирование	183
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}1 \times 10^9$ Вт/м^2	98
Лазерная обработка и ЭИЛ $q = 0{,}2 \times 10^9$ Вт/м^2	100

Необходимо отметить, что величины остаточных напряжений, приведенные в табл. 6, являются приблизительными, так как при исследованиях не были использованы напряженные эталоны. Истинные значения напряжений, по-видимому, выше, хотя несомненно то, что они не достигают предела прочности твердого раствора, так как отсутствуют микротрещины, а также то, что они имеют положительный знак непосредственно у поверхности (поскольку иначе объяснить уменьшение периода решетки железа не удается).

В свою очередь при лазерной обработке при плотностях мощности (до $2 \cdot 10^4$ Вт/см^2) у всех сталей в поверхностном слое формируются растягивающие макронапряжения, и уменьшающиеся у стали ХІ2М к границе зоны термического воздействия.

При малых плотностях мощности, когда обрабатываемый материал нагревается ниже температуры плавления, в поверхностном слое развиваются довольно большие растягивающие напряжения, причем область их распространения соизмерима с глубиной зоны термического воздействия. С увеличением плотности мощности лазерного излучения, сопровождающимся появлением на поверхности тонкого слоя оплавленного металла, наблюдается снижение растягивающих напряжений и выравнивание их по глубине, и появляются сжимающие напряжения [1].

Сталь ХІ2М в отличие от сталей ХВГ, У8А,45 при всех плотностях мощности имела растягивающие остаточные напряжения (причем наименьшие при плотности мощности 200 кВт/см^2) [1].

В работе [1] установлено, что снижение напряжений и более равномерное распределение их по толщине способствует увеличению толщины покрытия, его адгезионной прочности.

Для оценки остаточных напряжений в упрочненном слое после ступенчатой обработки использовались образцы из стали ХІ2М. Гистограмма прогибов образцов при различных условиях обработки приведена на рисунке 1.

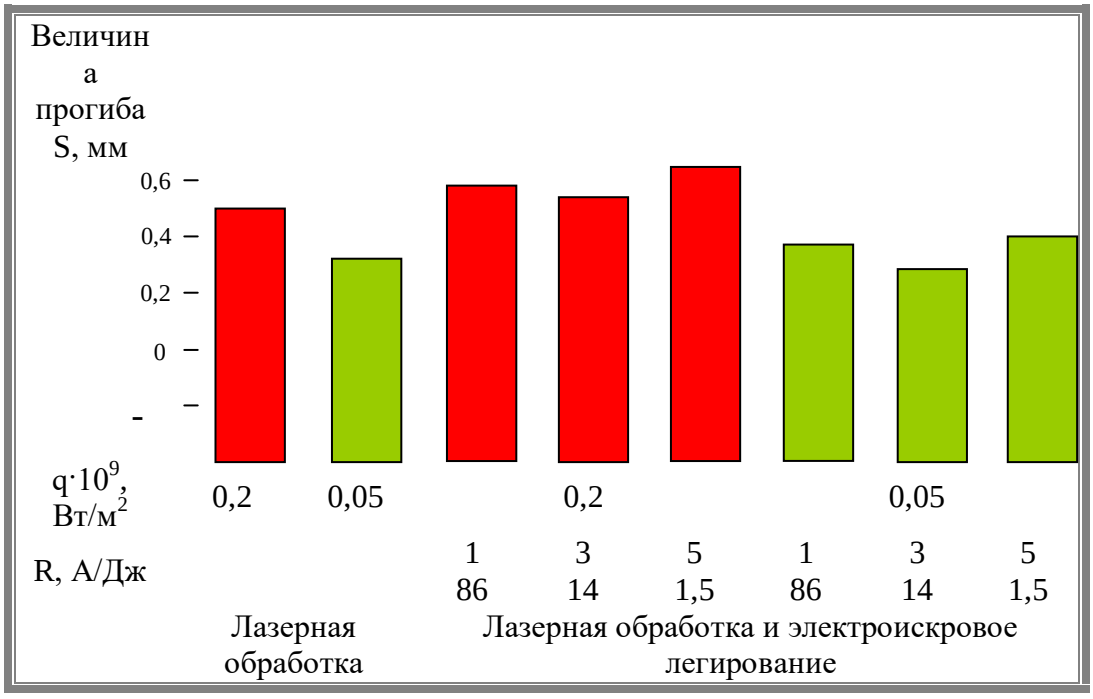


Рис. 1. Величина прогиба образцов при различных видах обработки

Обобщая проведенные исследования можно сделать вывод, что в результате ступенчатого упрочнения лазерной обработкой с последующим электроискровым легированием в поверхностном слое происходят следующие изменения:

- в приповерхностном слое возрастает количество карбидов хрома;
- возрастает степень легирования твердого раствора железа хромом и вольфрамом;
- вновь образовавшиеся карбиды хрома обладают достаточно совершенной аксиальной текстурой;
- состав образовавшихся карбидов хрома близок к равновесному; для этих фаз характерен дефицит углерода.
- в приповерхностном слое формируются растягивающие напряжения, причем в образцах, упрочненных лазером с электроискровым легированием несколько ниже, чем в образцах без лазерной обработки, что позволяет предположить о влиянии лазерной обработки на суммарные напряжения.

Список литературы: 1. Коваленко В.С. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов/ Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головко Л.Ф., Подчерняева И.А.// М.: Наука,1986., 276 с. **2.** Полевой С.Н. Упрочнение металлов : справочник/ Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. – М.: Машиностроение, 1986. 320 с. **3.** Верхотуров А.Д. Электродные материалы для электроискрового легирования/ Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф.. – М: Наука, 1988.- 224 с.

УДК 622.267

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ГОРНОГО МАССИВА НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Клишин В. И., Тайлаков О. В., Опрук Г. Ю., Соколов С. В., Телегуз А. С., Нестерова О. А. *(Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, г.Кемерово, пр. Ленинградский, 10, 650065, Россия)*
Тел./Факс: +7(384-2) 45-20-63; E-mail: klishinvi@icc.kemsc.ru

Abstract: *The experience of controlling the geo-mechanical state of the rock massif during hard roof coal seam excavation that includes drilling relief wells in a coal seam and weakening of a roof by directional hydraulic fracturing method is presented in the paper. The results of coal-bearing massif stress-strain state monitoring made by applying geophysical and seismic equipment together with instrumental observation of the preliminary working roof, soil, and sides convergence in a bearing pressure zone are given. The scheme of directional hydraulic fracturing of the hard roof together with the scheme of drilling the relief wells in a coal seam are also introduced in the paper.*
Key words: *directional hydraulic fracturing, hard roof, stress state of a seam, complex control method, coal seam relief/discharge, seismic exploration.*

Подземная выемка угля на пластах с труднообрушаемой кровлей с применением механизированных комплексов и длинностолбовой системы отработки сопряжена с рядом трудностей, возникающих по причине зависания и последующего крупноблочного обрушения основной кровли.

В процессе ведения подготовительных и очистных работ в результате выемки горной массы в массиве горных пород происходят динамические изменения при распределении веса подработанной (зависшей) горной толщи на боковые породы, а также при разгрузке пород почвы горной выработки. Наибольших масштабов данное явление достигает в процессе ведения очистных работ по длинностолбовой системе отработки с полным обрушением пород кровли. Однако, одной из основных сложностей при решении проблем безопасности и эффективности этой системы отработки, является обеспечение и контроль своевременного и полного обрушения пород основной и непосредственной кровли. Зависание кровли над выработанным пространством приводит к увеличению зон повышенного горного давления и напряжений впереди очистного забоя и в боковых породах, что способствует возникновению динамических явлений и разрушению краевой части пласта и вмещающих пород и даже пород почвы в выработанном пространстве за очистным забоем.

Зависание пород кровли также косвенно влияет на аэрологическую безопасность: часть воздуха уходит в выработанное пространство, нарушая проветривание очистного забоя и создавая опасность возникновения эндогенных пожаров; при залповом крупноблочном обрушении породы кровли вытесняют скопившийся в выработанном пространстве газ в очистную выработку. Это послужило одной из причин крупных аварий на шахтах «Тайжина» – 2004 г. и «Ульяновская» – 2007 г. (ОАО «Южкузбассуголь»), где крупноблочное обрушение пород кровли в выработанном пространстве на большой площади к образованию избыточного вентиляционного давления, выделению метана и угольной пыли в действующие горные выработки [1]. На шахте №1-5 рудника «Баренцбург» в 2004 г. зависание пород основной кровли и увеличение горного давления привело к возникновению горного удара с резким вспучиванием пород почвы и смещению лавного конвейера и комбайна на 40 см в сторону секций механизированной крепи [2].

Для предотвращения зависания основной кровли пласта на больших площадях применяется метод направленного гидроразрыва (НГР), который заключается в создании искусственной направленной трещины в породах основной кровли. Направленная трещина способствует снижению шага посадки основной кровли и подбучиванию толщи пород основной кровли, залегающей на большей глубине. Опыт применения направленного гидроразрыва на шахтах Кузбасса показал его эффективность при снижении первичного и последующих шагов обрушений основной кровли [3, 4] и охране подготовительных выработок, поддерживаемых на границе с выработанным пространством [5].

Консоль пород основной кровли, зависшая над выработанным пространством, способствует увеличению горного давления на краевую часть пласта и целики угля в зоне опорного давления, которые в свою очередь передают давление на породы непосредственной почвы пласта, это приводит к ее пучению в подготовительных выработках, очистном забое [2] и выработанном пространстве. С целью предотвращения пучения почвы и разгрузки угольного пласта широко применяется способ бурения разгрузочных скважин в пласте угля, снижающий напряжения в краевой части пласта и целиках [6], а также передаваемое ими горное давление на породы почвы.

В Кузбассе на шахте «Листвяжной» был применен комплексный метод управления геомеханическим состоянием горного массива, включающий бурение разгрузочных скважин и метод направленного гидроразрыва, при отработке выемочного столба лавы 823. Это позволило снизить конвергенцию кровли и почвы вентиляционного штрека 823 в зоне опорного давления (см. табл. №1).

Таблица 1. Измерения конвергенции кровли и почвы вентиляционного штрека №823 в зоне опорного давления

Номер замерной станции	Пикет	Высота выработки, м			Ширина выработки, м	Сечение выработки в свету, м^2
		03.03.21	06.03.21	09.03.21		
1	25	3,5	3,5	3,5	5,8	20,4
2	26	3,0	3,0	3,5	5,7	17,3
3	27	2,8	2,8	3,0	5,4	15,5
4	28	2,8	2,8	2,2	5,7	16,2
5	29	2,8	2,8	1,9	5,5	15,7
6	30	2,5	2,5	1,7	5,3	13,4
7	31	2,3	1,7	1,3	5,9	14
8	32	1,7	1,5	1,1	4,9	8,2
9	33	1,8	1,4		4,6	8,4
10	34	1,4	1,1		4,9	7,3
11	35	1,2	1-0,9		4,5	5,8
12	36	1,5			6	9,3
13	37	1,4			4	5,4
14	38	1			5,5	5,7

Проектная высота выработки составляет 3,5 м, шаг между пикетами – 10 м. После начала ведения комплекса работ по разгрузке пласта и разупрочнению кровли значительно снизилась интенсивность пучения почвы и смещений кровли при подходе очистного забоя. Так, 03.03.2021 г. проектное сечение выработки сохранялось на

расстоянии не менее 130 м до очистного забоя, а 09.03.2021 г. – на расстоянии не менее 80 м.

Схема расположения разгрузочных скважин и скважин НГР представлена на рисунках №№1-4.

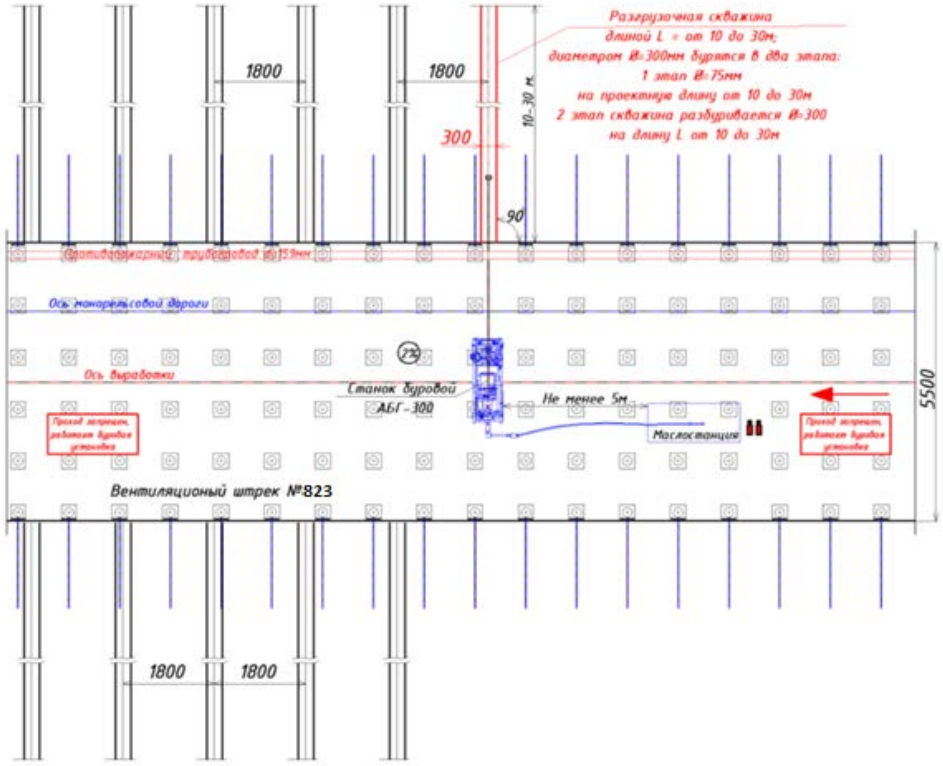


Рис. 1. Схема бурения разгрузочных скважин в вентиляционном штреке 823

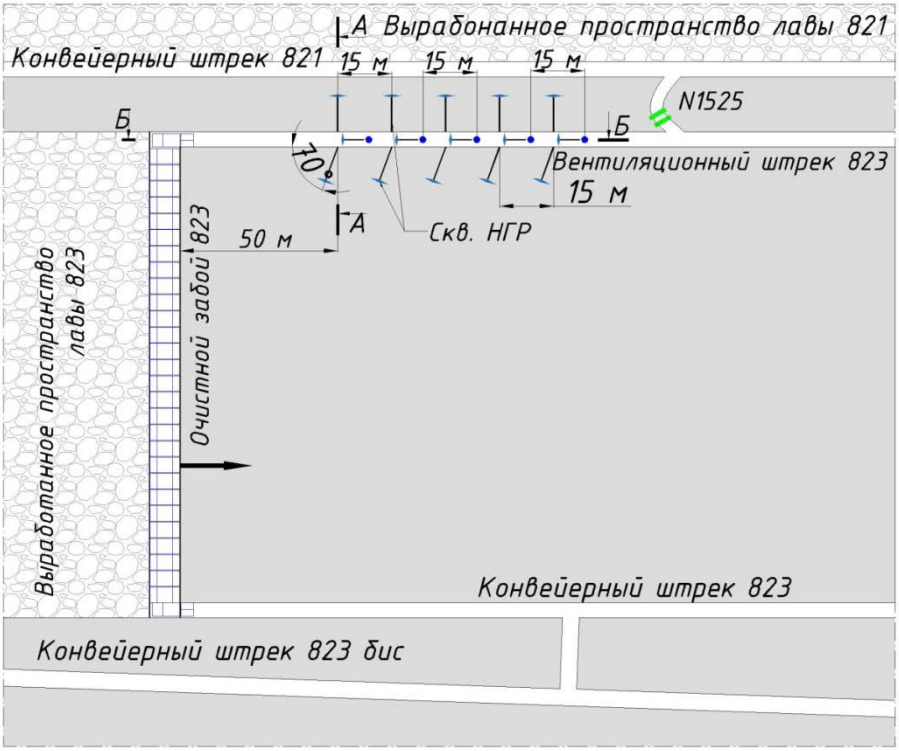


Рис. 2. Схема расположения скважин НГР в вентиляционном штреке 823

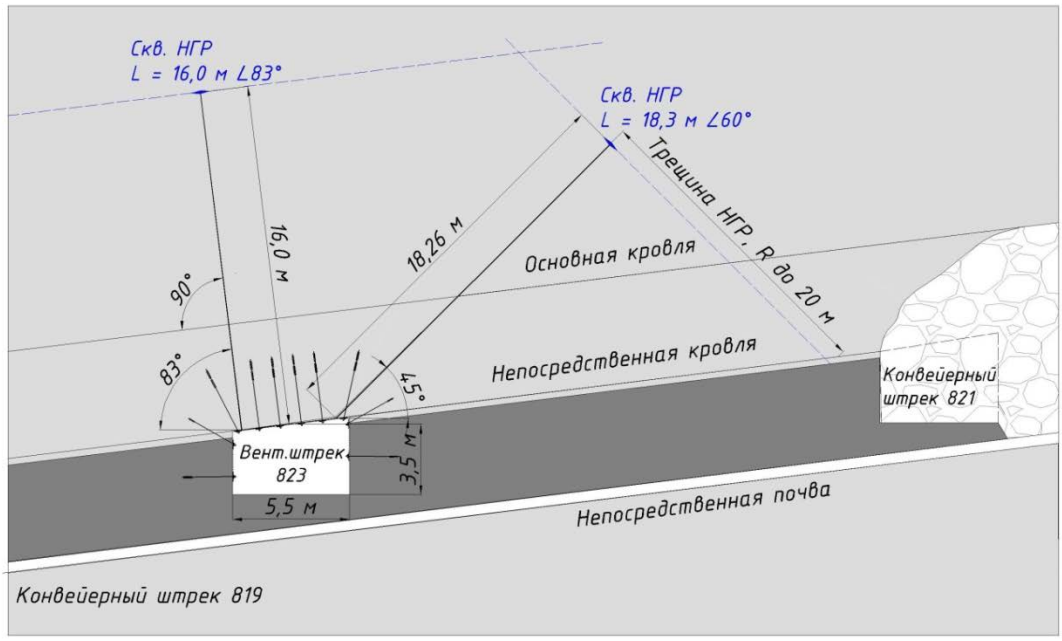


Рис. 3. Вертикальная схема заложения скважин НГР (Вид А-А)

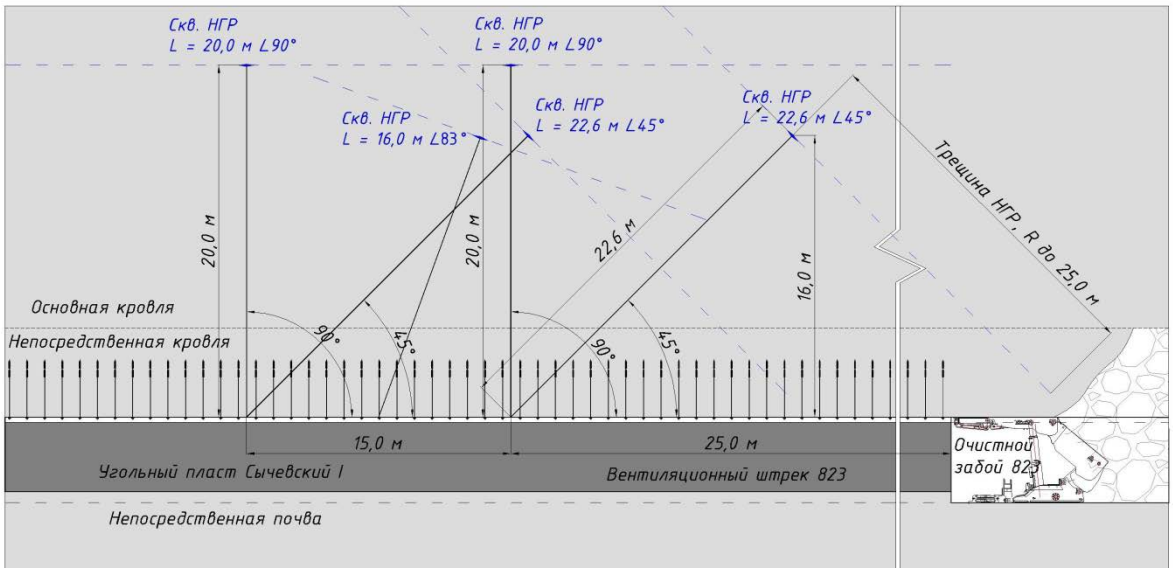


Рис. 4. Вертикальная схема расположения скважин НГР глубокого заложения (Вид Б-Б)

Для разгрузки краевой части пласта и межлавного целика в вентиляционном штреке 823 были использованы скважины НГР, пробуренные с наклоном на целик угля и выемочный столб с шагом заложения скважин равным 15,0 м, и разгрузочные скважины, пробуренные в наиболее мощной пачке угля.

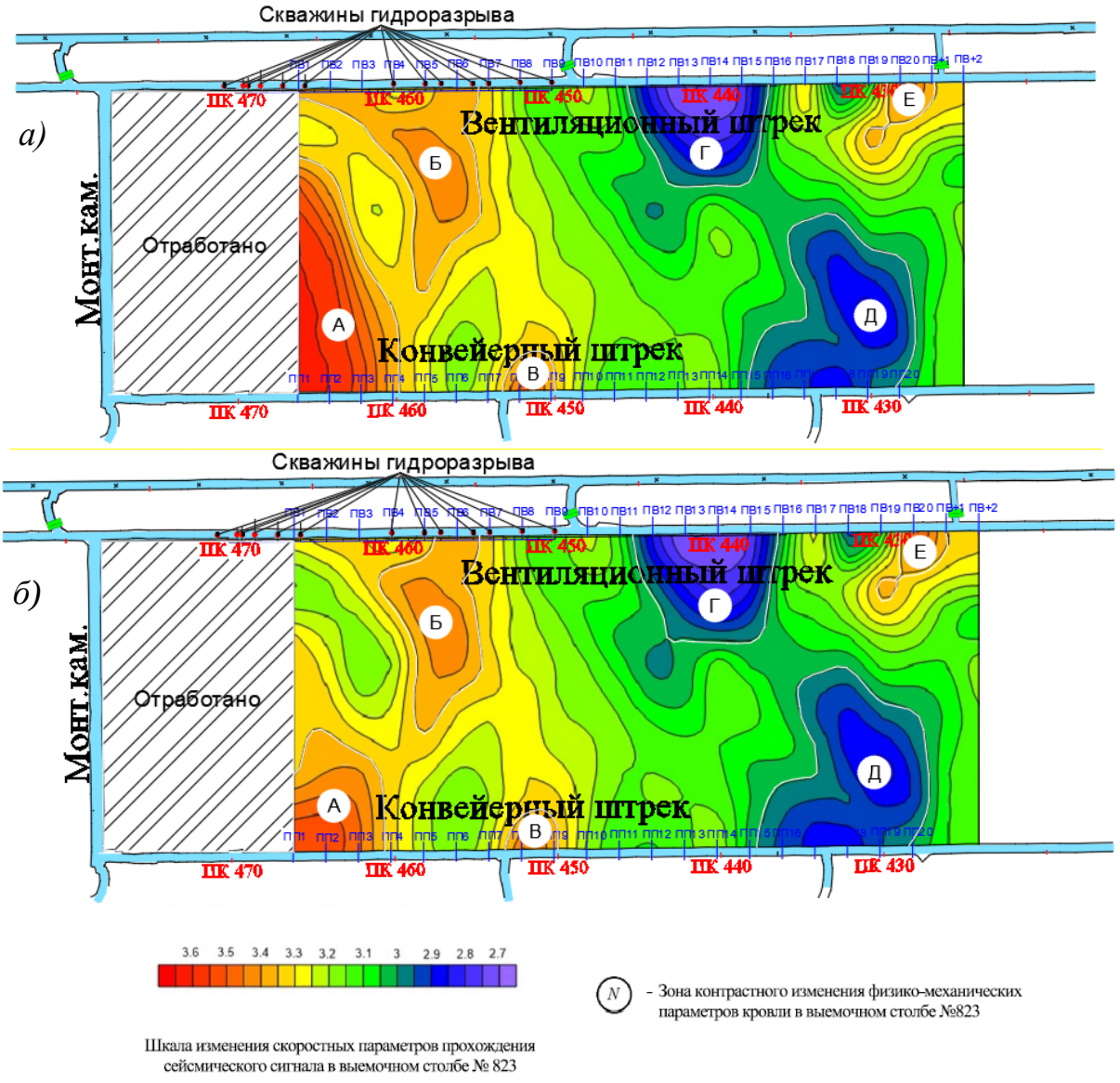
С целью снижения последующих шагов обрушения пород основной кровли пласта Сычевский I дополнительно производилось разупрочнение кровли скважинами НГР глубокого заложения. Вертикальные скважины НГР длиной 20,0 м обеспечивают расслоение пород кровли и необходимое подбучивание вышележащей толщи, а наклонные скважины длиной 22,6 м отсечение кровли и ликвидацию ее зависания в выработанном пространстве.

Для оценки эффективности мероприятий по разупрочнению кровли проведено ее обследование методом сейсмической томографии до и после гидроразрыва [7-10]. По

результатам сейсмических измерений выполнен анализ параметров сигнала, распространяющегося по активной кровле, и получены горизонтальные геофизические разрезы (рис. 5).

В ходе оценки состояния кровли до гидровоздействия (рис. 5 а) в ее пределах зарегистрированы зоны минимальных скоростей распространения продольных сейсмических волн (< 2.9 км/с): Г, Д и максимальных скоростей: А, Б, В (> 3.40 км/с). Установлено, что участки А, Б и В, исходя из их размеров и расположения, потенциально способны обеспечить формирование протяженного участка труднообрушающейся основной кровли с максимальными ее проявлениями в пределах зоны А.

По результатам сейсмического просвечивания после НГР (рис. 5 б) зафиксированы изменения состояния активной кровли, выраженные в снижении скоростного фона в исследуемой области и сокращении площади зон А, Б, В. В целом, изменение размеров и взаимного расположения указанных зон в результате гидровоздействия свидетельствуют о разгрузке кровли и снижении вероятности формирования участка труднообрушающейся основной кровли в исследованном интервале.



а) до гидравлического воздействия; б) после гидравлического воздействия

Рис. 5. Результаты сейсмического просвечивания активной кровли

Для оценки площади области распространения разгрузки, дополнительно сформирован сейсмотомографический разрез, характеризующий отношение разницы скоростей, зафиксированных в измерениях до и после гидроразрыва к диапазону их возможного изменения (рис. 6).

По результатам его построения фиксируется незначительные изменения расчетного отношения до 2% в отдельных участках на всем протяжении области измерений, что можно объяснить естественной разгрузкой массива и подвиганием забоя в интервале между первым и вторым измерением. Также, на геофизическом разрезе зарегистрирована зона 1 с изменением расчетного отношения от 3 до 23%. Контуры данной зоны можно сопоставить с площадью области распространения разгрузки, происшедшей в результате проведенного гидровоздействия.

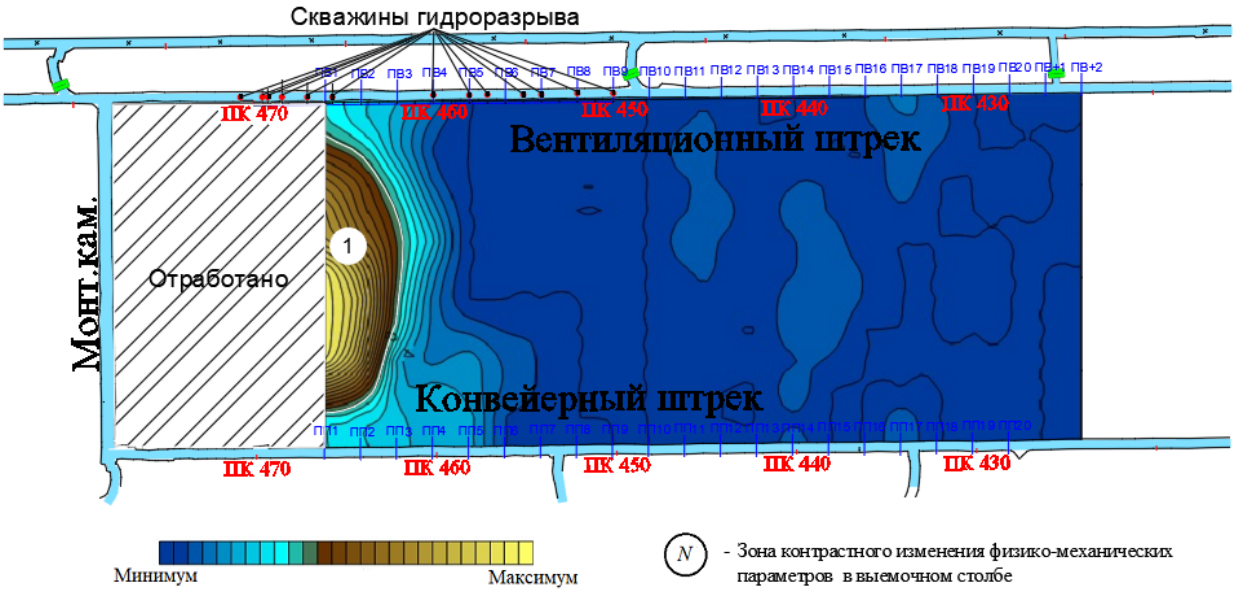


Рис. 6 Сейсмотомографический разрез, отражающий степень разгрузки активной кровли, зафиксированную в измерениях до и после гидровоздействия

Выводы

1. При отработке угольных пластов с полным обрушением пород кровли и оставлением межлавных целиков ограниченных размеров, происходит наложение зон опорного давления от ранее отработанной и действующей лавы. Передача нагрузки от горного давления на целики вызывает появление на данных участках высоких горизонтальных напряжений, а при наличии слабых пород непосредственной почвы пласта нагрузка от целика и краевой части пласта передается в почву, что приводит к ее пучению и стремительному снижению поперечного сечения выработки в свету по мере подвигания механизированного комплекса.
2. Осуществление комплекса мер по управлению геомеханическим состоянием горного массива, включающих разгрузку угольного пласта и разупрочнение пород основной кровли методом направленного гидроразрыва, позволило значительно снизить конвергенцию пород кровли, почвы и боков вентиляционного штрека 823 по мере подвигания забоя лавы 823.
3. По результатам выполненных исследований методом сейсмической томографии установлено, что фиксируемое разупрочнение активной кровли, выраженное изменением совокупной площади и взаимного расположения зон максимальных скоростей: А, Б, В на горизонтальном геофизическом разрезе активной кровли после гидравлического воздействия и наличием зоны 1 на разрезе, отражающем степень

разгрузки активной кровли, свидетельствует об эффективности выполненных мероприятий по направленному гидроразрыву.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).

Список литературы: 1. Оганесян С.А. Авария в Филиале «Шахта Тайжина» ОАО ОУК «Южкузбассуголь» - хроника, причины, выводы // Уголь, 2004, № 6, с.25-28. **2.** Клишин В.И., Рашевский В.В., Артемьев В.Б и др. Труднообрушаемые кровли: проблемы и решения для механизированных забоев современного технического уровня угольных шахт / В.И. Клишин, В.В. Рашевский, В.Б. Артемьев, К.Н. Копылов, С.В. Клишин, Г.Ю. Опрук. М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2016. – 480 с. : табл., ил. – (Библитека горного инженера. Т. 3 «Подземные горные работы». Кн. 13). **3.** Инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках. – Л: Министерство угольной промышленности СССР. Всесоюз ордена Трудового Красного Знамени НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела., 1991. – 102 с. **4.** Клишин В.И. Опыт применения направленного гидроразрыва основной кровли при выводе механизированного комплекса из монтажной камеры / В.И. Клишин, Г.Ю. Опрук, А.В. Сентюрев, А.В. Николаев // Уголь. – 2015. - №11. – С. 12-16. **5.** Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Телегуз А.С., Черноусов П.А., Николаев А.В. Опыт применения технологии направленного гидроразрыва пород кровли с целью обеспечения устойчивого состояния сохраняемой выработки в условиях шахты "Есаульская" // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т – Новокузнецк, 2017. – №3. С.177-181. **6.** Телегуз А.С. Мониторинг комплекса мероприятий по разгрузке межлавного целика методом акустического зондирования // Ежегодная конференция молодых ученых ФИЦ УУХ СО РАН «Развитие – 2020» [Электронный ресурс]: сборник трудов конференции 18 – 20 мая 2020 г. ; отв. ред. А.Е. Майоров. Электронные текстовые дан. – Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2020. С. 79-87. **7.** Jackson M.J., Tweeton D.R. MIGRATOM – Geophysical Tomography Using Wavefront Migration and Fuzzy Constraints // Report of Investigations 9497, Bureau of Mines [http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-0457/] (Дата обращения 08.06. 2021 г.). **8.** Сальников А.С., Канарейкин Б.А., Долгова С.В., Дунаева К.А., Сагайдачная О.М., Харламов А.С. Технология и результаты сейсмотомографических исследований на проходящих волнах в угольных шахтах Кузбасса // Технологии сейсморазведки, № 2, 2012, с. 74–88. **9.** Тайлаков О.В., Соколов С.В., Герасимов А.В., Колмакова А.А. Определение аномальных тектонических зон, характеристик устойчивости и управляемости кровли методом сейсмического просвечивания на проходящих волнах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S49. С. 275-282. **10.** Klishin V. I., Taylakov O. V., Opruk G. Yu., Makeev M. P., Sokolov S. V., Teleguz A. S. and Tatsienko A. L. Seismic monitoring of hydrodynamic impact on coal seam at interval hydraulic fracturing // International Scientific Conference «Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources», 4–7 June 2019, Novokuznetsk, Russian Federation, Volume 377, №012034, pp. 1-7 (DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012034).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕМПФЕРОВ СУХОГО ТРЕНИЯ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Козырев Д.Л. *(ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»)*
E-mail: kozyrev.dd@yandex.ru

Abstract: *The article is devoted to experimental studies of a lever vibration protection system for cars based on a friction damper. The main types of classification of friction dampers and schemes of their use in vibration protection systems are presented. Conclusions are drawn and recommendations are made for the formation of a methodology for experimental studies of friction dampers.*
Key words: *friction damper; vibration protection system; lever relaxation suspension; experimental stand; oscillograms of motion.*

Работа фрикционных демпферов основывается на трении внешних поверхностей твердых рабочих элементов. Основными достоинствами фрикционных демпферов являются простота конструкции, устойчивость к мелким повреждениям, относительная простата ремонта. Параметры фрикционных демпферов практически не чувствительны к изменению положения в пространстве. Компенсирующая сила фрикционного амортизатора, в отличии от гидравлического, не зависит от скорости перемещения, что значительно упрощает управление демпфированием. Демпфер сразу включается в работу без переходных процессов. Главный недостаток фрикционных демпферов – износ трущихся поверхностей.

Демпферы с жесткими фрикционными элементами можно классифицируются по способу создания давления на поверхностях трения (амортизаторы с клиновым распором и с распором за счет упругих элементов рис. 1); по роду фрикционных материалов (стальными, металлокерамические, поверхности трения из пластмасс); типу упругих элементов амортизатора (пружинно-фрикционные, резино-фрикционные элементами); характеру совместной работы фрикционных элементов (на амортизаторы с одновременно работающими фрикционными элементами и с фрикционными элементами, не одновременно включающимися в работу); формам силовых характеристик [1 - 2] .

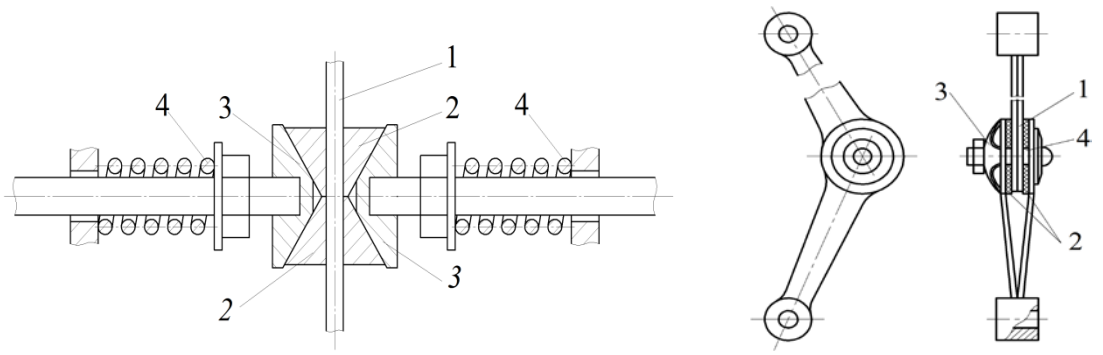


Рис. 1. Фрикционные демпферы с клиновым распором и дисковый демпфер

Существует множество конструкций фрикционных демпферов. На рисунке 1 показано устройство фрикционных демпферов с клиновым распором и дисковая конструкция. В демпферах с клиновым распором давление между трущимися элементами создается эффектом расклинивания. Демпфер на рисунке 1а имеет шток 1, передающий вибрацию, клинья 2 и прижимные клинья 3. Пружины 4 создают

необходимое усилие прижатия. При наличии дополнительного механизма перемещая прижимных клиньев 3 можно выключать или включать демпфер в работу, осуществляя тем самым управление демпфированием. На рисунке 2б изображен дисковый фрикционной демпфер. При повороте трение между диском 1 и прижимными дисками 2 создает тормозящий момент. Тарельчатая пружина 3 обеспечивает необходимую силу прижатия. Перемещая в продольном направлении ось 4 и изменяя силу прижатия, возможно управлять демпфированием.

Важнейшим аспектом при этом является выбор материалов трущихся поверхностей. Так стальные трущиеся поверхности показывают нестабильность коэффициента трения в процессе эксплуатации. К фрикционной паре можно предъявить следующие требования: 1) изменение коэффициента трения в процессе эксплуатации должно быть не значительным; 2) значение коэффициента трения должно бать достаточно высоким; 3) износ трущихся поверхностей должен быть минимален; 4) в тоже время поверхности не должны слипаться (схватываться), так как это приводит к заклиниванию.[1-3]

Наличие в конструкции ненагруженного упругого элемента у прощает процесс оптимизации параметров подвески, так как параметры релаксационного элемента возможно варьировать независимо от упругости несущего элемента[4]. Конструктивные реализации рычажных подвесок также довольно разнообразны. Применение рычажных схем в конструкции подвески позволяет уменьшить габаритные размеры, дает возможность откалибровать виброзащитные свойства путем изменения соотношения плеч рычага. Если центр масс рычага не лежит на оси вращения, то такой рычаг может работать как динамический гаситель. [3-4] На рисунке 2 представлены некоторые возможные схемы рычажных подвесок.

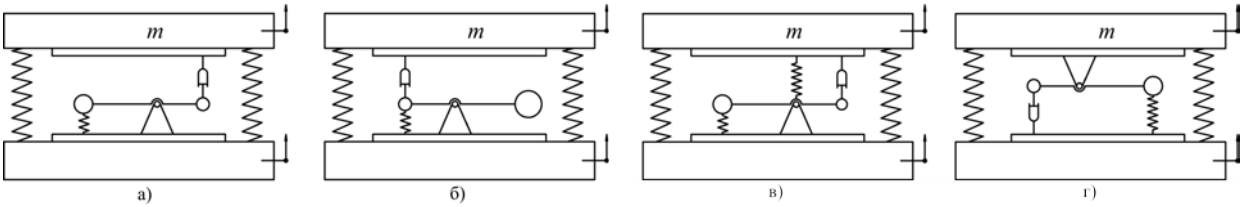


Рис. 2. Схемы рычажных подвесок

Стоит отметить, что рычажные схемы подвесок, как правило, имеют несущие упругие элементы, а упругие элементы, соединенные непосредственно с плечами рычага, не нагружены в статическом состоянии, что дает право тоже отнести такие схемы к релаксационным.

Различные варианты схем виброзащиты имеют свои преимущества при определенных внешних вибрационных воздействиях, однако полностью избавиться от резонансных явлений путем изменения конструкции не удается [3]. При необходимости работы в различных условиях применяют управляемые подвески, то есть подвески способные изменять свои параметры в зависимости от текущего состояния. При этом наиболее эффективным и простым в реализации способом управления подвеской является управление демпфированием [5].

Экспериментальные исследования лабораторной модели рычажной релаксационной подвески с управляемым демпфированием сухого трения позволяют проверить согласованность законов движения элементов подвески, испытывающей, со стороны вибростенда, циклическое возмущающее воздействие с теоритической моделью. Объектом исследования является лабораторная модель рычажной релаксационной подвески, выполненная, преимущественно, из алюминия и полимерных материалов в минимально возможном масштабе. Источник возмущения – вибростенд

горизонтального действия «Витар 2/9», генерирующий колебания, близкие к синусоидальным, на частотах 0,33…2,5 Гц.

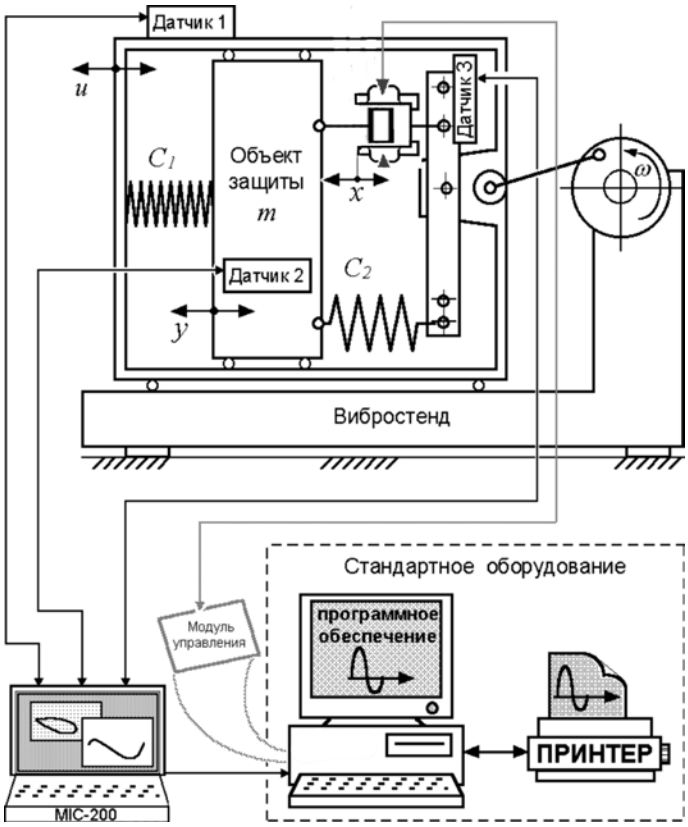


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки

Основные положения методики выполнения экспериментальных исследований рычажной релаксационной подвески с прерывистым демпфированием следующие:

- выбор условий и режимов работы объекта исследований, позволяющих оценить его функциональные свойства в требуемом объеме;
- выбор методов и средств измерений;
- задание возмущающего воздействия, оказывающего требуемое влияние на функционирование объекта исследования;
- обеспечение повторяемости результатов.

В соответствии с задачами и методическими положениями в экспериментальную часть исследований рычажной релаксационной подвески с прерывистым демпфированием включены следующие этапы [3]:

- разработка технических решений реализации экспериментальных моделей рычажной релаксационной подвески с прерывистым демпфированием прямого и непрямого подобия;
- проектирование и изготовление моделей;
- выбор, установка и наладка датчиков, преобразователей и измерительной аппаратуры;
- выбор и настройка программного обеспечения для регистрации и интерпретации экспериментальных данных;
- калибровка измерительного комплекса в целом;
- эксперименты при различных алгоритмах демпфирования;
- сопоставление экспериментальных данных с теоретическими;

– выявление и оценка неучтенных в расчетах факторов и явлений.

Анализ осциллограмм перемещений (рис. 4а) и скоростей (рис. 4б), полученных в ходе испытаний лабораторной модели рычажной релаксационной подвески с управляемым демпфером сухого трения в целом подтвердили результаты, предсказанные используемой математической моделью.

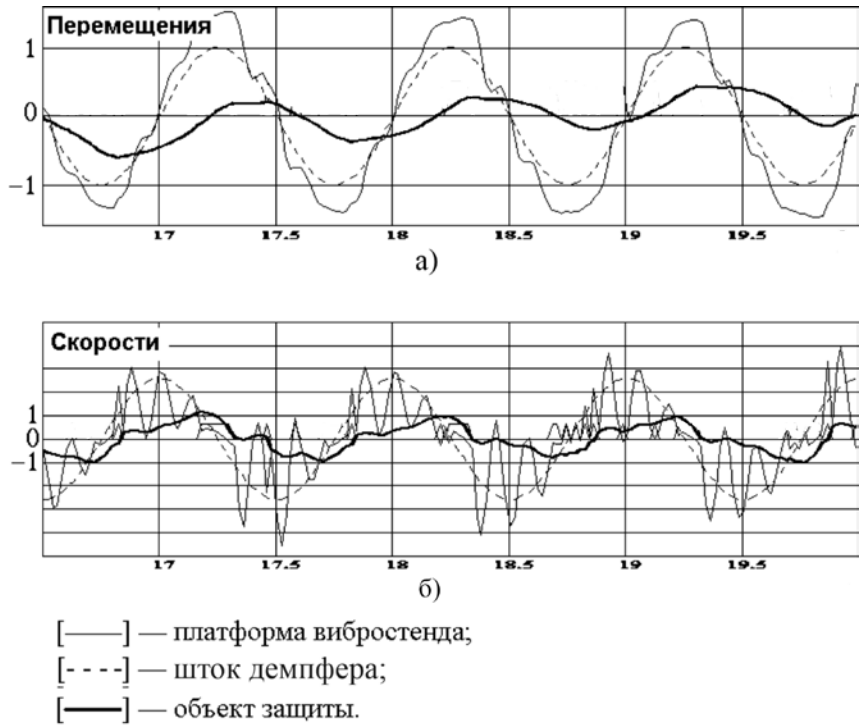


Рис. 4. Осциллограммы движения элементов подвески

Выявлено качественное сходство расчетного и экспериментального законов движения элементов рычажной релаксационной подвески. Спектральный состав колебаний объекта защиты в ряде случаев незначительно отличается от расчетного, что объясняется воздействием неучтенных сил трения в подвижных соединениях системы.

Список литературы: 1. Гусаров, В.И. Виброзащитные механизмы переменного демпфирования систем железнодорожного транспорта / В.И. Гусаров, А.В. Ковтунов, О.П. Мулюкин; под ред. О.П. Мулюкина. – Самара: СамГАСП, 2004. – 178 с. **2.** Смирнов, Г.А. Теория движения колесных машин/Г.А. Смирнов.– М.: Машиностроение, 1990. – 352 с. **3.** 14. Климов, А.В. Динамика рычажной релаксационной подвески с прерывистым демпфированием: дис. … канд. техн. наук: 01.02.06 / А.В. Климов. – Орел, 2001. – 115 с. **4.** Климов, А.В. Влияние массы рычага на динамические характеристики рычажной релаксационной виброзащитной системы / А.В. Климов // Сб. науч. тр., Т.9. – Орел: ОрелГТУ, 1997. – С.156-158. **5.** Белозерова, Е.Б. Повышение эффективности виброизоляции виброактивного оборудования за счет прерывистого демпфирования: дис. … канд. техн. наук: 01.02.06 / Е.Б. Белозерова. – Орел, 2012. – 184 с.

О ПУТЯХ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ: «ЗЕЛЕНЫЙ КВАДРАТ» ИЛИ РАЗНОСТОРОННИЙ МНОГОУГОЛЬНИК

Кондуров Е.П., Кругликов П.А., Сухоруков Ю.Г., Сухорукова Е.А., Хоменок Л.А.
(ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург, Россия)
тел. +79215720039; E-mail: pak47@mail.ru

Abstract: *The main ways and directions of the development of energy technologies in Russia and in the world are considered. A conclusion is made about the importance of the development of nuclear energy and the need to preserve the diversity of energy technologies in the XXI century.*
Key words: *energy technologies, nuclear energy, renewable energy sources, fusion reactor, installed capacity utilization factor.*

В последние годы не стихают дискуссии и появляются различные прогнозы о путях развития отечественной и мировой энергетики. Это вызвано целым рядом обстоятельств: неоднозначным воздействием и влиянием развития возобновляемых источников энергии на нас и окружающий нас мир; определенным торможением и отчасти стагнацией развития ядерной энергетики; неопределенностью и долговременностью развития новых технологий (термоядерной, водородной и др.); нарастающим ощущением конечности минерально-сырьевых ресурсов используемых в энергетике; возможным влиянием политических и военных конфликтов на энергогенерацию.

Несколько лет назад генеральный директор Госкорпорации «Росатом» А. Лихачев в одном из своих выступлений заявил: «Солнце, ветер, вода и атом, дополняя и усиливая друг друга, должны образовать тот пресловутый «зеленый квадрат», который станет основой будущего мирового безуглеродного баланса» [1].

Этот тезис многократно повторялся и варьировался в выступлениях и заявлениях руководителей Росатома (К. Комаров, К. Рудер и др.). Концепция «зеленого квадрата» для Росатома реально воплотилась, кроме строительства АЭС, в создание специализированного подразделения Росатома – «ВетроОГК». Этим подразделением по состоянию на май 2021г., пущены первые ветроэлектростанции (ВЭС) Росатома – Адыгейская мощностью 150 МВт, Кармалиновская (60МВт), Кочубеевская (210МВт). Идет строительство других ВЭС.

С учетом ряда объективных факторов и дискуссионности некоторых положений и концепций попробуем вкратце проанализировать возможное будущее энергетических технологий.

Ориентировочная общая доля различных энергоисточников в мире при производстве электроэнергии в % и ее динамика приведены в таблице 1.

Таблица 1. Производство электроэнергии в мире в %

Вид источника	Уголь, торф	Газ	Нефть	ГЭС	АЭС	Ветер (ВЭС)	Солнце (СЭС)	Прочие
1973 г.	38,3	12,1	24,8	20,9	3,3	0,6 суммарно		
2018 г.	38	23	2,9	16,2	10,1	4,8	2,1	2,9

При этом суммарное производство электроэнергии на 1973 г. составляло 6131 ТВт·час, а на 2018 г. – 26615 ТВт·час. Установленная мощность различных типов электростанций на начало 2018 г. составляла 6892 ГВт и приведена в таблице 2 по типам станций.

Обращает на себя внимание разительное несоответствие доли установленной мощности АЭС и суммарной доли ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) станций с количеством вырабатываемой ими электроэнергии. К этому вопросу мы еще вернемся.

Таблица 2. Установленная мощность электрических станций в мире.

Тип эл. станции		ТЭС	ГЭС	АЭС	ВЭС	СЭС	Прочие
Установленная мощность	ГВт	4279	1267	399	520	393	34
	%	62,1	18,4	5,8	7,5	5,7	0,5

Нужно отметить, что уже к концу 2019 г. мощность СЭС составляла 663 ГВт, а ВЭС – 980 ГВт, демонстрируя высокую динамику роста. [2]

Десятью крупнейшими электростанциями в мире по установленной мощности (на начало 2021 г.) являлись:

1. ГЭС «Three Gorges» (Китай) – 22 500 МВт;
2. ГЭС «Itaipu» (Бразилия) – 14 000 МВт;
3. АЭС «Кашивасака Карива» (Япония) – 8 212 МВт;
4. АЭС «Брук» (Канада) – 6 827 МВт;
5. ГЭС «Саяно-Шушенская» (Россия) – 6 400 МВт;
6. АЭС «Запорожская» (Украина) – 6 000 МВт;
7. АЭС «Гравелин» (Франция) – 5 706 МВт;
8. ТЭС на газе «Сургутская ГРЭС-2» (Россия) – 5 667 МВт;
9. ТЭС на мазуте «Shoaiba plant» (Саудовская Аравия) – 5 600 МВт;
10. ТЭС на угле «Taichung TPP» (Тайвань) – 5 500 МВт.

Состояние и динамика установленных мощностей электрических станций и производства электроэнергии в РФ отражено в таблице 3.

Таблица 3. Установленная мощность и производство электрической энергии электростанциями России в 2020 г. [3]

Показатель		Всего ЕЭС РФ	ТЭС	ГЭС	АЭС	Ветровые (ВЭС)	Солнечные (СЭС)
Установленная мощность	ГВт	245,3	163,3	49,9	29,4	1,03	1,73
	%	100	66,5	20,3	11,9	0,4	0,7
Производство эл. энергии	млрд. кВт·ч	1047,03	620,9	206,3	215,7	2,1	2
	%	100	59,3	19,7	20,6	0,2	0,1

Нужно отметить, что в РФ установленная мощность СЭС составляла на 2017 г. 0,57 ГВт, т.е. за 3 года мощность этого типа станций выросла в 3 раза. А ВЭС увеличили свою установленную мощность за 2 года (с 2018г.) практически в 5 раз. На ТЭС относительная выработка электроэнергии за последний год имела небольшую тенденцию к снижению, что может быть объяснено ковидными ограничениями, погодными условиями и реализацией соглашения с ОПЕК по снижению добычи нефти.

В 2020 г. параллельно с ЕЭС России, т.е. с осуществлением перетоков энергии, работали энергосистемы Белоруссии, Украины, Грузии, Азербайджана, Казахстана, Монголии. Пока еще работают системы Эстонии, Латвии и Литвы, декларирующие свое скорое присоединение к ЕЭС Европы. Периодически шли перетоки в Молдавию, Узбекистан, Киргизию, Абхазию и Южную Осетию.

По суммарной выработке электроэнергии в последние 2-3 года Россия входит в первую четверку стран мира, уступая по выработке электроэнергии только Китаю (более

7 ТВт·час), США (более 4 ТВт·час) и Индии (более 1,5 ТВт·час). [4] При этом, по заявлению министра энергетики РФ А. Новака, российская структура топливно-энергетического баланса одна из самых «зеленых» в мире, т.к. на угле вырабатывается примерно 15% электроэнергии. В Китае этот показатель на уровне 70 %, в США и ФРГ около 40 %. [5]

Пик выработки электроэнергии угольными станциями был достигнут в 2014 г – 41 % от мирового производства, при генерирующей мощности около 2 000 ГВт. Угольную энергетику используют 77 стран мира. Вместе с тем в 2018 г. 27 стран присоединились к Альянсу поэтапного отказа от угольной генерации. Для сравнения, доля некоторых стран в мировой угольной генерации на 2018 г.: Китай – 47 %; США – 14 %; Индия – 11 %; РФ – 2 %. [5] Одновременно нужно отметить, что РФ занимает более трети газового рынка Европы.

Несмотря на постоянно растущую генерацию электроэнергии и установленную мощность различного типа электростанций, по ряду оценок около 1 млрд. человек на планете не имеют доступа к электричеству, а в наименее развитых странах потребление электроэнергии на душу населения в ~ 30 раз меньше, чем в США.

Одним из наиболее спорных и дискутируемых направлений развития электроэнергетики являются будущее и перспективы атомной энергетики. На 01.2021 г. в 32 странах на 189 АЭС работало 450 реакторов, общей мощностью около 420 ГВт. Страны лидеры по количеству блоков и их мощности указаны в таблице 4. [6]

Таблица 4. Количество и мощность АЭС по странам

Страна	США	Франция	Китай	Россия	Япония
Кол-во блоков АЭС	95	57	50	38	33
Мощность АЭС, ГВт	96,5	61	47,5	30,3	32

В планах развития АЭС в мире на 2020-2025 гг. строительство 49 новых блоков, общей мощностью 53,5 ГВт. Четверть этих плановых мощностей приходиться на Китай. Активно наращивать мощности АЭС планируют Индия, ОАЭ, Южная Корея. Вместе с тем существует и обратная тенденция. Если в 2020 г. в мире было пущено 5 новых блоков АЭС (2 в Китае, по одному в РФ, Белоруссии и ОАЭ), то 6 блоков АЭС было остановлено.

Отказ от использования АЭС продекларирован Германией, Швейцарией, Италией, Испанией, Бельгией. Основными мотивами провозглашаются: опасность аварий и их последствия, проблемы хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ), высокая стоимость строительства и демонтажа.

Первая крупная авария на АЭС произошла 28 марта 1979 г. в США на АЭС «Три-Майл-Айленд». Из-за ошибок персонала произошел расплав 53% активного отсека реактора; 185 м3 радиоактивной жидкости ушло в реку; 200 тыс. человек было эвакуировано; для восстановления разрушенного блока потребовалось 12 лет и 1 млрд долларов.

25 апреля 1986 г. в СССР произошел взрыв 4 блока Чернобыльской АЭС. 190 тонн радиоактивных частиц оказались в воздухе; дозы облучения были превышены в радиусе 30 км; загрязнение затронуло 19 регионов с населением 2,6 млн. чел.; проект «Укрытие» (саркофаг) стоил 2 млрд. евро.

11 марта 2011 г. авария на АЭС Фукусима (Япония). В результате цунами произошел отказ систем энергоснабжения и охлаждения, расплав топлива в 3-х реакторах, затем взрыв водорода с гибелью людей; из зараженных районов на 2012 г более 100 тыс. жителей было эвакуировано. Работы по извлечению ОЯТ отложены до 2023 г. из-за задержки разработки роботизированного манипулятора, т.к. апробированной технологии пока нет. Полное завершение вывода блоков рассчитывают завершить после 2041 г. Общие расходы на демонтаж оцениваются ориентировочно в 75 млрд. долл., на полный демонтаж потребуется не менее 40 лет. [7]

Кроме указанных крупнейших аварий регулярные инциденты на АЭС не являются исключениями. Так, например, 03.02.2021 г. на исследовательском тяжеловодном реакторе NIST в США при пуске был превышен радиационный фон в здании. Несколько работников подверглись воздействию повышенного уровня радиации. Реактор был заглушен.

19.12.2020 г. произошло повышение уровня радиации внутри станции «Олкилуото» (Финляндия), последовала экстренная остановка реактора. [8]

Было бы несправедливо упрекать в крупных техногенных катастрофах только атомную отрасль. Например, крупнейшая техногенная авария в современной истории на американском химическом заводе в Бхопале (Индия) в 1984 г. унесла жизни не менее 18 тыс. человек.

К сожалению, настороженное отношение к развитию атомной энергетики вызвано не только крупными, хотя и единичными авариями. Перечислим еще несколько факторов препятствующих широкому внедрению АЭС, как основной энерготехнологии. АЭС весьма дороги, особенно с учетом наращивания дорогостоящих систем безопасности, их окупаемость в лучшем случае составляет не менее 20 лет. Такая прибыльность, как правило, не устраивает финансистов. Развитие АЭС в странах, не обладающих исторически развитыми ядерными технологиями весьма проблематично. Такие страны не обладают соответствующими научными школами, отсутствует задел НИР и ОКР, нет механизма воспроизведения компетентных кадров. Ядерная энергетика в этих странах становится «сателлитной», т.е. основные компетенции остаются у разработчиков и поставщиков технологии. Настораживающим фактором остается зависимость развития ядерных технологий от политической ситуации. Развитие атомной энергетики связано с оружием, и передача новому государству ядерных технологий всегда таит опасность возникновения военной ядерной программы. Упования на то, что АЭС улучшат ситуацию с декарбонизацией на планете, утопичны, т.к. скажем их роль в декарбонизации Африки или Латинской Америки, мягко говоря, не состоятельна. Ко всему прочему остаются проблемы с захоронением ОЯТ и радиоактивных отходов (РАО) и серьезные протестные настроения населения в ряде стран.

Россия, отметив в 2020 г. 75-летний юбилей атомной отрасли, остается одной из ведущих стран в развитии и продвижении атомной энергетики. Госкорпорация Росатом занимает 70 % рынка строительства АЭС в мире.

В 2020 г. пущена первая в мире атомная теплоэлектростанция на базе плавучего энергоблока «Академик Ломоносов» (ПАТЭС). Идет строительство АЭС в Белоруссии, Турции, КНР, Индии, Багладеш и 3-х блоков в России.

В различных стадиях находится оформление документации для строительства АЭС в Финляндии, Египте, Венгрии, Болгарии. Ведутся переговоры с Узбекистаном, Киргизией и Казахстаном. В 2020 г. в РФ АЭС выработали 20 % всей производимой в стране электроэнергии. В 2021 г. Росатом попросил у правительства России государственной поддержки в вопросе приравнивания атомной энергетике к «зеленой» генерации на международном уровне и получения «зеленого» сертификата для АЭС, вследствие того, что они делят первое место с ветрогенерацией по удельным выбросам CO_2.

Вместе с тем, в целом активная и целенаправленная позиция Росатома по развитию атомной энергетики вызывает ряд дискуссионных вопросов. Одним из главных являются условия контрактов на зарубежное строительство. В частности, по строительству АЭС «Аккую» в Турции (4 блока по 1,2 ГВт) предусматривается: финансирование строительства исключительно за счет средств РФ без финансовых обязательств Турции; схема возврата средств предусматривает продажу электроэнергии турецким потребителям по фиксированной цене (12,35 цента США за 1 кВт·час) по 2037 год без учета инфляции и эскалации цен; РФ несет ответственность за вывод АЭС из эксплуатации и обращение с ОЯТ; все страхование рисков по физической защите АЭС, надежности и обучению персонала, ответственности за возможный ядерный ущерб ложатся на РФ; кредитование беспроцентное. [9]

Ориентировочно на похожих условиях, получивших название «строй, владей, эксплуатируй» строятся взаимоотношения с Египтом, получившим от РФ государственный кредит 30 млрд. долл., покрывающий 85 % общих расходов строительства АЭС. В проект АЭС в Бангладеш Росатомом вложено 12 млрд. долл., которые покрывают 90 % общей стоимости строительства. [10]

Как уже отмечалось, одной из наиболее бурно развивающихся технологий электроэнергетики на сегодня являются возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Их несомненные плюсы: экологическая чистота, в частности отсутствие выбросов CO_2, отсутствие затрат на топливо, сохранение ископаемого потенциала Земли, кажущаяся доступность для любых стран и объединений, при отсутствии собственных месторождения ископаемого сырья.

Наиболее бурно идет развитие ветроэлектростанций (ВЭС). В 2020 г. в Европе на основе ВИЭ, включая и гидростанции (ГЭС), выработано электроэнергии больше чем, на основе ископаемого топлива (38 % против 37 %). В том же 2020 г. в Великобритании доля ВИЭ и ГЭС по выработке электроэнергии составила 44,6 %. [11] Наибольшее распространение получают оффшорные или шельфовые ВЭС, чье основание жестко крепиться к морскому дну на небольшой глубине шельфовых зон. В 2018 г. было введено 4,3 ГВт ВЭС. Одна из крупнейших Moray Firth East мощностью 950 МВт и стоимостью 3,3 млрд. долл. (Великобритания). На конец 2010 г. мощность ВЭС в Европе составляла ~ 15 ГВт. Вместе с тем, развитие ВИЭ порождает зачастую и ряд нерешаемых вопросов. Одной из самых слабых, экономически уязвимых сторон ВИЭ, является низкий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). Этот коэффициент является отношением фактической выработки электроэнергии станцией за определенный период эксплуатации к теоретически возможной выработке за этот же период при работе без остановов на номинальной мощности. Зачастую его используют как отношение числа часов работы в году эквивалентное работе на номинальной мощности к 8760 час, т.е. годовой продолжительности в часах. Для станций с ВИЭ ограничением КИУМ является неравномерность и нерегулируемость источника (ветра, солнца).

Средняя расчетная себестоимость производства электроэнергии на протяжении жизненного цикла электростанции - LCOE (Levelized cost of energy), включает в себя все инвестиции, затраты и доходы.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{K_t + И_t + C_t}{(1+E)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{W_t}{(1+E)^t}}$$

где К – капиталовложения, И – издержки производства, С – затраты топлива, W – производство электроэнергии, t – текущий год, n – количество лет полного жизненного цикла станции, Е – ставка дисконтирования.

Станции с ВИЭ выигрывая по показателю C_t, становятся убыточными при корректном учете W_t, т.е., чем меньше КИУМ, тем выше тариф на электроэнергию. В России в 2016 г. КИУМ ВЭС составлял 5 %, СЭС – 13 %. По данным за 2018 г. КИУМ ВЭС возрос до 18 %, а СЭС до 14 %, при этом КИУМ ТЭС составил 46,5%. [12] Для сопоставления можно указать, что для АЭС России КИУМ в 2020 г. составил 81,5 %. Успешным внедрение ВИЭ может быть только при учете индивидуальных климатических особенностей страны. КИУМ ВИЭ в России значительно ниже, чем в некоторых зарубежных странах, и соответственно стоимость электроэнергии на отечественных энергообъектах ВИЭ кратно выше. Кроме того, использование нестабильных источников энергии требует дополнительных затрат для надежности энергосистемы: резервирования мощностей, создания дорогостоящих систем аккумуляции. В подавляющем большинстве стран ВИЭ по сути выведены из-под действия законов рыночной экономики, что создает иллюзию их низкой стоимости. Как правило, для ВИЭ гарантируется сбыт производимой электроэнергии в

любых объемах и в любое время по заранее установленной цене. В ряде стран существуют дополнительные стимуляторы для развития ВИЭ. Введение платы за выбросы CO_2 – это также мера по повышению конкурентности ВИЭ.

Т.к. ВИЭ зависят от условий окружающей среды и не могут поставлять потребителям гарантированную мощность, то их субсидирование идет через специнвестконтракты, налоговые льготы и льготные банковские кредиты. Сейчас в РФ поддержка ВИЭ осуществляется за счет повышенных выплат с оптового энергорынка, т.к. договора на поставку «зеленой» мощности (ДПМ ВИЭ) гарантируют возврат инвестиций за 15 лет. Эта программа заканчивается в 2024 г., и инвесторы в ВИЭ активно лоббируют ее продолжение. При этом тарифы ВИЭ в РФ в 2-3 раза выше, чем в ЕС; КИУМ на лучших ВЭС не выше 27 %, а на СЭС не выше 14 %, LCOE ВИЭ выше оптовых цен в 3-5 раз, а достигаемое снижение выбросов CO_2 составляет 0,2 % от эмиссии в РФ. Достижения «сетевого паритета», т.е. равной цены электроэнергии от ВИЭ и покупки от сети оценивается по данным «Совета рынка» в 15 лет. И даже А. Чубайс признавая, что ВИЭ во всем мире сегодня не окупаемы и для их развития нужно внедрение различных механизмов поддержки, лоббирует внедрение 2 этапа поддержки зеленой энергетики с 2025 по 2035 гг. [13]

Несомненно, существует и политическая составляющая в тенденции к пропагандированию ВИЭ и осуждению использования минерально-сырьевых источников энергии, а точнее стран, имеющих и использующих эти источники, прежде всего РФ. Эти страны объявляются виновниками в экологически неблагоприятных тенденциях планеты. Есть еще ряд аспектов, которые отнюдь не благоприятствуют бурному развитию ВИЭ.

ВИЭ не смогут заменить углеродную энергетику по причинам земельным и пространственным. Для обеспечения всех жителей Земли таким же количеством энергии, которая составляет половину потребления жителя США, ВЭС и СЭС должны покрыть территорию размером с Южную Америку. [14]

Существуют негативные экологические последствия применения ВИЭ – гибель птиц и насекомых, угрожающая биоразнообразию. Инфраструктура вокруг них может серьезно нарушить естественную среду обитания животного мира.

Параметры наиболее крупных ВЭС достигают «циклопических» размеров. При единичной мощности ветроустановки приближающейся к 8 МВт, диаметр ротора приближается к 180 м, а длина лопасти доходит до 80 м, масса лопасти до 35 т, высота башни до 90 м. Для РФ степень локализации производства оборудования ВЭС, как правило, не превышает 60%.

Существуют проблемы и с выводом ВИЭ, в частности ВЭС, из эксплуатации. К 2023 г. в Европе в выводе из эксплуатации будут нуждаться 14 тыс. лопастей ВЭС. Процесс их утилизации затруднен тем, что изготовлены они из сложных композитных материалов обеспечивающих долговечность и меньший вес. Набор технологий по их утилизации в промышленных масштабах недостаточно проработан: включает в себя механическое измельчение, расщепление ионами растворителя и пиролиз. Этот процесс весьма энергоемок, затратен и не экологичен.

И еще об экономике ВИЭ в мировых тенденциях.

За прошедшее десятилетие крупнейшим инвестором в ВИЭ стал Китай выделив 758 млрд. долл. за период 2010-2019 гг. На втором месте были США с инвестициями 356 млрд. долл., на третьем Япония – 200 млрд. долл. За этот же период европейские страны инвестировали в «зеленую» энергетику 698 млрд. долл. [15]

Существуют оценки, сделанные применительно к отечественной энергетике по стоимости 1 кВт установленной мощности электрических станций с учетом потенциала ВИЭ по КИУМ и необходимым системам аккумуляции и резервирования. [16] Эти данные сведены в таблицу 5.

Таблица 5. КИУМ и стоимость установленного кВт мощности различных электрических станций

Тип. электростанции	ТЭС	АЭС	Малые ГЭС	ВЭС с аккумуляцией	СЭС (фотоэлектрические)
КИУМ, %	50-60	80-90	30	25	13
Стоимость 1 кВт установленной мощности с учетом КИУМ, долл.	2000-3000	5000	5000	10000	38500

Удельные выбросы CO_2 (г/кВт·ч) в целом по энергосистеме РФ значительно ниже, чем в США, Китае и среднемировые. КИУМ ВИЭ в России также ниже, чем за рубежом. Стоимость электрической энергии ВИЭ в РФ превышает ее стоимость за рубежом и завышенные «зеленые» тарифы могут сделать нашу промышленность неконкурентоспособной. Очевидно понимание этого обстоятельства привело к тому, что в марте 2021г. было принято решение Правительства РФ о 22-процентном снижении объемов финансирования и поддержки ВЭС и СЭС.

Как одна из перспективных технологий будущего развития энергетики рекламируется и исследуется водородная энергетика. На сегодня огромный спрос на потребление водорода обеспечивают химическая и нефтеперерабатывающая промышленность. Используется водород частично и на транспорте, как правило на экспериментальных образцах. Основное преимущество водородной энергетики – отсутствие вредных выбросов в атмосферу, т.к. при электрохимических реакциях с Н2 выделяется только вода. Это является основным аргументом к масштабному внедрению водородной энергетики. Однако в этой технологии есть свои минусы и нерешенные проблемы. Одна из важнейших проблем – это безопасность использования и хранения водорода. Отсутствуют надежные технологии и инфраструктура масштабного и безопасного хранения и транспортировки водорода на ТЭС.

Водород чрезвычайно активный элемент, делающий металлоконструкции более хрупкими и способствующий их постепенному разрушению. Так называемая стресс-коррозия разрушает системы трубопроводов и особенно сварные швы при транспортировке водорода. Сам процесс электролиза при производстве водорода требует объемы электроэнергии, которые превышают объемы электроэнергии, получаемые при использовании водорода на ТЭС, а также зачастую могут быть получены далеко не экологически чистым способом. Если используется технология производства водорода из метана, то все равно происходит образование CO_2. Существующие сегодня способы производства водорода гораздо дороже, чем добыча нефти или газа в пересчете на необходимую выработку электроэнергии.

Нельзя не упомянуть еще одну энергетическую технологию будущего – термоядерный синтез. Вопрос управляемого термоядерного синтеза на мировом уровне возник в середине XX века. Несомненными аргументами в его пользу являлись: неисчерпаемые запасы топлива (смесь изотопов водорода дейтерия и трития), минимальная вероятность аварийного взрыва, отсутствие продуктов сгорания, образующиеся радиоактивные отходы имеют короткий период полураспада и не требуют долговременных хранилищ, не используются материалы, которые могут быть применены для создания ядерных взрывных устройств. Вместе с тем возникли существенные препятствия между пониманием процессов ядерного синтеза, его практическим использованием и технологическими возможностями. Показательна в этом плане история Международного термоядерного экспериментального реактора (ITER). Участниками этого интернационального проекта являлись: страны ЕС (как единый участник), Индия, Китай, Россия, Республика Корея, США, Япония. Была поставлена задача демонстрации возможностей коммерческого использования термоядерного реактора и решение технологических проблем при его реализации. Был выбран тип реактора «токамак», от русскоязычного сокращения «тороидальная камера с магнитными катушками». Определено место строительства – исследовательский центр Кадараш, на юге Франции. Разработка проекта началась с середины 1980-х годов.

Инженерный проект был завершен разработчиками (ЕС, Россия, США, Япония) в 2001 г. В 2007 г. началась подготовка площадки, а в 2010 г. началось строительство. В июле 2020 г. началась сборка реактора. Еще в период проектирования первоначальный пуск планировался на 2016г., затем последовали сдвиги этой даты на 2019 г., и на 2025 г. Первоначальная стоимость установки оценивалась в 5 млрд. евро, в 2015 г. предполагаемая сумма выросла до 19 млрд. евро. Ожидается, что ITER потребляя электрическую мощность 110 МВт, будет производить тепловую энергию мощностью ~ 500 МВт, как минимум в течении 500 сек. О рентабельности установки речь не идет, но в случае успешной реализации проекта после ввода ITER планируется создание электростанции на термоядерном синтезе – ДЕМО (Demonstration Power Plant), с непрерывной генерацией электроэнергии мощностью 2 ГВт, проект которой должен быть закончен к 2030 г., строительство в 2031-2043 гг., пуск первой очереди не позднее 2048 г.

В различных направлениях исследования термоядерного синтеза и создания экспериментальных установок типа «токамак» ведутся работы в России, США, Великобритании, Китае, Японии. В своем стремлении овладеть энергетическим потенциалом человечество идет на самые неожиданные и смелые эксперименты. В 2000 г. в США была произведена попытка передачи энергии из космоса на Землю, используя модуль с солнечной панелью на космическом корабле и передатчик микроволновой энергии.

В свое время один из основателей ОПЕК министр нефтяной промышленности Саудовской Аравии шейх Ахмед Заки Ямани пророчески сказал: «Каменный век кончился не потому, что закончились камни, и нефтяной век кончится не потому, что кончится нефть».

Выводы:

1. Атомные станции занимают существенную нишу в мировом энергопроизводстве, в РФ их доля в выработке электроэнергии достигла 20 % и продолжает расти. Несмотря на ряд факторов замедляющих их рост в общем энергобалансе, на ближайшие десятилетия АЭС продолжат оставаться одним из важнейших производителей электроэнергии.
2. Ветровые и солнечные возобновляемые источники энергии в силу ряда климатических, экономических и технологических причин не смогут стать основой производства электроэнергии для населения Земли и, в частности, для Российской Федерации.
3. Развитие новых технологий получения электроэнергии и сроки их выхода на промышленные объемы производства зачастую непредсказуемы. Вместе с тем наряду с традиционными источниками, основанными на ископаемом сырье, а также ядерными технологиями, они несомненно займут свой сегмент в энергообеспечении Земли в XXI веке.
4. Устойчивое и эффективное развитие и функционирование электроэнергетики может быть обеспечено определенным разнообразием составляющих ее частей, зависящим от наличия сырьевых источников, вида потребителей, климатических условий, технологической базы и ряда других факторов.

Список литературы: **1.** RegnumNews.Ru 06.10.2017, **2.** EES EAEC Мировая энергетика www.sites.google.com, **3.** Отчет о функционировании ЕЭС России в 2020 г., **4.** BP Statistical Review, 2019, **5.** BigpowerNews, 28.02.2017, 03.07.2018, **6**. «Эксперт Ру» 01.02.2021, **7**. Atominfo.Ru 26.12.2020; «Российское атомное сообщество» 12.04.2019; ТАСС 26.02.2021, **8**. Atominfo.Ru 04.02.2021, **9.** Соглашение между правительством РФ и Правительством Турецкой республики о сотрудничестве в сфере строительства и эксплуатации АЭС на площадке «Аккую». от 29.11.2010, №322-ФЗ, **10.** Ино ТВ 01.11.2019, **11**. http://renen.ru, Agora Energie wende Ember ЕС, **12.** Белобородов С.С. «Снижение эмиссии CO_2: развитие когенерации или строительство ВИЭ» Энергосовет №1 (51), 2018, **13.** www.proatom.ru; Big power News 28.05; 09.10; 24.10;30.10;13.12 – 2018, **14.** http://next75.ru, **15.** О проблемах развития мировой энергетики и ВИЭ. «Энергетика за рубежом» №4, 2020, **16.** Осадчий Г.Б. “Использование солнечной энергии для бесперебойного электроснабжения децентрализованных потребителей России”, Энергетик №3, 2014.

СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНОГО РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Костенко А.В., Рахимов Ю.Г., Кириченко В.В., Кан В.А.
(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)
Тел.: +7 984 163 74 36; E-mail: andr13kost@list.ru

Abstract: *The article deals with the formation of functionally-oriented coatings for parts of marine diesel engines. The formation of the coating is associated with ensuring the required service life of marine diesel engines and their elements. The classification of parts of marine diesel engines is given.*

Keywords: *resource, operating conditions, marine diesel engine, part, functionally oriented coating.*

Обеспечить требуемую, экономически и технически обоснованную, надежность и долговечность деталей судовых дизелей – одна из главных задач технологии машиностроения. Одно направлений решения задачи – производство агрегатов с единым заданным ресурсом. Применение функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [1] при изготовлении деталей судовых дизелей позволит обеспечить требуемый уровень надежности всего агрегата на протяжении необходимого ресурса.

Сложность решения этой задачи определяется неравномерностью ресурса деталей, входящих в судовой дизель, поскольку работают такие детали в очень сильно отличающихся условиях, изготовлены из различных материалов различными способами и на различных предприятиях.

Методы ОУО, связанные с образованием покрытий на поверхностях деталей, являются одними из самых перспективных для использования на основе функционально-ориентированных технологий, поскольку позволяют создавать требуемые свойства на поверхности деталей, в том числе и переменные свойства. Вакуумное ионно-плазменное напыление, являясь прогрессивным процессом нанесения ФОП, имеет хорошие перспективы для применения в судовом машиностроении. К его преимуществам следует отнести [2, 3]:

– возможность создания покрытий из самых различных материалов, что позволяет создавать покрытия с различными целевыми функциями: антиадгезионные, антифрикционные, жаростойкие, защитные, износостойкие, коррозионностойкие, теплозащитные, термостойкие, уплотнительные, фрикционные, эрозионностойкие и т.д. К тому же, важно отметить, что есть возможность создания многоцелевых многослойных покрытий, что важно для тяжелонагруженных деталей, работающих в сложных эксплуатационных условиях.

– достаточно высокая производительность процесса за счет пространственного размещения деталей в вакуумной камере в специальных приспособлениях.

– возможность нанесения покрытий на наружные плоские и криволинейные поверхности, внутренние поверхности, а также на тела вращения.

– возможность создания покрытий, обладающих переменными свойствами, которые будут изменяться в соответствии с требуемыми параметрами качества поверхностного слоя детали, как в пространстве, так и во времени. Переменные свойства покрытия позволяют также реализовать требуемый ресурс детали и агрегата, например реализуя равный износ в условиях действия различных эксплуатационных функций.

– возможность гибкого управления процессом напыления в связи с наличием большого количества регулируемых технологических параметров, режимов ТП.

– доступность метода, достаточная экономичность.

Возможность использования напыления в судовом машиностроении подтверждается Российским морским регистром судоходства, который в Методических рекомендациях по техническому наблюдению за ремонтом морских судов [4] допускает использование напыления при условии одобрения Регистром соответствующего технологического процесса.

Особенности эксплуатации судовых дизелей определяются в первую очередь необходимостью безотказной работы в заданный период эксплуатации, т.к. силовая установка в большинстве случаев не имеет резервирования, запасные системы, как правило, применимы лишь кратковременно в экстренных ситуациях.

Все элементы судовых дизелей можно условно разделить на 3 группы:

– базовые детали, ресурс которых равен ресурсу эксплуатации дизеля в целом (фундаментная рама, картер);

– тяжелонагруженные узлы и детали, ресурс которых должен быть равен или превышать длительность межремонтного цикла эксплуатации (поршень, цилиндровые втулки, коленчатый вал);

– быстросменные, быстроизнашиваемые детали, ресурс которых может существенно увеличиваться не привязываясь к межремонтным циклам, сокращая количество их замен (клапаны, шестерни, штанги).

Причем в первых 2 группах деталей ресурс реализуется по принципу минимальной его избыточности, что позволяет минимизировать затраты как на их изготовление, так и на их восстановление при ремонте (минимум затрат на удаление остатков покрытия). Для 3-й группы деталей экономически целесообразно обеспечивать максимальное повышение их ресурса.

Таким образом, используя различные методы ОУО, необходимо создавать функционально-ориентированные покрытия, имеющие заданные параметры, которые определяют требуемый ресурс детали судового дизеля.

Список литературы: 1. 1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. **2.** Поляк, М.С. Технология упрочнения. В 2 т. / М.С. Поляк. – М.: «Л.В.М. – СКРИПТ», «Машиностроение», 1995. – Т.1. – 832 с. **3.** Костенко А.В. К вопросу о развитии судоремонтной отрасли Камчатского края / А.В. Костенко, Б.Н. Безлобенко // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : материалы междунар. научно-техн. конф. (23–25 октября 2019 г.) / отв. за вып. О.А. Белов. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2020. – С. 23-27. **4.** Методические рекомендации по техническому наблюдению за ремонтом морских судов (редакция 2018 года) [Электронный ресурс] : НД 2-039901-005. – Электронный аналог печатного издания, утвержденного 30.06.16. – Санкт-Петербург : Российский морской регистр судоходства, 2016. – 145 с. – URL: https://meganorm.ru/Index2/1/4293736/4293736573.htm (дата обращения 02.06.2021).

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ИХ АРХИТЕКТУРЫ

Кошелев М.А., Борзов Д.Б. *(Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация)*
e-mail: maks46.krutoe@gmail.com

Abstract: *Reconfigurable computing is a computer architecture which is intended to fill the gap between the hardware and the software, achieving potentially much higher performance than software, while maintaining a higher level of flexibility than hardware. Most commonly and widely used high speed computing fabrics deployed in reconfigurable computing are field-programmable gate arrays (FPGAs). This paper illustrates the architecture used in reconfigurable computing and also demonstrates the advantages of using reconfigurable computing design over conventional ASIC or a simple microprocessor for achieving high level of performance for a specific application.*

1. Введение.

Использование реконфигурируемых вычислительных систем для ускорения вычислений возникло в конце 80-х годов. Инновационная разработка ПЛИС, конфигурация которых могла быть перепрограммирована неограниченное количество раз, стимулировала изобретение новой области, в которой множество различных аппаратных алгоритмов могло бы выполняться, в свою очередь, на одном устройстве, так же, как и множество различных программных алгоритмов.

Ранее в обычных вычислениях использовались два основных метода выполнения алгоритмов: специализированная интегральная схема (ASIC) или программно-программируемые микропроцессоры.

ASIC разработаны специально для выполнения заданных вычислений, и поэтому они очень быстрые и эффективные при выполнении точных вычислений, для которых они были разработаны. Однако схема не может быть изменена после изготовления. Это вынуждает модернизировать и переделывать чип, если какая-либо часть его схемы требует модификации. Это дорогостоящий процесс, а также несколько негибкий, часто требующий перепроектирования платы и замены в случае изменений в приложении [1].

Второй метод - использование микропроцессоров с программным обеспечением - гораздо более гибкое решение. Процессоры выполняют набор инструкций для выполнения вычислений. Изменяя программную инструкцию, функциональность системы изменяется без изменения аппаратного обеспечения. Однако процессор должен прочитать каждую инструкцию из памяти, расшифровать ее значение и только затем выполнить ее. Это приводит к высоким накладным расходам на выполнение каждой отдельной операции. Кроме того, набор инструкций, которые могут использоваться программой, определяется во время изготовления процессора. Любые другие операции, которые должны быть реализованы, должны основываться на существующих инструкциях [2].

Реконфигурируемые вычислительные системы призваны заполнить пробел между аппаратным и программным обеспечением, достигая потенциально более высокой производительности, чем программное обеспечение, при сохранении более высокого уровня гибкости, чем аппаратное обеспечение. Реконфигурируемая вычислительная система обычно содержит один или несколько процессоров и реконфигурируемую структуру, на которой могут быть построены пользовательские функциональные блоки. Процессор(ы) выполняет последовательный и некритический код, в то время как вычислительные коды отображаются на реконфигурируемое оборудование. Подобно ASIC, функции, которые были сопоставлены с рекон-

фигурируемой структурой, могут использовать преимущества параллелизма, достижимого в аппаратной реализации, но в отличие от ASIC, новую структуру не нужно разрабатывать для каждого приложения. Это позволяет реализовывать самые разные функциональные единицы.

Другие преимущества реконфигурируемых конструкций включают уменьшение размера и, следовательно, стоимости, сокращение времени выхода на рынок, повышенную гибкость и возможность обновления. Для достижения этих преимуществ в производительности при поддержке широкого спектра приложений, реконфигурируемых системы обычно формируются с помощью комбинации реконфигурируемой логики и микропроцессора общего назначения[3].

Исследователи из США и Франции в поисках гибких, высокопроизводительных строительных блоков представили новый тип суперкомпьютера, состоящий из аппаратно-перепрограммируемых компонентов, которые за счет настройки оборудования для каждого приложения могли бы обеспечить увеличение производительности на два порядка по сравнению с обычным. процессоры с фиксированным набором команд. Первые реконфигурируемые компьютеры были построены Исследовательским центром суперкомпьютеров IDA (SRC) в США и Парижской исследовательской лабораторией DEC (PRL).

2. Программируемые модули.

Программируемая вентильная матрица - это вычислительный блок для реконфигурируемых систем - регулярный двухмерный массив логических блоков. Каждый логический блок - это таблица поиска, простая память, которая может хранить произвольную логическую функцию с n входами. Логические блоки взаимодействуют через программируемую сеть межсоединений. Периферия такой системы содержит «блоки ввода / вывода» для взаимодействия между внутренними логическими блоками и выводами ввода / вывода. Эта простая однородная архитектура превратилась в гораздо более разнородную, включая блоки памяти на кристалле, а также блоки DSP [4].

ПЛИС также можно разделить на мелкозернистые и крупнозернистые. Мелкозернистые реконфигурируемые системы очень гибкие. Их можно использовать для реализации любых функций последовательной и комбинационной логики, но в целом они медленнее и физически больше, чем ПЛИС серии Xilinx 6200. С другой стороны, крупнозернистые реконфигурируемые структуры быстрее, занимают меньшие площади, но ограничены реализацией только одной из предопределенных функций, например, в архитектурах ADRES и RaPiD.

3. Параллелизм и его применения.

Параллелизм на уровне инструкций - это мера операций в компьютерной программе, которые могут выполняться одновременно. Создавая больше процессоров, традиционный микропроцессор может выполнять более одной инструкции за такт.

В отличие от традиционных процессоров, ПЛИС не запускают код. Когда мы программируем реконфигурируемые системы, мы напрямую программируем логические вентили внутри системы. Системы дистанционного управления индивидуально адаптируются к конкретному применению. В обычном процессоре уровень параллелизма фиксируется во время его разработки. На ПЛИС эти блоки состоят из настраиваемых логических блоков. Их количество, ширина и тип произвольны и могут быть оптимизированы для приложения. Более того, ПЛИС свободны от операций выборки инструкций, потому что инструкции встроены в сам путь данных. Таким образом, «инструкция», интерпретируемая реконфигурируемой системой, представляет собой произвольный набор связанных логических схем, в котором количество и тип арифметических устройств оптимизированы для каждого приложения.

3.1 Криптография.

Криптография была одним из важнейших двигателей вычислительных технологий на протяжении более шести десятилетий. Он включает в себя создание, анализ и взлом кода. Криптография обеспечивает безопасную передачу информации между отправителем и получателем по незащищенным компьютерным сетям [5]. Алгоритмы, составляющие основу этой безопасности, требуют больших вычислительных мощностей и могут потребовать очень долгого времени выполнения. При развертывании на ПЛИС эти алгоритмы могут использовать доступный параллелизм ПЛИС с чрезвычайной эффективностью. Методы на основе FPGA могут использоваться для взлома многих схем шифрования данных, которые когда-то казались надежными.

Например, FileVault основан на стандарте Advanced Encryption Standard (AES) и обеспечивает зашифрованную файловую систему для операционной системы Apple Macintosh. Восстановление паролей FileVault требует хэширования возможного пароля с помощью хэш-функции SHA-1 тысячи раз. При использовании кластера 72-FPGA SC5 скорость приложения для восстановления ключей FileVault увеличивается в 498 раз по сравнению с исходной программной реализацией, работающей на процессоре Intel Core i7 с тактовой частотой 2,93 ГГц. Это приводит к сокращению времени работы с 21 часа до 2,5 минут [6].

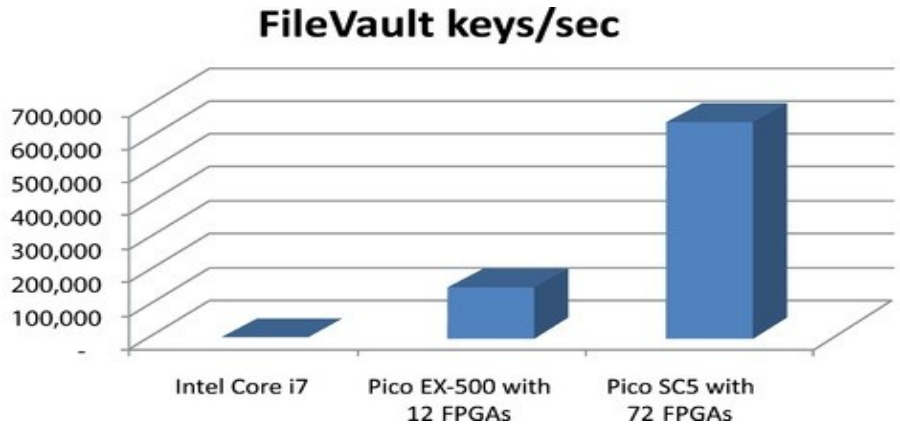


Рис. 1. Взлом FileVault ускорен в 498 раз с использованием кластера FPGA

3.2 Обработка видеоизображения.

Целью обработки изображений является надежное извлечение полезной высокоуровневой информации из изображений и видео. Реконфигурируемый компьютер особенно хорошо подходит для удовлетворения требований многих приложений для обработки видео и изображений. Реконфигурируемый компьютер сочетает в себе гибкость программного подхода, присущего рабочей станции, с производительностью аппаратного решения, присущего ASIC. Более того, низкая стоимость разработки делает их идеальными для приложений обработки видео и изображений. При использовании реконфигурируемых систем, а не процессоров общего назначения, получается ускорить процесс обычно в два раза [7].

3.3 Приложения DSP.

DSP включает в себя представление сигналов в цифровом виде в виде последовательностей чисел или символов и обработку этих последовательностей для извлечения информации из сигналов или для синтеза сигналов с желаемыми свойствами либо в виде полностью новых сигналов, либо из существующих сигналов. Эффективность RC для DSP в основном связана с параллелизмом, который можно использовать в прило-

жениях DSP [13]. В качестве простого примера рассмотрим, как фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ) может быть реализован на оборудовании. КИХ-фильтр реализует следующие уравнения:

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a(n)x(k-n)$$

Решение на основе микропроцессора будет выполнять вычисления в N умножениях и N-1 сложениях. Тогда как в реконфигурируемом оборудовании фильтры КИХ могут быть реализованы с использованием параллелизма, так что N умножений и N-1 сложений выполняются в каждом цикле с результатом, предоставляемым в каждом цикле.

3.4 Сетевая безопасность.

Чтобы проверить наличие уязвимостей, например, являются ли используемые методы шифрования устаревшими, или проверить наличие слабых паролей в сетевой безопасности, используется метод, называемый «Система обнаружения вторжений в сеть». Увеличение числа атак из Интернета, таких как вирусы, спам, вредоносные программы, а также другие злонамеренные действия, вызвало необходимость в методах защиты, которые помогают защитить систему пользователя [8]. Система обнаружения сетевых вторжений (NIDS) - одно из решений, которое может глубоко проверять все полезные данные пакета.

Сопоставление строк используется системами обнаружения вторжений в сеть (NIDS) для проверки полезной нагрузки входящих пакетов на наличие враждебных данных [15]. Скорость сети достигла нескольких гигабит в секунду (Гбит / с) и может быть выше в будущем. Следовательно, программным решениям NIDS сложно обрабатывать такой большой объем данных, и, более того, каждая строка байтов трафика будет сравниваться с большим количеством правил, что заставляет программные решения пропускать пакеты из-за ограничений в памяти. Скорость сопоставления строк часто является основным фактором, ограничивающим производительность NIDS. Производительность сопоставления строк может быть значительно улучшена за счет использования программируемых вентильных матриц (FPGA) за счет использования настоящего параллелизма, обеспечиваемого оборудованием [16].

4. Заключение.

Реконфигурируемые вычисления становятся важной частью исследований компьютерных архитектур и программных систем. Поместив части приложения с интенсивными вычислениями на реконфигурируемое оборудование, это приложение может быть значительно ускорено. Это связано с тем, что реконфигурируемые вычисления объединяют многие преимущества как программного обеспечения, так и реализации ASIC. Как и программное обеспечение, отображаемая схема является гибкой и может изменяться в течение срока службы системы или даже в течение срока службы приложения. Подобно ASIC, реконфигурируемые системы предоставляют способ отображения схем на оборудование. Таким образом, реконфигурируемые системы имеют потенциал для достижения гораздо большей производительности, чем программное обеспечение, в результате обхода цикла выборки-декодирования-выполнения традиционных микропроцессоров, а также, возможно, использования большей степени параллелизма.

Реконфигурируемые аппаратные системы бывают разных форм: от конфигурируемого функционального блока, интегрированного непосредственно в центральный процессор, до реконфигурируемого сопроцессора, соединенного с микропроцессором хоста, до автономного блока с несколькими ПЛИС. Уровень связи, детализация структур вычислений и форма ресурсов маршрутизации - все это ключевые

моменты при проектировании реконфигурируемых систем. Использование разнородных структур также может значительно улучшить общие характеристики окончательного дизайна [9].

Сила реконфигурируемых компьютеров в области криптографии, обработки сигналов и изображений и т.д. Была очевидна с момента их появления, но продолжающиеся исследования и использование многомиллионных шлюзов расширили область применения и открывают двери для новых возможностей. Реконфигурируемые системы предлагают лучшее из обоих миров: возможность программирования во время выполнения и производительность на уровне оборудования.

Список литературы: 1. Андреев А. М. Многопроцессорные вычислительные системы: теоретический анализ, математические модели и применение: учеб. пособие / А. М. Андреев, Г. П. Можаров, В. В. Сюзев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 332, с. **2.** Бедакова Н.В. Анализ методов размещения складской сети пространственно-распределенного предприятия [Текст]/ Н.В. Бедакова // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 6. – С. 123-135. **3.** Закалюжный А.А. Развитие беспроводных сетей как средство контроля и управления удаленными системами / А.А. Закалюжный // Молодой исследователь Дона. – 2018. – №4(13). – С. 46-51. **4.** Зинкин С. А., Белецкий П. А. Оптимизация размещения данных по узлам информационно-вычислительной сети [Текст]/ С.А. Зинкин, П.А. Белецкий // Современные тенденции технических наук: материалы II Междунар. науч. конф. – 2013. – С.29-31. – Режим доступа: https://moluch.ru/conf/tech/archive/74/3863/ (дата обращения: 05.06.2021). **5.** Макаренко А. В. Применение методов теории графов к исследованию Т-синхронизации хаотических систем [Текст]/ А.В. Макаренко // Проблемы управления. – 2016. – №3. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metodov-teorii-grafov-k-ssledovaniyu- t-sinhronizatsii-haoticheskih-sistem (дата обращения: 10.06.2021). **6.** A.-L. Andersen, T. D. Brunoe, K. Nielsen, C. Rösiö Towards a generic design method for reconfigurable manufacturing systems: analysis and synthesis of current design methods and evaluation of supportive tools Int J Ind Manuf Syst Eng, 42 (2017), pp. 179-195, 10.1016/J.JMSY.2016.11.006. **7.** M. A. Koshelev, D. B. Borzov, U. V. Sokolova Modelling of real-time reconfigurable system taking into account the reduction of information processing time Proceedings of MAI, 2021, № 117. - pp. 137-152. **8.** M. A. Koshelev, D. B. Borzov Modelling of wireless data transmission for relocatable receiving-transfer objects Proceedings of South-West State University. - Management, computer science, informatics. Medical instrumentation, 2021. - № 1. - pp. 146-158. **9.** Y. Koren, M. Shpitalni Design of reconfigurable manufacturing systems J Manuf Syst, 29 (2010), pp. 130-141, 10.1016/J.JMSY.2011.01.001.

УДК 658.5.012.2

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТЕВОГО ГРАФИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

Кудрявцев В. Н., Парамонова В. А. *(Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Россия, Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, ДНР)*
Тел.: +38(071)3230841; E-mail: kudryavtsevvn@mail.ru, vaparamonova@mail.ru

Abstract: *The article considers a simple method of reasonable adoption of the production program and the construction of a network schedule, according to which the most complete use of all the resources of the enterprise is possible.*
Keywords: *network planning, production program, optimization*

1. Введение

Сетевой график производства является динамической моделью производственного процесса предприятия, которая отражает технологические зависимости и последовательность выполнения комплекса работ, направленного на выполнение производственной программы, отражающая их взаимосвязь во времени с учётом затрат всех видов ресурсов и стоимости работ, с выделением критических мест. Создание сетевых графиков в машиностроении является одним из основных способов планирования производства. Необходимость в совершенствовании и автоматизации методов планирования назрела уже очень давно [1]. На самых ранних этапах были сформированы основные методы расчёта параметров сетевых графиков: аналитический способ расчета, методика расчёта сетевого графика в табличной форме и методика расчёта на графике. Все методы требовали обязательного человеческого присутствия для принятия итогового сетевого графика, поскольку зачастую получались неоднозначные решения [2-6]. Эти решения требовали, как корректировки, так и оптимизации. Среди наиболее часто встречающихся корректировок можно отметить такие: корректирование сети по критерию «время»; корректирование сети с учётом ограничений по количеству рабочих; корректирование сети с учётом ограничений по материальным ресурсам и корректирование сети с учётом ограничений по денежным ресурсам [7, 8]. Среди оптимизаций как наиболее часто встречающиеся можно отметить: оптимизация сетевых графиков при поточной организации работ и оптимизация сети по критерию «время-себестоимость». Помимо интеллектуально затратных решений ещё необходимо специально обрабатывать и исходные данные для подготовки к составлению сетевых графиков. Это и структурное «дерево» разработки, и специальное кодирование событий и работ, и формирование временных оценок, и составление специальных карточек-определителей [9, 10]. Такое количество дополнительных видов работ делает составление сетевых графиков сложным и интеллектуально затратным процессом, для реализации которого необходимы высококвалифицированные человеческие ресурсы.

Учет всех производственных факторов позволяет получить графическое построение, подобное представленному на рисунке 1 сетевому графику.

Аналогичные построения также могут быть получены на основании табличного и аналитического метода. При этом табличные методы не отличаются наглядностью представляемой информации, а аналитические методы достаточно трудоемки в разработке и использовании, и требуют значительный объем оперативной памяти компьютера, а для ускорения производимых расчетных операций целесообразно применение современного многопоточного процессора. Также целесообразно учитывать, что постоянно вносимые корректировки и попытки многокритериальной оптимизации превра-

щают аналитический метод из «трудно применимого» в «невозможный для практически значимого использования».

Как видно из рисунка 1, он трудно поддаётся корректировке. А полученная информация не отличается чёткой однозначностью. Существуют компьютерные фирмы, предоставляющие услуги по автоматизации сетевого планирования, но их продукция очень сильно специализирована и любые корректировки, как правило, требуют повторного привлечения их специалистов. Это ставит отдел главного технолога в зависимое положение при составлении сетевых графиков.

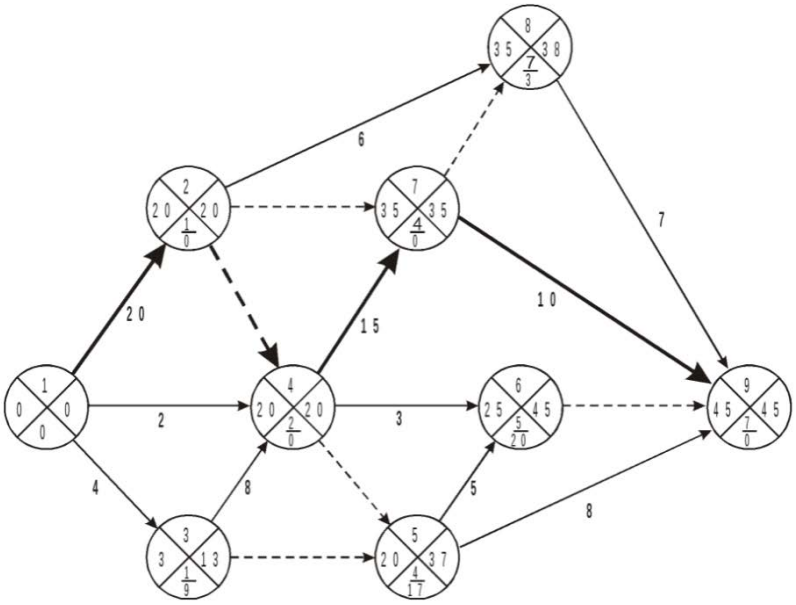


Рис 1. Графическое представление сетевого графика (цифрами условно обозначают виды работ и ресурсов, стрелками последовательности работ и их взаимосвязи)

2. Основное содержание и результаты работы

С целью обоснованного принятия производственной программы в данной работе предложено решение, базирующееся на общедоступных средствах программного обеспечения.

Прежде всего предложенный алгоритм позволяет грамотно принять производственную программу, которая основывается на точном расчёте. После разработки технологических процессов, расчета режимов резания и выбора оборудования рассчитываем производственную программу выпуска деталей на месяц. Расчет осуществляем с использованием метода линейного программирования: параметром оптимизации являются размеры партий деталей, обеспечивающие максимальную загрузку наиболее загруженной единицы оборудования. Расчет производственной программы осуществляем с использованием надстройки «Поиск решения» программы MS EXCEL. После проведения анализа загрузки оборудования технологического участка, осуществляем выравнивание ресурсов путем подбора количества единиц оборудования каждого вида и последующего пересчета размеров партий деталей.

В процессе принятия производственной программы дополнительно рассматриваем вариант работы участка в две смены. Наилучшим результатом расчета будут наибольшие размеры партий деталей, изготовление которых обеспечит максимально возможную загрузку оборудования и загруженность основных рабочих.

Математическая модель нашей задачи линейного программирования включает:

- целевую функцию, оптимальное значение которой (максимум или минимум) требуется определить;
- ограничения в виде системы линейных уравнений или неравенств; требование не отрицательности переменных.

В общем виде наша модель записывается заданным значением или следующим образом:

– целевая функция:

$$L(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \ldots + c_nx_n \rightarrow max\ (min) \quad (1)$$

– ограничения:

$$\begin{aligned} &a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \ll (\gg, =) b_1, \\ &a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \ll (\gg, =) b_2, \\ &\ldots\ldots\ldots \\ &a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \ll (\gg, =) b_m; \end{aligned} \quad (2)$$

требование не отрицательности:

$$x_{ij} \geq 0,\ j = \overline{1,n},$$

где $a_{ij}, b_i, c_i\ (i = \overline{1,m},\ j = (\overline{1,n})$ - заданные постоянные величины.

Задача состоит в нахождении оптимального значения целевой функции при соблюдении ограничений.

Вектор $\bar{x}$=($x_1, x_2, \ldots, x_n$), удовлетворяющий ограничениям, называется допустимым решением (планом) задачи линейного программирования.

План, при котором целевая функция достигает своего максимального (минимального) значения, называется оптимальным.

Для обеспечения загруженности основных рабочих рассматриваем возможность привлечения универсальных рабочих и назначение им выполнение сразу нескольких операций. Полученная методика расчета производственной программы с использованием надстройки «Поиск решения» программы MS EXCEL представлена на рисунке 2.

Ключевым в данной методике является то, что технологические процессы считаются уже оптимизированными, не требующими внутренней оптимизации, осуществление которой является сложной технической задачей [11, 12].

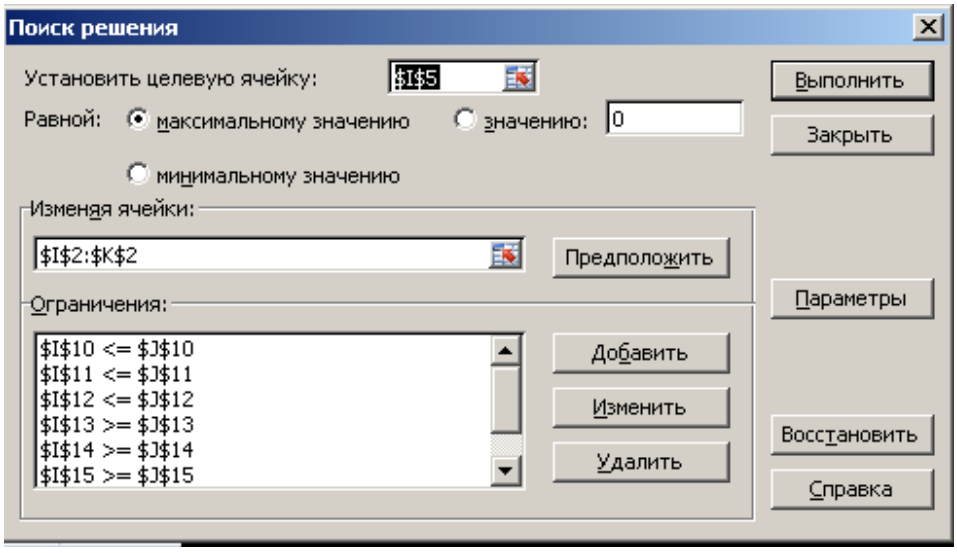


Рис. 2- Методика расчета производственной программы с использованием надстройки «Поиск решения» программы MS EXCEL

По полученным данным строим сетевой график, представленный на рисунке 3.

Анализируя данный сетевой график средствами MS EXCEL, мы можем получить таблицу ресурсов (рисунок 4), чёткий календарный план (рисунок 5) и таблицу назначений (рисунок 6).

Как видно из представленных рисунков, разработанная методика позволяет добиться 100% загрузки сразу всех ресурсов, а из рисунка 5 дополнительно видно, что предложенная методика позволяет оперативно решать не только технологические задачи, но и задачи экономического характера, рассмотрение которых требует отдельной проработки сетевых графиков.

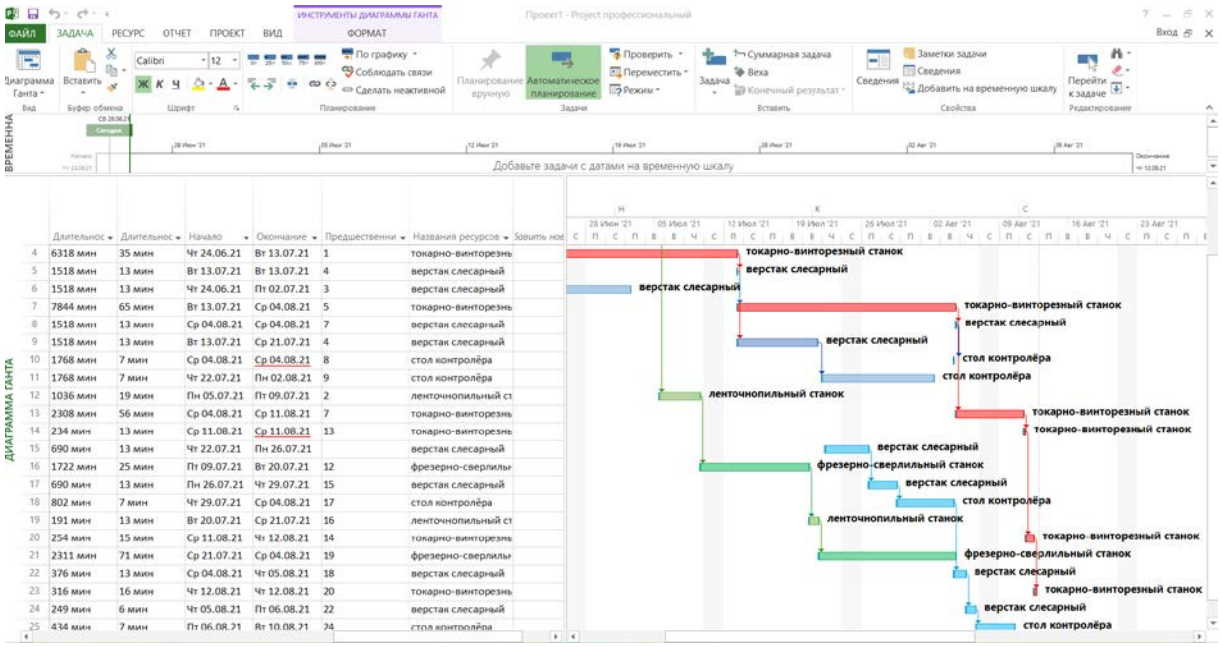


Рис. 3. Сетевой график загрузки технологического участка

	Ид.	Название	Краткое	Тип	Ед	Макс. еди	Стандартн	Затраты н	Заметки
2	0			Трудовой		100%	0,00 ₽/ч	0	
3	1	ленточнопильный станок	л	Трудовой		100%	0,00 ₽/ч	0	
4	2	токарно-винторезный станок	т	Трудовой		100%	0,00 ₽/ч	0	
5	3	верстак слесарный	в	Трудовой		100%	0,00 ₽/ч	0	
6	4	стол контролёра	с	Трудовой		100%	0,00 ₽/ч	0	
7	5	фрезерно-сверлильный станок	ф	Трудовой		100%	0,00 ₽/ч	0	
8									

Рис. 4. Таблица ресурсов.

3. Заключение

	Ид.	Активная	Режим з	Название	Длительн	Начало	Окончани	Предшест	Ур
2	0	Да	Автоматическое планир		17274 мин	24 Июнь 2	12 Август 2021 17:54		0
3	1	Да	Планир	УКТИ.000.001	17 мин	24 Июнь 2	24 Июнь 2021 9:17		1
4	2	Да	Планир	УКТИ.000.001	3545 мин	24 Июнь 2	05 Июль 2021 12:05		1
5	3	Да	Планир	УКТИ.000.001	35 мин	24 Июнь 2	24 Июнь 2	1	1
6	4	Да	Планир	УКТИ.000.001	6318 мин	24 Июнь 2	13 Июль 2	1	1
7	5	Да	Планир	УКТИ.000.001	13 мин	13 Июль 2	13 Июль 2	4	1
8	6	Да	Планир	УКТИ.000.001	3037 мин	24 Июнь 2	02 Июль 2	3	1
9	7	Да	Планир	УКТИ.000.001	7844 мин	13 Июль 2	04 Август	5	1
10	8	Да	Планир	УКТИ.000.001	13 мин	04 Август	04 Август	7	1
11	9	Да	Планир	УКТИ.000.001	3037 мин	13 Июль 2	21 Июль 2	4	1
12	10	Да	Планир	УКТИ.000.001	7 мин	04 Август	04 Август	8	1
13	11	Да	Планир	УКТИ.000.001	3535 мин	22 Июль 2	02 Август	9	1
14	12	Да	Планир	УКТИ.000.002	2071 мин	05 Июль 2	09 Июль 2	2	1
15	13	Да	Планир	УКТИ.000.002	2308 мин	04 Август	11 Август	7	1
16	14	Да	Планир	УКТИ.000.002	234 мин	11 Август	11 Август	13	1
17	15	Да	Планир	УКТИ.000.002	1381 мин	22 Июль 2	26 Июль 2021 17:10		1
18	16	Да	Планир	УКТИ.000.002	3445 мин	09 Июль 2	20 Июль 2	12	1
19	17	Да	Планир	УКТИ.000.002	1381 мин	26 Июль 2	29 Июль 2	15	1
20	18	Да	Планир	УКТИ.000.002	1603 мин	29 Июль 2	04 Август	17	1
21	19	Да	Планир	УКТИ.000.003	507 мин	20 Июль 2	21 Июль 2	16	1
22	20	Да	Планир	УКТИ.000.003	254 мин	11 Август	12 Август	14	1
23	21	Да	Планир	УКТИ.000.003	4622 мин	21 Июль 2	04 Август	19	1
24	22	Да	Планир	УКТИ.000.003	751 мин	04 Август	05 Август	18	1
25	23	Да	Планир	УКТИ.000.003	316 мин	12 Август	12 Август	20	1
26	24	Да	Планир	УКТИ.000.003	498 мин	05 Август	06 Август	22	1
27	25	Да	Планир	УКТИ.000.003	868 мин	06 Август	10 Август	24	1

Рис 5. Календарный план по сетевому графику

В работе были проанализированы основы планирования с помощью операционного и производственного менеджмента, теории управления производством, проанализирован процессный подход к управлению и построению карт потоков. Применены методы синхронизированного производства и сетевых технологий. Проанализированы оптимизационные подходы. На основании обобщения была предложена методика, не требующая дорогого программного обеспечения, но при этом позволяющая выполнить сетевое планирование производства, контролировать загруженность ресурсов предприятия и оперативно контроли-

ровать выполнение производственной программы, а также вносить корректирующие изменения прямо в ходе работы.

	Название зада	Название ресурса	% завер	Трудозатраты	Единицы
2	УКТИ.000.001	ленточнопильный станок	0	17м	100%
3	УКТИ.000.001	ленточнопильный станок	0	3 545м	100%
4	УКТИ.000.001	токарно-винторезный станок	0	35м	100%
5	УКТИ.000.001	токарно-винторезный станок	0	6 318м	100%
6	УКТИ.000.001	верстак слесарный	0	13м	100%
7	УКТИ.000.001	верстак слесарный	0	3 037м	100%
8	УКТИ.000.001	токарно-винторезный станок	0	7 844м	100%
9	УКТИ.000.001	верстак слесарный	0	13м	100%
10	УКТИ.000.001	верстак слесарный	0	3 037м	100%
11	УКТИ.000.001	стол контролёра	0	7м	100%
12	УКТИ.000.001	стол контролёра	0	3 535м	100%
13	УКТИ.000.002	ленточнопильный станок	0	2 071м	100%
14	УКТИ.000.002	токарно-винторезный станок	0	2 308м	100%
15	УКТИ.000.002	токарно-винторезный станок	0	234м	100%
16	УКТИ.000.002	верстак слесарный	0	1 381м	100%
17	УКТИ.000.002	фрезерно-сверлильный станок	0	3 445м	100%
18	УКТИ.000.002	верстак слесарный	0	1 381м	100%
19	УКТИ.000.002	стол контролёра	0	1 603м	100%
20	УКТИ.000.003	ленточнопильный станок	0	507м	100%
21	УКТИ.000.003	токарно-винторезный станок	0	254м	100%
22	УКТИ.000.003	фрезерно-сверлильный станок	0	4 622м	100%
23	УКТИ.000.003	верстак слесарный	0	751м	100%
24	УКТИ.000.003	токарно-винторезный станок	0	316м	100%
25	УКТИ.000.003	верстак слесарный	0	498м	100%
26	УКТИ.000.003	стол контролёра	0	868м	100%
27					

Рис 6. Таблица назначений

Данная методика является оптимальной для малых машиностроительных предприятий с постоянно меняющейся номенклатурой выпускаемой продукции и не имеющих возможность приобрести дорогостоящее программное обеспечение.

Список литературы: 1. Параубек Г.Э. Сетевое планирование и управление (Методы построения, расчётов и оптимизации сетевых графиков). – М.: Экономика, - 1967 г., - 143 с. **2.** Производственный менеджмент: Учебник / Под ред. В.А.Козловского.- М.:ИНФРА-М, 2005.- 574 с. **3.** Хейзер Дж., Рендер Б. Операционный менеджмент. 10-е изд..-СПб.:Питер, 2016.- 1056 с. **4.** Стивенсон В.Дж. Управление производством / Пер. с англ. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. – 928с. **5.** Чейз Р.Б., Джейкобз Ф.Р., Аквилано Н.Дж. Производственный и операционный менеджмент .- М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007.- 730 с. **6.** Пелих С.А., Гоев А.И. Операционный менеджмент. Оперативное управление производством .- Мн.: БГЭУ, 2001.-182с. **7.** Репин В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнеспроцессов.- 5-е изд. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2007 .- 408 с. **8.** Ротер М. Учитесь видеть бизнес-процессы. Практика построения карт потоков создания ценности. – М.: Альпина Бизнес Букс: CBSD, Центр развития деловых навыков, 2006.-144 с. **9.** Слак Н., Чеймберс С., Джонстон Р. Организация, планирование и проектирование производства. Операционный менеджмент.- М.: ИНФРА-М, 2009.- XXVI, 790с. **10.** Такеда Х. Синхронизированное производство. М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2008.-288 с. **11.** Оптимизация режимов электроконтактно-абразивной обработки //Левашова Е.Л., Кудрявцев В.Н./ Неделя науки СПбПУ 14-19 ноября 2016, СПбПУ, Санкт-Петербург. – 2016. – С. 171-174. **12.** Разработка модели оптимизации для электроэрозионной прошивки сплавов//Кудрявцев В.Н., Дроздов И.М./ Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Часть 1. – СпбПУ, Санкт-Петербург. – 2015. – С. 141-143.

ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО ВЫХЛОПА В РАМКАХ МОДЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ И НЕРАВНОВЕСНОЙ КИНЕТИКИ

Ладоша Е.Н., Холодова С.Н., Цымбалов Д.С. *(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)*
Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

Abstract: *An simplified model describing the piston engine toxicity proposed. The model is based on mathematical programming related to chemical transformations. The simplification is performed to reduce the model complexity as possible with minimal effect on it's adequacy. The elaboration enables to reproduce the toxicity of engine exhaust. The development is useful to improve engine technologies and operation including environmental safety aspects.*

Конкуренция требует постоянно совершенствовать конструкцию и технологию двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также процедуры обкатки, регулирования и техобслуживания. При этом экологические требования фактически определяют развитие двигателестроения, что актуализирует научные знания о физико-химических механизмах преобразования энергии и образования токсичных веществ в ДВС [1].

Современные средства технической диагностики ДВС, в т.ч. экспресс-анализа отработавших газов (ОГ), не позволяют наблюдать внутрицилиндровый процесс с необходимым временным, пространственным и химическим разрешением. Соответственно детальные информационные модели внутрицилиндровой динамики, допускающие интеграцию с измерительной аппаратурой различного назначения, представляют особый научный и прикладной интерес. Их фундамент составляют новейшие достижения физикохимии горения. Важным качеством таких моделей представляется их простота, призванная обеспечить легкость встраивания в различные аппаратно-программные комплексы.

В данной работе предпринята попытка оценить возможности термохимического подхода для корректного описания химического состава ОГ. При этом результат моделирования сопоставляется с существенно более детальным – на основе упрощенного, но динамического или термокинетического подхода.

Результатом сжигания моторных топлив ДВС служат как продукты полного сгорания CO_2 и H_2O, так и некоторые промежуточные (CO, C_xH_y, O, OH, H) и побочные (NO) компоненты, образующиеся в т.ч. в результате диссоциации конечных продуктов. К вредным из вышеперечисленных веществ относятся угарный газ, углеводороды и оксиды азота.

Поскольку горение в ДВС быстрый процесс, протекающий при высокой температуре, для оценки химического состава ОГ используем надлежаще модифицированную модель химического равновесия. Ее особенность состоит в том, что неоднородный по химическому составу заряд делят на три зоны: в первой соотношение топливо – воздух соответствует расчетному, во второй несколько обогащенной, а в третьей – несколько обедненной смеси. Степень неоднородности заряда при этом следует рассматривать как эмпирический параметр модели, который отвечает качеству организации рабочего процесса. Соответственно стандартную модель химического равновесия следует применить трижды – для зон с обедненной, нормальной и обогащенной смесью, после чего результаты осреднить.

Важным моментом в таких расчетах является удачный выбор «химического базиса» – учитываемых в модели веществ. Предварительный анализ термохимических показателей вероятных при горении в ДВС веществ позволяет ограничиться в первом приближении веществами **CO** – O – CO_2 – O_2 – **NO** – OH – H – H_2O – H_2 – N_2 – $\mathbf{C_2H_2}$, среди которых вредные для человека и окружающей среды выделены жирным шрифтом [2].

В математических терминах модель термодинамического равновесия для выписанной системы задается следующим образом:

$$G(P,T)=\sum_j e^{c_j}[g_j(T)+RT\ln(\frac{e^{c_j}}{\sum_j e^{c_j}}\cdot P)]\rightarrow \min, \quad (1)$$

$$g_j(T)=H_j(T_0)+C_{Pj}(T-T_0)-C_{Pj}\ln\frac{T}{T_0}-S_j(T-T_0) \ , \quad (2)$$

$$n_j = e^{c_j}, \qquad \sum_j n_j = \sum_j e^{c_j} = n \ ,$$

$$j = \{CO, O, CO_2, O_2, NO, OH, H, H_2O, H_2, N_2, C_2H_2\} , \quad (3)$$

$$\alpha \boldsymbol{n} = \beta \ . \quad (4)$$

В формулах (1)-(4) $g_j(T)$ – термохимический потенциал *j*-го вещества, $H_j(T_0)$ – энтальпия его образования в стандартных условиях (298 К); C_{Pj} и S_j – молярные теплоемкость и энтропия; n_j – молярная концентрация; c_j – искусственная переменная, призванная исключить отрицательные концентрации; α – матрица содержания составляющих вещества элементов (углерода C, водорода H и азота N) в компонентах смеси; β – вектор количества химических элементов, из которых состоят рассматриваемые вещества. Использованные числовые параметры модели приведены в табл. 1-2.

Таблица 1. Термохимические параметры составляющих систему веществ

N пп.	Химическая формула вещества	*H*, кДж/моль	*S*, Дж/моль·К	C_P, Дж/моль·К
1	CO	-110.6	197.7	29.1
2	O	249.2	161.0	21.9
3	CO_2	-393.8	213.8	37.1
4	O_2	0	205.0	29.4
5	NO	90.3	210.7	29.9
6	OH	33.5	183.9	29.8
7	H	218.3	114.8	20.8
8	H_2O	-242	190.0	33.5
9	H_2	0	130.6	28.8
10	N_2	0	191.5	20.1
11	C_2H_2	227.1	201.0	44.0

Таблица 2. Содержание элементов в веществах, выраженное числом атомов

N пп.	Элемент Химическая формула вещества	C	H	N	O
1	CO	1	0	0	1
2	O	0	0	0	1
3	CO_2	1	0	0	2
4	O_2	0	0	0	2
5	NO	0	0	1	1
6	OH	0	1	0	1
7	H	0	1	0	0
8	H_2O	0	2	0	1
9	H_2	0	2	0	0
10	N_2	0	0	2	0
11	C_2H_2	2	2	0	0

Система $CO – O – CO_2 – O_2 – NO – OH – H – H_2O – H_2 – N_2 – C_2H_2$ моделировалась при температуре и давлении, характерных для горения в ДВС. Коэффициент избытка воздуха выбирался равным 0.7, 1 и 1.3.

При стехиометрическом соотношении «топливо - окислитель» брутто-уравнение (химическая схема) горения моторных топлив имеет вид:

$$C_xH_yN_z + k\,N_vO_w \rightarrow x\,CO_2 + ½\,y\,H_2O + ½\,(z + k\,v)\,N_2\,, \qquad (5)$$

в котором v, w, x, y, z – параметры, характеризующие содержание различных элементов в топливе и окислителе, k – стехиометрический коэффициент. При неполном горении и вторичных процессах в составе ОГ оказываются все вещества из табл. 1-2.

Удобно считать, что

$$x + y + z = 1 \qquad \text{и} \qquad v + w = 1\,. \qquad (6)$$

Стехиометрический коэффициент, очевидно, равен

$$k = (2\,x + ½\,y)\cdot v^{-1}\,. \qquad (7)$$

При коэффициенте избытка окислителя $\alpha > 1$ схема (5) трансформируется в

$$C_xH_yN_z + k\,\alpha\,N_vO_w \rightarrow x\,CO_2 + ½\,y\,H_2O + ½\,(z + k\,\alpha\,v)\,N_2 + k\,(\alpha - 1)\,w\,O\,. \qquad (8)$$

Если коэффициент избытка окислителя $\alpha < 1$, вместо (5) имеем

$$C_xH_yN_z + k\,\alpha\,N_vO_w \rightarrow x\,\alpha\,CO_2 + ½\,y\,\alpha\,H_2O + ½\,(z + k\,v)\,\alpha\,N_2 + \\ + 1/2\cdot(1 - \alpha)\,x\,C_2H_2 + 1/2\cdot(1 - \alpha)\,(y - x)\,. \qquad (9)$$

Уравнения (5),(8),(9) схематизируют всевозможные соотношения компонентов и позволяют задавать соответствующие материальные ограничения. В частности, бензин описывается условной формулой C_7H_{13}, а воздух как окислитель формулой N_4O. После нормировки (5) эти формулы принимают дробный вид – $C_{0.35}H_{0.65}$ и $N_{0.8}O_{0.2}$ соответственно. Условиям стехиометрического сжигания соответствует величина $k = 1.281$ и доли элементов в смеси C – 0.153, H – 0.285, N – 0.449, O – 0.112. Аналогично по формулам (8)-(9) рассчитывается элементный состав горючей смеси для нестехиометрических условий $\alpha \neq 1$. При $\alpha = 0.7$ (недостаток окислителя или переобогащенная смесь) доли элементов составляют: C – 0.185, H – 0.343, N – 0.378, O – 0.095, а при $\alpha = 1.3$ (обедненная смесь): C – 0.131, H – 0.244, N – 0.5, O – 0.125.

В табл. 3 приведены результаты расчета состава ОГ при различном коэффициенте избытка воздуха согласно модели (1)-(9), табл. 1-2. Для сопоставления в табл. 4 приведены результаты расчетов этого состава для различных режимов работы двигателя ВАЗ-2108 в рамках термокинетической модели [3].

Таблица 3. Содержание токсичных компонентов в ОГ автомобиля при различном коэффициенте избытка воздуха согласно термодинамической модели (1)-(9), табл. 1-2

α	[C]	[H]	[N]	[O]	**[CO]**	**[C_2H_2]**	**[NO]**
0.7	0.185	0.343	0.378	0.095	0.012	0.23	$9.7\cdot10^{-5}$
1	0.153	0.285	0.449	0.112	0.006	0.17	$1.3\cdot10^{-5}$
1.3	0.131	0.244	0.5	0.125	0.007	0.12	$2.5\cdot10^{-4}$

Таблица 4. Содержание токсичных компонентов в отработавших газах ДВС ВАЗ 2108 в рамках термокинетической модели [3]

Частота вращения коленвала, $мин^{-1}$, Вещество	1000	2000	4000
[C_xH_y]	0.013	0.014	0.013
[CO]	0.0077	0.0076	0.0078
[NO]	0.0099	0.014	0.017

Сопоставление результатов термодинамического и кинетического моделирования токсичности ОГ ДВС свидетельствуют о существенном влиянии химических механизмов и термодинамических условий процесса на скорость реализации равновесия. В частности видно, что содержание угарного газа в выхлопе хорошо описывается равно-

весной стационарной моделью, содержание оксидов азота – занижается на два порядка величины, а содержание углеводородов, наоборот, завышается на порядок.

Расхождение объясняется динамической сложностью реального процесса образования ОГ [3,4], показанной на рис. Приведенные на рис. данные относятся к малой нагруженности ДВС (Ω = 2000 мин–1), соответствующей равномерному движению по ровной поверхности со скоростью ~ 60 км/ч.

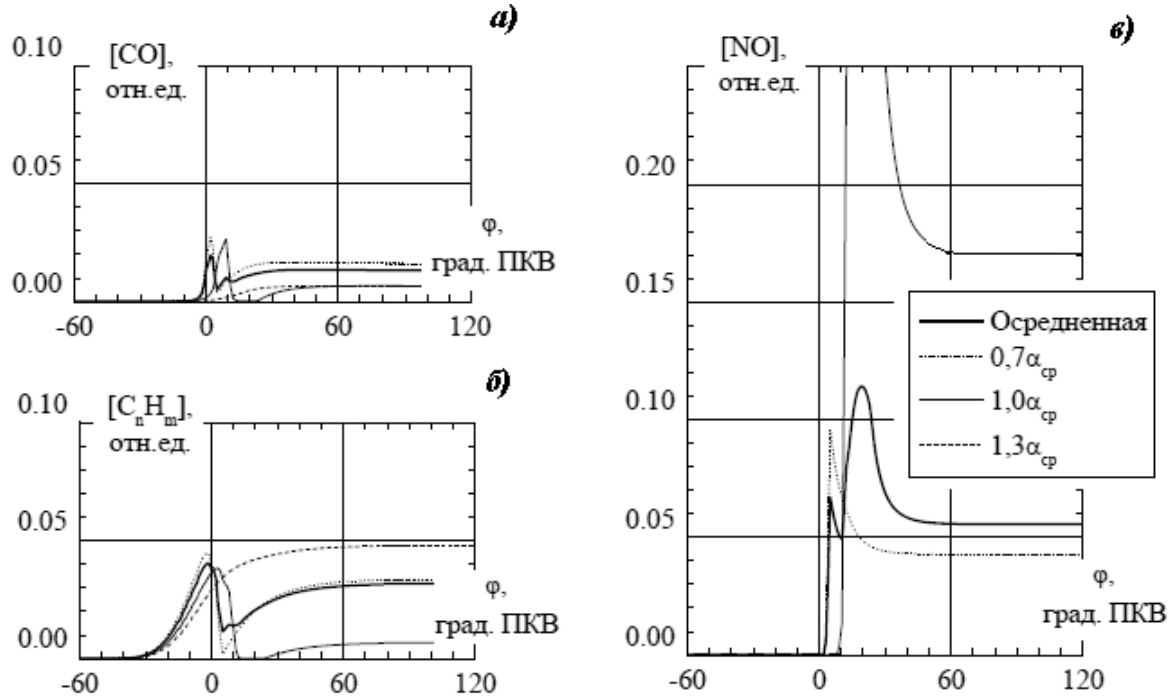


Рис. 1. Динамика образования/гибели основных токсичных веществ в двигателе ВАЗ 2108 (позонно), рассчитанные согласно кинетической модели рабочего процесса при Ω = 2000 мин$^{-1}$

Результаты выполненных исследований сводятся к следующему. Упрощенный термохимический алгоритм расчета состава ОГ автомобиля позволяет верно определять лишь содержание CO, в то время как расчет содержания оксидов азота и углеводородов следует осуществлять в рамках детальных термокинетических моделей.

Список литературы: 1. Якубовский Ю. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды. – М.: Транспорт, 1979. **2.** Яценко О.В. Информационно-математические модели внутрицилиндровых процессов в поршневом двигателе: механизмы, уравнения, термодинамические и кинетические коэффициенты / Св-во об официальной рег. БД № 2004620137. – М.: РОСПАТЕНТ, 2004. **3.** Бакулин В.Н., Ладоша Е.Н., Потопахин В.А., Яценко О.В. Моделирование кинетики неравновесных физических процессов и реакций в многокомпонентном турбулентном заряде поршневых двигателей внутреннего сгорания // Мат. моделирование. – 2007. – Т. 19. – № 12. – С. 81-97. **4.** Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. – М.–Л: Изд-во АН СССР, 1947.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

Лапаева И.В., Белокриницкая О.В., Горобец И.А.
(МОУ «Профильная гимназия №122 г. Донецка», ГОУВПО «ДОННТУ», г. Донецк)
E-mail: iren.vit77@gmail.com

Abstract: *The tasks of education in relation to modern requirements and challenges of society are considered. Analysis of the results, trends and reasons for the state of modern education are given. Recommendations for conducting a distance learning process are given.*
Key words: *education, problems, analysis, tool, skills, tasks.*

В настоящее время, одним из ключевых инструментов повышения эффективности работы предприятий и учреждений, предопределяющих состояние экономики страны, является подготовка системой образования высококвалифицированных инженерных кадров в концепции непрерывного образования школа – колледж - ВУЗ. Так, статьями 63 и 66 Закона об образовании [1] в качестве целей общего и высшего образования предусмотрено: формирование навыков самостоятельной учебной деятельности на основе индивидуализации, продолжение образования и обеспечение подготовки высококвалифицированных кадров по всем основным направлениям общественно полезной деятельности в соответствии с потребностями общества и государства.

Процесс непрерывного образования школа – колледж – ВУЗ имел свои особенности, охарактеризованные в исследованиях авторов и заключающиеся в определённых тенденциях развивающегося диссонанса соответствия уровня подготовки абитуриентов к требованиям высших учебных заведений и современного технократического общества [2,3]. Такое положение дел в образовательной сфере усугублялось введением и дальнейшей культивацией с середины 90-х годов либерального отношения к обучаемым (подражая западной манере обучения). Либерализм отношений к обучаемому приводил к нивелированию авторитета учителя, что влекло за собой неизбежное снижение уважения к педагогическому коллективу, нигилизму и потере мотиваций к дальнейшему обучению [3]. Между тем, как отмечает автор работы [4], в школах и гимназиях, а затем и в колледжах, училищах и вузах человек получает основную базу знаний, которая в дальнейшем определяет его место в обществе. Более того, студенты представляют наиболее передовую часть молодёжи, это будущее нации, которому необходимо как передавать накопленный опыт, так и находить новые подходы в сохранении связи поколений [4].

Однако, в конце 2019 года общество столкнулось с новыми серьёзными вызовами, связанными с появлением и быстрым распространением коронавируса COVID-19, в результате чего процесс обучения перешёл в дистанционный режим. Защитная реакция человечества против эпидемии подтолкнула все учебные заведения и их преподавательский состав к вынужденному использованию дистанционного обучения, а также интенсивному внедрению в учебный процесс информационных технологий и средств телекоммуникаций [5]. Анализ материалов публикаций ВОЗ, даёт основание полагать, что действие новой вирусной инфекции не прекратится в ближайшие годы, вирус будет модифицироваться и преобразовываться, вызывая всё новые и новые угрозы человеческой популяции планеты. Поэтому, дистанционное обучение, возможно, станет обыденным стандартом получения образования.

За прошедшее время работы учебных заведений появилась информация о некоторых результатах работы в дистанционном режиме. Проанализировав результаты SWOT-анализа по организации и внедрению дистанционного обучения в гимназии [6] с учётом результатов исследований авторов, можно выделить особенности, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты использования дистанционного обучения в гимназии

Сильные стороны	Слабые стороны	Угроза	Возможности
1.Экономия времени	1.Отсутствие непосредственного контакта ученика и учителя.	1.Без соответствующего контроля «слабый» ученик не усвоит даже базовый минимум.	1.Возможность учиться, где угодно и когда угодно.
2.Вовлечение в учебный процесс обучающихся, по разным причинам не посещающих образовательное учреждение	2.Отсутствие методики дистанционного преподавания в образовательном учреждении. Каждый учитель не обладает достаточными знаниями о дистанционных технологиях.	2.Возможна подмена своих результатов чужими.	2.Получать образование лицами с ограниченными возможностями. Дистанционное обучение идеально для домашнего обучения.
3.Реализация индивидуальной траектории развития обучающегося. Выбор индивидуального графика обучения.	3.Трудности контроля учащихся.	3.Слабые технические навыки некоторых учителей.	3.Возможность дистанционного обучения учеников, находящихся в отъезде.
4.Организация работы с одарёнными детьми. Разбор заданий повышенной сложности за пределами урочной системы. Более широкий охват материала, не только УМК, но и дополнительных познавательных материалов.	4.Не у всех учащихся есть Skype, электронная почта.	4.Недостаточность оцифрованных российских учебников (учебных пособий и др.) может привести к их замещению на зарубежные источники и, соответственно, потере национальной культуры.	4.Расширение и углубление знаний по предмету через организацию проектной деятельности, проведение олимпиад, конкурсов, онлайн тестов. Подготовка к ЕГЭ, ОГЭ.
5.Быстра связь с учащимися в любое им удобное время.	5. Временное отсутствие Интернета.	5.Негативное влияние на здоровье использования компьютера и работы в Интернете.	5.Процесс обучения документируется – у обучающихся остаётся сам курс обучения (презентации, фрагменты урока), электронная переписка с учителем, это даёт возможность обращаться к нему позже, по мере необходимости.
6.Возможность обучаться в своём темпе, а не со скоростью самого медленного ученика.	6. Рассчитано на ответственного, целеустремлённого (мотивированного) ученика.	6. Потеря чувства коллектива в процессе обучения.	6.Индивидуальный характер обучения. Ученик изучает учебный материал в процессе всего времени учёбы, а не только в период занятий, что гарантирует более глубокие остаточные знания.
7.Дистанционная форма обучения заставляет ученика заниматься самостоятельно, развивая навыки самообразования.	7. Рассчитано на ответственного, целеустремлённого (мотивированного) ученика	7. Отсутствие мотивации к самостоятельной работе	7. Получение важного навыка самостоятельной работы с информационным материалом.

Проанализировав информацию, указанную в табл. 1, считаем, что потеря навыков социализации детей в обществе также является угрозой. Кроме того, ещё одной возможностью является развитие навыков самообразования, самоорганизации, формирование универсальных учебных действий (УУД) обучающихся, таких как поиск и отбор необходимой информации из информационных источников.

Кроме указанной в табл.1 информации, следует отметить тенденцию снижения усвоения точных наук выпускниками средних школ и лицеев. Так в 2021 году, согласно статистическим данным украинского агентства [7], 31,11% выпускников не сдали тестирование ЗНО по математике, что более чем в 2,5 раза превышает показатель «доковидного» периода - 2020 года (12,71%).

Обратной стороной дистанционного образования также является то, что значительная часть зарегистрировавшихся на онлайн-платформах никогда не начинают обучение, а до конца доводят его всего 20–60% пользователей [8]. Хотя исследование [8] в целом показало полностью положительное отношение 73% обучающихся к дистанционному образованию, в то же время нельзя не учитывать мнение части обучающихся о том, что «…вне условий пандемии я бы предпочёл формат «живого» общения с педагогами и группой». Кроме того, несмотря на доступность к разнообразным специализированным онлайн-источникам, часть студентов по-прежнему склонны привычно искать информацию в Google или Википедии.

Психолог развития Элисон Гопник из Калифорнийского университета в Беркли в интервью Би-би-си отметила: «Обучение в классе, когда ученики сидят перед учителем и он что-то рассказывает, такой тип образования мы переняли из эпохи индустриального развития. Полученные таким образом навыки были необходимы в далёком прошлом. Такие навыки нужны для выполнения заданий, которые в ближайшем будущем будут выполнять роботы» [9].

Однако, существует и противоположная точка зрения: "Если вы хотите будущее, в котором студентам просто выдают факты, информацию, а они её зазубривают, тогда обучение онлайн вполне подходит. Но это ненастоящее образование", - говорит один из профессоров Оксфордского университета. «То, что мы видим во время пандемии, - это не новая модель образования. Это просто запасной вариант, пока нельзя восстановить существовавшую ранее модель образования» [9]. Авторы статьи также придерживаются этого мнения.

Тем не менее, текущий этап развития экономики, современная ситуация в бизнесе, вызванная процессами санкций западных стран и необходимостью импортозамещения, обусловили ряд требований к персоналу, которые озвучили работодатели РФ, сформулировавшие ряд приоритетных требований к умениям и навыкам современных работников:

- чётко изъясняться и контактировать с окружающими коллегами;
- быстро находить решения и приходить к взаимным договорённостям;
- наличие коммуникационных, креативных и лидерских качеств;
- умение работать с информацией;
- анализировать массив данных в условиях цифровизации экономики;
- стрессоустойчивость и самоорганизация;
- знание иностранного языка.

Все перечисленные выше навыки и умения должны быть приобретены в результате получения образования в связке: школа – колледж – ВУЗ. Поскольку дистанционное обучение, по всей видимости, будет присутствовать и в дальнейшем в образовательной системе - необходима его рационализация и оптимизация, заключающаяся в использовании более эффективных методик. По мнению авторов, новые методики проведения обучения в режиме онлайн должны включать не только

образ преподавателя, смотрящего в глаза каждого обучаемого, информационные материалы, созданные, например, средствами power-point, но и обязательный онлайн тест по пройдённому материалу протяжённостью 5-7 минут в конце учебного занятия или модуля. Средняя оценка таких тестов, равно как и оценка за выполненные самостоятельные задания (или работы), а также экзамены должны быть учтены при итоговой аттестации, например, в пропорции 25 х 25 х 50%.

Проведение учебных занятий по такой методике предполагает использование современного телекоммуникационного инструмента, в качестве которого, например, авторами были использованы учебные платформы «ЯКласс» и «Учи.ру», апробированные в процессе дистанционного обучения в МОУ «Профильная гимназия №122 г. Донецка» (ДНР). Учёт текущих оценок тестов, самостоятельной работы обучающихся, экзаменов и итоговой аттестации должен соответствующим образом вестись в корпоративном цифровом пространстве учреждения. Для этого потребуется использование и освоение преподавательскими коллективами учебных заведений современных средств XRM (управление отношениями с клиентами) и PDM (управление проектными данными) [10], а в дальнейшем, с учётом концепции образования в течении всей жизни (Life Long Learning) [11] – и PLM (управление жизненным циклом) [12] с целью повышения квалификации и переквалификации обучающегося.

Текущая и динамически изменяемая эпидемиологическая ситуация вскоре потребует создания, использования всеми участниками образовательного процесса новых телекоммуникационных инструментов:

1. корпоративного и государственного стандарта проведения обучения в дистанционном формате;
2. единых корпоративных баз методических и учебных данных;
3. инструментов упорядоченного хранения учебных, информационных материалов, их пополнения, администрирования, разграничения прав доступа к информации, мониторинга результатов работы;
4. новых отечественных онлайн-платформ для одновременного ведения учебных занятий (в форме лекции, урока, практического занятия) и проведения экспресс-тестирования результатов обучения в течении занятия в реальном времени.

Решению современных образовательных задач должны поспособствовать:

- разработанные эффективные методики подготовки образовательного процесса,
- возможность самостоятельного изучения специально подготовленного материала (электронные конспекты, методические указания, лабораторные практикумы, задачники, вопросники, электронные издания литературы, тестовые системы, электронное расписание и пр.), выложенные на сервере (либо «облаке») учебного заведения,
- обязательная дальнейшая цифровизация вспомогательных процессов образования и подготовки учебных занятий.

Общение преподавателя и обучающихся должно оставаться живым и не превращаться в общение электронных образов.

Выводы. Для подготовки конкурентоспособных специалистов в условиях динамично изменяющихся современных вызовов, стоящих перед человеческим сообществом, для реализации дистанционного образования необходим методический подход. Комплексное решение задачи перезагрузки образовательной системы лежит в дальнейшем реформировании пространственно-временной логической пирамиды: школа – колледж - ВУЗ. Эффективному решению этой задачи способствуют: использование современных методик и средств коммуникаций; разработка и использование корпоративных и государственных стандартов дистанционного

обучения; активное использование инструментов управления, упорядоченного хранения учебных, информационных материалов, их администрирования; разработка новых и совершенствование существующих отечественных онлайн-платформ для эффективного ведения учебных занятий.

Список литературы: **1.** Закон об образовании ДНР № 55-IНС от 19.06.2015, действующая редакция по состоянию на 31.03.2021 [Электронное издание] – Режим доступа: https://dnrsovet.su/zakon-dnr-ob-obrazovanii. **2.** Горобец, И.А. Использование метода проектов и CALS – технологий для повышения эффективности обучения студентов инженерных специальностей / И.А.Горобец, И.В.Лапаева, Н.В.Голубов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XX межд. науч.-тех. конф. в г. Севастополе 16 – 21 сентября 2013 г. В 3-х т. – Донецк: ДонНТУ, 2013. Т.1. – с. 162-164. **3.** Горобец, И.А. Современные вызовы и особенности подготовки квалифицированных инженерных кадров / И.А.Горобец, И.В.Лапаева, Н.В.Голубов // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 86-89. **4.** Лялюк, А.В. О проблемах дистанционного формата обучения в вузе в новых социокультурных условиях / А.В. Лялюк. – Текст : электронный / Этнос и культура в эпоху глобализации: Сборник материалов IV Международной научной очно-заочной конференции, 1-2 июля 2021 г. – Краснодар: Изд. КубГТУ, 2021. – С.461-466. - Режим доступа: https://kubstu.ru/data/celist/CEM2149.pdf **5.** Подиева, Е.А. От сессии до сессии живут студенты весело (о студентах 1950-1960 гг.) [Электронный ресурс] / Е.А.Подиева, А.С.Бочкарева, Ю.В.Хотина // Этнос и культура в эпоху глобализации: Сборник материалов IV Международной научной очно-заочной конференции, 1-2 июля 2021 г. – Краснодар: Изд. КубГТУ, 2021. - С.679-684. [Электронное издание] - Режим доступа: https://kubstu.ru/data/celist/CEM2149.pdf **6**. SWOT-анализ по организации и внедрению дистанционного обучения в гимназии [Электронное издание] - Режим доступа: http://gymnasium44.ru/teachers/folder/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B%20%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%82%20%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%87/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%E2%84%963.pdf **7.** Математика. Результати ЗНО 2021 року [Электронное издание] - Режим доступа: http://osvita.ua/test/rez_zno/82828 **8.** Ахметжанова Г.В. Недостатки и перспективы дистанционного обучения: социологический аспект / Г.В. Ахметжанова, Т.В. Емельянова // Педагогика, психология, общество: новая реальность : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (Чебоксары, 22 янв. 2021 г.) – Чебоксары: ИД «Среда», 2021. – С. 109-113. **9.** Смирнова О. "Ненастоящее образование". Как пандемия вскрыла проблемы онлайн-обучения [Электронное издание] - Режим доступа: https://www.bbc.com/russian/vert-cap-54027632 **10.** Меняев М.Ф. Информационные технологии управления: Учебное пособие в 3-х кн. Кн.3. Системы управления организацией - М: Омега - Л, 2010 - 464 с. **12.** Обучение в течение жизни (Life Long Learning) [Электронное издание] - Режим доступа: https://hr-academy.ru/hrarticle/obuchenie-v-techenie-jizni-life-long-learning.html **13**. Шаламов А. Управление жизненным циклом изделия с помощью средств корпоративной информационной системы / А.Шаламов, О.Бесов // САПР и графика. №6, 2021г. С.32-39. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://sapr.ru/article/26174

ТЕХНОСФЕРА И МАШИНОСТРОЕНИЕ: ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ

Липаев А.А. (*УГГУ, г. Екатеринбург, Россия*)
Тел. +79826041779, E-mail: lipaevagni@yandex.ru

Abstract: *Mechanical engineering is the leading branch of the national economy, playing a major role in accelerating scientific and technological progress, and serving as a tool for managing the technosphere in the organization of rational environmental management. At the same time, engineering production is a source of a wide range of solid, liquid, gaseous and energy waste that pollute nature and are not always effectively used as secondary material resources. The key task of modern mechanical engineering is considered, which is associated with reducing the amount of production waste, reducing their harmful effects on the environment, as well as their processing and use as secondary raw materials.*
Key words: *technosphere, mechanical engineering, environmental management, production waste, low-waste technologies, additive technologies.*

Введение

Техносфера представляет собой совокупность всех искусственных объектов, созданных человеком для удовлетворения своих материальных и духовных потребностей и комфортного проживания. Создавая среду обитания человечество непрерывно взаимодействует с природой. История этого взаимодействия представляет собой единство двух противоположных тенденций. Первая из них связана с развитием производительных сил и расширением его господства над природой, а вторая – ростом уровня противоречий, дисгармонией между человеком и окружающей средой [1].

Разрешение этого противоречия возможно только при управлении техносферой, под которым понимается прогнозирование, планирование, организация, мотивация, координация и контроль за действиями человеческого общества по реализации его материальных и духовных потребностей [2].

Машиностроение, как известно, представляет собой комплекс отраслей промышленности, изготавливающих орудия труда для народного хозяйства, транспортные и другие средства, а также предметы потребления и продукцию оборонного назначения. В этой связи его роль в решении отмеченных выше задач управления техносферой трудно переоценить.

Современное машиностроение характеризуется большой технологичностью и наукоемкостью, ориентируется на роботизированные производства с минимумом персонала. Оно играет ведущую роль в ускорении научно-технического прогресса. Уровень развития машиностроения, в целом, определяет производительность труда, степень воздействия человека на природу, объем потребления материально-сырьевых ресурсов и образования отходов, а также качество продукции других отраслей народного хозяйства и обороноспособность страны.

1. Отходы машиностроительного производства

Технологические процессы предприятий машиностроительного комплекса включают механическую обработку материалов (металла, дерева, пластмасс и др.), обработку поверхностей, предметов или продукции органическими растворителями, с использованием электролитических или химических процессов (в том числе гальваническое и травильное производства).

Являясь инструментом управления техносферой и производя огромный ассортимент различной продукции, машиностроение имеет широкий спектр твердых, жидких и газообразных отходов, загрязняющих биосферу.

Твердые отходы в машиностроении образуются в процессе производства продукции в виде амортизационного лома, появляющегося при модернизации оборудования, замене оснастки, ломке инструмента; стружки и опилок металлов, древесины, пластмасс и т.п. при обработке деталей; шлаков и золы; шламов, осадков и пылей (отходы систем очистки воздуха) и др.

К жидким отходам относятся сточные воды, количественный и качественный состав которых зависит от технологических процессов, используемых в производственном цикле. Из всех видов этих вод наиболее опасными являются сточные воды гальванических и травильных производств. В окружающую среду ежегодно сбрасываются тысячи тонн высокотоксичных металлов, таких как хром, никель, свинец, медь, калий, цинк, олово и др.

Вредные газовые отходы появляются при работе металлорежущего оборудования, в литейном производстве, при применении в термических цехах химических веществ, проведении технологических процессов в цехах металлопокрытий, при сварке и пайке и др.

Машиностроительные предприятия являются также серьезными источниками шумов и вибрации (энергофизические загрязнения). Последние – это почти повсеместные спутники применяемых технологических процессов. Наибольший шум создается при работе на крупногабаритных токарных, револьверных, фрезерных, карусельных станках, особенно при обработке деталей из твердых сплавов. Основными источниками шума при этом служат приводы, электродвигатели и режущий инструмент.

Отходами машиностроительных заводов служит также тепловая энергия (вторичные энергетические ресурсы), которая образуется в основном в мартеновских, нагревательных и термических печах в виде тепла отходящих газов, охлаждения установки и произведенной продукции. Низкопотенциальное тепло содержится в отработанном паре прессов и молотов.

2. Пути уменьшения отходов в машиностроении

Научно-техническая политика в сфере управления отходами в машиностроении должна быть ориентирована на рациональное природопользование, снижение количества образующихся отходов, уменьшение (вплоть до полного исключения) доли их токсичности и других вредных свойств и на развитие методов максимального использования вторичных вещественных и энергетических ресурсов.

Важным способом рационального использования материалов и снижения количества отходов в машиностроении является совершенствование применяемых технологических процессов и операций, разработка малоотходных технологий. Это связано в том числе и с необходимостью увеличения коэффициента использования металла. Например, в литейном производстве относительно новым технологическим процессом является применение быстротвердеющих формовочных смесей. Коэффициент использования металла при таком литье возрастает до 95-98 %. При этом также значительно сокращается пылевыделение [3]. Изготовление разовых литейных форм, в которых увлажненный песок быстро замораживается жидким азотом, позволяет получить отливки из чугуна и цветных металлов с хорошей структурой и гладкой поверхностью.

Эффективными способами борьбы с угаром и образованием окалины является нагрев заготовки в защитной безокислительной среде, а также контактный и индукционный нагрев, позволяющие существенно снизить потери металла. Для предотвращения окисления и обезуглероживания поверхностного слоя стальных деталей целесообразно применять их нагрев в ваннах. При этом замена минерального масла в нагревательной ванне расплавом селитры позволяет снизить потребление и сброс нефтепродуктов.

Практический интерес при термической обработке металлов представляют производственные методы, основанные на проведении процессов в замкнутых объемах с экономичным расходом исходных составляющих и без выделения в окружающую среду продуктов реакции.

В области обработки металлов резанием перспективным является новый универсальный метод - иглофрезерование, при котором не образуются пыли. При этом используется обрабатывающий инструмент с несколькими сотнями тысяч режущих элементов, собранный в виде тела вращения из прямых и равных по длине отрезков высокоуглеродистой стальной проволоки – игл. Этот метод позволяет заменить травление при подготовке поверхностей металлов (удалении окалины, ржавчины, загрязнений и др.).

При раскрое древесины и других материалов количество отходов зависит от применяемого оборудования (толщины пил). Объем этих отходов (опилок) можно существенно снизить или вообще устранить, если использовать другие способы деления этих материалов [4].

Уменьшению количества абразивного шлама и удлинению срока службы оборудования способствует применение алмазно-абразивных инструментов и кругов из нового синтетического материала – эльбора.

В прокатном производстве создаются так называемые «деталепрокатные станы» (зубопрокатные, винтовой прокатки в винтовых камерах и др.), позволяющие в ряде случаев отказаться от дальнейшей металлообработки и сэкономить 10-35 % металла по сравнению с резанием.

Материалы и изделия с особыми, часто уникальными составами, структурой и характеристиками, которые иногда вообще не достижимы при других технических процессах, позволяет создавать порошковая металлургия. При этом обеспечивается значительный экономический эффект за счет сокращения потерь материалов до 5-7 %.

Принципиально иным способом создания изделий и предметов в машиностроении являются так называемые «аддитивные технологии». Они представляют собой приоритетное направление развития науки, техники и технологии в мире.

Аддитивные технологии (Additive Manufacturing – от слова аддитивность – прибавляемый) – это послойное наращивание и синтез объекта с помощью компьютерных 3d технологий. В аддитивных технологиях используются различные материалы: воск, гипсовый порошок, жидкие фотополимеры, полиамиды, полистирол и металлические порошки.

Примером применения аддитивных технологий в машиностроении являются создание компанией Local Motors в 2015 году «умного и безопасного» автомобиля LMSD Swim – 75 % деталей которого выполнены с помощью трехмерной печати использующей АБС-пластик и углеволокно.

Необходимо также отметить в качестве приоритетных направлений сокращения ресурсоемкости автотранспортной отрасли и уменьшения загрязнения окружающей среды, технологии восстановления деталей до требований конструкторской документации при обращении с компонентами утилизируемых автомобилей [5]. Очевидно, это перспективное направление может быть распространено и на другие машиностроительные отрасли.

3. Утилизация отходов машиностроения

Ключевой задачей современного машиностроения является не только сокращение отходов производства, снижение их вредного воздействия на окружающую среду, но и переработка и использование вторичных материальных ресурсов как в машиностроении, так и в других отраслях народного хозяйства.

Большое экономическое значение имеет рециклинг твердых отходов машиностроения – металлов и пластмасс. Так, затраты на вовлечение в оборот металлических отходов значительно меньше, чем на выплавку металла из руды. Между тем следует отметить, что у нас в стране доля вторичных цветных металлов существенно ниже, чем в технически развитых странах. Это обусловлено тем, что большое количество отходов этих металлов (особенно, содержащихся в коммунальных отходах) теряется на местах их образования.

Что касается пластмасс, то основным способом их утилизации должна быть переработка их во вторичное полимерное сырье. Однако в силу различных причин это не

всегда удается и значительное число подобных отходов подвергается пиролизу, сжигается и депонируется на полигонах [4].

Шламы гальванических производств утилизируются с помощью химических (термических), физико-химических способов и их комбинацией. Обезвоженные гальванические шламы используются в частности в промышленности строительных материалов. Между тем, перспективными являются гидрометаллургические методы переработки гальванических шламов, позволяющие селективно извлекать практически все цветные металлы [4, 6].

Особо следует подчеркнуть проблему использования возобновляемых энергетических ресурсов (ВЭР). Например, весьма простым и достаточно эффективным средством утилизации тепла отходящих газов на машиностроительных предприятиях является использование запечного парообразователя для выработки пара сравнительно невысоких параметров [7].

Основные выводы

Машиностроение, служащее источником широкого спектра отходов, загрязняющих природу, имеет значительные резервы снижения материало- и энергоемкости производства.

Совершенствование технологий этой отрасли должно быть направлено на рациональное природопользование, сокращение количества отходов производства путем перехода на аддитивные технологии, уменьшение вредного воздействия на человека и природу, а также комплексное использование отходов (вещественных и энергетических).

В связи с тем, что рециклинг отходов производства все больше встраивается в технологические процессы необходимо серьезное улучшение инженерного образования для машиностроительной отрасли [8].

Следует также отметить, что машиностроение тесно связано с другими отраслями народного хозяйства. Так, продукцией машиностроителей является оборудование, используемое в других отраслях промышленности и сельского хозяйства. Рациональное природопользование подразумевает снижение материало- и энергоемкости выпускаемой машиностроением продукции, повышении ее качества. Отсюда эффективность отмеченных выше отраслей напрямую зависит от машиностроения. Это особо подчеркивает ведущую роль последнего в управлении техносферой.

Список литературы: 1. Концепции современного естествознания: Учебник для вузов / Под ред. проф. В.Н.Лавриненко, проф. В.П. Ратникова.- 3-е изд., перераб. И доп.- М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006.- 317 с. **2.** Липаев А.А. Биотехносфера: этапы создания и проблемы управления // Управление техносферой: электрон. журнал. 2019. Т.2. Вып.1. URL: http://fing.udsu.ru/technosphere **3.** Отходы машиностроения. Техника и технология…. bstudy.net>820234…othody_maschinostroenya. **4.** Бобович Б.Б. Обращение с отходами производства и потребления: учебное пособие / Б.Б. Бобович.– М.: ИНФРА-М, 2019.– 436 с. **5.** Бобович Б.Б. Восстановление деталей и агрегатов транспортных средств как инструмент управления техносферой // Управление техносферой: электрон. журнал, 2021. Т.4. Вып.1. URL: f-ing.udsu.ru/technosphere С. 1–10. **6.** Липаев А.А., Липаев С.А. Обращение с отходами производства и потребления: учебное пособие.– М.: Инфра-инженерия, 2021.– 402 с. **7.** Лотош В.Е. Переработка отходов природопользования. Книга 3. Екатеринбург: Полиграфист, 2007.– 503 с. **8.** Липаев А.А., Липаев С.А. О совершенствовании подготовки (переподготовки) специалистов в области обращения с отходами производства и потребления // Управление техносферой: электрон. журнал. 2021. Т.4. Вып. 1. URL: http://fing.udsu.ru/technosphere С. 18–29.

ТЕПЛОВОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ ПОРШНЯ ГАЗОДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Лихачёва Т.Е., Дьяков А.А., Белашова И.С., Петрова Л.Г.
(МАДИ, , г. Москва, Россия)
Тел./Факс +7 (499) 1558938; E-mail: laromadi@yandex.ru

Abstract: *The reasons for the failure of the engine of a quarry dump truck are investigated. The reason for the failure is the poorly performed repair of fuel equipment. There was a melting of the piston of the second cylinder. The parameters checked during the calibration of the injectors do not meet the requirements of GOST 10579-2017.*
Key words: *open-put dump truck ,engine, injectors, fuel equipment.*

В советское время был распространён особый тип организации народного хозяйства, основанный на взаимодействии хозяйствующих субъектов в соответствии с единым планом. Подвижной состав и сложные агрегаты направлялись для ремонта на определённые ремонтные заводы, где качество обеспечивалось внедрением систем управления качеством для всей отрасли. При переходе к конкурентной среде в рыночной экономике руководство этих крупных ремонтных предприятий, получивших самостоятельность, с большим трудом осознавало необходимость внедрения систем качества в соответствии с ISO 9000, с фокусом на потребителя и его удовлетворённость оказанной услугой. В настоящее время такие предприятия вытеснены с рынка услуг. Изменились методы ремонта. Производители сложной автотракторной техники не практикуют восстановительные методы, а рекомендуют замену деталей, а также замену отдельных узлов в сборе. Если отдельные ремонтные организации проводят разборку сборочной единицы, а затем её восстановление заменой отдельных износившихся деталей, то у них должна быть возможность контроля качества выполненной работы. Если предприятие не способно контролировать результат собственной работы, тогда происходит сбой в качестве. Когда это происходит во второй раз, можно заключить, что система качества на ремонтном предприятии отсутствует.

Приведём пример несоответствия качества ремонта, вызвавший прогар поршня двигателя карьерного самосвала Komatsu 730E (Рис. 1). Оплавление поршней дизелей происходит по причинам достаточно изученным. Тепловое повреждение поршня произошло после проведения ремонта двигателя, включавшего, в том числе ремонт топливной аппаратуры. Особенностью двигателя Cummins K2000E (серийный номер 33189993) с карьерного самосвала Komatsu 730E является наличие двухтопливной системы питания двигателя EVO 7300, которая была установлена за 1376 моточасов до выведения самосвала в ремонт.

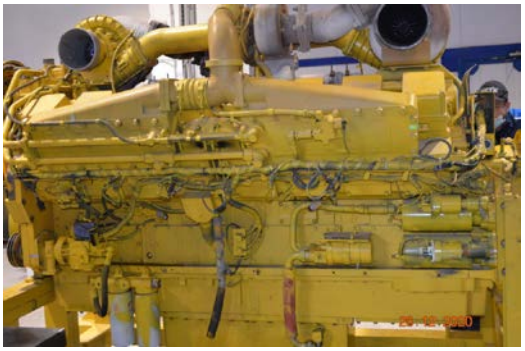


Рис. 1. Двигатель Cummins K2000E, демонтированный с карьерного самосвала Komatsu 730E

Рис. 2. Зеркало второго цилиндра с задиром и перенесённым на него материалом поршня

Рис. 3. Оплавленный поршень второго цилиндра

После ремонта и 86 моточасов работы двигателя произошло оплавление поршня только в одном - втором цилиндре из шестнадцати (Фото 3). Задиром металла повреждено зеркало цилиндра (Рис. 2). Часть металла поршня перенесено на зеркало цилиндра и это видно на приводимых фотографиях (Рис. 2, 3).

Состояние поршня в третьем цилиндре показано на рис. 4 и отражает штатное состояние. На поршне видны следы от факелов дизельного топлива. Для представления о том, как формируются такие следы на днище камеры сгорания поршня (ней), приведён рисунок 2, на котором показано формирование и горение факелов дизельного топлива в цилиндрах.

Рис. 4. Пример состояния поршня третьего цилиндра со следами от топливных факелов на днище камеры сгорания в поршне

Рис. 5, иллюстрирующий как происходит подача дизельного топлива в цилиндры (из свободных ресурсов интернет)

Для работы исследуемого двигателя в него заправляют на 24 часа работы 2,7 тонны дизельного топлива и 900 литров или 400 кг метана. Таким образом, основным топливом, на котором работает двигатель, остаётся дизельное. Преимущественно на работу на газе двигатель не переходит.

Если принять, что основная часть работы происходит в режиме газодизеля, то упрощённо можно принять, что всего расходуется 3100 кг топлива. В процентах 400 кг от 3100 кг составляет 12,9%. В цилиндре двигателя может находиться смесь метана с воздухом, которая теоретически способна к взрывному сгоранию.

На практике эта смесь воздуха с газом воспламеняется после короткой задержки воспламенения факелами дизельного топлива, которое поступает из форсунки. Принципиальная схема смесеобразования в газодизеле приведена на рисунке 6.

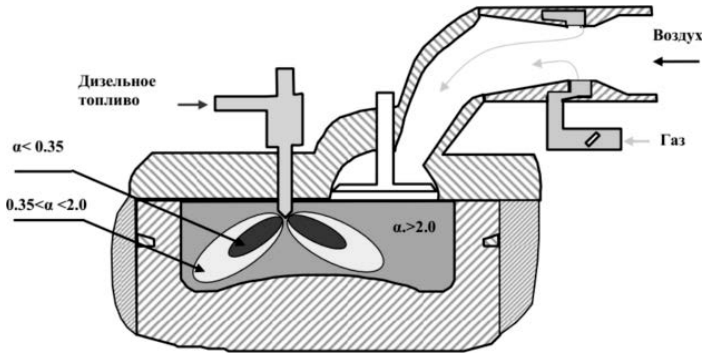


Рис. 6. Схема принципиального устройства смесеобразования в газодизеле

Условий для создания взрывного горения только в одном из шестнадцати цилиндров при подаче вместе с воздухом в цилиндры газа (газовоздушной смеси) быть не может. Возможность применения газа метана «низкого качества» может отрицательно влиять на газовое оборудование автомобиля. Примеров оплавления отдельно взятого поршня в двигателе из-за некачественного метана в технической литературе не описано. Общеизвестно, что преимущественно в зимний период, в баллонах для метана происходит оседание нелетучей фракции газа — прозрачной жидкости (конденсата). Для работы ДВС используется только паровая фракция содержимого баллона. Даже теоретически невозможно предположить, что нелетучая фракция газа заполнит весь баллон и в жидком виде попадёт на поршень только одного из цилиндров. Вне баллона эта жидкая фракция хорошо испаряется, а при условии прохождения через турбину двигателя, однозначно образует однородную с воздухом смесь. Отсутствие каких-либо повреждений в 15 из 16 цилиндров позволяет заключить, что тепловое воздействие на поршень второго цилиндра не связано с подачей газовоздушной смеси при работе в режиме газодизеля.

Не могла быть причиной оплавления поршня только в одном (втором) цилиндре ограниченная подача воздуха, например из-за засорённого воздушного фильтра, так как воздух через фильтр поступает одинаково во все цилиндры.

Одна из двух турбин двигателя имела признаки выделения моторного масла в сторону выпуска. Была проконтролирована поверхность впускного тракта после турбины на впуске в двигатель, которая оказалась совершенно сухой, без признаков попадания моторного масла. Тепловое повреждение поршня второго цилиндра не связано с попаданием в камеру сгорания избыточного количества моторного масла и сгоранием масла вместе с топливом.

Рис. 7. Форсунки, подающие моторное масло для охлаждения поршня

Проконтролирован клапан подачи масла для охлаждения поршня, он работоспособен. Форсунки, подающие масло на поршень снизу для охлаждения, чистые.

Шатунные вкладыши двигателя без признаков работы в режиме масляного

голодания. Можно сделать заключение, что тепловое повреждение поршня не было связано с недостатком его смазки.

При цетановом числе (ЦЧ) топлива меньше 40 резко возрастает задержка горения (время между началом впрыскивания и воспламенением топлива) и скорость нарастания давления в камере сгорания. Существует возможность, что топливный факел при низком ЦЧ успеет до его воспламенения достичь поверхности поршня. Это создаст нештатную тепловую нагрузку на металл поршня. Качество исследованного топлива по ЦЧ надлежащее, что подтверждают его физико-химические показатели, приведённые в таблице 1.

Температура вспышки в открытом тигле и фракционный состав при несоответствии могли указать на наличие в дизельном топливе керосина или бензина. Это в свою очередь могло иметь последствия для процесса сгорания. Температура вспышки в открытом тигле и фракционный состав у исследованного топлива надлежащие.

Таблица 1. Физико-химические показатели дизельного топлива

№ п/п	Наименование показателей	Метод испытания	Результат испытаний	ГОСТ 32511-2013, ДТ-З-К5
1.	Цетановое число	ГОСТ 3122	54,0	не менее 49,0
2.	Температура вспышки в закрытом тигле, °С	ГОСТ 6356	55	не ниже 55
3.	Массовая доля воды, мг/кг	EN ISO 12937	34,8	не более 200
4.	Общее загрязнение, мг/кг	EN 12662	3,4	не более 24
5.	Фракционный состав	ГОСТ 2177		
	до температуры 180°С перегоняется, %		4	не более 10
	до температуры 360°С перегоняется, %		97	не менее 95

Наличие воды нарушает смазку трущихся частей топливной аппаратуры, вызывает коррозию и может быть причиной нарушения работы. У исследованного топлива присутствуют только следы воды[1].

Загрязнения, включающие механические примеси неприемлемы для работы прецизионной топливной аппаратуры. Учитывая, что топливо отобрано из корпуса фильтра, можно было ожидать повышенного содержания загрязнений, но и по этому показателю исследованное топливо оказалось надлежащим. Дизельное топливо, отобранное из топливного фильтра двигателя, по своим физико-химическим показателям соответствует требованиям стандартов и не могло быть причиной нарушения в работе топливной аппаратуры или сгорания в цилиндре (рах) двигателя.

Для полноты исследования был проверен состав материала поршня. Ближайшим по химическому составу к -93 системы Al-Si-Cu с повышенным содержанием кремния, легированный никелем материалу поршня является алюминиевый сплав марки АК12ММгН (АЛ 30) ГОСТ 1583и медью для повышения жаропрочности. Жаропрочность сплава положительно влияет при штатном режиме работы. Если топливо, подаваемое форсункой, будет сгорать не так, как показано на

[1] Из-за конденсации влаги из воздуха, абсолютного отсутствия следов воды достичь невозможно.

приведённом рисунке, а, например, на поверхности камеры сгорания, то поршень будет объективно плавиться. В приведённом для сравнения третьем цилиндре, следы на поршне указывают на штатную подачу топливных факелов. Ещё одной особенностью двигателя Cummins K2000E является подача дизельного топлива насос-форсунками. Принципиальная схема организации такой подачи топлива приведена на рисунке 8. Сама насос-форсунка (далее форсунка) из второго цилиндра показана на рис. 9.

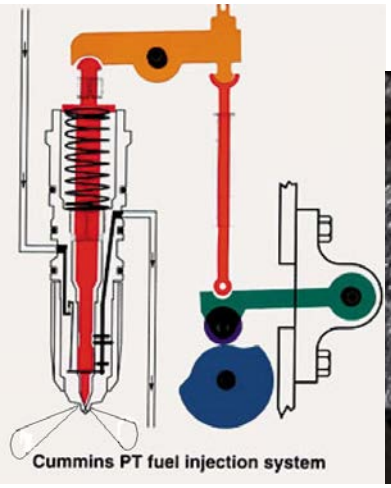


Рис. 8.

Рис. 9.

В соответствии с «Ведомостью установки запасных частей на ДВС (Агрегат)» форсунки ремонтировались заменой отдельных деталей. Плунжеры ((3076126) были заменены в количестве 16 шт., а распылителей (3279747) было заменено только три. Внешним осмотром износы могут быть не установлены. Наиболее правильно, при выполнении дорогостоящего капитального ремонта такого двигателя как Cummins K2000E с карьерного самосвала Komatsu 730E, заменять если не форсунки, то распылители форсунок в сборе с запирающей иглой (игольчатым клапаном). Специализированные ремонтные организации, берущие на себя восстановительный ремонт форсунок, процессе обработки распылителя и запирающего его конуса клапана (иглы) добиваются восстановления уплотнения по узкому посадочному пояску, как показано на рисунке 10. Совершенно недопустимо увеличение зоны контакта, как это показано на рисунке – позиция 2.

Также совершенно недопустимо, чтобы притирочных поясков (уплотнения между иглой и конусным отверстием в распылителе) образовывалось несколько. Игла будет в зависимости от теплового состояния двигателя уплотняться то по одному, то по другому пояску, образовывая подвпрыски топлива.

При изучении документации по ремонту было установлено, что параметры, проверяемые при калибровке форсунок после ремонта не соответствуют требованиям ГОСТ 10579-2017 «Форсунки дизелей. Технические требования и методы испытаний». Проверка засоренности (закоксовывания) отверстий, как и отклонение струй топлива из распыливающих отверстий в «Ведомости», не предусмотрена. Проверка герметичности форсунки (нок) по запирающему конусу также не предусмотрена ремонтной документацией.

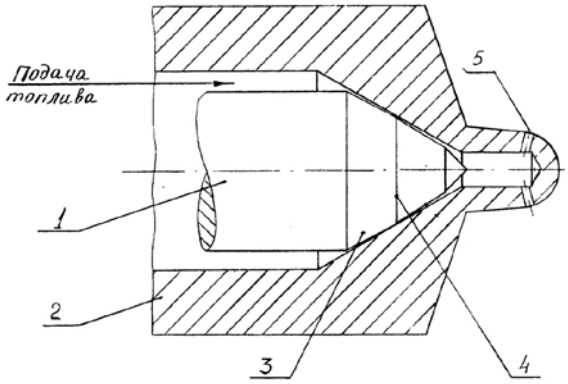


Схема распылителя форсунки: 1-запирающий элемент (игла);2- распылитель;3 – запирающий конус; 4 – притирочный поясок;5- сопловые отверстия

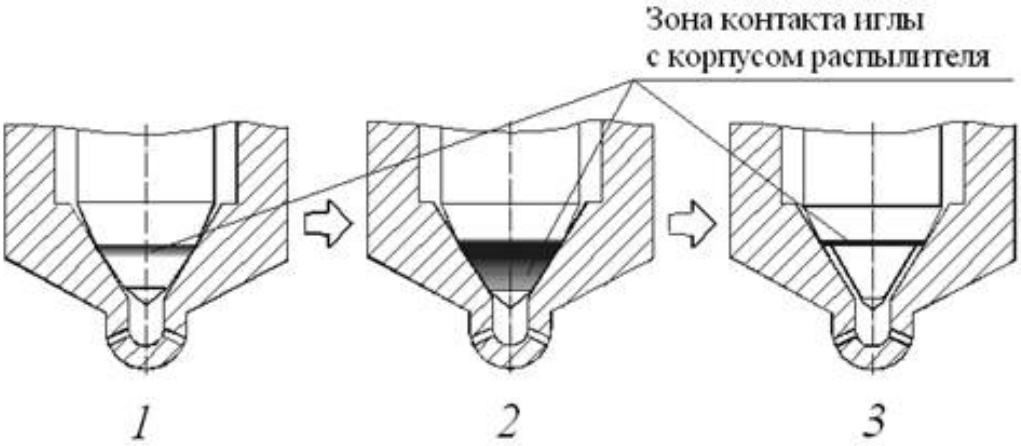


Рис. 10. Вид уплотнения посадочного конуса нового (1), изношенного (2) и восстановленного (3) распылителя

Рис. 11. Новый запорный конус прирабатывался к множественным выступам на старом распылителе

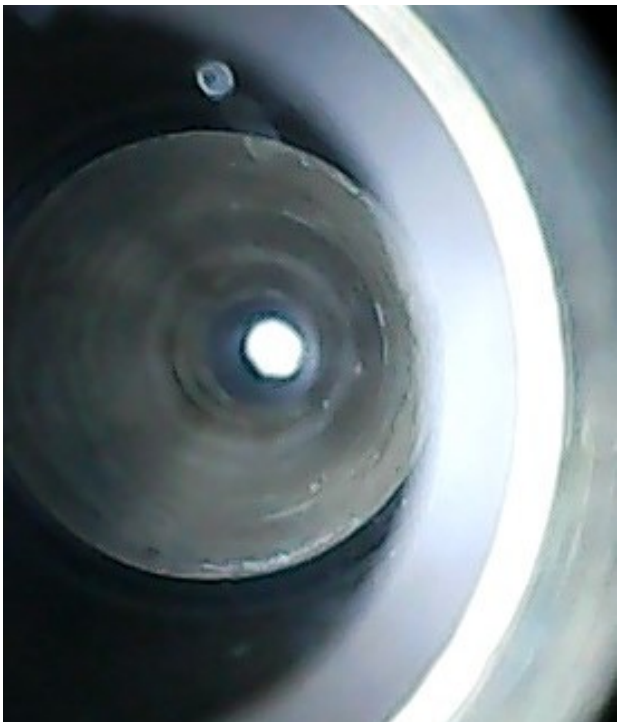


Рис. 12. Внутренняя поверхность распылителя форсунки второго цилиндра, кроме предусмотренной конусности, имеет ступенчатость, выступы и чёрные отложения нагара

Выводы. Причина выхода из строя исследованного двигателя Cummins K2000E, демонтированного с карьерного самосвала Komatsu 730E, в оплавлении поршня второго цилиндра с переносом оплавленного металла на зеркало цилиндра с образованием задиров рабочей поверхности. Данная причина связана с некачественно проведёнными ремонтными работами в организации, выполнившей капитальный ремонт.

Список литературы: **1.** ГОСТ 10579-2017 «Форсунки дизелей. Технические требования и методы испытаний». **2.** Экспертиза технического состояния и причины неисправностей автомобильной техники. Александр Хрулёв, Сергей Лосавио, Владимир Дроздовский. ООО «Издательство АБС», М. ООО «Полиграфический комплекс», 2019 г.,964л. **3.** Программа самообучения 352 . Насос-форсунка http://chip-tuning58.ru/publ/vag_programmy_samoobuchenija/352_nasos_forsunka_s_pezoehl_klap/2-1-0-12 **4.** Повреждения поршней. Как выявить и устранить их. Издатель: © MSI Motor Service International GmbH Untere Neckarsulm\Германия. Авторы: Бернд Вальдхауэр, Уве Шиллинг и др. https://autotopik.ru/rukovodstva/raznoe/povrejdeni-porshnei.pdf

КАК ОЦЕНИТЬ КАЧЕСТВО РАБОТЫ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ ВУЗА?

Лумпиева Т.П., Волков А.Ф. *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел.: +380667729839 E-mail: lumpieva@mail.ru

Abstract: *The report provides an analysis of domestic and foreign approaches to assess the effectiveness of the teaching staff of higher educational institutions. The disadvantages of existing techniques are reviewed.*
Key words: *quality of education, teacher's performance assessment, labor motivation, rating, assessment criteria.*

Качество высшего образования зависит от многих факторов. Это объёмы инвестиций в образование, квалификация преподавателей, качество абитуриентов, содержание образования. Уровень профессорско-преподавательского состава, а также его положительная мотивация труда являются ключевыми факторами. Одним из путей усиления заинтересованности преподавателей в непрерывном самосовершенствовании может быть оценивание работы профессорско-преподавательского состава.

Если анализировать зарубежные подходы к оценке деятельности преподавателя, то в этом случае участие в научно-исследовательской работе и эффективность преподавания рассматриваются как системообразующие, но не единственные компоненты. Во второй половине XX века в различных странах мира были разработаны требования к преподавателю высшей школы, в которых он рассматривался не только как учёный, но и как педагог.

Например, в США преподаватель выполняет целый ряд общественных поручений, принимает активное участие в организации общественной, спортивной жизни, как студенчества, так и ближайшего социального окружения по месту его жительства (так называемый, community). Без выполнения перечисленных функций развитие его карьеры затруднено. Назначение преподавателей на должность осуществляется советами попечителей, оценка качества деятельности и рекомендации для продвижения по службе выдаются компетентными комиссиями Департамента образования. При наличии общегосударственных требований к профессионально-педагогической культуре преподавателя в каждом отдельном высшем учебном заведении происходит их конкретизация, и расставляются акценты. Среди наиболее значимых аспектов деятельности университетского преподавателя обычно называют: педагогическое мастерство, результаты научного исследования, отношение к работе, уровень профессионализма, прошлые заслуги, мотивированность использования отдельных методов обучения. Иногда при оценке качества работы сотрудника используются формальный и неформальный рейтинг преподавателя среди коллег и студенческой аудитории, мнение непосредственного руководства соответствующего департамента, учебно-методического совета, содержание лекционных курсов, стремление к совершенствованию, внедрение инновационных технологий, участие в конференциях и другие факторы. Однако, по мнению учёных, специально исследовавших подобную «разбросанность» в интересах американских преподавателей, вызванную общенациональным стремлением оказывать населению различные услуги в сфере образования и просветительства, в вузах США утрачивается единство целевой установки высшего образования, что влечёт за собой подрыв основной идеи стандартизации всей системы [1].

В классических Британских университетах система оценки деятельности преподавателей сложилась несколько столетий назад. Её основными компонентами являются процедуры назначения на должность, рецензирования учебно-методических пособий, подготовленных преподавателями, повышения квалификационного разряда и получения права на постоянную работу в учебном заведении, т.е. бессрочного контракта

(tenure). Однако в конце 80-х гг. произошло реформирование этой системы, что повлекло за собой значительное ужесточение требований к кандидатам на замещение вакантных должностей и продвижение по служебной лестнице. Каждый университет получил право разработать свою схему учёта и контроля деятельности преподавателя, при этом они могли основываться на рекомендациях, утверждённых Ассоциацией университетских преподавателей (Association of University Teachers) и Комитетом Вице-канцлеров и ректоров. При этом учитываются как объективные критерии (ученая степень, педагогический стаж, список научных публикаций), так и ориентированность сотрудника на совершенствование качества своего труда, личностный рост, перспективность его научной деятельности. Играет роль выбор лиц, дающих письменную характеристику кандидатам, весомость рекомендаций, субъективное мнение специализированного комитета, составленное по результатам собеседования с кандидатом.

Между университетами существуют различия в частотности проведения аттестации преподавательского состава (от года до трех), в подборе экспертной комиссии, количестве и спектре, выносимых на экспертизу аспектов деятельности преподавателя. Вообще в этой стране предпочтение в оценке деятельности университетского преподавателя отдается заполнению разного рода формуляров, отражающих его активность, и привлечению внешней экспертизы [1].

В целом ряде российских вузов разрабатываются разнообразные методики оценки эффективности работы профессорско-преподавательского состава. В настоящее время в практике высшей школы существует порядка 40 частных методик оценки и измерения результатов деятельности преподавателей, но общепринятой методики нет. Это объясняется рядом объективных причин. Прежде всего, потому, что оценка работы преподавателя не может быть выражена только количественными показателями, так как они не охватывают весь спектр педагогической деятельности. Качественные показатели часто носят субъективный характер. Тем не менее, сам факт наличия оценки работы зачастую даёт положительный эффект. Рассмотрим наиболее типичные методы оценки деятельности преподавательского состава.

При проведении конкурсов на замещение вакантных должностей, аттестации и отборе кандидатов на повышение традиционно предусмотрено составление Мотивированного заключения, включающего краткое описание и оценку учебной, методической, научной, воспитательной работы преподавателя и результатов повышения его квалификации. Мотивированное заключение составляется сотрудниками кафедры, на которой работает преподаватель, на основе изучения его вклада в перечисленные выше виды работ и посещения ряда его лекционных и практических занятий с последующим анализом и оценкой профессионально-методического мастерства. Все эти данные рассматриваются на заседании кафедры и после отчёта преподавателя формулируются в вышеназванный документ, который направляется на утверждение соответствующего Совета факультета или университета. Таким образом, основными экспертами в оценке деятельности преподавателя выступают коллеги по кафедре и заведующий кафедрой. Такая оценка деятельности, как правило, проводится раз в пять лет.

Данный подход к оценке преподавателя не может считаться в полной мере объективным по следующим причинам.

1. Как правило, оценка профессионально-методического мастерства дается на основе одного специально подготовленного открытого занятия.
2. Занятие оценивается коллегами, которые сами впоследствии будут оцениваться данным преподавателем, поэтому оценка не всегда носит объективный характер.
3. Отсутствует внешняя экспертиза деятельности преподавателя.

В последние годы широкое распространение получил такой метод ежегодной оценки деятельности профессорско-преподавательского состава вузов, как индивиду-

альный рейтинг преподавателя. Например, в нашем университете рейтинг проводится один раз в год по результатам работы текущего календарного года [2]. В рейтинг включены следующие направления деятельности: учебно-методическая работа, научно-исследовательская и руководство научной работой студентов. Итоги подводятся по трем категориям преподавательского состава: профессор, доцент, старший преподаватель – ассистент. Каждый вид работы по указанным направлениям оценивается в баллах в соответствии с положением. Сюда входит участие в госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских работах, публикация статей, участие в выставках, выступления с докладами на конференциях, издание учебных и методических пособий, участие в подготовке и проведении предметных олимпиад и конференций. Затем рассчитываются относительные показатели активности каждого преподавателя по каждому направлению деятельности. Рейтинг преподавателя определяется как сумма его относительных показателей по направлениям работы. Сразу же возникают вопросы: насколько точно оценки соответствуют сложности выполненной работы? Что авторы брали за основу? Изучались ли временные затраты на выполнение определённых видов работы?

Ещё одна проблема. Учебная нагрузка на преподавателя колеблется в пределах от 700 до 900 часов в зависимости от занимаемой должности. Общий объём выполняемой работы за год составляет 1548 часов. Это означает, что на остальные виды работ остаётся от 848 до 648 часов в год. На сегодняшний день на большинстве кафедр преподаватели работают на долю ставки. Но при проведении аттестации и подведении итогов рейтинга это во внимание вообще не берётся, что автоматически означает, что часть работы преподаватели выполняют за счёт личного времени. Наиболее типичные примеры: составление бесконечных отчётов, справок, необходимость сдать различные данные и показатели в отделы университета, деканаты и т.д.

Анализ рейтинговой оценки позволяет выделить наиболее общие недостатки.

1. Оценка деятельности преподавателя определяется только количественными характеристиками, а они не охватывают весь спектр деятельности педагога.
2. Результаты рейтинга не влияют на уровень оплаты труда, так надбавки за высокие показатели отсутствуют.
3. Результаты рейтинга не учитываются при продлении трудового договора или прохождении конкурса.
4. Итого подводятся формально. Преподаватели не получают никаких рекомендаций по своей работе в плане её улучшения.

Часть работы, проводимой профессорско-преподавательским составом университета, вообще невозможно оценить никакими рейтингами. Применительно к нашему вузу – это работа по переходу на российские образовательные программы и аккредитации специальностей. Очень сложно оценить работу по привлечению абитуриентов, так как конечный результат такой работы зачастую непредсказуем.

Администрация университета постоянно требует внедрения в учебный процесс интерактивных методов обучения. Но работа по созданию дистанционных курсов и их последующему обслуживанию никак не оценивается. Во время пандемии многие преподаватели записывали видеолекции, выставляли материалы на сайты и т.д. Такая работа также не учитывается ни в учебную нагрузку, ни в рейтинги.

В некоторых учебных заведениях проводится статистическое изучение мнения студентов об эффективности работы конкретного преподавателя по различным видам его профессионально-педагогической деятельности. Следует отметить, что большая часть преподавателей отрицательно относится к анкетированию студентов. Наиболее широко распространено мнение, что студенты не вполне компетентны в оценке профессионального мастерства и вклада их педагогов в научную и методическую деятель-

ность, не способны оценить всю сложность преподавательской работы. Считается, что молодые люди больше обращают внимание на личностные и коммуникативные качества преподавателей, харизму, внешний вид и т. д.

Педагогическая профессия относится к профессиям типа «человек – человек», поэтому личностные свойства и качества преподавателя оказывают существенное влияние на результат обучения. Ни для кого не является секретом, что любой предмет воспринимается, прежде всего, через личность преподавателя. Как правило, не любят не предмет или учебную дисциплину, чаще не любят преподавателя, поэтому нельзя сбрасывать со счетов личностные качества педагога. Однако, нельзя не согласиться с тем, что оценки студентов не всегда бывают объективными, поэтому такое оценивание должно проводиться систематически и охватывать все группы, в которых ведутся занятия. Вопросы для анкетирования должны составляться предельно корректно. Нельзя такие опросы проводить выборочно и только перед аттестацией или прохождением конкурса. Также недопустимо, чтобы эта оценка деятельности ставилась во главу угла, то есть была определяющей [3].

Наши критические замечания не означают, что рейтинговая оценка не нужна как таковая. Она, безусловно, нужна, но то, в каком виде она проходит, не стимулирует преподавателей к работе и уж тем более к улучшению её качества.

Для получения объективной оценки необходимо создать систему, учитывающую все направления деятельности преподавателя, а также личностные качества, влияющие на результативность работы. Одновременно с системой оценивания должна быть создана подсистема стимулирования труда профессорско-преподавательского состава, причем не только морального, но и материального. Эта работа требует изучения и анализа существующих методик и имеющегося опыта по оценке качества работы профессорско-преподавательского состава, прежде всего российских вузов.

Таким образом, анализ отечественных и зарубежных подходов к оценке деятельности преподавателя позволяет сделать следующий вывод: изменение роли преподавателя и характера его труда в условиях формирующегося информационного общества заставляет по-новому взглянуть на проблемы развития личности педагога, модернизации системы профессиональных знаний и совершенствования его методического мастерства [3]. Такие элементы его профессионально-педагогической культуры как постоянное стремление к повышению качества своей деятельности, результативности используемых методов обучения и воспитания, работа по самообразованию и самосовершенствованию должны рассматриваться сегодня не просто как достижения отдельных индивидов, а как требования, способные обеспечить поступательное развитие, как университета, так и системы высшего образования.

Список литературы. 1. Аавиксоо, Я. Обеспечение качества: неортодоксальный взгляд на проблему / Я. Аавиксоо // Alma mater («Вестник высшей школы»). – 2002. – № 6. – С. 3–8. **2.** Временное положение о рейтинговой оценке деятельности научно-педагогических сотрудников и учебных подразделений Государственного образовательного учреждения "Донецкий национальный технический университет" (ДонНТУ) / сост.: А. В. Корощенко. – Донецк: ДонНТУ. – 2019. **3**. Исаева, Т. Е. Эффективность оценивания деятельности преподавателей вузов: сравнение отечественных и зарубежных методик / Т. Е. Исаева, М.П. Чуриков, Ю. Ю. Котляренко // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №3 (2015) http://naukovedenie.ru/PDF/141PVN315.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/141PVN315.

ФИНИШНАЯ ЗУБООБРАБОТКА ШЕСТЕРЕН КОМБИНИРОВАННЫМИ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМИ КРУГАМИ

Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А., Горбунов А.С., Песин М. В.
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет, АО «Редуктор-ПМ», г. Пермь, Российская Федерация)
E-mail: makarovv@pstu.ru; m.pesin@pstu.ru; vorozhtcova@reductor-pm.com; gorbunov-as@reductor-pm.com

Abstract. *This article contains the results of research on technological capabilities of the finishing grinding of toothing cylindrical gears withthe combined worm grinding-polishing wheel. For tests selected cylindrical gear of the fifth degree of accuracy. Cylindrical gears are cut into test samples to study the quality of the surface layer. The use of new technology finishing will increase the reliability and durability of the cylindrical gears.*
Keywords: *gear grinding, gear honing, gear polishing, precision, the quality of the surface layer, the combined worm grinding-polishing wheel.*

Задача совершенствования технологических операций, раскрытие потенциальных возможностей оборудования применительно к комбинированным способам воздействия решена для цилиндрического зубчатого колеса планетарной передачи главного редуктора, передающего мощность от пары газотурбинных двигателей на несущий винт вертолета. Конструкторской документацией определены требования, предъявляемые к зубчатому венцу сателлита числом зубьев z=29, модулем m=6, углом профиля α=28° и шириной b=48 мм. Твердость поверхностей зубьев сателлита обеспечивается цементацией на глубину 1,5 – 1,8 мм и последующей объемной закалкой до поверхностной твердости HRC≥61. Контроль поверхности на шлифовочные прижоги травлением после операции зубошлифования. Зубчатый венец изготавливают по 5-5-4 степени точности согласно ГОСТ 1643-81 [1]. Шероховатость профилей зубьев не должна превышать Ra≤ 0,16 мкм. Оптимальный контакт зацепления обеспечивается за счет применения модификации профиля по головки зуба, глубина которого составляет fKo=36...26 мкм, длина его развернутости 3,3...4,0 мм.

Для обеспечения вышеуказанных требований серийной технологией, предусмотрено выполнение двух операций. Зубошлифование направлено на нивелирование коробления после химико-термической обработки и обеспечение требуемой геометрической точности зубчатого венца, толщин зубьев и погрешности профиля зубьев. Несмотря на достигаемую точность (рис. 1а), сдерживающим фактором применения зубошлифования в качестве окончательной операции является получаемая шероховатость профиля зубьев Ra=0,4 мкм.

Для обеспечения требуемой шероховатости Ra≤0,16 мкм по серийной технологии после зубошлифования предусмотрено зубохонингование алмазным хоном. При этом геометрическая точность эвольвенты не всегда обеспечивается, а иногда и ухудшается – погрешность профиля зуба Fa и размер фланка fKo и в некоторых случаях может превышать допуск. Ухудшение погрешности профиля зубьев на операции зубохонингования обусловлено несовершенством изготовления профилей зубьев алмазного зубчатого хона. Эти погрешности инструмента переносятся на профиль зубьев, что ухудшает класс точности зубчатого венца по нормам плавности зацепления, достигнутого на предшествующей операции зубошлифования. Дополнительная правка профиля алмазного хона позволяет

несколько улучить показатели погрешности профиля зубьев сателлита до F_a=5,8 мкм. Однако, правка достаточно трудоемкий процесс шлифования профиля алмазного хона, который выполняется за несколько операций на основном технологическом оборудовании для обработки зубчатых колес, максимально возможное количество правок – 26.

Таким образом, при изготовлении зубчатого венца сателлита возникает два противоречия. Первое противоречие заключается в том, что процесс обкатного зубошлифования позволяет достигать высокую степень точности зубчатых колес, не обеспечивая при этом требуемую шероховатость поверхности зуба. Второе противоречие заключается в том, что процесс зубохнингования позволяет обеспечить требуемую шероховатость поверхности профиля зуба, но при этом ухудшает степень точности зубчатого венца - увеличивается погрешность профиля зуба.

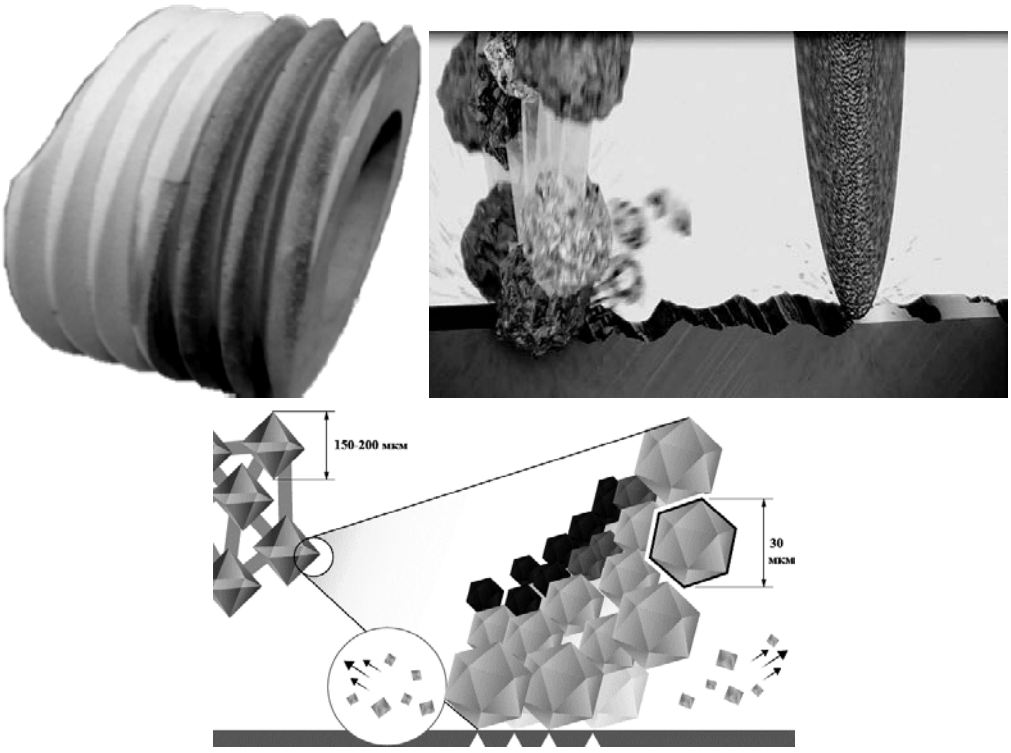
Аналогичные противоречия окончательной обработки зубьев встречаются и при производстве автомобильных зубчатых колес. В работе [2] отмечается негативное воздействие вибрационной отделочной обработки на геометрические параметры профилей зубьев. Компанией Reishauer AG предпринята попытка решения противоречия процесса обкатного зубошлифования, заключающаяся в том, чтобы объединить две операции зубошлифования и зубополирования за счет присоединения полировального круга к классическому червячному шлифовальному кругу. Подобные технические решения использования абразивных инструментов переменной абразивной способностью в осевом направлении для повышения производительности за счет объединения стадий черновой, чистовой и отделочной обработки поверхности на бесцентровых шлифовальных станках приводится в работах российских ученых [3].

В работе [2] автор утверждает, что комбинированным кругом возможно достичь шероховатость поверхности профилей зубьев Ra=0,15 мкм и ниже, в зависимости от выбранной последовательности обработки, но не раскрывает стратегии обработки, режимов резания, характеристики абразивного круга, параметров точности зубчатого венца и шероховатости поверхностей профиля зубьев. Однако приводятся экспериментальные данные центра исследования шестерен Мюнхенского технического университета о снижение потерь мощности на 15% зубчатых колес, обработанных комбинированным кругом. Отмечается, что снижение потерь мощности достигается за счет уменьшения трения в зубчатой передаче под нагрузкой, в сравнении с образцами зубчатых колес обработанными классическим методом обкатного шлифования.

Появление у червячного шлифовального круга нового свойства – полирования раскрывает для существующего зубошлифовального оборудования новые возможности при обеспечении требований точности и шероховатости поверхности зубьев. Общеизвестно, что внедрение новых технологий обработки связано с затратами, при этом стоимость инструмента от общих затрат составляет лишь порядка 1%, примерно 3% составляют затраты на СОТС, 10% - затраты на обеспечение качества, 19% - заработная плата рабочих, 32% - стоимость обслуживания оборудования и 35% - стоимость оборудования. Поэтому внедрение нового инструмента считается обоснованным вложением, при обеспечении качества и повышении производительности.

Работа комбинированного червячного шлифовально-полировального круга (рис.1а) заключается в снятии основного припуска шлифовальной частью круга, при обеспечении заданной точности, и срезании вершин микронеровностей полировальной

частью (рис.1б), обеспечивая снижение величины шероховатости поверхности. Шлифовальная часть состоит из мелкокристаллических соединений зерен Al_2O_3, смешанных с белым оксидом алюминия, размер частиц при самозатачивании ≤30 мкм (рис. 1в). Каждое отдельное зерно размером 150-200 мкм состоит из агломерата острых частиц, которые легко самозатачиваются при высокой скорости удаления материала, поддерживают устойчивый процесс.

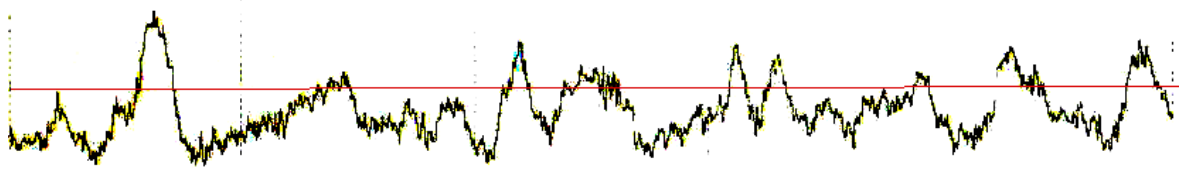


а) б) в)

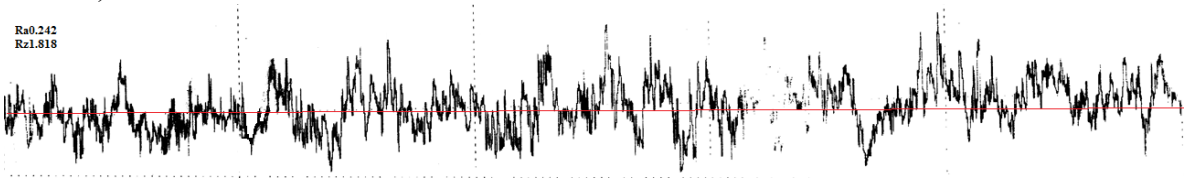
Рис. 1. Моделирование резания комбинированным кругом: а) комбинированный червячный круг б) образование шероховатости после шлифовальной и полировальной частей в) схема самозатачивания

Анализ результатов экспериментальных исследований [4] процесса зубошлифования комбинированным шлифовально-полировальным кругом с на станке RZ basic фирмы «Reishauer» позволяет сделать вывод о том, что применение комбинированного круга позволяет достигать высоких показателей по степени точности и шероховатости поверхности. На операцию зубошлифования цилиндрическое зубчатое колесо поступает после химико-термических операций с шероховатостью профиля зубьев Ra=3,05 мкм (рис. 2а). Шероховатость после зубошлифования первой частью комбинированного круга составила Ra=0,242 мкм (рис.2б). После зубошлифования полировальной частью величина микронеровности профиля зуба составила Ra=0,089 мкм (рис. 2в).

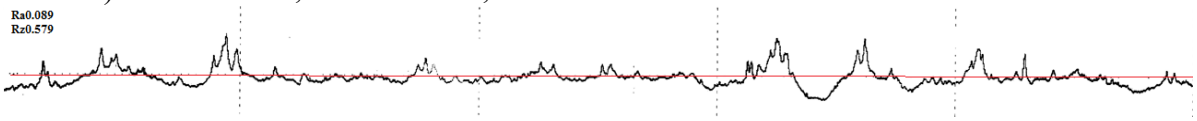
Достигнутая погрешность эвольвентного профиля зуба составила F_a=1,6 мкм при допуске Fa=6 мкм. Согласно DIN 3962 [6] для 1-ой степени точности допуск погрешности профиля зуба сателлита составляет F_a=2,5 мкм.



а) Ra 3.050 мкм, Rz 15.82 мкм, Rmax 21.84 мкм



б) Ra 0.242мкм, Rz 1.818мкм, Rmax 2.609 мкм



в) Ra 0.089мкм, Rz=0.579, Rmax 0.721

Рис. 3. Профилограммы шероховатости поверхностей после: а) химико-термической обработки; б) зубошлифования; б) зубошлифования

Выводы

1. Применение комбинированного шлифовально-полировального червячного круга при обкатном зубошлифовании на станке RZ basic обеспечивает высокую степенью точности и позволяет достичь шероховатости поверхности Ra = 0,089 мкм.

2. Анализ исследования остаточных напряжений, микроструктуры и микротвердости в ранее проведенных исследованиях [6] показал , что комбинированная шлифовально-полировальная обработка обеспечивает более высокое качество поверхностного слоя зубьев шестерен, что очень важно для повышения эксплуатационных параметров авиационных зубчатых колес.

3. При внедрении новой технологии повышается производительность обработки шестерен на 25-30%, не требуются значительные дополнительные затраты, обеспечивается значительный экономический эффект.

Список литературы: 1. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. - М.: Изд-во стандартов. - 1981. - С.45. **2.** Walter Graf. Шлифование и полирование зубчатых колес // Ритм машиностроения [Электронный ресурс]. - 2016. - Режим доступа https://ritm-magazine.ru/ru/public/shlifovanie-i-polirovanie-zubchatyh-koles (дата обращения: 10.05.2020). **3.** Патент 2240913, Российская Федерация, МПК[7] B24B 5/18, B24B 1/00. Способ бесцентрового шлифования / Свирщев В.И., Флегентов В.К., Макаров В.Ф., Подборнов И В. 2303108147/02. заяв. 24.03.2003. опубл. 27.11.2004 Бюл. №33. с.4. **4.** Ворожцова Н.А., Макаров В.Ф., Песин М.В. Обработка зубчатых колес сборными шлифовально-полировальными кругами // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2020 Т.22 №1. С.79-87. **5.** Ворожцова Н.А., Горбунов А.С., Макаров В.Ф. Обеспечение качества зубчатого венца цилиндрических колес при обработке комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом// Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2019. № 2. С.22-28. **6.** DIN 3962-1-1978 Tolerances for Cylindrical Gear Teeth; Tolerances for Deviations of Individual Parameters. German Institute for Standardisation, 1978. - 18 p.

НЕУПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Малашенко Т.И., Малашенко В.В. *(ДонНТУ, ДонФТИ, г. Донецк, Украина)*
E-mail: malashenko@donfti.ru

Abstract: *Inelastic processes under high-speed cutting of metals and alloys are analyzed. An analytical dependence of the hardening of an aged binary alloy on the concentration of the alloying impurity and Guinier-Preston zones under high-speed cutting is obtained.*
Keywords*: aged binary alloys, high strain rate deformation, high speed cutting.*

Высокоскоростное резание, как и высокоскоростная обработка металлов и сплавов, является примером интенсивного воздействия на функциональные материалы. При этом в металлах и сплавах реализуется высокоскоростная деформация, весьма существенно отличающаяся от квазистатической деформации, что приводит к возникновению существенных различий в механическом поведении этих материалов и в формировании их механических свойств. В частности, изменяется зависимость упрочнения сплавов от концентрации легирующих примесей. Как известно, основными носителями пластической деформации являются дислокации – линейные дефекты структуры, способные перемещаться под действием внешних нагрузок вдоль плотноупакованных плоскостей. Именно их зарождение, размножение, перемещение по кристаллу и взаимодействие с другими структурными дефектами в значительной степени определяет формирование механических свойств материалов. Структурные дефекты, взаимодействуя с дислокациями и препятствуя их перемещению по кристаллу, способствуют повышению его прочности и увеличению предела текучести, т.е. внешнего механического напряжения, выше которого деформация становится пластической, приобретая необратимый характер. В промышленных сплавах одним из основных типов структурных дефектов являются атомы легирующих примесей. Кроме того, в состаренных сплавах возникают зоны Гинье-Престона, которые оказывают весьма существенное влияние на формирование их механических свойств, а потому являются объектом повышенного внимания материаловедов.

Исследование особенностей неупругих процессов при высокоэнергетическом воздействии на функциональные материалы в настоящее время привлекает все большее внимание исследователей [1-3]. Однако задачи такого типа чаще всего решаются методом молекулярной динамики. Это весьма эффективный метод компьютерного моделирования, основанный на задании потенциала взаимодействия атомов различных материалов. Он позволяет выявлять весьма тонкие особенности исследуемых процессов, однако не дает возможности получить аналитические зависимости механических свойств различных сплавов от их конкретных характеристик. Для получения таких зависимостей весьма эффективной оказывается разработанная нами теория динамического взаимодействия структурных дефектов [4-6].

Целью работы является исследование неупругих процессов при высокоскоростной резке и высокоскоростной обработке металлов и сплавов, в том числе состаренных.

Неупругие процессы в кристаллах, определяемые дислокационным движением, в частности, пластическая деформация, при высокоскоростной обработке существенно отличаются от аналогичных процессов в условиях квазистатического деформирования. Это связано с кардинальным изменением механизма диссипации движущейся дислокации, который в случае высокоскоростной деформации заключается в необратимом переходе энергии внешних воздействий в энергию дислокационных колебаний в плоскости скольжения.

Рассмотрим движение дислокационного ансамбля под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 в положительном направлении оси *OX* со средней скоростью v в плоскости *XOZ*. Кристалл содержит хаотически распределенные атомы второго компонента и зоны Гинье-Престона. Зоны Гинье-Престона будем считать одинаковыми, имеющими радиус *a* и распределенными случайным образом в плоскостях параллельных плоскости скольжения дислокаций *XOZ*. Линии дислокаций параллельны оси *OZ*, их векторы Бюргерса $\mathbf{b} = (b,\ 0,\ 0)$ одинаковы и параллельны оси *OX*. Положение *k*-ой дислокации определяется функцией

$$X_k = vt + w_k$$

Здесь w_k – случайная величина, описывающая изгибные колебания дислокации, возбужденные ее взаимодействием с хаотически распределенными дефектами. Среднее значение этой величины по длине дислокации и по хаотическому распределению дефектов равно нулю.

Уравнение движения дислокации может быть представлено в следующем виде

$$m\left\{\frac{\partial X^2}{\partial t^2} - c^2\frac{\partial^2 X}{\partial z^2}\right\} = b\left[\sigma_0 + \sigma_{xy}^d + \sigma_{xy}^G\right] - B\frac{\partial X}{\partial t}$$

где σ_{xy}^d – компонента тензора напряжений, создаваемых атомами второго компонента на линии дислокации, $\sigma_{xy}^d = \sum_{i=1}^{N}\sigma_{xy,i}^d$, *N* – число растворенных атомов в кристалле, σ_{xy}^G – компонента тензора напряжений, создаваемых на линии дислокации зонами Гинье-Престона, *m* – масса единицы длины дислокации (массы всех дислокаций считаем одинаковыми), *c* – скорость распространения в кристалле поперечных звуковых волн, *B* – константа фононного трения.

Анализ неупругих процессов выполняется в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия структурных дефектов. В частности, упрочнение сплава может быть получено с помощью следующего выражения

$$\sigma = \frac{nb}{8\pi^2 m}\int d^3q\,|q_x|\cdot\left|\sigma_{xy}(\mathbf{q})\right|^2\,\delta(q_x^2v^2 - \omega^2(q_z))$$

где $\omega(q_z)$ – спектр дислокационных колебаний, $\sigma_{xy}(\mathbf{q})$ – Фурье-образ компоненты тензора напряжений, созданных соответствующим дефектом (в нашем случае это либо точечный дефект, либо зона Гинье-Престона), *n* – объемная концентрация соответствующих дефектов.

Для решения поставленной задачи нам необходимо получить выражение для поля смещений зоны Гинье-Престона, которое мы можем представить в виде интеграла по поверхности, опирающейся на контур зоны

$$u_i(\mathbf{r}) = -c_{jklm}b_m\int\limits_{S_0} n_l\frac{\partial}{\partial x_k}G_{ij}(\mathbf{r}-\mathbf{r}')dS' \ ,$$

где $G_{ij}(\mathbf{r})$ - тензор Грина уравнений равновесия данной упругой среды. Наиболее простую и наглядную форму это выражение принимает в изотропном случае

$$G_{ij}(\mathbf{r}) = \frac{1}{8\pi\mu}\left(\frac{2\delta_{ij}}{r} - \frac{\lambda+\mu}{\lambda+2\mu}\frac{\partial^2 r}{\partial x_i\partial x_j}\right),$$

$$c_{jklm} = \lambda\delta_{jk}\delta_{lm} + \mu(\delta_{jl}\delta_{km} + \delta_{jm}\delta_{kl}),$$

где λ и μ коэффициенты Ляме.

После выполнения вычислений получим Фурье-образ необходимой нам компоненты в следующем виде

$$\sigma_{xy}(q_x, q_z, y) = -i\pi\mu b_0 a\,|y|\,J_1(qa)\frac{\lambda+\mu}{\lambda+2\mu}q_x \exp(-q|y|)$$

где $J_1(qa)$ – функция Бесселя первого рода, $q = \sqrt{q_x^2 + q_z^2}$.

Исследуемый нами механизм рассеяния энергии весьма чувствителен к виду спектра дислокационных колебаний, который в данном случае имеет вид

$$\omega^2(q_z) = c^2 q_z^2 + \Delta^2$$

Здесь Δ – щель в спектре дислокационных колебаний. Эта щель может быть порождена либо коллективным взаимодействием точечных дефектов (атомов второго компонента), либо коллективным взаимодействием дислокаций. Если она создается точечными дефектами, выражение для нее можно получить, решая следующее уравнение

$$\Delta^2 = \frac{2nb^2\mu^2\chi^2}{\pi m^2}\iiint \mathrm{d}^3 p \frac{1}{\Delta^2 + c^2 p_z^2 - p_x^2 v^2}\frac{p_x^4 p_y^2}{p^4}\frac{R^2}{\left(p^2 + R^{-2}\right)^2}.$$

Здесь χ – параметр размерного несоответствия атомов легирующей примеси, n – их объёмная концентрация, μ – модуль сдвига.

Спектральная щель, обусловленная коллективным взаимодействием атомов легирующей примеси, имеет вид

$$\Delta = \Delta_d = \frac{c}{b}\left(n_d \chi^2\right)^{1/4}$$

Здесь n_d – безразмерная концентрация примеси.

Если же главный вклад в формирование спектральной щели вносит коллективное взаимодействие дислокаций, что имеет место в случае их высокой плотности, то выражение для нее получается стандартным образом в результате Фурье-преобразования уравнения движения и имеет следующий вид

$$\Delta = \Delta_{dis} = b\sqrt{\frac{\rho M}{m}} = c\sqrt{\frac{2\rho}{\ln(D/l_{dis})}} \approx c\sqrt{\rho}\,; \qquad M = \frac{\mu}{2\pi(1-\gamma)}$$

Здесь ρ – плотность дислокаций, γ – коэффициент Пуассона, c – скорость распространения поперечных звуковых волн в кристалле, l_{dis} – средняя длина дислокации, D – величина порядка размеров кристалла.

Щель в спектре дислокационных колебаний может возникать также благодаря действию сил изображения при скольжении дислокации параллельно свободной поверхности. Движение краевой дислокации параллельно поверхности кристалла эквивалентно движению пары дислокаций – реальной дислокации и ее изображения. Возникающая в этом случае спектральная щель определяется выражением

$$\Delta = \Delta_S = \frac{b}{l_S}\sqrt{\frac{M}{2m}} \approx \frac{c}{l_S}$$

Здесь l_S – расстояние от свободной поверхности кристалла до плоскости скольжения дислокации.

При нахождении выражения для упрочнения сплава нам необходимо выполнить усреднение по длине дислокации и хаотическому распределению дефектов структуры, взаимодействующих с движущимися дислокациями. Такое усреднение производится с помощью стандартной процедуры

$$< \sigma(r_i) > \; = \frac{1}{L}\int_L dz \int_V \sigma(r_1)\frac{dr_1}{V} \cdot \int_V \sigma(r_2)\frac{dr_2}{V}\int_V \sigma(r_3)\frac{dr_3}{V} ... \int_V \sigma(r_N)\frac{dr_N}{V}$$

где V – объем кристалла, N – число растворенных атомов в кристалле, L – длина дислокации. При выполнении усреднения в соответствии со стандартной процедурой число дефектов N и объем кристалла V устремляются к бесконечности, при этом их отношение остается постоянным и равным средней концентрации дефектов.

Воспользовавшись результатами теории динамического взаимодействия структурных дефектов, получим выражение для упрочнения состаренного двухкомпонентного сплава

$$\sigma = \frac{\eta}{\sqrt{\left(1+\sqrt{n_d / n_1}\right)}} + \frac{\beta n_d}{\left(1+\sqrt{n_d / n_1}\right)} + \lambda$$

Здесь введены обозначения

$$\beta = \frac{\mu\chi^2\dot{\varepsilon}}{\rho^2 b^3 c}; \qquad \eta = \frac{n_G \mu b_0 a}{\sqrt{\rho}}; \qquad \beta = \frac{B\dot{\varepsilon}}{\rho b c},$$

где $\dot{\varepsilon}$ - скорость пластической деформации.

Упрочнение сплава является немонотонной функцией концентрации атомов второго компонента и имеет максимум при $n_d = n_1$ и минимум при $n_d = n_2$.

$$n_1 = \left(\frac{\rho b^2}{\chi}\right)^2; \qquad n_2 = \sqrt[3]{\left(\frac{n_G b^3 R \rho c}{\dot{\varepsilon}\chi^{3/2}}\right)^4}$$

Максимум соответствует переходу от доминирующего влияния коллективного взаимодействия дислокаций на формирование спектральной щели к доминированию влияния коллективного взаимодействия атомов второго компонента. Минимум полученной кривой соотвествует переходу от доминирования торможения дислокаций зонами Гинье-Престона к доминированию торможения атомами второго компонента. Численные оценки дают значения $n_1 = 10^{-3} - 10^{-4}$ и $n_2 = 10^{-1} - 10^{-2}$.

Полученные нами результаты могут быть использованы для определения оптимальной концентрации легирующих добавок в металлическом сплаве, подвергающемся высокоэнергетическим воздействиям, в частности, высокоскоростному резанию и высокоскоростной обработке.

Список литературы: **1.** Варюхин В.Н., Малашенко В.В. Динамические эффекты в дефектной системе кристалла // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82, № 9. С. 37– 42. **2.** Alshits V I, Darinskaya E V, Koldaeva M V, Kotowski R K, Petrzhik E A, Tronczyk P. Dislocation kinetics in nonmagnetic crystals: a look through a magnetic window // Phys. Usp.- 2017.- V.60.-P. 305–318. **3.** Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers // Europhysics Letters.- 2016.- V. 114.- P. 65001(1-7). **4.** Malashenko V.V. The effect of Guinier–Preston zones on the dynamic yield stress of alloys under the shock-wave load // Technical Physics. 2017.-V. 62.- № 5.- P. 810-811. **5.** Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects / V.V. Malashenko // Physica B: Phys. Cond. Mat. 2009. V. 404, № 2. P. 3890–3892. **6.** Малашенко В.В. Зависимость динамического предела текучести бинарных сплавов от плотности дислокаций при высокоэнергетических воздействиях. 2020. Физика твердого тела. Т. 62, № 10. С. 1683-1685.

УДК 534.014.1: 629.78

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНАСТКИ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ РДТТ

Малькова С.А., Рожков А.В. (*ПАО НПО "Искра", г. Пермь, Россия*)
Тел. +7 (342) 262 73 59, E-mail: malkovasofia@myrambler.ru

Abstract: *This article analyzes the influence of the elements of the test rig on the values of the natural frequencies of vibrations of the product. The study was carried out by the finite element method using modal and harmonic types of analysis. In the future, the calculation results will be verified with the results of dynamic tests.*
Keywords: *Solid-propellant rocket engine, frequency characteristics, modal analysis, harmonic analysis, finite element method, vibration test.*

Для оценки прочности изделия от заданных нагрузок необходимо определить резонансные частоты изделия. С целью определения собственных частот изделия проводятся вибрационные испытания. Испытания проводятся на вибростенде по трем взаимно перпендикулярным осям с использованием специальной оснастки, в которой закрепляется изделие.

В настоящее время в практику эксперимента вошли современные инженерные конечно-элементные пакеты, позволяющие проводить пред- и постиспытательное моделирование, что позволяет повысить качество отработки, определить реализуемые режимы, сократить количество отладочных испытаний и сроки отработки в целом. Из результатов численного моделирования можно получить дополнительную информацию об исследуемых процессах, оптимизировать конструкцию, критические узлы и элементы изделий, правильно интерпретировать экспериментальные данные. Для этого необходимо обеспечить наиболее точные результаты расчетов соответствующие результатам испытаний [1-2].

При написании данной работы рассмотрены аналитические и численные методы определения частот и форм колебаний изделия, представленные в работах [3-5].

Для проведения расчета динамических нагрузок, действующих на РДТТ разработана конечно-элементная модель (КЭМ). КЭМ должна: соответствовать геометрическим параметрам, адекватно отражать динамические характеристики в диапазоне частот до 200 Гц.

Целью данной работы является анализ влияния оснастки на собственные частоты испытываемого изделия.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Построена оптимальная объемная конечно-элементная модель изделия.
2. Проведен модальный анализ для трех случаев закрепления изделия и по трем осям X,Y и Z.
3. Проведен гармонический анализ для трех случаев закрепления изделия и по трем осям X,Y и Z.
4. Проанализированы полученные результаты.

Ось X соответствует оси изделия, Y и Z направлены перпендикулярно.

Для получения собственных частот решена задача в объемной постановке методом конечных элементов с использованием модального анализа.

Модальный анализ представляет решение уравнения собственных колебаний [5]:

$$[\mathrm{M}] \cdot \{\ddot{u}\} + [\mathrm{K}] \cdot \{\mathrm{u}\} = 0,$$

где [M] – матрица масс;

[K] – матрица жесткости;

{ü} – вектор узловых ускорений;

{u} – вектор узловых перемещений.

Предполагается, что при модальном анализе система является линейной. Для такой системы свободные колебания являются гармоническими и представляются в виде:

$$\{u\} = \{u\}_i \cos(\omega_i t_i),$$

где $\{u\}_i$ – собственный вектор моды колебаний на i-й частоте;

ω_i – собственная круговая частота;

t_i – время.

Амплитудно-частотные характеристики изделия определяются проведением испытаний при гармоническом нагружении. Поэтому был проведен расчет резонансных частот с помощью гармонического анализа.

Гармонический анализ представляет решение уравнения [5]:

$$[M] \cdot \{ü\} + [C] \cdot \{u̇\} + [K] \cdot \{u\} = \{F\},$$

где [C] – матрица демпфирования;

{u̇} – матрица узловых скоростей;

$\{F\}$– вектор внешних нагрузок.

Так как при первом приближении демпфирование элементов конструкции неизвестно, [C] принимается равным 0. После проведения виброиспытаний необходимо уточнение КЭМ с учетом полученных при испытаниях коэффициентов демпфирования.

При расчете в приняты следующие допущения: в модели не учитываются мелкие детали, мало влияющие на результат, с целью сокращения времени расчета.

С целью получения наиболее наглядной картины влияния оснастки на собственные частоты изделия проводился расчет в диапазоне частот 0 – 1000 Гц для нескольких вариантов закрепления РДТТ:

Вариант 1 – Изделие жестко закреплено по четырем отверстиям на фланце.

Вариант 2 – Изделие закреплено с помощью болтового соединения на плите оснастки. Плита жестко закреплена за отверстия.

Вариант 3 – Изделие закреплено аналогично варианту 2. Плита закреплена на оснастке, оснастка жестко закреплена по одному из торцов (торец закрепляется в зависимости от оси, вдоль которой прикладывается нагрузка при испытаниях)

В результате проведения модального анализа были получены первые частоты колебаний вдоль осей изделия и при разных вариантах закрепления, представленные в таблице 1.

Таблица 1 Собственные частоты из модального анализа, Гц

Закрепление	X	Y	Z
Вариант 1	682.59	149.34	149.55
Вариант 2	406.90	128.77	121.37
Вариант 3	381.42	131.22	120.97

В качестве нагрузки при гармоническом анализе принята амплитуда виброускорения, используемая при проведении вибропрочностных испытаний равная

5 м/с^2. Контакты заданы так, чтобы наиболее точно отражать реальные условия в соединениях.

Полученные первые частоты колебаний представлены в таблице 2.

Таблица 2. Резонансные частоты из гармонического анализа, Гц

Закрепление	X	Y	Z
Вариант 1	682.60	149.34	149.60
Вариант 2	406.90	128.75	121.36
Вариант 3	381.45	131.85	120.41

Резонансные частоты, полученные гармоническим анализом, соответствуют собственным частотам, полученным при модальном анализе. Разница в значениях обусловлена погрешностью расчета и выбора шага при гармоническом анализе.

Заключение

1. Собственные и резонансные частоты изделия совместно и без оснастки вдоль оси X превышают 200 Гц.
2. Снижение первой собственной частоты в диапазоне до 200 Гц составило порядка 19%.
3. Получено, что конструкция и жесткость оснастки существенно влияют на резонансные частоты, получаемые на испытаниях.
4. На следующем этапе по результатам виброиспытаний необходимо провести верификацию конечно-элементной модели с целью уточнения расчетных значений собственных частот.

Список литературы: **1.** Я.М. Клебанов Применение метода оценки соответствия экспериментальных и расчетных собственных частот для уточнения конечно-элементной модели изделия /Я.М. Клебанов, В.А. Бруяка, М.А. Вавилов, Н.Н. Столяров // Технические науки. Вестник СГТУ – Самара, 2013. №1(37) – с.118 – 126. **2.** Межин В. С., Обухов В. В. Практика применения модальных испытаний для целей верификации конечно-элементных моделей конструкции изделий ракетно-космической техники /В.С. Межин, В.В. Обухов // Космическая техника и технологии – Королев, 2014. №1(4) – с.86–91. **3.** А.Ф. Сальников, И.А. Кашина Сравнительный анализ методов определения собственных частот конструктивных элементов системы РДТТ / А.Ф. Сальников, И.А. Кашина // Полет. Общероссийский научно-технический журнал – Москва: Машиностроение-Полет, 2013. №6 – с.26-30. **4.** В.Е. Хроматов Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния авиационных изделий при динамическом нагружении /В.Е. Хроматов, Р.В. Чухлебов, В.Н. Щугорев // Прогресивні технологіі і системи машинобудування – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2014. №3(49) – с.211-215. **5.** А.А. Иголкин Модальный анализ динамического макета малого космического аппарата / А.А. Иголкин, А.И. Сафин, А.Г. Филипов // Решетниковские чтения – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, 2018 – Т.1 – с.117-118.

ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Маньшин М.В., Степанова Е.А.
(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)
Тел. +7(914)6221790; e-mail: len_sta@rambler.ru; z5x3m@gmail.com

Abstract: *The definition of current and final oil recovery is given, methods of stimulating the reservoir are given.*
Keywords*: oil recovery, reservoir, method, field.*

Актуальной является проблема извлечения из нефтеносных пластов месторождений максимального количества геологических запасов имеющихся в пластах.

Существует текущая и конечная нефтеотдача. Конечная – зависимость конечного общего количества нефти от первоначально доступных залежей. Текущая – отношение количества извлечённой на данный момент разработки пласта нефти к первоначальным геологическим запасам.

В целях повышения экономической эффективности разработки месторождений, снижения прямых капитальных вложений и максимально возможного использования реинвестиций весь срок разработки месторождения принято делить на три основных этапа.

На первом этапе для добычи нефти максимально возможно используется естественная энергия пласта (упругая энергия, энергия растворенного газа, энергия законтурных вод, газовой шапки, потенциальная энергия гравитационных сил.

На втором этапе реализуются методы поддержания пластового давления путем закачки воды или газа. Эти методы принято называть вторичными.

На третьем этапе для повышения эффективности разработки месторождений применяются методы увеличения нефтеотдачи.

Существуют различные методы воздействия на пласт. Среди них:

– тепловой – методы воздействия на пласт заключаются в искусственном повышении температуры в стволе буровой и в призабойной зоне.

– газовый – основан на закачивании воздуха в пласт.

– химический – включают в себя вытеснение сырья с помощью растворов полимеров.

– физический – метод воздействия на призабойную зону пласта отличаются от остальных тем, что в процессе их применения используется естественная энергия слоя.

Фактические запасы углеводородов на Земле ограничены, поэтому необходимы технологии более глубокой выработки геологических запасов.

Список литературы: 1. Малышко Ф.Л. Новые методы повышения нефтеотдачи пластов // Экспозиция нефть газ. – 2013. – №2(27). – С. 17-18. **2.** Методы воздействия на пласт [Электронный ресурс]. – URL: https://www.neftegaz-expo.ru/ru/articles/2016/metody-vozdejstviya-na-plast/ (дата обращения: 26.05.2021). **3.** Способы повышения нефтеотдачи [Электронный ресурс]. – URL: https://www.neftegaz-expo.ru/ru/articles/2016/sposoby-povysheniya-nefteotdachi/ (дата обращения: 26.05.2021).

УДК 622.23.054.8

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ РЕЗЦОВ АЛМАЗНЫХ ДОЛОТ

Мартюшова А.А. *(Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", Россия)*
Телефон: +7-926-141-80-34, email: nastya.martyushova@mail.ru

Abstract: *The article presents a comparative analysis of the design features of diamond drill bit cutters, considers the specifics of their use in various mining and geological conditions. The directions of improvement of the drilling tool with diamond inserts in order to increase the efficiency of the drilling process are indicated.*
Keywords*: drilling, rock, drill bits, diamond tools, bicomponent inserts design features, operational characteristics.*

Введение

Алмазные долота в современное время приобрели большую популярность, среди бурового инструмента, благодаря своим эксплуатационным характеристикам. При выборе места для скважины, не всегда точно известно, через какой ряд пород будет она проходить, именно поэтому чаще всего на практике в качестве инструмента используют алмазные долота. Конструкция алмазного инструмента рассчитана на среднюю твердость породы, но также учтена возможность использования инструмента в случае, когда твердые породы чередуются с мягкими. Срок службы алмазных долот в 3-5 раз больше шарошечных и лопастных при (идентичных нагрузках на инструмент.

Долото состоит из алмазных режущих элементов, именно они и гарантируют разрушение пород разной крепости. Эффективность алмазного долота находится в зависимости от свойств используемых материалов и их качества. По количеству и типу расположения алмазов различают одно – и многослойные алмазные долота. Так же есть классификация долот, которая строится с учетом позиционирования алмазов: радиальные, спиральные, ступенчатые.

Несмотря на высокую стойкость алмазных долот и ряд преимуществ, которыми они обладают, существуют некоторые сложности в использовании данного инструмента. К примеру, если в процессе бурения на пути инструмента встретиться металлический объект или же очень твердая порода, то долото может выйти из строя по причине скола, либо в результате выпадения алмазного резца из корпуса долота. Наряду с этим, некачественная промывка режущей части инструмента может также привести к выводу его из строя, или к снижению эффективности бурения.

Резцы долот являются исполнительным органом инструмента. Разрушение породы происходит режуще-истирающим способом, при котором наблюдается процесс самозатачивания резцов. Самозатачивание связано напрямую с конструкцией инструмента, используемых материалов и технологии изготовления. Исходя из этого можно сказать, что анализ конструктивных особенностей алмазных резцов важен для улучшения технических и эксплуатационных свойств инструмента.

Устройство алмазного долота

Алмазное долото состоит из хвостовика, корпуса и резцов. Хвостовик долот изготавливается из высококачественной стали, типы размеров определяются стандартным рядом по ГОСТ и ISO. Стойкость и функциональные характеристики алмазных долот находятся в прямой зависимости от физико-механических свойств и крепости породы. Исходя из данных условий существуют три вида конструкции корпуса инструмента – матричный, бицентричный и корпус из высококачественной легированной стали.

Матричное и бицентричное основание долота изготавливаются также из высококачественной стали, но имеются отличительные особенности в технологии, а именно, их получают спеканием матрицы и хвостовика. Бицентричный корпус имеет несимметричную форму [1] и применяются только для бурения скважин под хвостовик. Все виды конструкций инструмента имеют как преимущества, так и недостатки относительно друг друга, например, по методу крепления резцов.

Установка резцов в посадочные отверстия, высверленные заранее в стальном корпусе, происходит посредствам нагревания корпуса инструмента до температуры 440°С с последующим медленным охлаждением. Соответственно при нагревании отверстия расширяются, при охлаждении – сжимаются, при этом задавая позицию и ориентацию резцам.

Закрепление резца в матричном корпусе долота более трудоемко. Посадочные карманы под резцы, расположенные на матрице, производятся в процессе формовки при помощи установки вспомогательных графитовых вкладышей, которые после отливки корпуса удаляются машинной обработкой [2]. Процесс установки резцов в матрицу можно разделить на несколько этапов. Первый этап заключается в тщательной чистке опор резцов и основания отверстия до размещения припоя. Следующий этап - накладка флюса на присоединительную часть резцов, для предотвращения нейтрализации продуктов окисления, а также равномерного размещения припоя по конструкции резца. Окисление металлов может помешать проведению пайки и разрушить целостность элементов. Третий этап является основным, так как режущие элементы устанавливаются при помощи специального пружинного приспособления в подготовленные карманы, а в последующем впаиваются в матрицу долота при помощи простого припоя. Последующий этап термообработки заключается в нагревании матрицы в восстановительной среде до 700°С для формирования связи между гранями резца и отверстий матрицы [3]. Охлаждение до нормальной температуры следует проводить на воздухе для застывания припоя и удаления фиксирующих приспособлений.

Резцы долота на твердосплавной базе покрываются слоем поликристаллического алмаза [3]. Толщина покрытия зависит от назначения и типа размера алмазного долота, и может варьироваться от 0,5 до 5 мм. Изнашивание твердосплавной основы быстрее покрытия резца позволяет режущей части инструмента оставаться как можно больше острым (эффект самозатачивания).

Основные требования, предъявляемые к режущей части алмазных долот

Для предупреждения разрушения алмазно-твердосплавных резцов необходимо исключить в алмазном слое растягивающие напряжения. Поэтому резцы имеют тупой угол резания ($90° + \alpha$) [4]. Для ограничения глубины внедрения и, соответственно, перегрузки резцов сзади могут устанавливаться опорные элементы, например, зубки из твердого сплава (рисунок 1).

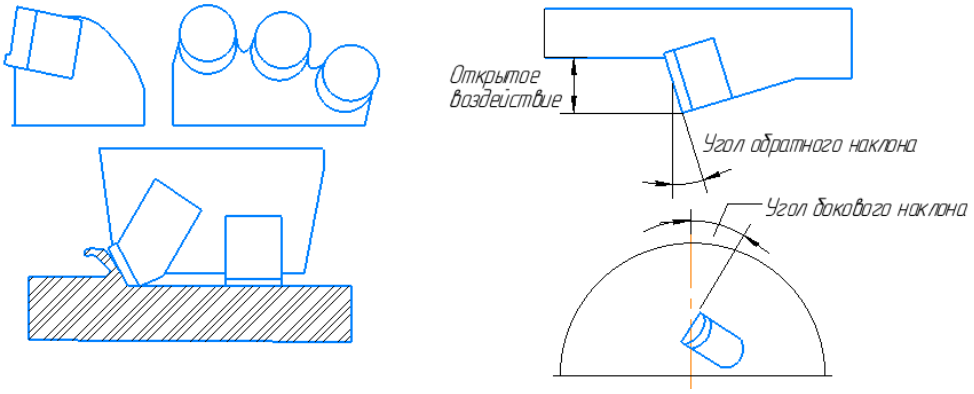
После сборки долота и оснащения лопастей резцами долото балансируется на специальном стенде с целью минимизации его вибрации в процессе разрушения горной породы и, соответственно, увеличения скорости бурения и надежности долота [3].

Сравнительный анализ резцов алмазных долот

Резцы алмазных долот различаются по геометрическим формам и назначению. Наибольшую распространенность получили PDC резцы, которые могут быть выполнены треугольной и круглой формы, также применение нашли и резцы с термостойкими (HOT) и горячепрессованными (GHI) вставками.

PDC резец – это бикомпонентный резец, который получают путем спекания слоя поликристаллических алмазов (PolyCrystalline Diamond Compact = PDC), на подложке из карбида вольфрама при высокой температуре и под значительным давлением. При

таких условиях спекания слой PDC прочно закрепляется на подложке, образуется практически цельная абсолютно плотная конструкция.



а *б*

Рис. 1. Расположение (*а*) и геометрические характеристики (*б*) установки резцов PDC-долот

PDC резцы для буровых долот – новое и очень перспективное направление для российского рынка, поскольку нет ни одного российского предприятия, которое производило бы такую продукцию [5]. Все предприятия, производящие буровые долота, закупают данные резцы либо в США, Японии, либо в Китае.

Основу резца круглой формы составляет твердый сплав, покрываемый слоем поликристаллического алмаза толщиной от 0,5 до 0,7 мм (рисунок 2, *а*). Прочность на изгиб у твердого сплава значительно больше прочности поликристаллического алмаза [3], это позволяет эффективно достигать необходимых характеристик для выработки пород. Диаметральный размер резца варьируется от 12,7 до 50,8 мм.

Диффузионная сварка является эффективным методом установки и крепления к державке резца треугольной формы, в результате чего образуется элемент вооружения в виде зубка (рисунок 2, *б*). При этом резцы треугольной формы используют при установке единичного резца в пограничной зоне лопасти долота, либо в виде комплекса из нескольких резцов, образующих мозаичный массив режущих элементов (рисунок 2, *в*), в соответствии с требованиями оптимальных геометрических параметров вооружения долот для разрушения твердой породы.

Несмотря на преимущества PDC резцов, у них существует ряд недостатков, например, большая температурная зависимость, так при температуре свыше 700°С PDC-резцы начинают разрушаться.

HOT резцы являются конкурентами PDC резцов, но из-за сложной технологии их изготовления и дороговизны, PDC резцы пока нашли большее распространение. Термостойкие вставки HOT проходят ряд термических операций, тем самым позволяют эффективно работать при высоких температурах. Специальная обработка позволяет режущей части резцов увеличивать устойчивость к абразивному износу, при этом оставаться острыми дольше, относительно PDC резцов.

Отличительной характеристикой HOT резцов является износостойкость, которая превышает обычную практически в 5 раз [3] и тем самым повышает надежность и долговечность элемента. Данный ресурс инструмента позволяет проходить смешанные типы пород за минимальное время. Острые края режущей части резца, повышенная износостойкость способствуют бурению на длинные расстояния без замены инструмента и увеличению механической скорости.

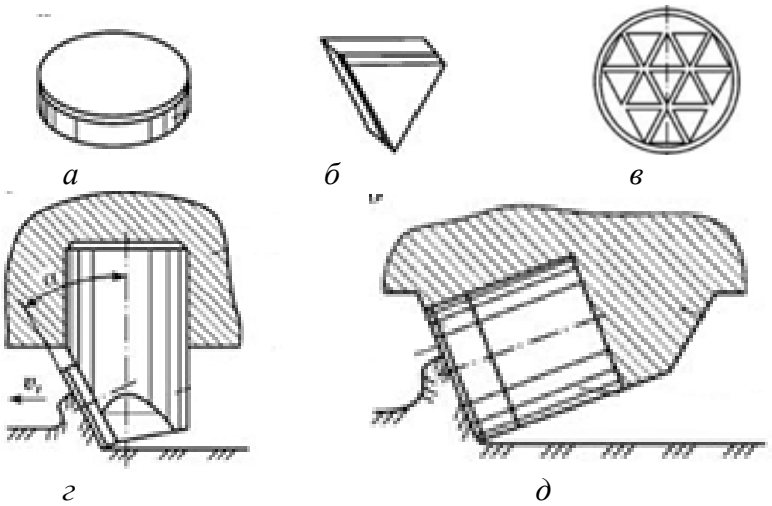


Рис. 2. Резцы алмазных долот: *а* – алмазно-твердосплавная пластинка круглой формы, *б* – резцы треугольной формы, *в* – матричный комплекс резцов, *г, д* – схемы крепления резцов и взаимодействия с горной породой

Изначально повышение долговечности резцов достигали за счет повышения твердости, но в ущерб сопротивляемости материала ударным нагрузкам. В дальнейшем, применение специальной термообработки резцов НОТ и использование материалов, малочувствительных к термическим воздействиям, позволили увеличить долговечность и стойкость вставок, а также сопротивляемость скалыванию режущей кромки за счет оптимизации распределения остаточных напряжений.

Горячепрессованные вставки GHI включают специальную комбинацию кристаллов алмаза и матричного порошка карбида вольфрама, которая подбирается в зависимости от свойств пород, встречающихся в конкретной задаче бурения [6].

Процесс гранулирования, реализуемый на определенном этапе технологии изготовления вставок, способствует равномерному распределению поликристаллических алмазов в матрице, что увеличивает долговечность вставок GHI и позволяет в течение более длительных промежутков времени вести проходку с большей скоростью.

Таким образом вставки GHI представляют собой миниатюрные шлифкруги, благодаря чему значительно снижается глубина подрезания породы при каждом обороте инструмента. При этом в процессе бурения имеет место процесс самозатачивание резцов, т. е. постоянное обновление режущих кромок резцов. Наряду с этим, вставки, выступая над поверхностью корпуса, обеспечивают защиту торцевой части инструмента, тем самым улучшают условия теплообмена режущих кромок, что позволяет увеличить скорость бурения. Использование для вставок различных связок и алмазов позволяет осуществлять эффективное бурение в разных геологических условиях.

Ранее рассмотренные резцы имели простую геометрическую форму (пирамида, цилиндр). Вместе с тем существуют резцы с более сложной оригинальной формой в виде гребня или клина (Axe) (рисунок 3, *а*), которые успешно комбинируют режущее действие резца PDC и дробящее действие твердосплавного зубка из карбида вольфрама. Такие резцы располагают по всему профилю долота, что значительно повышает эффективность бурения и теплоотдачу, сопротивляемость нагрузкам. прежде всего, за счет увеличения толщины алмазного слоя, комбинации разноразмерных гранул поликристаллических алмазов и оптимизации применяемых материалов.

Вооружение долот включает и использование конической формы вставок резцов (рисунок 3, *б*). Отличительной особенностью таких вставок является их расположение и численность [7]. Количество конических вставок на инструмент приходится до двух штук, чаще всего применяют одну, расположенную в центре долота для создания

значительной узконаправленной нагрузки для более эффективного разрушения породы. Это приводит к увеличению ресурса долота и скорости проходки в достаточно широком спектре геологических структур и интервале эксплуатационных параметров. На конических резцах толщина алмазоносного слоя практически в два раза больше толщины покрытия, благодаря чему они обладают высокой ударной прочностью и повышенной сопротивляемостью абразивному износу. Поэтому срок службы конических вставок значительно превосходит срок службы долот PDC.

а *б*

Рис. 3. Резцы алмазных долот гребнеобразной (*а*) и конической (*б*) формы

Заключение

Алмазное долото в настоящее время является наиболее востребованным буровым инструментом. Эффективность эксплуатации инструмента, его стойкость находятся в прямой зависимости от свойств используемых материалов, их качества, технологии изготовления и конструктивного исполнения резцов. К режущей части алмазных долот предъявляют ряд требований, из которых важными являются термоустойчивость, высокое сопротивление ударным нагрузкам и абразивная стойкость.

Проведенный сравнительный анализ конструктивных особенностей и эксплуатационных характеристик различных видов алмазных долот показал, что самым востребованным инструментом является долото с бикомпонентными вставками из твердого сплава в различном сочетании с поликристаллическими алмазными гранулами. Вместе с тем, несмотря на разнообразие конструктивного и технологического исполнения алмазных резцов, способов их крепления к корпусу, оптимальные варианты инструмента пока не найдены. Это определяет необходимость проведения научно-исследовательских работ в направлении повышения эксплуатационных характеристик алмазного бурового инструмента за счет усовершенствования конструкции режущей части, технологии их изготовления и повышения износостойкости применяемого вооружения.

Список литературы: 1. Богомолов Р.М., Гринев А.М., Сериков Д.Ю. Буровое долото с алмазными резцами. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 12. С. 28-34. **2.** Kochegarova N.A., Pankratova Ya.S. Drilling with PDC-type diamond bits. В сборнике: ADVANCED RESEARCH: PROBLEMS AND NEW APPROACHES. сборник статей Международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 2021. С. 157-160. **3.** Балаба В.И., Бикбулатов Н.К., Вышегородцева Г.Н. и др. Буровой породоразрушающий инструмент Учебное пособие для вузов. – М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2013, 251 с.: ил. **4.** Марамзин А. В., Блинов Г. А. Алмазное бурение на твердые полезные ископаемые. Технология работ. Л., «Недра», 1977. 248 с. **5.** Богомолов Р.М. Буровое алмазное долото с защитой промывочных насадок. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4-2 (84). С. 183-185. **6.** Недыхалов М., Богомолов Р.М. Повышение стойкости алмазного вооружения долот PDC. Ашировские чтения. 2020. Т. 1. № 1 (12). С. 272-275. **7.** Богомолов Р.М., Гринев А.Н., Сериков Д.Ю. Буровое долото с разноориентированным алмазными резцами // Сфера. Нефть и Газ. 2019. № 5 (73). С. 42-49.

ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Мещеряков В.Н., Пикалов В.В.
(Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), г. Липецк, Россия)
Тел. 89042930968, e-mail: wreditels@mail.ru

Abstract: *This article discusses the design features of an electric arc plasma installation intended for surface heating of the metalwork products and its components that ensure the operation of the installation. An experimental setup is presented, the features of the operation of its electric arc part are considered.*

Введение. В настоящее время электродуговые плазменные установки (плазмотроны) используются в различных технологических процессах как генераторы плазмы. Плазмотрон осуществляет формирование и формирование и нагрев плазменного потока, который используется для нагрева поверхности металлоизделий. Для напыления различных материалов на поверхность изделия в струю плазмы могут подаваться порошковые материалы, при этом происходят химические реакции в струе плазмы и на поверхности металлоизделия, которое для обеспечения более качественного напыления может использоваться как электрод. Более простую конструкцию имеют электродуговые плазмотроны с внутренней дугой в рабочей камере, предназначенные для нагрева потока газа, подаваемого на поверхность нагреваемой детали [1-5].

Известно достаточно большое количество конструкций плазмотронов с внутренней дугой в рабочей камере, вырабатывающих низкотемпературную плазму с температурой до 2500 ^{o}C [1,5] за счет пропускания под давлением через рабочую полую камеру, в которой горит электрическая дуга, потока воздуха или плазмообразующего газа. Рабочая камера может занимать вертикальное положение или располагаться горизонтально [5].

Плазмотроны с вертикальным расположением рабочей камеры с выходным каналом для плазмы направленным вниз используются в установках для сжигания твердых промышленных отходов, бытовых отходов и мусора с выработкой синтез-газа [1,4,5]. В таких установках плазмотрон размещен внутри закрытой печи, и ось его рабочей камеры с выходным отверстием для плазмы может располагаться под углом ко дну печи. Сжигаемые отходы загружаются на дно печи и попадают в зону действия потока плазмы.

Конструкция электродугового плазмотрона и работа опытной установки.

На кафедре электропривода ЛГТУ созданы конструкции плазмотронов, предназначенные для выработки низкотемпературной плазмы, используемой для установок сжигания твердых отходов, полезные модели [6,7], а также для нагрева поверхности металлоизделий [8,9]. Рабочую камеру электродугового плазмотрона, предназначенного для нагрева поверхности металлоизделий, целесообразно располагать горизонтально, так как в этом случае уменьшается рассеивание потока плазмы, проходящей напрямую или через сопло участок по воздуху от выхода рабочей камеры до поверхности нагреваемой детали.

На рисунке 1 приведена разработанная конструкция электродугового плазмотрона [8]. Электродуговой плазмотрон содержит горизонтально расположенную трубчатую цилиндрическую рабочую камеру 1, выполненную из непроводящего электрический ток тугоплавкого материала. В стенке камеры имеются два отверстия, расположенных соосно, в них установлены графитовые электроды 2 и 3. К электродам от источника питания 4 подводится регулируемое напряжение постоянного тока. В полость рабочей камеры через входное отверстие подается под давлением плазмообразующий газ с помощью нагнетающей установки 5 вентиляторного типа. Для начального зажигания дуги между электродами 2 и 3 используется высоковольтный осциллятор 12. Для удержания и растягивания дуги, горящей между электродами 2 и 3, предусмотрена система, реализующая магнитное дутье, состоящая из цилиндрического трубчатого маг-

нитопровода 7 и полюсов 8 и 9. На полюсах размещена обмотка 10, получающая от источника ее питания 11 регулируемое напряжение постоянного тока.

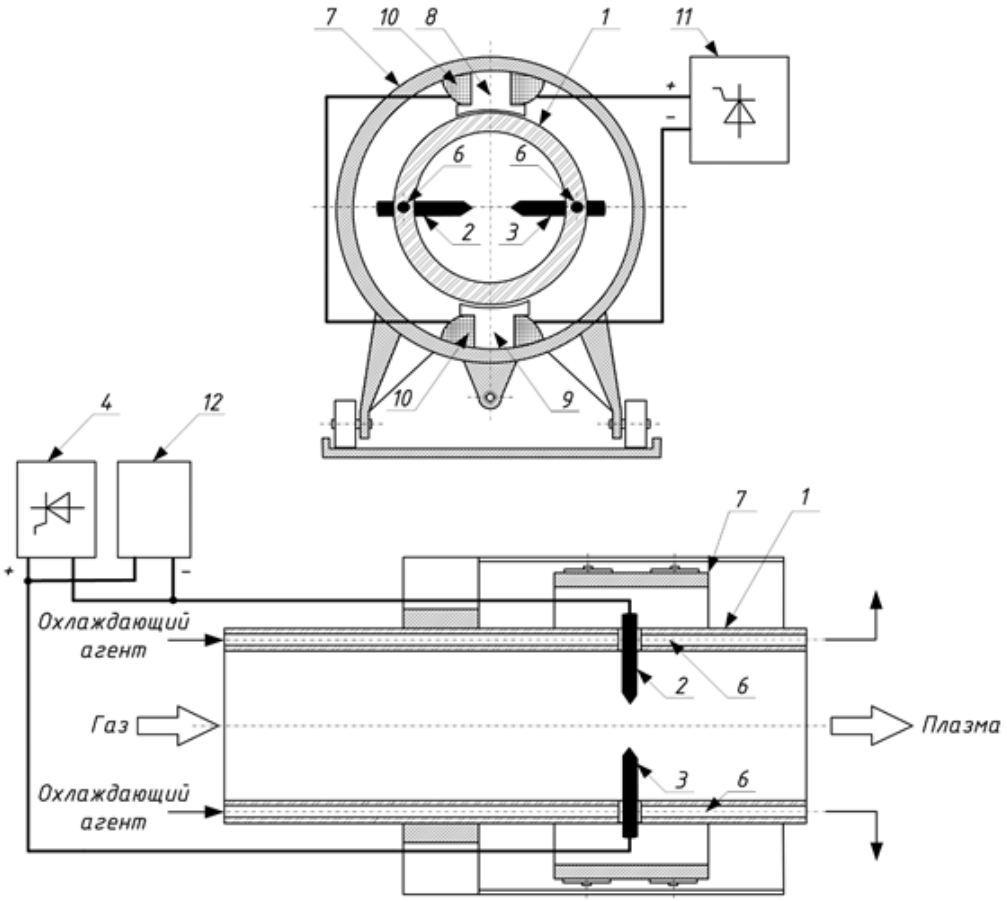


Рис. 1. Конструкция электродугового плазмотрона

В результате горения дуги электроды 2 и 3 постоянно подгорают, и расстояние между ними в процессе работы увеличивается. Поэтому для обеспечения постоянного межэлектродного расстояния в [6] была предложена система плавного движения электродов, осуществляемого в процессе работы установки. Эта система представляет собой мехатронный блок с сорвоприводом.

На основании конструкции электродугового плазмотрона, защищенной патентом на изобретение [6] и приведенной на рис.1, была выполнена экспериментальная электродуговая плазменная установка, общий вид которой показан на рис. 2. В качестве плазмообразующего газа в данной установке использовался воздух, подаваемый под давлением с помощью вентилятора й. Мощность электропривода вентилятора составляла 400 Вт и составляла около 4% от мощности силовой электродуговой установки.

Наиболее энергоемкой частью установки является система питания электродов, обеспечивающая силу тока в дуге на уровне 60 – 80 А. уравнение баланса напряжений в цепи с электрической дугой постоянного тока имеет общий вид [10]

$$R_{\Sigma} I + L_{\Sigma} \frac{dI}{dt} = E - \alpha - \beta(l + \Delta l), \qquad (1)$$

где I - ток в дуге; E – выпрямленная ЭДС источника питания; R_{Σ} - эквивалентное активное сопротивление дуги; L_{Σ} - полная эквивалентная индуктивность цепи; Δl - из-

менение длины дуги; l - длина дуги; β - дуговой градиент потенциала; α - падение напряжения вблизи электродов.

Рис. 2. Общий вид экспериментальной электродуговой плазменной установки

При изменении объема вырабатываемой плазмы осуществляется регулирование тока дуги, сопровождающееся изменением потребляемой из сети мощности, а также оптимальным регулированием потока плазмообразующего компонента, в качестве которого использован воздух. Мощность электродуговой плазменной установки, составляла около 10 кВт, источник питания был выполнен в виде трехфазного регулируемого выпрямителя. В режиме холостого хода выходное выпрямленное напряжение составляло 220 в.

Магнитная часть установки имеет малую мощность, составляющую менее 1% от мощности силовой электродуговой установки. Для улучшения электромагнитной совместимости электродуговой части плазматрона с питающей сетью могут использоваться активные фильтры электроэнергии, компенсирующие нелинейный характер нагрузки и уменьшающие уровень высших гармоник, поступающих в сеть.

Статья написана при поддержке гранта РФФИ 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

Список литературы: 1. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я. Урюков Б.А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). М.: Наука. 1973. - 232 с. **2.** Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э, Фалеев В.А. Переработка техногенных отходов в электродуговой плазме / Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и технология». 2008. №6. С. 131-135. **3.** А.с. СССР № 599732. Электродуговой нагреватель газа постоянного тока / Жуков М.Ф., Лыткин А.Я., Худяков Г.Н., Аньшаков А.С. Опубл. 07.09.1982. Бюл. № 33. **4.** Патент РФ № 2465748. Электродуговой плазмотрон / Мчедалов С.Г. Опубл 27.10.2012. Бюл. № 30. **5.** Моссэ А.Л. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов / А.Л. Моссэ, В.В. Савчин // Беларуская навука, 2015. _ 411 с. **5.** Патент на полезную модель № 188618. Электродуговой плазмотрон / Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Чупров В.Б., Конев В.А. Опубл. 18.04.2019. Бюл. №11. **6.** Патент на изобретение RU 2713736 C1. Электродуговой плазмотрон для сжигания твердых отходов. Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Данилова О.В., Ласточкин Д.В. Заявка № 2019118826 от 17.06.2019. Опубл. 07.02.2020. **7.** Патент на изобретение RU 2715054 C1. Электродуговой плазмотрон Мещеряков В.Н., Конев В.А., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Конев М.В., 25.02.2020. **8.** Патент на изобретение № 2713746. Электродуговой плазмотрон / Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Данилова О.В., Ласточкин Д.В. Опубл. 18.04.2019. Бюл. №11. 9. Доманов В.И. Влияние случайных факторов на работу системы регулирования тока дуговой плавильной установки / В.И. Доманов, А.В. Доманов, К.Е. Карпухин и др. // Приводная техника. - 2010. №6, С. 16-19.

ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТОДОМ РЕВЕРСИВНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Мирошниченко С.В. *(ГУ ДонФТИ им. А.А. Галкина, г. Донецк, ДНР)*
Тел.: +38 (071) 4382056; E-mail: svmiro@mail.ru

Abstract: *The theoretical possibility of the formation of a multiscale gradient structure by means of multicycle reversal extrusion is shown on the basis of a study of the evolution of the strain state of the deformed metal. In order to establish the possibility of obtaining a billet with the given properties and without technological failures, the assessment of the plasticity resource in the dangerous points of the billet section has been carried out using the Dell tensor criterion. The studies were based on FE simulation data.*

Key words: *reversal extrusion, architectured material, gradient structure, strain state, principal strain, ultimate strain, plasticity resource*

Накопленный опыт использования интенсивного пластического деформирования для достижения в металлах и сплавах субмикрокристаллических (СМК) состояний позволил перейти к разработке технологических приемов, нацеленных на создание мультимасштабных архитектурных материалов с градиентной структурой. Примером таковых являются слоистые материалы, получаемые при комбинации метода кручения под высоким давлением с химико-термической обработкой [1] или методом пластического резания [2], коаксиальные градиентные структуры, формируемые в прутках винтовой экструзией [3] или методом трехвалкового планетарного измельчения [4]. В получаемых монолитах создается определенная комбинация разных структурных состояний с плавным переходным слоем, обеспечивающим целостность объема. Обусловленный такой комбинацией градиент свойств оптимизирует соотношение противоположных характеристик.

Особые перспективы в данном направлении обещает развитие технологии реверсивного выдавливания, первоначально используемого для создания эффективных структурных состояний и высоких прочностных характеристик, равномерно распределенных в габаритных заготовках из различных металлов и сплавов [5]. Всесторонние исследования эволюции микроструктуры сплавов и их прочностных характеристик при использовании данной идеи доказывают ее эффективность [6].

Для рассмотрения возможностей метода реверсивного выдавливания в формировании внутренней мультимасштабной архитектуры и изучения реакции материала на многократное деформационное воздействие проведено численное моделирование четырех циклов процесса в среде конечно-элементного комплекса DEFORM-2D.

Согласно данному методу первой операцией цикла является формирование стакана путем выдавливания с обратным истечением металла. На втором этапе цикла имитируется реверсирование заготовки к исходной геометрии. После ее кантовки на 180 градусов этапы моделирования повторяются. В итоге смоделировано четыре цикла обработки.

Придерживаясь стратегии формирования материала с градиентным распределением свойств в радиальном направлении, при постановке задачи выбраны следующие конструктивные параметры деформирования: отношение высоты заготовки к диаметру H/D=0.5; относительный ход внедрения пуансона $\Delta h/H=0.7$; отношение диаметров пуансона и заготовки d/D=0.5. Заданная величина противодавления соответствовала $P_{ПД}$=200MPa.

В качестве модельного материала выбран алюминиевый сплав АД1, механические свойства которого заданы кривой упрочнения, учитывающей эффект Баушингера [7] и предельной поверхностью, аппроксимация которой представлена в виде [8]:

$$e_p(\eta,\mu_\sigma)=\frac{1{,}3\cdot exp(-0{,}3254\eta)}{1-0{,}621\mu_\sigma+0{,}2584\mu_\sigma^2},$$

где e_p – предельная деформация, η – показатель жесткости схемы напряженного состояния, μ_σ – параметр Надаи-Лоде.

Поскольку определяющую роль в формировании структуры и свойств обрабатываемых материалов играет деформированное состояние, условия получения внутренней архитектуры контролировали с помощью его основных характеристик, свидетельствующих о возможности формирования в объеме материала структурной комбинации из элементов субмикро- и микроуровней. Оценивали степень и распределение накопленной деформации в радиальном направлении заготовки, а также характер изменения средней главной деформации ε_2 в материальных точках деформируемого объема по шагам четырех циклов реверсивного выдавливания.

Приведенные на рис. 1 поля интенсивностей деформации, дающие качественное представление об уровне и градиенте распределения накопленных деформаций ε_{eff} в радиальном направлении, показывают удовлетворительные результаты по формированию незначительного объема очага интенсивной деформации в приосевой зоне. Перепад значений суммарных после четырех циклов деформаций в осевой (r<6мм) и периферийной (r>16мм) зонах составляет 4,5 раза. Такое распределение свидетельствует о возможности формирования в материале внутренней архитектуры типа твёрдый сердечник – мягкая оболочка, так как величина ε_{eff} в приосевой части заготовки, превышающая 6 единиц, вполне может обеспечить формирование в этой зоне СМК структур в отличие от слабодеформированных (ε_{eff}<3) наружных слоев.

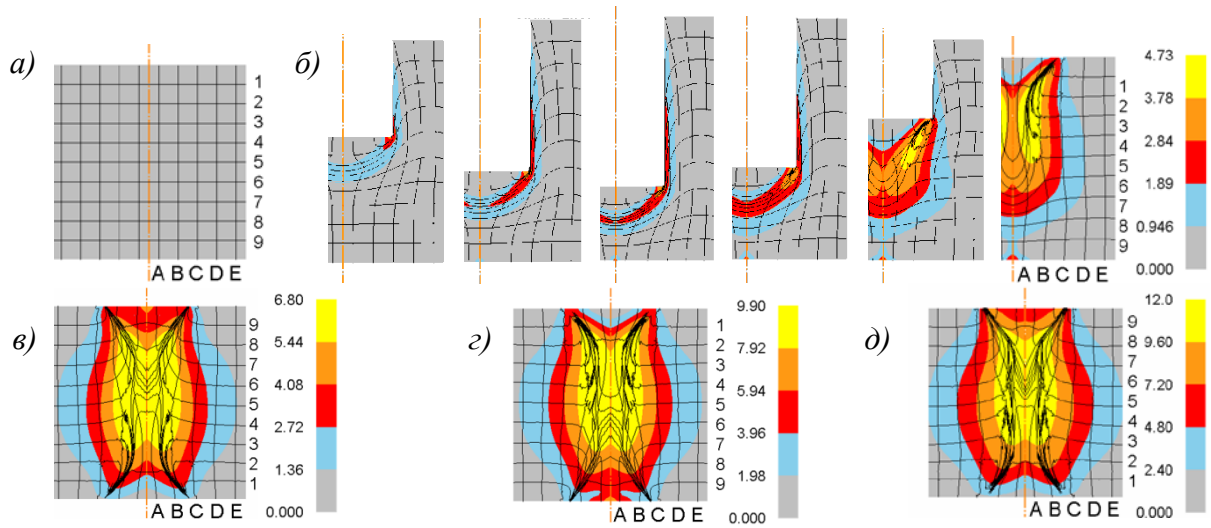


Рис. 1. Деформированное состояние заготовки обработке реверсивным выдавливанием: а – координатная сетка до деформации; б – поля интенсивности деформаций ε_{eff} по шагам первого цикла; г, д, е – поля ε_{eff} на последнем шаге соответственно второго, третьего и четвертого циклов

За развитием деформированного состояния материальных частиц металла следили по поведению средней главной деформации ε_2 (рис. 2). Данные для расчета считывали в узловых точках координатной сетки (A:E×1:9) (см. рис. 1, а).

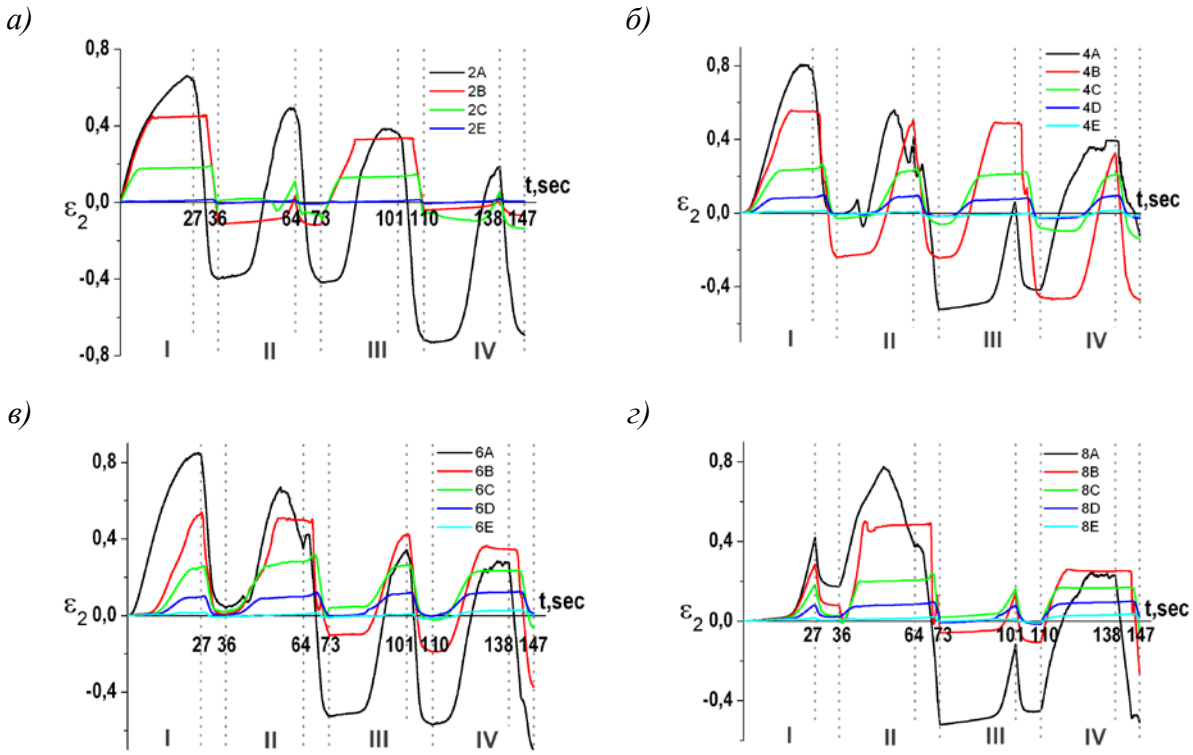


Рис. 2. Изменение расчетной деформации ε_2 при реверсивном выдавливании в точках линий: а – 2, б – 4, в – 6, г – 8; I, II, III, IV – циклы деформирования

Как видно из рисунка 2 на протяжении четырех циклов обработки слои центральной зоны заготовки подвергаются последовательному сжатию и растяжению, а периферийных областей – сжатию и сдвигу, что свидетельствует о немонотонном характере деформации. Этот факт может способствовать формированию равноосных ультрамелких зерен, а смена направления главных осей деформации за счет реверсирования и кантовки заготовки между циклами обработки положительно влияет на эффективность структурообразования [9].

Сохраняемая на всех этапах реверсивного выдавливания резко выраженная неравномерность деформации способствует образованию и развитию опасного (с точки зрения разрушения) сечения. Прерывание по этой причине процесса наиболее вероятно на этапах реверсирования из-за падения уровня гидростатического давления в зоне формирования пиковых деформаций (рис. 3). Это указывает на необходимость в условиях многократного деформирования контролировать уровень резерва пластичности, достаточный для проведения очередной операции без риска разрушения заготовки.

Для оценки степени исчерпания ресурса пластичности ψ из массива данных, рассчитанных для каждого текущего шага, по значениям суммарных деформаций и показателей напряженного состояния выделены области материала, принимаемые для исследования как потенциально опасные. Таковыми являются материальные частицы A6, A8, B2, B9 (см. рис.2а).

В решении данной задачи использовали современную феноменологическую теорию деформируемости [10], согласно которой интенсивность накопления

повреждений определяют историей деформирования, представленной траекториями движения материальных частиц в пространстве двух показателей напряженного состояния $\varepsilon_{eff}(\eta, \mu_\sigma)$, а предельное состояние материала задают объемной диаграммой пластичности, построенной в тех же координатах: $e_p(\eta, \mu_\sigma)$.

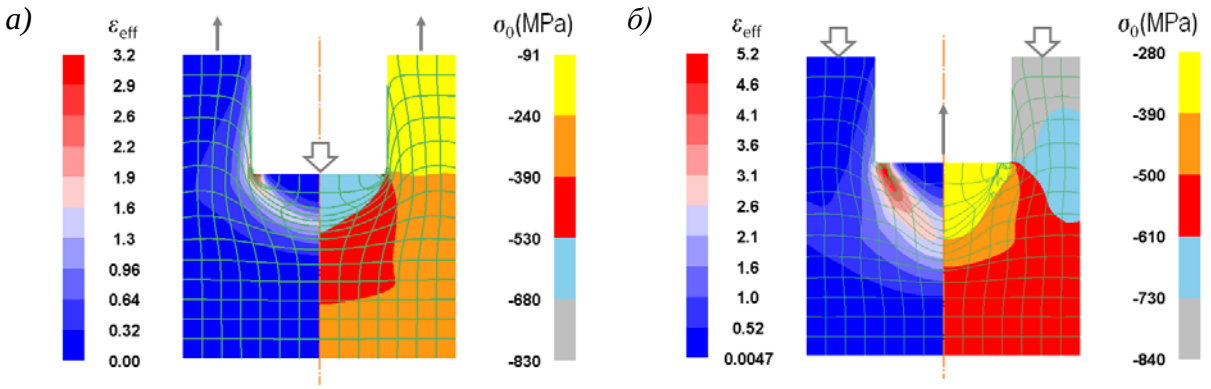


Рис. 3. Поля интенсивности деформаций ε_{eff} (слева) и гидростатических давлений σ_0 (справа) в стадии установившегося течения этапов выдавливания (а) и реверсирования (б) первого цикла обработки

Интенсивность накопленных деформаций в момент разрушения определяют, как предельную деформацию:

$$e_p = \int_0^{t_p} \dot{\varepsilon}_{eff}\, dt,$$

где $\dot{\varepsilon}_{eff}$ – интенсивность скоростей деформации, t_p – время деформирования до разрушения.

Исходя из того, что обработка материала реверсивным выдавливанием проходит в условиях сложного немонотонного нагружения [11]:, то значение использованного ресурса пластичности рассчитывали по критерию Г.Д. Деля [12]:

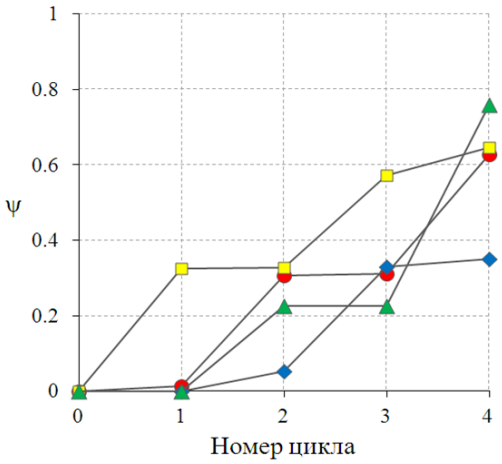


Рис. 4. Степень исчерпания ресурса пластичности в наиболее опасных точках: ○– А8, ◊ – А6, □ – В2, Δ – В9

$$\psi = \sqrt{\psi_{ij}\psi_{ij}}\,,$$

$$\psi_{ij} = \int_0^{\varepsilon_{eff}} F\left(\varepsilon_{eff}, \eta_k\right)\beta_{ij}\, d\varepsilon_{eff}$$

с уточненным видом функций характеристик материала $F(\varepsilon_{eff},\eta_k)$ и направляющего тензора приращения деформаций $\beta_{ij}(\varepsilon_{eff})$, выраженных через параметр Надаи-Лоде [13]. Итоговую величину степени использования запаса пластичности определяли суммированием этапных значений (рис. 4.).

Из результатов расчета видно, что при реверсивном выдавливании сохраняется достаточный запас пластичности, так как наибольшая величина использованного ресурса пластичности материала в точке В9 меньше величины допустимого предельного значения (Ψ=0,75<1).

Выводы: Сформированный в радиальном направлении градиент накопленной деформации, делает технологию реверсивного выдавливания перспективной для создания архитектурного материала с изменяющимися по радиусу заготовки свойствами. Выполненная оценка степени использования ресурса пластичности в наиболее опасных точках сечения показала, что материал, проходящий восемь этапов деформирования, характеризуется достаточным ее резервом.

Список литературы: 1. Ji Yun Kang, Jung Gi Kim, Hyo Wook Park, Hyoung Seop Kim, Multiscale architectured materials with composition and grain size gradients manufactured using highpressure torsion. www.nature.com/scientificreports, 2016. – P.1-10. **2.** Vu V.Q., Beygelzimer Y., Toth L.S., Fundenberger J.-J., Kulagin R., Chen C. The plastic flow machining: a new SPD process for producing metal sheets with gradient structures. Materials Characterization, 2018. – 138. – P.208-214**. 3.** Прокофьева О.В., Прилепо Д.В., Бокучава Г.Д., Исламов А.Х., Сапронов А.Н., Дорошкевич А.С. Формирование в металлах внутренней архитектуры с субмикро- и крупнокристаллическими компонентами методом винтовой экструзии. ФТВД, 2018. – Т.28. – №1. – Р.13-22. **4.** Wang Y.L., Molotnikov A., Diez M., Lapovok R., Kim H.-E., Wang J.T., Estrin Y. Gradient structure produced by three roll planetary milling: numerical simulation and micro-structural observations. Mater. Sci. Eng., 2015. - A639. – P.165-172. **5.** Пат.46999 Україна, МПК B 21 C 25/02. Спосіб зміцнення матеріалу і пристрій для його здійснення, С.Г. Синков, В.Н. Варюхін, В.Г.Синков, О.М. Сапронов, Я.Ю. Бейгельзімер; ДонФТИ НАН України – №2001053243; Заявл. 15.05.01; Опубл. 17.06.02, Бюл. №6. **6.** Haghdadi N., Zarei-Hanzaki A., Abedi H.R., Abou-Ras D., Kawasaki M., Zhilyaev A.P.. Evolution of microstructure and mechanical properties in a hypoeutectic Al–Si–Mg alloy processed by accumulative back extrusion. Materials Science&Engineering. 2016. – A. 651. – P.269-279. **7.** Грешнов В.М., Пятаева В.М. Физико-феноменологическая модель пластичности для решения задач обработки металлов давлением. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2008 – № 10 – С.13-20. **8.** Огородников В. А., Бабак Н. В., Сивак Е. И. Оценка безотказности и долговечности деталей машин на основе теории деформируемости. Захист металургійних машин від поломок: Міжвуз. темат. зб. наук. пр. Маріуполь, 2002. – №6. – с.56-60. **9.** Валиев Р.З., Александров И.В..Объемные наноструктурные металлические материалы. Получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398с. **10.** Огородников, В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением, Киев: Вища школа,1983. – 175с. **11.** Мирошниченко С. В. Деформируемость металла при реверсивном выдавливании. часть II. Анализ ресурса пластичности. сравнение двух конструктивных вариантов исполнения. ФТВД, 2021.– Т.27. – №3. – с.1-12. **12.** Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла. ФТВД, 1983. – № 11. – с.28-32. **13.** Сивак Р.И., Коцюбивская Е.И. Пластичность металлов при немонотонном нагружении. Наукові праці ВНТУ, 2011. – № 1. – с.1-6.

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ЗУБЬЕВ КПП ПРИ ИХ МОДИФИКАЦИИ И ФОРМООБРАЗОВАНИИ

Михайлов А.Н., Котляров Б.С., Котляров В.Б., Полякова Л.П.
(ДОННТУ, ВФ УГТУ, г. Донецк, г. Москва, г. Ялта, г. Воркута, ДНР, Россия)
Тел: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 70-45-362;
E-mail: tm@fimm.donntu.org ; boris.kotlyarov@mail.ru; velidarkotlarov@mail.ru

Abstract: *This paper presents the results of studies concerning the methods of forming the geometry of the modified teeth of the limited sections of the gear rims of the block-shaft of the gearbox wheels without breaking the flow of the transmitted power, and the formation of their surface properties. Methods of forming the barrel-shaped teeth with modification in the width and height of the teeth are presented. The zones of loading of the teeth and the direction of movement of the load along the side surfaces during the gear change are established. The zones of the lateral surfaces of the teeth with the difference in surface properties with restrictions on coordinates are established. Explanations are given on the choice of the best processing option for each part of the surface on the basis of recurrent iterative enumeration and approximation to the optimal processing technology option.*
Key words: *cogwheel, tooth, , area, treated surface area, technology, functionally oriented technological impact.*

Особенностью зубчатого зацепления в рассматриваемой КПП без разрыва потока передаваемой мощности является, в частности, то, что модификации зубьев блок-вала колес касаются не всего зубчатого венца, а только лишь его части. На каждом зубчатом венца каждого из колес блок-вала колес расположены участки венцов, ограниченные угловым сектором, каждый из которых включает минимум 3-4 зуба, а при больших числах зубьев колеса – существенно больше, а величины углов угловых секторов каждого колеса одного блок-вала колес незначительно отличаются друг от друга.

Участки зубчатых венцов блок-вала колес, находящихся в угловых секторах, предназначенных для осуществления переключения передач рассматриваемой КПП, по функциональному назначению отличаются от остальных зубьев этих же венцов. Это влечет за собой необходимость применения иных технологических способов достижения требуемых параметров, чем обработка остальных элементов блок-вала колес.

На эскизе блок-вала колес, представленном на рис. 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 – (вид в плане, вид сбоку и сечение вала) показаны угловые секторы указанных зубчатых венцов с ограниченными в координатном отражении секторами модифицированных зубьев.

Принципиально возможные способы модифицирования зубьев колес по геометрии – это резанием, пластическим деформированием и наращиванием материала. Для частично готовой детали, прошедшей первичные операции формообразования, в т. ч. нарезание зубчатого венца, необходимо выбрать такие операции, которые бы не затрагивали готовые геометрические формы других элементов детали. Возможные для осуществления операции механической обработки, при помощи которых обеспечивается формирование бочкообразных зубьев [1, 2] с дополнительной продольной модификацией по длине зубьев, при этом локализованных в ограниченном угловом секторе зубчатого венца, следующие:

- профильное фрезерование;

- вихревое точение в приспособлении;
- профильное строгание;
- алмазное точение;
- тонкое профильное зубошлифование;
- электроискровой, электроэрозионный способ обработки;
- лазерная гравировка и др.

Траектория контакта инструмента с заготовкой может обеспечиваться копиром или программным обеспечением на станках с ЧПУ. Обработка модифицированных бочкообразных зубьев в ограниченном секторе зубчатого венца с применением ППД имеет существенные ограничения. Однако с применением виброударного метода пластической деформации результат модификации зубьев может быть достигнут.

Способ дополнительного наращивания материала при модифицировании зубьев можно применять с учетом необходимости предварительной подготовки поверхности для соблюдения необходимых размеров элементов зубчатого колеса. Могут применяться следующие методы:

- газопламенной, плазменной наплавки;
- электролитического наращивания;
- в зависимости от применяемых материалов – катодное или анодное напыление;
- плазменное напыление;
- вакуумное напыление.

Указанные выше способы составляют множество [3] функционально-ориентированных технологических способов модифицирования бочкообразных зубьев колес. Это множество в себя включает все возможные методы преобразования формы детали и изменения ее размеров. Для конкретного предприятия некоторые из указанных способов невозможно технически реализовать, поэтому из полного множества их необходимо исключить, приняв к рассмотрению на основе рекуррентно-итеративного подхода так называемое установленное для данного предприятия множество ФОТ-воздействий.

Для пояснения всего процесса исследования по этапам подготовки и осуществления самого процесса модифицирования бочкообразных зубьев зубчатых венцов блок-вала колес КПП приведен пример зуба на рис. 1 а, б, в, г, д с изображением модификации боковых поверхностей.

На рисунках 1а и 1б показан общий вид бочкообразного зуба по его профилю, а также представление о перемещении точки приложения усилий по пятну контакта при зацеплении в процессе переключения передачи. При этом одна и та же боковая поверхность зуба углового сектора колеса в процессе осевого относительного смещения по отношению к ведущей шестерне зацепляется последовательно с тремя зубьями ведущей шестерни.

На рис. 1в условно показаны траектории перемещения точки приложения усилия, передаваемого в зоне пятна контакта зуба шестерни с зубом блок-вала колес в момент переключения передачи. Диагональное положение траектории определяется одновременным перемещением точки зацепления зубьев по высоте при одновременном осевом перемещении ведущей шестерни относительно блок-вала колес под воздействием приложенного внешнего усилия. При этом в процессе перемещения пятна контакта вдоль ширины зуба в зацепление вступают последовательно еще два зуба, пока не будет достигнуто полноценное зацепление зубчатых венцов в новом положении блок-вала. Оси вращения зубчатых венцов имеют новое межосевое расстояние и иное передаточное отношение.

На рис. 1г показаны величины бочкообразности в торцевых сечениях колеса и в центральном сечении зубчатого венца колеса блок-вала. Величины бочкообразности зубьев колес в различных сечениях отличаются.

На рис. 1д показано центральное сечение зуба с двумя слоями модифицирующего материала, образующего полный профиль бочкообразности.

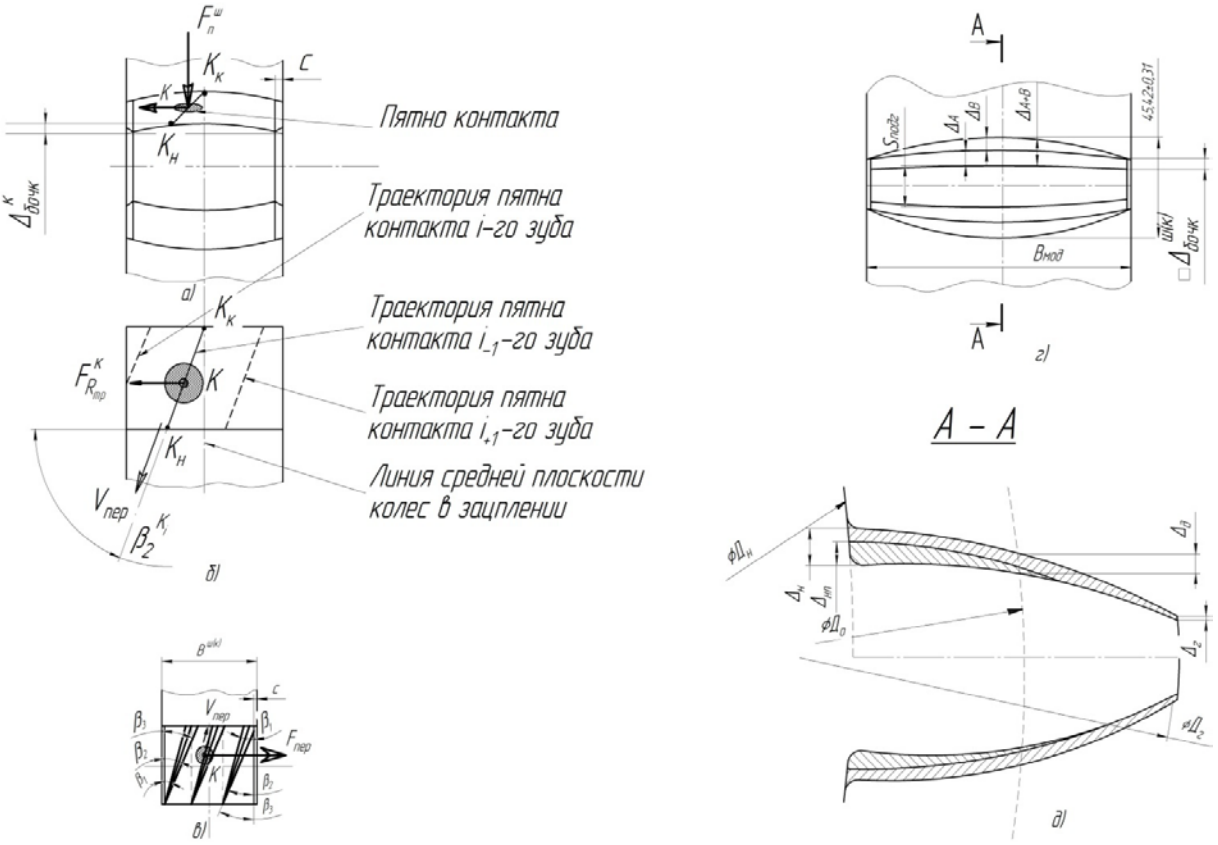


Рис. 1. Обработка с предварительным профилированием под напыление боковых поверхностей бочкообразных зубьев
а) общий вид бочкообразного зуба с точкой *К* приложения усилий; б) линии траекторий перемещения пятна контакта (точка К) при зацеплении с разными зубьями ведущей шестерни; в) различение направлений для пятна контакта для разных зубьев; г) разделение общего поля Δ_{A+B} модификации бочкообразности по ширине зуба; д) подготовленная поверхность боковой поверхности под напыление по высоте бочкообразного зуба

Схема образования бочкообразности с условным отражением относительных движений поверхностей заготовки и инструмента при формировании бочкообразного зуба с переменными величинами приведена на рис. 2. Указанная на схеме система координат зуба и система координат детали позволяет однозначно определять локализацию каждой точки бочкообразного профиля в общей системе координат детали. Траектория перемещения точки контакта по боковой поверхности зуба может быть использована для определения зоны дополнительного нанесения материала для упрочнения поверхности и повышения характеристик структуры материала на заданной глубине в строго ограниченных зонах. Ширина зоны повышения характеристик вдоль направления относительного перемещения (траектории) пятна контакта определяется диаметром самого пятна контакта. Направление траектории

определяется скоростями относительного перемещения по высоте зуба и в осевом направлении – углы β_i на рис. 1в, где β_i является обобщенным углом, отражающим характер зацепления зубьев шестерни по контактам зубьев шестерни с зубьями зубчатых венцов, начинающимся в разных зонах вершин зубьев блок-вала колес. В таком случае можно уравнение траектории перемещения пятна контакта по боковой поверхности зуба формально записать в виде:

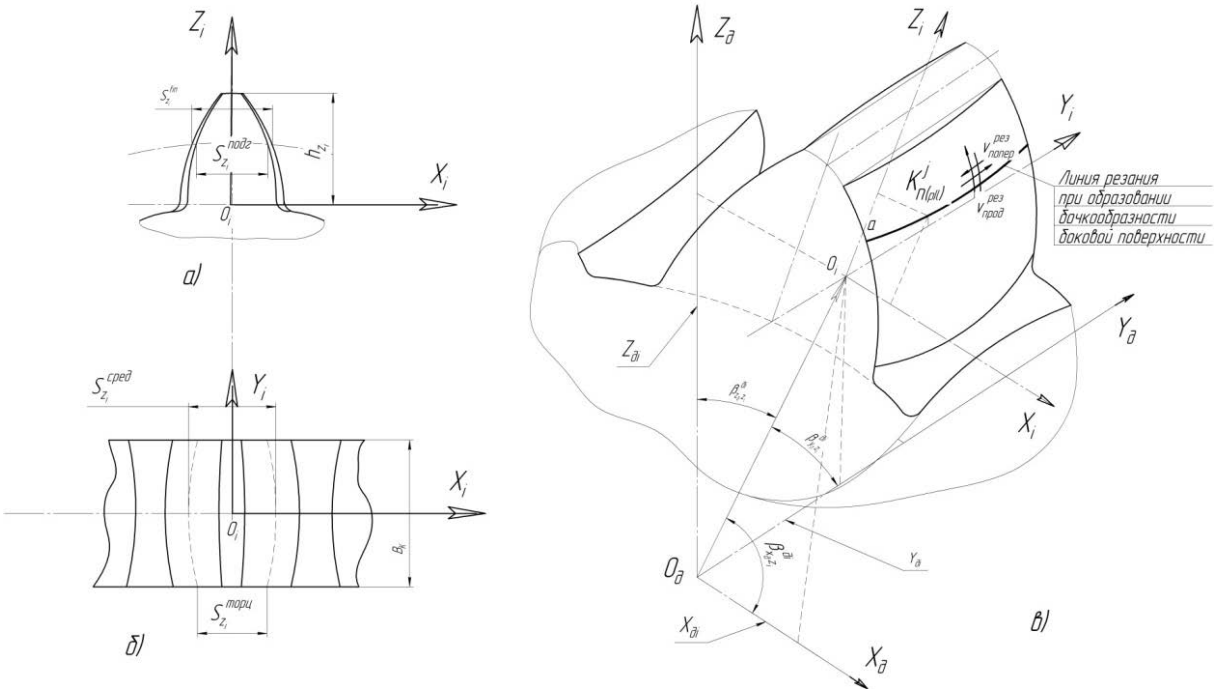


Рис. 2. Формирование бочкообразности с модификацией по ширине и по высоте зуба

$$Z_K^{L_j} = X_K^{L_j}\left[F_g(V_{попер} \cap V_{прод})\right] \cap Y_K^{L_j}\left[F_q(V_{попер} \cap V_{прод})\right], \qquad (1)$$

где $Z_K^{L_j}$, $X_K^{L_j}$, $Y_K^{L_j}$ - значения координат точек траектории L_j –ой линии боковой поверхности зуба, а $V_{попер}$ и $V_{прод}$ – составляющие общего вектора $V_{\sum}$ относительного движения точек сопрягаемых боковых поверхностей зубьев шестерни и колеса. Это выражение (1) может стать основой для вычисления конкретных значений при расчете координат зон послойного напыления боковых поверхностей зубьев, а также для расчета толщины слоев напыления. Выражение (1) может быть использовано и при предварительном формировании профиля под напыление, который образуется методом резания на станочном оборудовании. При этом вычисляется величина бочкообразности Δ_T в торцевых сечениях в поперечном сечении на любой высоте зуба, а также величину Δ_S – в плоскости среднего сечения зубчатого венца, и также на любой высоте зуба. Формирование впадин зубчатых венцов конкретно в настоящей работе мы не рассматриваем, однако следует отметить, что принципиальный подход не отличается от общепринятого порядка при нарезании зубчатых колес. Важно иметь в виду, что при формообразовании бочкообразности зубьев на различных зубчатых венцах одного и того же блок-вала колес параметры модификации будут различными. Зубья всех зубчатых венцов образованы с одинаковым модулем для одного блок-вала колес,

однако числа зубьев отличаются. Как следствие – различаются скорости относительных движений точек контакта, принадлежащих боковым поверхностям зубьев, в их относительном движении.

Таким образом, благодаря проведенным исследованиям установлены параметры модификации зубьев в виде бочкообразности, позволяющие формировать структурные схемы технологических воздействий с учетом направлений и скоростей относительных движений при нарезании предварительных профилей зубьев. Формообразование предварительных профилей зависит от принятого в дальнейшем способа финишной обработки боковых поверхностей зубьев блок-вала колес, позволяющего достичь установленных показателей величины бочкообразности в различных сечениях зубчатых венцов для разных колес одного блок-вала колес. При этом учитываются координатные ограничения для участков и зон боковой поверхности модифицируемого зуба, определяющие границы отдельных зон для нанесения многослойных покрытий, в частности при многослойном напылении твердых материалов. На одной боковой поверхности зуба могут быть выделены несколько функционально-ориентированных зон, в связи с чем могут формироваться функционально-ориентированные технологические воздействия различной направленности. Выбор наилучшей технологии из установленного множества ФОТ-воздействий на основе рекуррентно-итеративного подхода рассмотрен в ранее представленных материалах[4, 5]. Результатом является выбор ФОТ-воздействия, которое наилучшим образом отвечает установленным на конкретном предприятии требованиям. Эти требования могут включать кроме технических характеристик иные производственные аспекты, относящиеся к экономическим, управленческим, информационным, экологическим, эргономическим и иным сферам.

Список литературы: 1. Котляров Б.С. Автореферат диссертации – Основы структурного синтеза модификаций зубьев цилиндрических колес и схем многоинструментальных роторных машин для их формообразования, Харьков, 1989. 2. Технология машиностроения, в 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения. Бурцев В.М., Васильев А.С., Дальский А.М. и др. под ред. Дальского А.М.// Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 3 .Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. Донецк, ДонНТУ, 2009. -346с. 4. Михайлов А.Н., Котляров Б.С., Котляров В.Б., Котляров С.Б. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий.//Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов - Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 3 (70). С. 22-33. 5. Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б.: Синтез модели функционально-ориентированной технологической системы создания КПП без разрыва потока передаваемой мощности. Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 3 (71). С.35-43.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ И ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОЛЕЗНОСТИ (КАЧЕСТВА)

Михайлов А.Н., Матвиенко С.А, Лукичев А.В., Стрельник Ю.Н., Литвинов М.И.
(ДонНТУ, ДТЭК, г. Донецк, ДНР)
Тел. +38 (071) 3678009; E-mail: serge-matvienko@yandex.ru

Abstract. *The article establishes the relationship between the utility of a part and technological influences and its structural elements. The relationship between the direction of technological influences and the optimal durability of the part is established. The proposed method for evaluating the significance of product quality parameters from the point of view of utility contains three stages: determining the utility of the product, building a hierarchical structure of the quality of the surface layer of the product, calculating the priorities of product parameters by the method of preferences.*
Keywords*: utility, quality, durability, quality structure, priority parameters, preference method.*

В соответствии с современными тенденциями развития машиностроения возрастает роль потребителей и их требований в определении технического уровня и качества деталей машин. Качество детали машиностроения, это совокупность свойств, обусловливающих её пригодность выполнять функции в соответствии с её служебным (целевым) назначением. При проектировании изделий машиностроения необходимо учитывать структуру их потребительских свойств (полезности), их связь с другими свойствами качества изделий и структуру оценки полезности. Мерой полезности является качество детали. Таким образом, полезность детали находится в непосредственной зависимости от технологии её изготовления (рис. 1). Следовательно, при синтезе и выборе технологических воздействий необходимо знать значимость (весомость) показателей качества с точки зрения полезности.

Можно выделить следующие уровня качества детали: соответствие техническим условиям (качество исполнения); соответствие эксплуатационным требованиям (функциональное качество); соответствие требованиям потребителя по качеству и цене (полезность).

Рис. 1. Структура процесса обеспечения потребительской полезности детали

Каждый показатель качества детали отражает её способность удовлетворять потребительским потребностям. Таким образом, при формировании любого показателя качества необходимо учитывать его значимость для потребителя.

В настоящее время при синтезе технологических процессов изготовления деталей стремятся к достижению оптимальной долговечности, соответствующей минимальной себестоимости .

Эксплуатационные свойства (ЭС) деталей машиностроения определяется их качеством и непосредственно качеством рабочего поверхностного слоя (ПС). Качество ПС оказывает влияние на все эксплуатационные свойства деталей машин: износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и т.д. Параметры качества ПС формируются комплексом технологических воздействий на рабочий ПС на всех операциях технологического процесса обработки.

С точки зрения ЭС деталей, понятие качества модифицированного ПС включает совокупность показателей надежности, прочности, технологичности, эстетичности, характеристик эргономики и экологии и др. Номенклатура эксплуатационных свойств и число показателей качества деталей определяются в зависимости от функциональных требований, предъявляемых к деталям рассматриваемой группы применительно к конкретным условиям эксплуатации.

С точки зрения потребительской полезности для деталей соединений наиболее важным показателем является оптимальная долговечность при наименьшей себестоимости. Целенаправленное формирование качества ПС имеет доминирующее значение для обеспечения оптимальной долговечности деталей. Достижение необходимой полезности решается конструкторскими и технологическими методами или их комбинацией. Особенно перспективными и необходимыми для обеспечения, требуемого на сегодняшний момент уровня качества изделий являются функционально-ориентированные комбинированные технологии, разрабатываемые с учетом функционального назначения рабочих поверхностей деталей машин.

Долговечность проектируемых деталей ($T_д$) должна быть оптимальной. Оптимальная долговечность ($T_{опт.д.}$) это период времени, в течение которого на нее приходятся минимальные совокупные годовые затраты [5]:

$$\frac{\sum_{i=1}^{T_{опт}} C_{з.д.i}}{T_{опт}} \to \min, \qquad (1)$$

где $C_{з.д.i}$ – совокупные затраты, приходящиеся на деталь в i-м году эксплуатации изделия; $T_{опт}$ – оптимальная долговечность детали.

Так как ресурс деталей напрямую зависит от состояния рабочего ПС, то можно сказать что $T_{опт.д.}=T_{опт.ПС.}$ ПС состоит из определённого множества функционально-ориентированных зон. Ресурс различных зон отличается. При сравнении оптимальных ресурсов ПС и детали в целом возможны разные варианты.

При этом повышение долговечности не всегда будет связано с повышением стоимости. Это возможно за счет применения комбинированных технологических воздействий и обеспечения максимального эффекта.

Предлагаемая методика оценки значимости параметров качества изделий с точки зрения полезности содержит три этапа:1. Определение полезности детали; 2. Построение иерархии структуры качества ПС детали; 3. Вычисление приоритетов параметров детали и оценка согласованности суждений.

Под структурой качества ПС понимают систему взаимосвязей между параметрами конструктивных элементов ПС и используемых для их формирования технологических операций с показателями качества, которая определяет итоговое (интегральное) качество ПС.

В основу квалиметрического подхода к исследованию качества положен принцип рассмотрения качества ПС как некоторой иерархической совокупности потребительских свойств детали.

Предлагается рассматривать структуру качества ПС в виде иерархии. В этом случае интегральное качество ПС декомпозируют на группы показателей качества, а их, свою очередь, – на конкретные показатели. Далее каждый показатель качества декомпозируют на обеспечивающие его параметры конструктивных элементов ПС, а их – на формирующие технологические операции. Технологические операции могут быть при необходимости разделены на конкретные параметры технологических операций.

Иерархия структуры качества выглядит следующим образом:

1. Вершиной иерархии является итоговое (интегральное) качество рассматриваемого ПС;

2. На первом уровне рассматриваются группы показателей качества, сформированные по типу свойства полезности детали, которое они характеризуют (примерами таких групп могут быть: функциональные показатели, показатели надежности и т.п.);

3. На втором уровне рассматриваются конкретные показатели качества детали (долговечности, себестоимость и т.д.);

4.На третьем уровне рассматриваются конструктивные элементы ПС (граф поверхности);

5. На четвертом уровне рассматриваются технологические операции непосредственно обеспечивающие какие-либо показатели качества;

6. На пятом уровне рассматриваются технологические операции формирующие конструктивные элементы ПС.

7. На шестом уровне располагают параметры технологических операций.

Под приоритетом группы показателей качества понимают её весомость (значимость) для потребителя относительно других групп. Под приоритетом показателя качества понимают его весомость по сравнению с другими показателями в рассматриваемой группе.

Алгоритм метода предпочтений содержит следующие этапы [6].

1. Составляется исходная матрица предпочтений. Для этого каждый из m экспертов выполняет ранжирование n альтернатив по предпочтению, используя числа натурального ряда. Наиболее важному параметру присваивается оценка (ранг) 1, менее важному – 2 и т.д. Матрица имеет размер $m \times n$, и каждая экспертная оценка принимает значения $1 \le a_{ij} \le n, (i = \overline{1,m};\ j = \overline{1,n})$

2. Составляется модифицированная матрица предпочтений с оценками:

$$B_{ij} = n - a_{ij} \tag{2}$$

3. Находятся суммы преобразованных оценок по каждой из альтернатив:

$$C_j = \sum_{i=1}^{m} B_{ij} \tag{3}$$

4. Находится сумма всех оценок:

$$C_j = \sum_{j=1}^{n} C_{ij} \qquad (4)$$

5. Искомые веса альтернатив $\omega_j = C_j / C$. При этом $\sum \omega_j = 1$.

Рассмотрим шарнирное соединение – наконечник рулевой тяги. Для шарового пальца приемлемы следующие альтернативы: функциональные требования (А1), долговечность (А2), показатели технологичности (А3), себестоимость (А4) (табл. 1).

Чем больше весомость альтернативы, тем более предпочтительной, по мнению экспертов она является. Таким образом, получена следующая ранжировка альтернатив: А1, А2, А4, А3 (табл. 2). Следовательно, при разработке технологического процесса изготовления шарового пальца необходимо обеспечить оптимальную долговечность, даже если при этом повысится себестоимость детали.

Таблица 1 – Исходная матрица предпочтений показателей качества шарового пальца

Эксперты	Альтернативы (факторы)			
	А1	А2	А3	А4
Э1	1	2	4	3
Э2	2	3	4	1
Э3	1	2	3	4
Э4	1	2	4	3
Э5	1	2	4	3

Таблица 2 – Модифицирования матрица предпочтений показателей качества шарового пальца

Эксперты	Альтернативы (факторы)			
	А1	А2	А3	А4
Э1	3	2	0	1
Э2	2	1	0	3
Э3	3	2	1	0
Э4	3	2	0	1
Э5	3	2	0	1

$$C_1 = 14; C_2 = 9; C_3 = 1; C_4 = 6.$$

$$C = 14 + 9 + 1 + 6 = 30.$$

$$\omega_1 = \frac{14}{30} = 0{,}47; \omega_2 = \frac{9}{30}; \omega_3 = \frac{1}{30}; \omega_4 = \frac{6}{30} = 0{,}2.$$

Проверка согласованности экспертных оценок проводится для определения отсутствия резких различий в суждениях экспертов. Если мнения экспертов резко различаются, то выявляют причины и уточняют некоторые оценки.

В случае определения согласованности между ранжировками большого (более двух) числа экспертов рассчитывается коэффициент конкордации W (коэффициент Кендалла) – общий коэффициент ранговой корреляции для группы, состоящей из *m* экспертов:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (5)$$

где S – квадрат отклонения, вычисляемый по формуле

$$S = \sum_{i=1}^{n}\left(S_j - \frac{m \cdot (n-1)}{2}\right)^2, \quad (6)$$

где S_j – суммы оценок (рангов), указанных экспертами для каждой из альтернатив:

$$S_j = \sum_{i=1}^{m} a_{ij}, \quad (7)$$

Если W больше 0,5, то согласованность считается достаточной.

Таким образом, имеется ряд значимости показателей качества детали. Соответственно при синтезе технологического процесса изготовления детали обеспечиваются непосредственно показатели назначения, надежности и экономичности. Сначала обеспечиваются эксплуатационные требования, а потом с ними согласовываются технические и экономические характеристики детали.

С точки зрения потребительской полезности для деталей соединений наиболее важным показателем является оптимальная долговечность при наименьшей себестоимости. Так как ресурс деталей напрямую зависит от состояния рабочего ПС, то можно сказать что $T_{опт.д.} = T_{опт.ПС.}$ Предлагаемая методика позволяет определить значимость параметров качества ПС с точки зрения полезности. Данная оценка используется при синтезе процессов модифицирования ПС.

Список литературы: 1. Сафонов, С.В. Методология отработки технологичности при запуске в производство наукоемких изделий авиакосмической техники / С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2019. - № 7. - С. 30-34. **2.** Крицкий, Д.Н. Метод расчета обобщенного показателя привлекательности проектов создания беспилотной авиационной техники гражданского применения / Д.Н. Крицкий / Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. - № 3(16). - С. 21-25. **3.** Михайловский, И.А. Разработка методики оценки значимости параметров продукции и технологических операций её производства с точки зрения влияния на качество / И.А. Михайловский, Е.И. Гун // Век качества. – 2014. - № 3. - С. 28-33. **4.** Суслов, А.Г. Конструкторско-технологическое обеспечение качества и конкурентоспособности изделий машиностроения / А.Г. Суслов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2017. - № 7. - С. 25-28. **5.** Говоров, И.В. Организационно-технологическое обеспечение оптимальной долговечности деталей машин : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08, 05.02.22 / Говоров Игорь Витальевич ; БГТУ. - Брянск, 2009. - 326 с. **6.** Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. -М. : Машиностроение, 2000. – 320 с. **7.** Короходкина, К. Г. Качество поверхностного слоя детали / К.Г. Короходкина // Молодой ученый. - 2019. - №51. - С. 239-241. - URL https://moluch.ru/archive/289/65387/ (дата обращения: 24.03.2020).
8. Kheifetz ML.Technological Control of the Heredity of Operational Quality Parameters for Machine Parts / ML. Kheifetz, A.S. Vasilyev, S.A. Klimenko // Advanced Materials & Technologies. -2019.- №2. – С.008-018.

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА МНОГОСВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТИНУУМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Михайлов Д. А., Филиппова О. В., Михайлов А. Н., Шейко Е. А.
(ДАГЗ, УФУГТУ, ДонНТУ, ДГТУ, г. Донецк, г. Усинск, г. Ростов-на-Дону, ДНР, Россия)
Тел.: +38 071 3821135, E-mail: mitia3@donapex.net

Abstract: *In the presented article, the features of the synthesis of a coherent technological continuum of providing functionally oriented properties to the structure of a gas turbine engine are considered. A diagram of connections between the components of the system for the formation of functionally oriented properties of the structural elements of a gas turbine engine has been developed. The main conditions for ensuring the operational properties of the structural elements of a gas turbine engine based on the provision of functionally oriented properties are presented. The principles of the formation of functionally oriented properties in the structure of a gas turbine engine based on a connected technological continuum are presented.*

Key words: *functionally oriented properties, coherent technological continuum, principles, gas turbine engine.*

Введение

В настоящее время одним из эффективных источников движения современных самолетов и вертолетов являются газотурбинные двигатели (ГТД) [1, 2, 3]. Широкое применение в авиации ГТД обусловлено повышенными технико-экономическими параметрами и нетрадиционными эксплуатационными свойствами. Вместе с тем ГТД представляет собой сложную систему, состоящую из множества деталей, групп деталей и подсистем, которые испытывают в процессе работы неравномерные эксплуатационные функции. Это приводит к возникновению неравномерных и не одинаковых износов и разрушений элементов структуры ГТД. Например, лопатки компрессора, турбины и свободной турбины имеют неравномерные и не одинаковые износы поверхностей пера. Для рабочих лопаток компрессора максимальный износ пера возникает на элементах входной кромки, который далее распространяется по поверхности его корыта с выходом на периферийную и заднюю кромку. А также не одинаково изнашиваются группы лопаток компрессора относительно друг друга и относительно лопаток турбины, и так далее. Можно приводить и другие примеры неравномерного и не одинакового износа элементов ГТД. Все это снижает эксплуатационные свойства, технико-экономические показатели ГТД и ограничивает их возможности.

Проведенные исследования, приведенные в работе [4], позволили установить, что структуру ГТД можно представить гипотетически несколькими уровнями, а именно *R*-уровнями. Причем на каждом из этих уровней на структуры действуют свои неравномерности эксплуатационных воздействий, которые приводят к возникновению *R*-родов износа элементов структуры ГТД.

Одним из возможных направлений повышения технико-экономических показателей и эксплуатационных свойств ГТД в условиях действия неравномерностей *R*-родов износа элементов структуры является обеспечение его иерархической структуре функционально-ориентированных свойств (ФОС) [5, 6]. При этом в этих работах отмечено, что обеспечение ФОС необходимо выполнять в соответствии с принципами функционально-ориентированного подхода [5] по *R*-уровням иерархической структуры ГТД. Это позволяет решать следующие вопросы: обеспечивается возможность существенного повышения эксплуатационных свойств ГТД; повышается эксплуатационный потенциал всех элементов структуры ГТД; обеспечивается равные или кратные или

функционально-зависимые эксплуатационные свойства всех элементов структуры ГТД; повышается ремонтопригодность и восстанавливаемость всех элементов структуры ГТД; повышаются технико-экономические показатели ГТД.

Для формирования ФОС структурным элементам ГТД необходим комплексный связный технологический процесс [7, 8, 9, 10], который позволяет обеспечивать эти свойства по иерархической структуре ГТД. Так как ГТД состоит из множества элементов, процесс реализации ФОС является очень сложным, особенно с учетом иерархической структуры ГТД и неравномерностей действия эксплуатационных функций, то данный процесс можно отнести к технологическому континууму формирования ФОС. При этом с учетом равенства, кратности или функциональной зависимости в обеспечения эксплуатационных свойств структуры ГТД их можно реализовать только при наличии связей между множествами технологическими процессами обеспечения ФОС деталям ГТД.

Целью данной работы является разработка технологического обеспечения для формирования ФОС элементам структуры ГТД на основе связного технологического континуума.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи данной работы: выполнить анализ особенностей эксплуатации ГТД; представить общую схему формирования ФОС структурных элементов ГТД; привести основные условия обеспечения эксплуатационных свойств структурных элементов ГТД на основе обеспечения ФОС; представить принципы формирования ФОС по структуре ГТД на базе связного технологического континуума.

1. Структурно-функциональные особенности ГТД

Можно отметить, что ГТД представляет собой сложную систему, которая имеет заданную структуру (рис. 1). Структуру ГТД можно представить следующим выражением:

$$Str = Str\{X, A\},$$

Str - структура элементов ГТД;

X – множество структурных элементов ГТД;

A – множество связей (отношений) на множестве структурных элементов X.

Здесь:

$$X = \{X_1, X_2, ..., X_i, ..., X_n\};$$

$$A = \{A_1, A_2, ..., A_j, ..., A_m\},$$

где X_i – i-й структурный элемент множества X;

A_i – j-е отношение (связь) между структурными элементами X на множестве A;

n – мощность множества X;

m – мощность множества A.

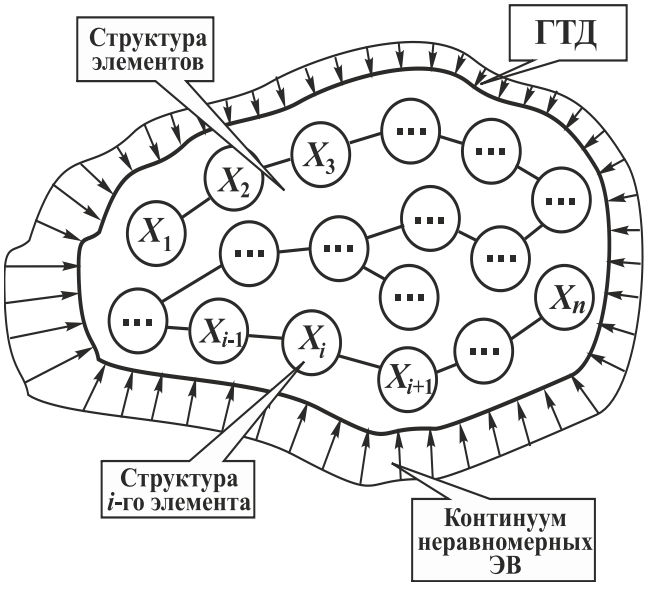


Рис. 1. Гипотетическая схема структуры ГТД и действия неравномерных эксплуатационных функций

На рис. 1 представлена гипотетическая схема структуры ГТД и действия неравномерных эксплуатационных функций. Здесь показаны структурные элементы ГТД, связи и континуум неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ).

Учитывая особенности структурирования элементов ГТД, представленные в работах [6, 7], иерархическая структура ГТД имеет следующие составляющие:

- структура 1-го уровня;
- структура 2-го уровня;
- структура 3-го уровня;
- ……..;
- структура *r*-го уровня;
- ……..;
- структура *R*-го уровня.

При эксплуатации ГТД на его иерархическую структуру действуют неравномерные эксплуатационные воздействия (ЭВ) *R* родов, которые приводят к неравномерному износу и разрушению элементов структуры. Поэтому в соответствии со структурой ГТД иерархическая структура износа его элементов будет иметь следующие составляющие [10]:

- неравномерный износ 1-го рода;
- неравномерный износ 2-го рода;
- неравномерный износ 3-го рода;
- ……..;
- неравномерный износ *r*-го рода;
- ……..;
- неравномерный износ *R*-го рода.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что ГТД состоит из множества деталей и элементов, которое можно характеризовать иерархической структурой *R* уровней. При этом в процессе эксплуатации ГТД на его структуру действуют неравномерные эксплуатационные воздействия, которые приводят к возникновению неравномерных износов и разрушений *R* родов. Для повышения технико-экономических показателей ГТД, работающего в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, необходимы специальные свойства его структурных элементов, которые бы позволяли компенсировать действие неравномерностей *R* родов и обеспечить нетрадиционные свойства авиационного двигателя. Это выполняется в данной работе на базе реализации ФОС структурных элементов ГТД [5, 6, 10].

2. ФОС структуры ГТД

ФОС структуры ГТД это специальные технические (физико-механические, геометрические) свойства его элементов, которые реализуются на базе группы особых принципов ориентации заданных, требуемых или предельных свойств [5] в соответствии с особенностями (неравномерностями *R* родов) действия эксплуатационных воздействий, предназначенные для компенсации действия этих неравномерностей при эксплуатации и обеспечения одинаковых, равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств (надежность, долговечность, ресурс, ремонтопригодность, восстанавливаемость и другие параметры) всех элементов иерархической структуры ГТД. Можно отметить, что обеспечение ФОС структуре ГТД позволяет решать вопросы создания нетрадиционных его свойств, а именно:

- повышаются эксплуатационные свойства ГТД;
- обеспечивается возможность полностью вырабатывать эксплуатационный потенциал всех деталей ГТД за счет выполнения одинакового, равного, кратного или функционально-зависимых эксплуатационных свойств его элементов;
- обеспечивается возможность управления эксплуатационными свойствами ГТД за счет реализации заданного, требуемого или предельного эксплуатационного потенциала ГТД;

- повышается ремонтопригодность и восстанавливаемость структурных элементов ГТД;

- повышаются технико-экономические показатели эксплуатации ГТД.

На рис. 2 представлена системная модель обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных и технических свойств структуре ГТД (выход W) на бузе ФОС (вход V) в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий ($ЭВ \neq const$). Здесь показано, что в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий на структурные элементы ГТД за счет ФОС можно обеспечивать на выходе из системы необходимые эксплуатационные и технические свойства ГТД, а именно перечисленные выше и представляемые множеством выходов $W = \{W_1, W_2, W_3, ..., W_z\}$.

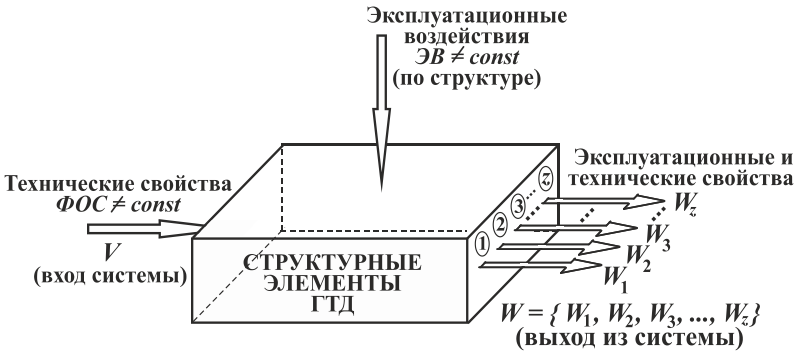


Рис. 2. Системная модель обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных и технических свойств структуре ГТД (выход W) на бузе ФОС (вход V) в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий ($ЭВ \neq const$)

Можно отметить, что ФОС иерархической структуры ГТД обеспечиваются R уровням и имеют следующий состав:

- ФОС 1-го уровня;
- ФОС 2-го уровня;
- ФОС 3-го уровня;
- ……..;
- ФОС r-го уровня;
- ……..;
- ФОС R-го уровня.

На рис. 3 представлена схема связей между составляющими системы формирования ФОС структурных элементов ГТД. Здесь, показаны следующие составляющие: 1 – эксплуатационные функции (свойства) F; 2 - технические (физико-механические) свойства C, в том числе ФОС; 3 - производственные (технологические) свойства T; 4 – структурные элементы системы ГТД. Буквами φ_i^j, χ_i^j, γ_i^j, ξ_i^j, λ_i^j - обозначены прямые и φ_j^i, χ_j^i, γ_j^i, ξ_j^i, λ_j^i - обратные связи между соответствующими составляющими схемы рис. 3.

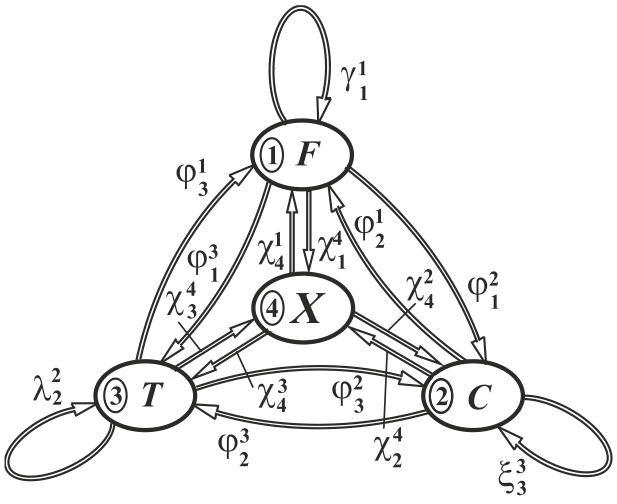


Рис. 3. Схема связей между составляющими системы формирования ФОС структурных элементов ГТД

Можно отметить, что кроме приведенных принципов формирования изменяющихся свойств в условиях действия неодинаковых и не равномерных эксплуатационных функций (износ, разрушения), представленных в работе [5], процесс обеспечения ФОС следует выполнять на базе следующих дополнительных принципов:

1. Обеспечения равных, кратных или функционально зависимых эксплуатационных свойств (надежность, долговечность, ресурс и другие единичные эксплуатационные свойства) по всем элементам каждого уровня структуры ГТД.

2. Обеспечения равных, кратных или функционально зависимых эксплуатационных свойств (надежность, долговечность, ресурс и другие единичные эксплуатационные свойства) по всем уровням иерархической структуры ГТД.

3. Последовательного распределения изменяющихся ФОС (технические свойства – физико-механические свойства) по всем элементам каждого уровня структуры ГТД, с началом от элемента, на котором действует максимальная интенсивность его износа или разрушения, затем по другим элементам в зависимости от степени уменьшения действия параметров эксплуатационных воздействий.

4. Последовательного распределения изменяющихся ФОС (технические свойства – физико-механические свойства) по всем уровням структуры ГТД, с началом от уровня, на котором действует максимальная интенсивность износа или разрушения элементов, затем по другим уровням в зависимости от степени уменьшения действия параметров эксплуатационных воздействий.

3. Синтез многосвязного технологического континуума обеспечения ФОС структуры ГТД

Для обеспечения ФОС иерархической структуре множества элементов ГТД по всем R уровням необходимо множество технологических процессов, которые также должны быть структурированы по R уровням:

- технологические процессы для обеспечения ФОС 1-го уровня;
- технологические процессы для обеспечения ФОС 2-го уровня;
- технологические процессы для обеспечения ФОС 3-го уровня;
- ……..;
- технологические процессы для обеспечения ФОС r-го уровня;
- ……..;
- технологические процессы для обеспечения ФОС R-го уровня.

При этом эти технологические процессы должны иметь связи, как на каждом r-м уровне, так и между уровнями комплексного многосвязного технологического обеспечения ФОС [7, 8, 9].

На рис. 4 представлена гипотетическая схема многосвязного технологического континуума обеспечения ФОС структурных элементов ГТД и схема связей его соседних элементов. Здесь показаны: T_i, T_{i+1} или T_{i-1}, – i-я, (i+1)-я или (i-1)-я операция (технологический процесс) для обеспечения ФОС i-го, (i+1)-го или (i-1)-го структурного элемента ГТД; λ_i^j - связь между i-м и j-м элементами; λ^i_j - связь между j-м и i-м элементами; n – мощность множества T на каждом уровне обеспечения технологических воздействий по структуре ГТД.

Можно отметить, что процесс формирования ФОС структурных элементов на каждом уровне технологического процесса имеет определенные особенности [10].

Технологические особенности обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных свойств (надежность, долговечность, ресурс, стойкость и тому подобные критерии) множества структурных элементов ГТД с ФОС (изменяющиеся во времени и/или в пространстве геометрические и/или физико-механические свойства), работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий R-родов, заключаются в том, что формирование равных, кратных или функционально-зависимых параметров ФОС на подмножествах элементов 1, 2, 3, …, i_r, …, n_r каждого уровня r на множестве уровней 1, 2, 3, …, r, …, R структуры, выполняется в зависимости от их эксплуатационных свойств, а именно, последовательно обеспечиваются по

структурным элементам каждого уровня, начиная, сначала с элемента и уровня, на которых происходит максимальный износ и/или разрушение при эксплуатационных воздействиях, затем, по другим элементам данного уровня, в зависимости от изменения параметров эксплуатационных воздействий и физико-механических свойств первого элемента, далее, аналогично выполняется обеспечение свойств элементов по другим уровням. В этом случае ФОС формируются на базе следующих выражений:

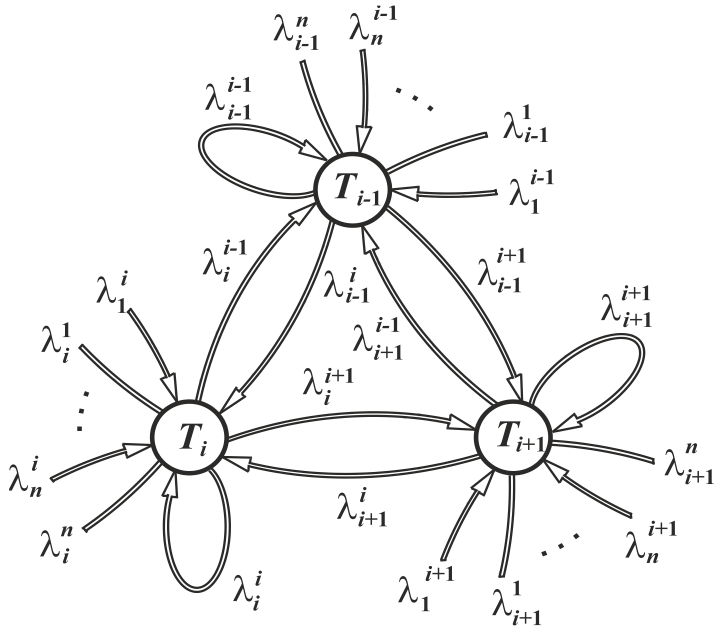


Рис. 4. Многосвязный технологический континуум для обеспечения ФОС структурных элементов ГТД и схема связей его соседних элементов

$$\left.\begin{aligned} C_1^r &= f_1(F_1^r = F_{\max});\\ C_2^r &= f_2(C_1^r,\ F_2^r);\\ C_3^r &= f_3(C_1^r,\ F_3^r);\\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots;\\ C_i^r &= f_i(C_1^r,\ F_i^r);\\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots;\\ C_n^r &= f_n(C_1^r,\ F_n^r), \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $C_1^r, C_2^r, C_3^r, ..., C_i^r, ..., C_n^r$ - множество физико-механических свойств соответствующего элемента структуры ГТД на уровне r;

$F_1^r, F_2^r, F_3^r, ..., F_i^r, ..., F_n^r$ - множество эксплуатационных функций действующих на соответствующий элемент структуры ГТД на уровне r;

$C_i^r = f_i(C_1^r,\ F_i^r)$ - функциональная зависимость физико-механических свойств i-го элемента r-го уровня структуры ГТД от свойств и эксплуатационных воздействий на первый элемент структуры.

На базе первой зависимости выражения (1) и ФОС ГТД можно формировать заданные, требуемые или предельные его свойства, а также управлять его параметрами в процессе реализации комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС. В этом случае, при распределении ФОС по элементам, первым элементом будет тот, на который действует максимальные эксплуатационные воздействия F_{max}. При этом свойства всех элементов структуры находятся в функциональной зависимости от первого элемента и особенностей действия эксплуатационных воздействий. Следует иметь в виду, что физико-механические свойства первого элемента могут быть заданными, требуемыми или предельными, далее идет распределение свойств по элементам каждого уровня и по уровням иерархической структуры ГТД. Это позволяет управлять физико-механическими свойствами структуры ГТД на этапе реализации технологии обеспечения ФОС. Определив свойства первого элемента на основании выражения (1) формируются все ФОС структуры ГТД.

Заключение

Таким образом, в представленной работе выполнена разработка технологических основ формирования ФОС элементов иерархической структуры ГТД на базе связного технологического континуума.

В работе выполнен анализ особенностей эксплуатации ГТД. При этом установлено, что в процессе эксплуатации ГТД на его структурные элементы действуют неравномерные эксплуатационные воздействия, которые приводят к неравномерному износу элементов. Для компенсации этих эксплуатационных неравномерностей в данной работе предлагается выполнять посредством обеспечения структуре ГТД ФОС.

Для обеспечения процесса формирования ФОС элементов по различным уровням структуры ГТД в работе разработаны основы их формирования на базе многосвязного технологического континуума. Этот процесс выполняется на основе разработанных принципов и приведенных особенностей формирования ФОС структуре ГТД.

Список литературы: **1.** Богуслаев, В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко. – К.: Манускрипт, 1993. - 332 с. **2.** Полетаев В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с. **3.** Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с. **4.** Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. - Вып. 4 (50). - С. 126 - 131. **5.** Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. **6.** Михайлов, Д. А. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа единовременного полного износа покрытия / Д. А. Михайлов, А. В. Хандожко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. - Вып. 4 (50). - С. 132 - 139. **7.** Михайлов, А. Н. Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. - № 1 (103). – С. 40-48. https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48. **8.** Михайлов, Д. А.. Общий подход синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XXVII международной научно-техн. конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. - С. 235-253. **9.** Михайлов, Д. А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя. / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. - Вып. 1 (72). - С. 40 - 57. **10.** Михайлов, Д. А. Некоторые особенности формирования функционально-ориентированных свойств структуры газотурбинного двигателя и связей параметров технологических процессов / Д. А. Михайлов, А. Н. Михайлов, А. А. Колодяжный, Е. А. Шейко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. - Вып. 3 (74). - С. 42 - 56.

РОЛЬ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ В СОПРОТИВЛЕНИИ КОРРОЗИИ СПЛАВА Cr28Mo9Ni

Михайлов Д.Л., Ермишкин В.А., Минина Н.А., Кулагин С.П., Томенко А.К.
(ИМЕТ РАН, Москва, Россия)
Тел. /факс: +7(499)1359668/+7(499) 1358680 eva@imet.ac.ru; minina1951@rambler.ru

Abstract: *The article is dedicated to the developed new version of thermoactivation analysis based on the data of tests carried out at various temperature-time regimes using the data of photometric analysis of structural images. Correlation analysis is proposed and tested. As a result of the experiments carried out on the Cr28Mo9Ni alloy, the efficiency of the temperature-time dependences of the structural data obtained by the method of photometric analysis of structural images is shown.*

Введение.

В настоящее время к сплавам для изготовления специального металлургического оборудования предъявляются высокие требования. Им приходится работать в чрезвычайно сложных условиях, сопротивляясь одновременному действию высоких температур, силовых нагрузок и агрессивных коррозионных сред. В частности, корпуса химических реакторов для приготовления расплавов щелочноземельных металлов должны быть жаропрочными коррозионностойкими в интервале температур 600-650ºС в течение продолжительных сроках эксплуатации. В ряде случаев не удается подобрать отечественный сплав с требуемыми характеристиками полностью отвечающим этим высоким требованиям. В условиях сложной международной обстановки импорт замещение является наиболее рациональным средством для удовлетворения потребностей народного хозяйства России в необходимых материалах. Новый отечественный жаропрочный коррозионностойкий сплав Cr28Mo9Ni, разработанный в ИМЕТ РАН призван способствовать решению важной задачи. Стадия предварительных исследований сплава успешно завершена и в настоящее время усилия авторского коллектива направлены на установление закономерностей, связывающих химический состав сплава, его структурные характеристики с условиями работы и комплексом его основных физико-химических характеристик применительно к заданным условиям эксплуатации. Режимы термообработки (ТО) жаропрочных коррозионностойких сплавов играют существенную роль в формировании структурных состояний, обладающих высокой стойкостью к воздействию агрессивных сред. По этой причине для оценки температурно-временной зависимости скорости коррозии был использован термоактивационный анализ (ТАА) свойств и структуры в качестве средства для обобщения результатов экспериментов, проведенных на образцах в разных структурных состояниях. Ввиду сложности использования общепринятой процедуры ТАА, основанной на формуле Аррениуса для анализа, полученных нами результатов, был разработан подход, учитывающий специфику методических особенностей проведенных экспериментов.

1. Методика термоактивационного анализа.

В нашем случае для поиска оптимальных режимов формирования различных структурных состояний исследуемого сплава были использованы обработки со стадийной сменой параметров режима. В качестве параметра, характеризующего структурное состояние, были использованы значения твердости по Бринеллю. Такой выбор был обусловлен простотой осуществления измерений, относительно большими размерами отпечатков, достаточной стабильностью результатов измерений. Для определения термоактивационных параметров были выбраны образцы с одинаковой твердостью, но структурой, сформированной по разным режимам. Твердость рассматривалась как функция эффективной продолжительности ТО, которое описывалось формулой:

$$t_e = t \cdot \left(-\frac{U}{RT}\right) \quad (1)$$

где: t - продолжительность выдержки при температуре T, U – энергия активации процесса, R – универсальная газовая постоянная.

Эффективное время процесса позволяет сравнивать структурные состояния материала, сформированные при разных режимах термообработки. При таких предположениях кинетику структурных превращений (характеризуемую H) описывали для разных режимов ТО формулами:

$$H = a_1 \cdot t_1 \cdot \left(\exp(-\frac{U}{RT_1})\right) \quad (2)$$

$$H = a_2 \cdot t_2 \cdot \exp\left(-\frac{U}{RT_2}\right) + a_3 \cdot t_3 \cdot \exp\left(-\frac{U}{RT_3}\right) \quad (3)$$

$$H = a_4 \cdot t_3 \cdot exp\left(-\frac{U}{RT_3}\right) + a_3 \cdot t_3 \cdot \exp\left(-\frac{U}{RT_3}\right) \quad (4)$$

$$H = a_5 \cdot 15 \cdot \exp(- - \frac{U}{R \cdot 1394}) \quad (5)$$

Для определения параметров в этих уравнениях были использованы данные экспериментов по выбору оптимальных режимов формирования требуемого структурного состояния с высоким сопротивлением коррозии под напряжением, приведенные в таблице 1:

Таблица 1. Режимы термообработки сплава Cr28Mo9Ni

№	H	Режимы термообработки		Режим отжига	
		t_i, мин	T_i, °C	t_i, мин	T_i, °C
1	187	20	1344	-	-
2	187	25	1344	30	1073
3	187	20	1394	30	1073
4	180	25	1394	30	1073
5	187	20	1394	-	-
6	184	15	1344	-	-

Опуская промежуточные преобразования уравнения в итоге получаем уравнения (6-11) в виде:

$$\ln a_1 - U \cdot 8{,}949 \cdot 10^{-5} = 2{,}23 \quad (6)$$

$$\ln a_2 - \ln a_1 = 0{,}223 \quad (7)$$

$$\ln a_3 - U \cdot 0{,}000112 = -3{,}385 \quad (8)$$

$$\ln a_4 - U \cdot 8{,}949 \cdot 10^{-5} = 2{,}235 \quad (9)$$

$$\ln a_5 - \ln a_1 + U \cdot 0{,}321 \cdot 10^{-5} = 0{,}038 \quad (10)$$

$$\ln a_5 = \ln a_2 + 0{,}272 \quad (11)$$

Решение полученной системы было найдено с помощью специальной программы для решения системы линейных уравнений. К линейному виду система приводится, если осуществить замену переменных: $a_{ij} = \ln a_i$

После потенцирования решение системы имеет вид:

$a_1 = 0{,}857$, $a_2 = 1{,}074$, $a_3 = 3{,}448$, $a_4 = 95{,}42$, $a_5 = 1{,}41$, U = 26,67 кДж /моль

2. Анализ закономерностей формирования структурного состояния сплава Cr28Mo9Ni.

На структурное состояние металлов и сплавов оказывает влияние множество различных факторов: параметры кристаллической, дефектной структуры, фазовый состав, параметры распределения элементов структуры по размерам и в пространстве, параметры технологических обработок, физико-химические характеристики рабочих сред. Оценить степень влияния этих факторов на свойства материалов при современном состоянии науки о материалах довольно затруднительно. В первом приближении оценить относительную значимость различных факторов по степени их влияния на

свойства материалов можно с помощью корреляционного анализа. При коэффициенте корреляции между двумя массивами переменных, описывающих качественно различные свойства материалов, превышающим 0,8, можно ожидать возможность описания связи между переменными в аналитической форме. Коэффициент корреляции «С» определяется по формуле:

$$C = \frac{\sum_1^n (x_i - X) \cdot (y_i - Y)}{\left\{ \sum_1^n (x_i - X)^2 \cdot \sum_1^n (y_i - Y)^2 \right\}^{0,5}} \quad (12)$$

где: x_i, y_i текущие значения переменных, X, Y –средние значения переменных.

На рис. 1. показан график зависимости $H_c - H_i = f(D_c - di)$, построенные по экспериментальным точкам и линия тренда по данным регрессионного анализа.

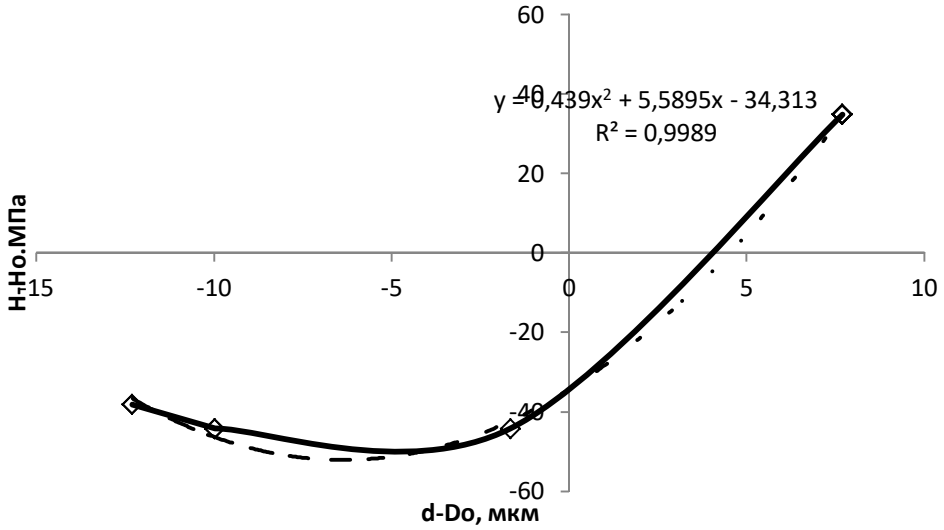


Рис. 1. Зависимости $(H_i - H_c) = f(d - D_o)$

Под H_i, d - понимаются средние значения твердости по Бринеллю и диаметры зерен, H_o и D – средние значения этих переменных. Уравнение регрессии для этой зависимости записывается как:

$$(H_i - H_o) = 0{,}438 \cdot (d - D_o)^2 + 5{,}589 \cdot (d - D\ \ )o - 34{,}31 \quad (13)$$

Коэффициент детерминации R^2 аппроксимации равен 0,998, что свидетельствует о хорошем согласии с данными экспериментов. На рис. 2 показана зависимость скорости коррозии от твердости по Бринеллю.

Из рисунка видно, что зависимость не монотонна. Оценка коэффициента корреляции показала отсутствие корреляции между сравниваемыми переменными. С = -4,2908E^{-16}. На рис. 3 показан график зависимости энергию отраженного от поверхности пучка света от температурно-временного фактора, каким является эффективная продолжительность пребывания при температуре испытаний на коррозионную стойкость исследуемого сплава. Для его определения были использованы значения энергии активации процесса, приведенные выше.

Из рисунка видно, что полиноминальная аппроксимация экспериментальной зависимости существенно отличается от экспериментальной. Об этом же свидетельствует расчетное значение коэффициента корреляции С = 1,058 при коэффициенте детерминации R^2 = 0,658.

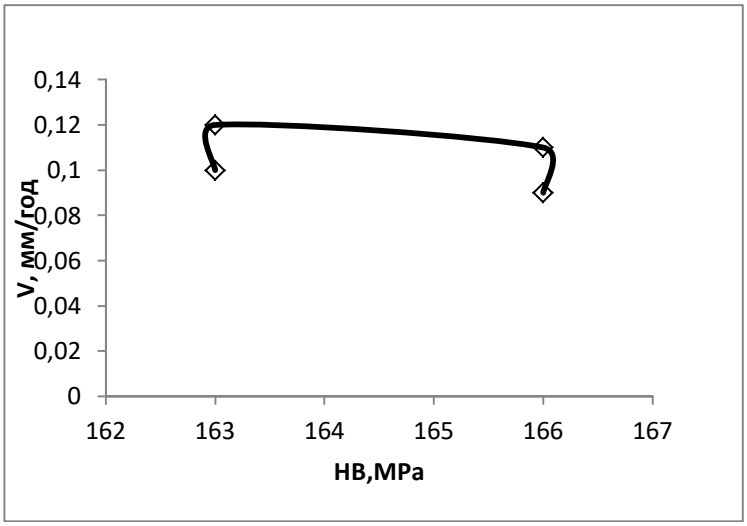


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии сплава от твердости по Бринеллю

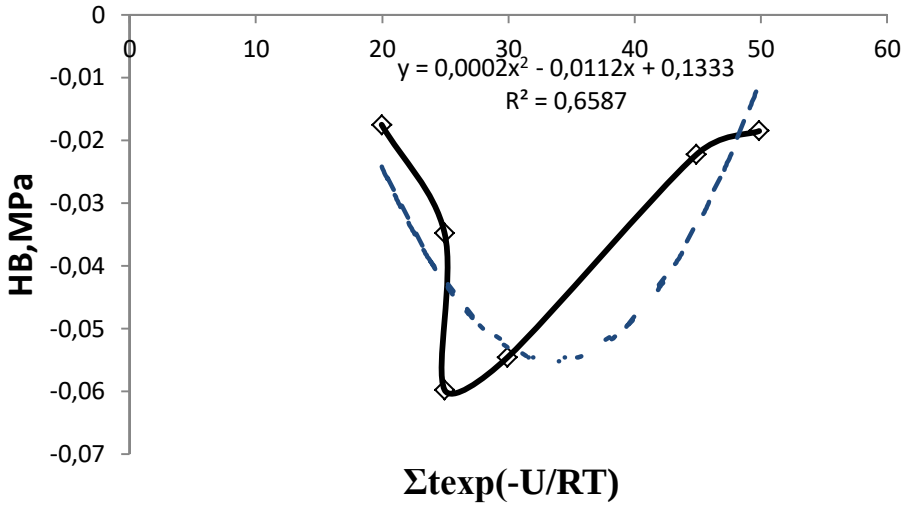


Рис. 3. Зависимость удельной энергии отраженного от поверхности материала пучка от эффективной длительности температурного воздействия

На рис. 4. показана зависимость твердости по Бринеллю от температурно-временного фактора.

Из рис. 4. Видно, что зависимость имеет четко выраженные максимум и минимум, отражающие характер структурных превращений в исследуемом материале. Максимум соответствует точке оптимальной перестройки дислокационной структуры, а последующее снижение твердости связано с процессом возврата. Последующий рост твердости по-видимому связан с выделением вторичной фазы.

Состояние (1) сформировано в результате термообработки при T = 1107°C в течение 30 мин с последующей закалкой в воде. Состояние (17) возникло после термообработки при 1127°C в течение 20 мин с последующим получасовым отжигом при T = 800°C.

Выводы:

1. Разработан новый вариант термоактивационного анализа по данным испытаний, проведенных при различных температурно-временных режимах с привлечением данных фотометрического анализа структурных изображений.

2. При выборе факторов, вносящих наибольший вклад в формирование структурного состояния предложен и опробован корреляционный анализ.

3. В результате проведенных экспериментов показана эффективность температурно-временных зависимостей структурных данных, полученных методом ФАСИ.

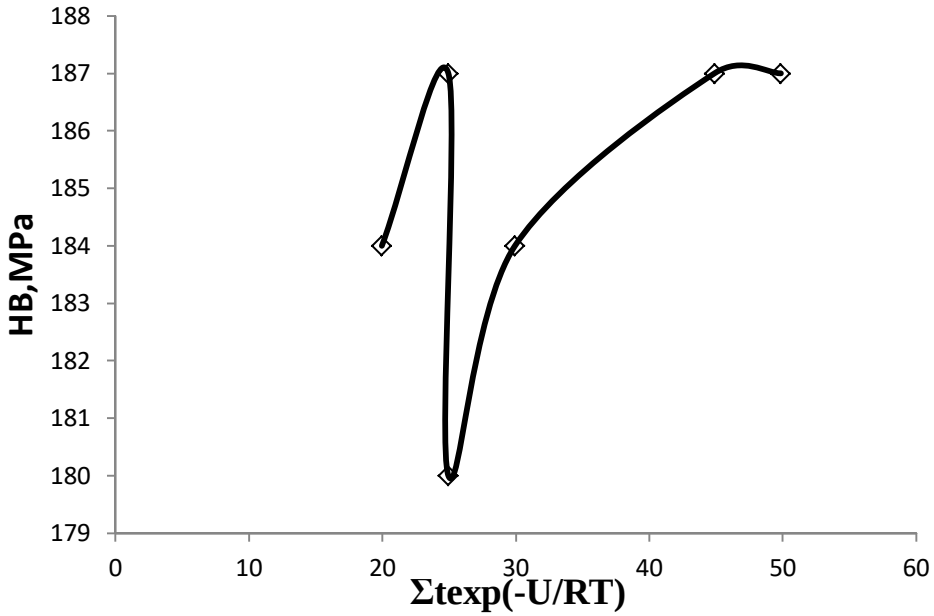


Рис. 4. Зависимость твердости по Бринеллю от эффективной длительности температурно-временного воздействия

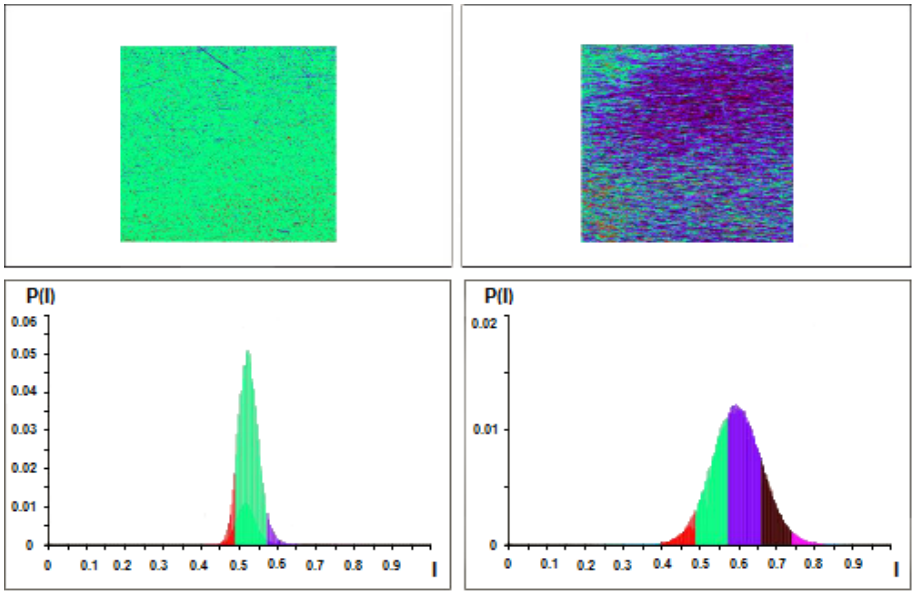


Рис. 5. Сравнение структур и спектров яркости отражения, полученные методом ФАСИ. Слева сплав Cr28Mo9Ni в состоянии (1), а справа - в состоянии (3)

Работа выполнена в рамках Государственного задания 075-00328-21-00.

Список литературы: 1. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных М: Мир, 1980, 606 с. **2.** Ермишкин, В.А., Мурат, Д.П., Подбельский, В.В Информационные технологии фотометрического анализа усталостного повреждаемости материалов // Информационные технологии. 2007. № 11. С. 65-70.

МОТИВАЦИЯ И ЕЕ ПРОБЛЕМЫ В СОВРЕМЕННОЙ ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

Мороз О.К. *(ДонНТУ, Донецк, ДНР)*
Тел./Факс: 38 (062) 3010905; E-mail: odm@mine.donntu.org

Abstract: *This article especially pay attention to the problem of humanisation of higher education. It is necessary to search new forms aimed at self-training of a student. It is impossible to reach this purpose without self-study which is in its turn impossible without the reasoned motivation. The authors have tried to prove it by doing a number of international comparative and contrastive researches of personal strategies of student self-study and motivations for studying foreign languages in higher schools. And they also tried to pay attention to the necessity of intensification one of the most important functions of the university - educational that is the necessary condition for the transition of higher education to the motivational self-teaching as a part of European educational integration.*
Keywords: *motivations, humanization, self-training, higher education, self-teaching*

В современном мире с каждым годом возрастает потребность в специалистах с высокой профессиональной компетентностью, творческим подходом к профессиональной деятельности, высоким уровнем общего развития, включающем, разумеется, владение иностранными языками. Международный обмен опытом, культурные связи, туризм, и пр. делает недостаточным пользование только электронными переводчиками при переводе массы технической литературы, увеличивающейся вместе со стремительным ростом технического прогресса. Поэтому перед современным техническим вузом стоит задача хорошей подготовки высококвалифицированных специалистов, владеющих на достаточном уровне иностранными, или хотя бы одним иностранным языком. Все это невозможно без оптимальной мотивации студентов и преподавателей.

Тем не менее, в последние годы намечается некоторое падение мотивации к овладению не только иностранными языками, но и даже к дисциплинам по выбранной специальности. Наши зарубежные коллеги отмечают так же, что хотя современный учебный процесс требует мотивированных на учебу студентов и преподавателей, столкновение разных мотивов обучаемых и обучающих приводит к несогласованности деятельности преподавателя и студента, или учителя и ученика. [1]

Авторы полагают, что мотивация играет решающую роль в решении данной проблемы. Почему? Чтобы ответить на данный вопрос вернемся к определению что же такое мотивация.

Определений масса. Википедия определяет мотивацию как:

“Мотива́ция (от лат. movere) — побуждение к действию; психофизиологический процесс, управляющий поведением человека, задающий его направленность, организацию, активность и устойчивость...” [3].

Другой источник дает такое определение: ”**Мотивация** – это психофизиологический процесс, который под действием внешних или внутренних факторов, стимулирует у людей желание заниматься той или иной деятельностью “ [2].

Или еще, достаточно широко применяемое определение:

“Мотивация – это процесс психологического порядка, побуждающий человека совершать какие-либо действия для достижения определенной цели” [1].

Мотивация (от латинского movere) побуждение к действию; психофизиологический процесс, управляющий поведением человека, задающий его направленность организацию, активность и устойчивость; способность человека деятельно удовлетворять свои потребности.

Но каковы бы ни были определения, все они говорят о том, мотивация – это:

1. Психофизиологический процесс.
2. Процесс, побуждающий человека к действию.

Мотивация неотрывно связана с самостоятельной работой обучаемого. Человек с низкой мотивацией, или вовсе без мотивации самостоятельно работать не станет. В лучшем случае ограничится аудиторной работой. В худшем – вовсе прекратит обучение.

Следует учитывать также характер мотивации. Т.е. она бывает внутренней (далее ВМ) и внешней. А внешняя - положительной или отрицательной (далее ВПМ и ВОМ). Соотношение между внешней и внутренней мотиваций называется «мотивационным комплексом» [Рис.1].

Между этими видами мотиваций зачастую нет четких границ. «Но, если более глубоко разобраться в вопросе, то можно заметить, что довольно часто границы между этими формами мотивации являются размытыми. Нередко внешняя мотивация перетекает во внутреннюю мотивацию. Это зависит от особенностей каждого человека, и того, как на него действуют различные стимулы» [2].

Мы говорим о внутренней мотивации, если присутствует любовь к изучаемому предмету, если обучаемый мыслит себя специалистом только в данной области. Например «хочу быть ТОЛЬКО программистом, сделать в этой области карьеру, не мыслю себя вне этой области». Этот вид мотивации по праву можно назвать одним из самых сильных. (Если не самым сильным).

Внешней мотивацией считается мотив, при котором личность занимается деятельностью, являющейся средством для достижения цели, например карьеры, награды, и т.д. в другой области. Допустим, человек обучается иностранному языку для того, чтобы поехать получать образование за рубежом. Или чтобы читать литературу по избранной специальности на иностранном языке. Или же для общения с зарубежными коллегами. Или чтобы работать на предприятиях, где за применение иностранного языка полагается солидная прибавка к зарплате.

Как пишет Йозеф Догнал (кандидат филологических наук, доктор философии, доцент философского факультета, Институт славистики, Университет им. Масарика; доцент кафедры русистики философского факультета, Университет им. св. Кирилла и Мефодия, г. Брно, Чешская Республика) «Для более глубокого понимания проблемы «включения» мотивации в процесс обучения познания необходимо обозначить различия между мотивацией и стимуляцией(стимулированием).

Мотивация — это внутренний процесс, основанный на сугубо личных мотивах, т.е. импульсах, побуждающих человека прикладывать усилия и приближающих носителя мотивов к достижению определенных целей или удовлетворению потребностей его собственными силами, его энергией, по его же воле. Так, мотивация, имея внутренние, отчасти психологические причины, не может быть внедрена извне, снаружи, другим человеком.

Мы можем говорить о том, что ответственность за мотивацию лежит полностью на самом человеке (иногда это называется «внутренняя мотивация» или «самомотивация»).

Другие — в том числе и преподаватели — могут лишь **стимулировать** — то есть называть, вызывать, поддерживать, развивать извне те импульсы, которые индуцируют мотивацию (в некоторых источниках это называется «внешней мотивацией») [1].

Значит, соединение, взаимодополнение мотивации и стимуляции — это желаемая предпосылка действительно эффективного процесса обучения, из чего следует, что за эффективность процесса обучения отвечают обе стороны — и преподаватели, и студенты.

К внешней отрицательной мотивации мы относим мотивы избегания какого-либо нежелательного события, страха. Т.е. – это мотив, толкающий к действию с целью уйти от чего-либо. Например, страх перед отрицательной оценкой знаний, боязнь быть отчисленным из вуза, произвести плохое впечатление, отстать от сверстников и т.д.

К сожалению, согласно исследованиям авторами мотивов изучения студентами иностранных языков в 2-х группах горного факультета в Донецком национальном техническом университете, случаев внутренней мотивации не было обнаружено.

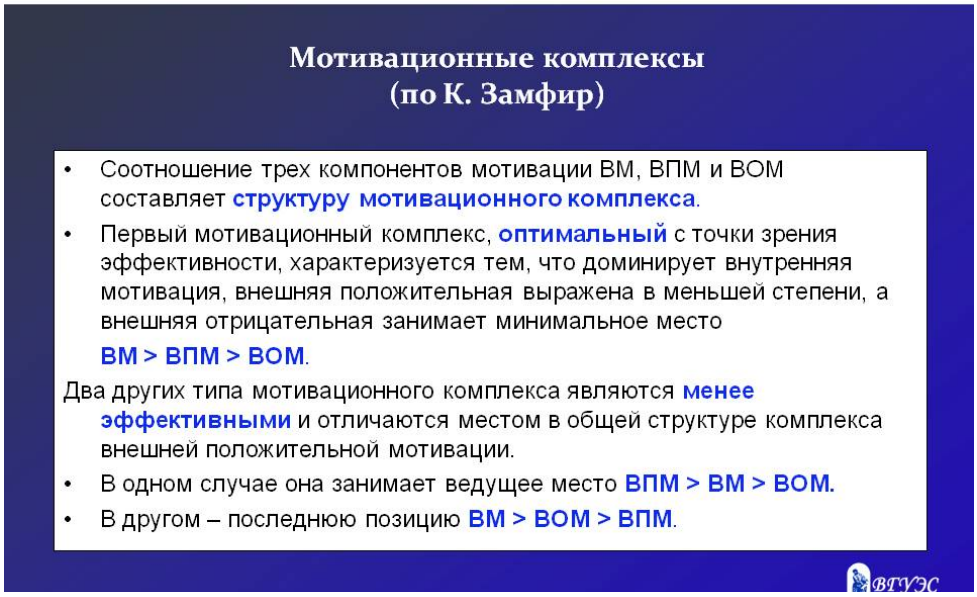


Рис.1. Мотивация персонала

Хотя внешняя мотивация студентов была достаточно высокой. Хотя не было и случаев отрицательной мотивации в этих группах, они были обнаружены в других, вне процесса исследования. Это выразилось в желании выбрать иностранный язык в качестве «дисциплины по выбору студента», чтобы избежать другой, более сложной с точки зрения студентов, дисциплины.

Но вернемся к мотивам, которые порой приводят абитуриентов в вуз. А затем играют отрицательную роль для мотивации к получению знаний. Например « я учусь, чтобы еще на 5 лет куда-то определиться», «учиться престижнее, чем работать», «мне нужен только диплом, а заниматься я буду своим бизнесом», « получу диплом, а на работу родители устроят». Эти мотивы, конечно, побуждают студента что-то делать для достижения целей, но не стимулируют к получению высоких профессиональных навыков.

Как видно по перечисленным возможным мотивам, само по себе получение теоретических знаний и практических умений не всегда является главным источником мотивации для студентов. С другой стороны, задача учителя — показать значимость и предмета, и конкретных знаний и передать эти знания и конкретные умения учащимся, т.е. с его точки зрения целью/мотивом не являются ни диплом, ни деньги, ни что-либо другое.

Итак, преподаватель принимает во внимание только **часть потенциальных мотивов студента**, предполагая, что студент заинтересован в предмете, в знаниях и умениях, связанных с этим предметом, — и только эта часть (преимущественно) становится содержанием комплекса стимулирующих инструментов преподавателя. Преподаватель не может отвечать за все остальные индивидуальные по своему характеру цели, которых хочет достичь студент и о которых преподаватель вряд ли может знать. Как может учитель в случае, когда конкретные знания и умения не являются целью, а лишь средством для достижения другой цели, узнать об этом и использовать это для стимуляции деятельности? Более того, если студент сам осознает, что не только знания и умения, получаемые в университете, но и другие факторы (связи, фаворитизм, удача и др.) могут привести к желаемой цели, то зачем ему/ей верить всему, что говорит учитель, принимать стимулирующие импульсы и положительно на них реагировать? Это означает, что даже если преподаватель выполняет свои обязательства и должным образом стимулирует студентов в рамках данного предмета, в конечном счете, результаты всей деятельности будут зависеть от внутренней реакции студента.»[2].

Разумеется, преподаватель должен стимулировать студентов к обучению. «Педагог должен объяснить студентам необходимость, полезность и важность роли

изучаемой науки для современного инженера. В ходе изложения каждой темы, следует оказывать внимание прикладным задачам, устанавливать межпредметные взаимосвязи с общетехническими и специальными дисциплинами» [5].

Как правило деятельность преподавателя нацелена на положительно мотивированных студентов. Хотя отрицательная мотивация тоже может мотивировать, но не на самостоятельную работу. Допустим, сдал экзамен по предмету, получил положительную оценку и довольно. Особенно если предмет на следующем курсе не изучается. Бесспорно, преподаватель должен объяснить значимость данной дисциплины, ее место в будущей деятельности обучаемого. Но конечный результат зависит от последнего. Нельзя забывать, что мотивация носит личностный характер, преподаватель СТИМУЛИРУЕТ уже мотивированного студента. Забывая об этом можно легко переложить ответственность за получение знаний на исключительно на обучающего. Это как раз и наблюдается в последнее время. «Меня не научили».

Йозеф Догнал называет такое отношение обучаемого «потребительским». Вместе с Йозефом Догналом авторы полагают, что «во-первых, это факт, что студенты не считают знания основной предпосылкой для успешной карьеры. Во-вторых, это внедрение убеждения, что студент - заказчик, и связанной с ним тенденции переносить ответственность за результаты процесса обучения больше на преподавателя, который становится «поставщиком» информации. В-третьих, это постоянно нарастающее количество университетов и вузов, которые по экономическим соображениям вступают в «гонку за средствами», то есть пытаются привлечь по возможности больше студентов, понимающих, что это меняет их статус в системе.

Свою роль играют и постоянные изменения, связанные с тенденцией непрерывно работать над «инновационными проектами», которые иногда вместо систематической работы вносят в процесс обучения скорее нарушения, нежели усовершенствования. Результатом является падение мотивации и преподавателей, и студентов и связанная с ними определенная мера недоверия с обеих сторон и ухудшение результатов процесса обучения». [2]

В отличие от чешского коллеги, преподаватели из Татарстана считают, что обучающие должны заниматься мотивированием студентов. И предлагают меры по повышению мотивации у обучаемых [6]. Например:

1. *Контроль учебной деятельности.* Контроль проводится с целью оценки знаний, умений будущих специалистов. Он может осуществляться различными способами, которые должны систематизировать поведение, содержать понятные критерии оценки. Необходимо, чтобы результатом был качественный анализ учебной деятельности студента.

Контроль знаний может осуществляться в виде устного опроса, проверки домашних работ, проверка практических, контрольных и лабораторных работ, а также различные тестирования.

Основным способом оценки контроля знаний, повышающих мотивацию студентов к саморазвитию, изучению дисциплин является рейтинговая система [5]. У будущих специалистов появляется заинтересованность к выполнению заданий повышенной сложности, стимулируется познавательная активность. Хочется выделить сбалансированность контрольных работ для студентов заочного отделения. Работы должны иметь полный состав, охватывающий самые разные типы задач, которые должен решать студент. Но задачи не должны быть слишком сложными, потому что большая часть студентов «заказывают» решение контрольных работ на рынке платных образовательных услуг.

2. *Олимпиады.* Они помогают увидеть свой реальный уровень по сравнению с лучшими студентами, стимулируют к усовершенствованию знаний, так как одним из мотивационных факторов самосовершенствования студентов является стремление к состязательности [4]. Четко зная свои «пробелы», студент может проанализировать и улучшать ситуацию. Стремление студента к победе воспитывает в нем способность к конкуренции, что в дальнейшем поможет добиться успехов в профессиональной деятельности.

3. *Стиль педагогической деятельности преподавателя.* Деятельность любого преподавателя имеет свой определенный стиль. Это постоянные наборы приемов, навыков, методов и способов, которые проявляются в процессе его педагогической деятельности. Стиль, как правило, зависит не только от студентов, но и от психологической личности преподавателя. Всем известно, что если преподаватель донес до учащихся доступно, красочно и ярко информацию, то студент без лишних усилий усвоит материал, а соответственно и дисциплину.

Как стиль, так и эффективность преподавательской деятельности во многом зависят от преподавателя. Мудрый преподаватель знает, что он не только доносит знания и развивает информативные стороны студентов, но и является образцом для подражания. Ему необходимо чувствовать каждую личность, ее слабые и сильные стороны. Преподавателю необходимо установить правильные взаимоотношения со студентами. При этом он должен учесть индивидуальность каждого. Еще одним неотъемлемым фактором является успех и активность студента. Его нужно стимулировать, поощряя за успехи. Работая с каждым, преподаватель дает возможность ему раскрыться и проявить себя. Для этого преподавателю необходимо создать дружелюбную и позитивную атмосферу, взаимопонимание между студентами и взаимовыручку.

Все вышеперечисленное стимулирует работу студента, повышает его мотивацию. Если студент будет уверен в том, что в будущем он будет востребован как специалист, то стремиться он будет не только к тому, чтобы закончить вуз и получить диплом, но и к получению качественного образования [5].

Поэтому контроль учебной деятельности должен включать в себя и контроль над внеаудиторной работой студента. Например, можно предложить студентам просмотреть фильмы, или передачи на иностранных языках на выбор обучаемого, а затем посвятить 15 минут урока для пересказа им того, что он проработал сам. (Содержания фильма, книги, передачи и т.д.) Возможно повышение балла при оценке знаний студентов, работающих внеаудиторно. Предложить студентам вести портфолио, с помощью которого он отслеживает свои успехи и оценивает свои знания сам. Зачастую у студентов, занимающихся самостоятельно, повышается и уровень аудиторных знаний.

Список литературы: **1.** Н.В. Бордовская, А.А.Реан. Мотиваций профессиональной деятельности. Учебник нового века. Педагогика. Питер. 2001, с.280. **2.** Мороз О.К., Данилова В.А. Швабова Юлия. Самостоятельная работа студентов и мотивация, как факторы для овладения иностранным языком в техническом вузе. Материалы VI-научно-методической конференции «Проблемы и пути совершенствования учебной, учебно-методической и воспитательной работы» г.Донецк.04 февраля 2016г.- Донецк: ДонНТУ, 2016. 697 с. **3.** Йосейф Догнал. Мотивация студентов к обучению и ее барьеры. Эссе, основанное на опыте обучения иностранным языкам. Институт славистики. Университет им. св. Кирилла и Мефодия, г.Брно, Чешская Республика.2017 г. https://www.meteor-city.top/motivacia-studentov-i-ee-baryery. **4.** Шайхутдинова И.И., Тарковская К.О. Проблема повышения мотивации в обучении студентов технического вуза // Научное сообщество студентов XXI столетия. Гуманитарные науки: сб. ст. по мат. XXXI междунар. студ. науч.-практ. конф. № 4(31). URL: http://sibac.info/archive/guman/4(31). https://sibac.info/studconf/hum/xxxi/41655 **5.** Отчет о научно-исследовательской работе «мотивация и самостоятельная работа студентов при изучении иностранных языков в техническом вузе Н-2-07 (заключительный). ДонНТУ, Донецк, 2013,С.138. **6.** Мотивация персонала. Мотивационные комплексы по К.Замфир. https://yandex.ua/search/?text=%D0%A0%D0%B8%D0%B0%D0%BD%20%D0%9C%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%8B&rdrnd=8028&lr=142&redircnt=1563298809.1

УДК 621.313.333

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ТОКА СТАТОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Морозов А. Л. *(Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А. Н. Туполева – КАИ)*
Тел.: +7 (843) 231-01-09; Факс.: +7 (843) 236-60-32; E-mail: kai@kai.ru

Abstract: *In this paper, the well-known methods of processing of the stator current signals for fault diagnosis of the induction motors are considered and their main advantages and disadvantages for the implementation in embedded systems are highlighted. The previously proposed method based on a combination of the fast Fourier transform and the statistics of the fractional moments is optimized for implementation in embedded systems. The efficiency of the diagnosis of such faults as eccentricity and a broken rotor bar, using the proposed method, is verified on the stator's currents measurements of the real motors under different constant load levels: no load, 50% of the rated load, 75% of the rated load. The results show that this approach allows accurately diagnose the considered faults independently from the load level.*

Key words: *induction motors, condition monitoring, diagnosis, diagnosis, fault detection, fast Fourier transform, statistics of the fractional moments.*

I. Введение

Асинхронные двигатели (АД) получили широкое распространение в промышленности [1], благодаря их надежности, производительности, простоте конструкции и относительно низкой стоимости. Однако, несмотря на это, АД подвержены неисправностям. Своевременное обнаружение неисправностей позволяет снизить стоимость ремонта, предотвратить аварийные ситуации и избежать остановки производства. В связи с этим повышается актуальность надежных систем мониторинга состояния АД. Предпочтительные средства мониторинга состояния – это маломощные, недорогие устройства, построенные на основе встраиваемых систем, использующих недорогие микроконтроллеры или маломощные процессоры. Данные системы имеют ограниченную производительность и малый объем памяти, поэтому разрабатываемые алгоритмы обработки сигналов для диагностики, должны быть достаточно эффективными, иметь приемлемую вычислительную сложность и требовать небольшой объем памяти.

Методы обнаружения неисправностей и диагностики АД классифицируются по измеряемым параметрам: крутящий момент, магнитный поток, температура, акустическая эмиссия, электрические токи и напряжения, и вибрации. Мониторинг электрического тока является одним из наиболее часто используемых параметров для диагностики АД, поскольку для измерения тока не требуется прямой доступ к двигателю, а также электрические токовые сигналы, не так сильно зашумлены как, например, вибрации (вибрационные сигналы исследуемого АД, как правило сильно «зашумляются» вибрациями рядом стоящего оборудования).

В таблице 1 представлены преимущества и недостатки известных методов обработки токовых сигналов для решения задач диагностики АД, с точки зрения реализации этих методов во встраиваемых системах.

На основе приведенного в таблице 1, выделены основные проблемы существующих методов:

Таблица 1. Методы обработки токовых сигналов, используемые для диагностики и контроля АД

Название метода и ссылки	Преимущества	Недостатки
Анализ токовых сигнатур двигателя на основе быстрого преобразования Фурье [2]	доступность на большом количестве платформ; высокая точность оценки сигнатур неисправностей; низкая вычислительная сложность.	эффект спектральной утечки; подверженность шумам; требуется длительная выборка данных; требуется информация о скольжении двигателя.
Методы высокого разрешения: MUSIC, ESPRIT [3, 4]	частотное разрешение не зависит от длины выборки.	большая вычислительная сложность; требуется информация о скольжении двигателя; требуется большое количество векторов наблюдений.
Анализ огибающей токового сигнала [5]	низкая вычислительная сложность.	требуется длительная выборка данных; требуется информация о скольжении двигателя.
Спектральный анализ на основе эмпирического разложения мод [6]	устойчивость к шумам; высокая точность оценки сигнатур неисправностей.	требуется большое количество выборок; требуется длительная выборка данных; высокая вычислительная сложность; требуется информация о скольжении двигателя.
Методы на основе вейвлет-преобразования [7, 8]	высокая точность оценки сигнатур неисправностей.	высокая вычислительная сложность; требуется длительная выборка данных; требуется информация о скольжении двигателя.

1) требуется большая выборка измерений. Это приводит к следующим сложностям: требуется большой объем памяти; увеличивается время выполнения вычислений, так как требуется обработать большой объем данных; необходимо, чтобы двигатель находился в устоявшемся режиме работы, который может быть потерян в течение длительного интервала сбора данных;

2) большая вычислительная сложность;

3) требуется априорная информация о скольжении двигателя.

Для решения проблемы требования большой выборки измерений, в [9] предложена комбинация Быстрого Преобразования Фурье (БПФ) и Статистики Дробных Моментов (СДМ) для диагностики дефекта в одном из стержней ротора. Этот метод позволяет сократить анализируемую временную выборку, сохраняя надежный результат диагностики. Данный метод основан на свойствах Функции Обобщенного Среднего (ФОС), которая была разработана в рамках СДМ в работах [10, 11]. Несмотря на успешное решение проблемы требования длительной выборки измерений, данный метод не исследован на возможность диагностировать различные неисправности под

различными уровнями нагрузки АД, так как в [9] рассматривалось только обнаружение дефекта в стержне ротора при работе двигателя с полной номинальной нагрузкой. Кроме этого, данный метод недостаточно оптимизирован для реализации во встраиваемых системах.

В данной статье продолжена разработка и исследование, предложенного в [9], комбинированного метода на основе БПФ и СДМ: метод оптимизирован для реализации во встраиваемых системах, с целью снижения требований к памяти и вычислительных затрат. А именно: к измерениям применяется децимация и процедура выделения информативного частотного диапазона, с целью уменьшения объема обрабатываемого набора данных. Подобраны оптимальные значения для следующих параметров предложенного метода, а именно: результирующая частота после децимации – 1 кГц; длина анализируемой выборки – 0.2 с. В результате требуется единовременно хранить лишь 200 отсчетов. Кроме этого, предложенный метод исследован на зависимость результатов диагностики от скольжения двигателя и на возможность диагностировать такие дефекты как эксцентриситет и дефект в стержне ротора (ранее в [9] было исследовано только обнаружение дефекта в стержне ротора). Диагностика выполнена при обработке данных, полученных от АД при различных уровнях постоянной нагрузки: 0%, 50% и 75% от номинальной нагрузки. В указанных условиях были измерены электрические токи фаз статора двигателей в различных состояниях: исправный двигатель, двигатель с дефектом в одном стержне ротора, двигатель с эксцентриситетом. Полученные результаты доказывают эффективность предложенного метода, а также его пригодность для реализации в виде алгоритма для встраиваемых систем в средствах непрерывного мониторинга технического состояния АД.

2. Комбинированный метод обработки сигналов на основе быстрого преобразования Фурье и статистики дробных моментов

2.1 Модификации существующего метода

В данной работе представлен оптимизированный для реализации во встраиваемых системах комбинированный метод обработки сигналов на основе быстрого преобразования Фурье и Статистики Дробных Моментов (СДМ), к которому дополнительно, введена процедура децимации и процедура выделения информативного частотного диапазона.

Децимация используются для сокращения количества данных, которые необходимо хранить для последующей обработки. Таким образом уменьшается объем требуемой памяти. Информативный Частотный Диапазон (ИЧД) – это отрезок Фурье спектра, ограниченный определенным частотным диапазоном. Использование ИЧД вместо всего Фурье спектра уменьшает требуемое количество вычислений и повышает чувствительность метода, так как в вычислениях отсутствуют неинформативные гармоники.

2.2 Алгоритм реализующий предложенный метод

Предложенный метод, реализуется алгоритмом, состоящим из следующих шагов:

1. α-β преобразование

Трехфазные токи статора IM представляются как вращающийся пространственный вектор в системе отсчета, прикрепленной к фазовой плоскости статора. Действительная ось α совмещена с осью одной из обмоток статора, а мнимая ось β сдвинута по фазе на 90 градусов. Преобразование координат от измеренный токов фаз i_u, i_v, i_w, к координатам i_α, i_β получается матричной операцией:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix}$$

2. Децимация

Представим выборку токового сигнала *x*, как вектор наблюдения $\mathbf{x}^T$:

$$\mathbf{x}^T = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_M \end{bmatrix}$$

$$M = T \cdot F_s$$

где M – общее количество измерений, T – интервал сбора данных, а F_s – исходная частота дискретизации. Децимация с помощью процесса усреднения дает сигнал *y*, который можно представить как вектор наблюдения $\mathbf{y}^T$:

$$\mathbf{y}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_d}\sum_{j=1}^{K_d} x_j & \frac{1}{K_d}\sum_{j=K_d}^{2K_d} x_j & \dots & \frac{1}{K_d}\sum_{j=M-K_d}^{M} x_j \end{bmatrix}$$

$$K_d = \frac{F_s}{F_{dec}}$$

где K_d – коэффициент децимации и F_{dec} – частота, полученная после децимации. Размер *N* вектора $\mathbf{y}^T$ после децимации равен:

$$N = \frac{M}{K_d}$$

Для дальнейшей обработки достаточно хранить только сигнал y, представленный буфером данных размера *N*, который в K_d раз меньше, исходного вектора $\mathbf{x}^T$.

3. Быстрое преобразование Фурье

Вычисление полного спектра сигнала выполняется с помощью Быстрого Преобразования Фурье (БПФ), согласно следующему выражению:

$$fftFull_k = \left| \sum_{j=1}^{N} y(j) e^{\frac{(-2\pi i)(j-1)(k-1)}{N}} \right|$$

$$fFull_k = k\frac{F_{dec}}{N}$$

где y – сигнал после децимации, N – количество точек после децимации, $fftFull(k)$ – модуль амплитуд полного спектра Фурье, $fFull(k)$ – частоты полного спектра Фурье, $k = 1, 2, ..., N$. Для того чтобы не рассматривать реальную и мнимую части отдельно, используется модуль.

4. Выделение информативного частотного диапазона

Каждый дефект по-разному влияет на спектр тока. Для того, чтобы анализировать только информативную часть спектра, введена процедура выделения Информативного Частотного Диапазона (ИЧД). ИЧД зависит от: частоты питающего напряжения, типа анализируемой неисправности, результирующей частоты после децимации.

$$IFR_l = fftFull_p$$

$$p = p_{min},...,p_{max,}p_{min} = floor\left(f_{min}\frac{N}{F_{dec}} \right), p_{max} = floor\left(f_{max}\frac{N}{F_{dec}} \right)$$

$$l = 1,2,...p_{max} - p_{min}$$

где IFR – отрезок амплитуд спектра Фурье, входящий в ИЧД, f_{min} – нижняя граница ИЧД, f_{max} – верхняя граница ИЧД, $floor()$ – операция округления до целого. Выражения для индексов p_{min} и p_{max} получены исходя из выражения для частот спектра (7).

В данной работе рассматривается диагностика таких неисправностей как эксцентриситет и дефект в стержне ротора. Для данных неисправностей подобран ИЧД – $f_{min} = 25Гц, f_{max} = 125Гц$. Отрезок амплитуд, входящих в ИЧД, обозначим – IFR.

5. Вычисление Функции Обобщенного Среднего

ФОС вычисляется для отрезков спектра Фурье, которые входят в ИЧД – IFR. ФОС вычисляется согласно следующему выражению:

$$\Delta_{(mom_p)} = \left(\sum_{i=1}^{L} IFR_i^{mom_p} \right)^{1/mom_p}$$

где L – число амплитуд, входящих в отрезок спектра, в ИЧД, а mom_p – порядок момента, который может быть вычислен согласно:

$$mom_p = \exp\left\{ min + \frac{p}{P}(max - min) \right\}$$

где min, max и P – параметры ФОС, а $p = 1,2,...,P$. Значения min и max определяют пределы в логарифмической шкале, P – коэффициент, определяющий разрешение порядков момента. Оптимальные значения этих параметров подобраны в работе [9] и имеют следующие значения $P = 75, min = -15, max = 15$.

6. Расчет наклонов

ФОС, вычисленная на предыдущем шаге, сравнивается с эталонной ФОС. Для сравнения ФОС между собой, вычисляется наклон ФОС, полученной для тестируемого двигателя, относительно ФОС, полученной для эталонного двигателя. В данной работе, эталонного двигателя рассматривается исправный АД без нагрузки. Наклоны рассчитываются с использованием линейного метода наименьших квадратов, который является хорошо известным и не раскрывается в данной работе.

7. Сравнение наклонов

На этом этапе вычисленные наклоны сравниваются с заранее определенными значениями, полученными для АД в различных состояниях. На основе этого делается заключение о состоянии испытуемого двигателя.

3. Экспериментальное исследование

3.1 Описание экспериментальной установки

На рис. 1 (а) показаны схема и фотография лабораторного испытательного стенда, используемого для получения экспериментальных данных. Использовались три идентичных АД, запитанных напрямую, без использования частотных регуляторов. Первый АД – исправный; у второго АД в одном из стержней ротора, просверлено отверстие в торцевом кольце рис. 1 (б). В третьем АД оригинальные подшипники были заменены новыми подшипниками с меньшим наружным и большим внутренним диаметром, а эксцентриковые втулки были установлены точно между валом ротора и подшипником, а также между подшипником и корпусом подшипника, чтобы спровоцировать нарушение эксцентриситета рис. 1 (в). Механическая нагрузка

создавалась с помощью синхронной машины с постоянными магнитами, которая управлялась сервоприводом. Ток измерялся токовыми зажимами, измеренные сигналы записывались на цифровой осциллограф. Длительность записанной выборки – 100 секунд, частота дискретизации – 100 кГц. Измерения проводились при следующих уровнях нагрузки АД: без нагрузки (0%), половина номинальной нагрузки (50%) и три четверти номинальной нагрузки (75%) для каждого АД. Используемый двигатель – трехфазный IM Siemens UD 1010/71980410-10, с соединением звездой и номинальными характеристиками: *P=1.5кВт, f=50Гц, U=300В, I=3,25А, n=2860об/мин,* cos*φ=0,85*. Используемая асинхронная машина для нагрузки – асинхронная машина с постоянными магнитами ABB MS4839N4008E43C10 с номинальными характеристиками I_n*=14,4А*, P_n*=4,9кВт*, F_n*=200Гц*, N_n*=3000об/мин*.

(а) (б) (в)

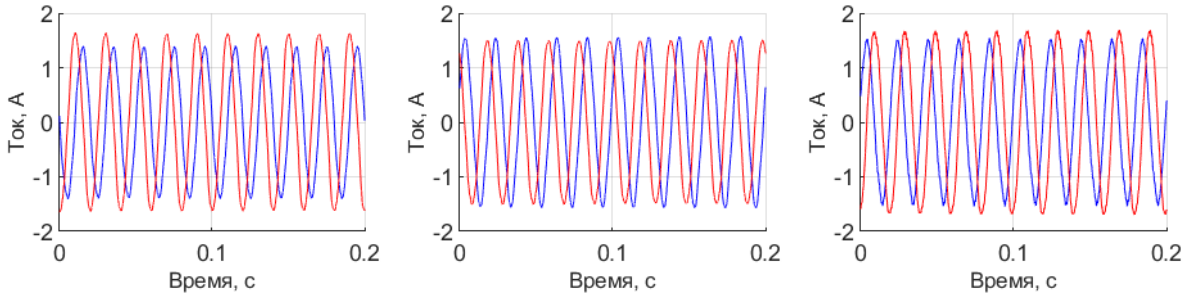
Рис. 1. (а) принципиальная схема лабораторного испытательного стенда, (б) ротор с дефектом в стержне, (в) ротор с эксцентриситетом: a) оригинальный подшипник, b) наружная эксцентриковая втулка, c) внутренняя эксцентриковая втулка, d) новый подшипник, e) втулки и подшипник, установленные на валу ротора

3.2 Диагностика АД без нагрузки с помощью предложенного метода

В предложенном подходе, настраиваемыми параметрами являются коэффициент децимации и временное окно. Временное окно, соответствует минимальной длине выборки, необходимой предложенному алгоритму для диагностики неисправностей. В данной работе, оба этих параметра подобраны эмпирически, обеспечивая компромисс между наименьшими вычислительными затратами и затратами памяти, с одной стороны, и точными результатами диагностики с другой: коэффициент децимации – 100 (результирующая частота $F_{dec} = 1$ кГц), временное окно $T = 0.2$ секунд.

Длина общей выборки измерения, для каждого рассматриваемого двигателя – 100 с. Для оценки эффективности предложенного алгоритма, данная выборка была разделена на отрезки, длина которых равна выбранному временному окну – $T = 0.2$ с. В результате было получено 500 непересекающихся и независимых отрезков. Для каждого такого отрезка был применен предложенный алгоритм.

На рис. 2 показаны токовые сигналы, после α-β преобразования, рассматриваемых двигателей без нагрузки: исправный двигатель, двигатель с дефектом в стержне ротора, двигатель с эксцентриситетом. Следующим этапом предложенного алгоритма является децимация. Децимация применялась к исходным данным с частотой дискретизации $F_{orig} = 100$ кГц. Частота дискретизации после децимации равна $F_{dec} = 1$ кГц. После децимации, к полученным данным применялось БПФ. На рис. 3 показаны полученные спектры. Следующим шагом вычислялись ФОС для ИЧД полученных спектров IFR. На рис. 4 (а), представлены ФОС относительно порядка момента, на рис. 4 (б) показаны наклоны полученных ФОС относительно ФОС, полученной для исправного двигателя без нагрузки.



(а) (б) (в)

Рис. 2. Исходные сигналы, полученные от АД без нагрузки: (а) исправный двигатель, (б) двигатель с дефектом в стержне ротора, (в) двигатель с эксцентриситетом

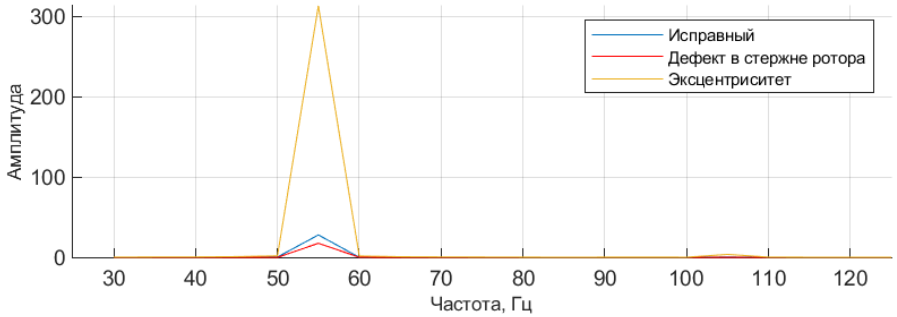
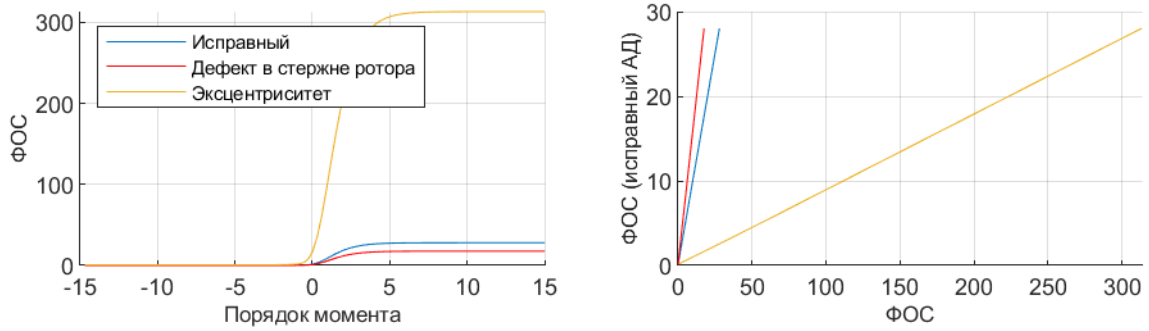


Рис. 3. Отрезки Фурье спектров АД без нагрузки



(а) (б)

Рис. 4. ФОС спектров двигателей без нагрузки. (а) – зависимость ФОС от порядка момента (б) зависимость ФОС исправного двигателя от ФОС всех рассматриваемых двигателей.

3.3. Обнаружение неисправностей при различных уровнях нагрузки

В этом разделе проверяется чувствительность предлагаемого подхода к различным уровням нагрузки. Показано, что метод эффективен и может воспроизводить одни и те же результаты диагностики независимо от уровня нагрузки. Рассматриваются различные уровни постоянной нагрузки: без нагрузки, 50% от номинальной нагрузки, 75% от номинальной нагрузки. Для анализа воспроизводимости подхода, исходные данные были поделены на 500 независимых и непересекающихся частей, которые подвергались обработке, предложенным методом отдельно и независимо, аналогично тому, как это сделано в предыдущем разделе. После обработки данных предложенным методом, получены значения наклонов ФОС для рассматриваемых типов двигателей при различных уровнях нагрузки. Наклоны

рассчитывались относительно ФОС, полученной для исправного двигателя без нагрузки. Полученные наклоны представлены на рис. 5.

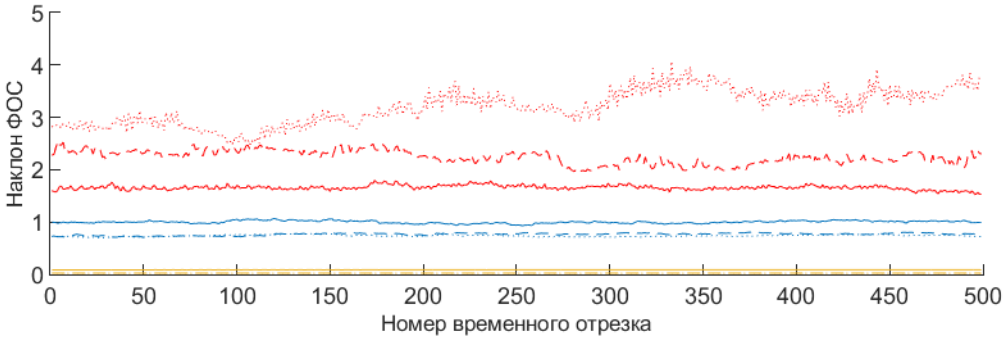


Рис. 5. Наклоны ФОС, полученные для исследуемых двигателей при различных уровнях нагрузки: голубые кривые соответствуют исправному двигателю, красные – двигателю с дефектом в стержне ротора, желтые – двигателю с эксцентриситетом; сплошные кривые соответствуют измерениям без нагрузки, штриховые кривые соответствуют измерениям при 50% нагрузкой, пунктирные – измерениям при 75 % нагрузки

На рис. 5 видно, что данные, полученные для исправного двигателя (голубые кривые), не пересекаются с данными, полученными для двигателя с эксцентриситетом (желтые кривые) и данными, полученными для двигателя с дефектом в стержне ротора (красные кривые). Таким образом данные от разных двигателей можно отличить между собой и соответственно диагностировать состояния двигателя. Результаты показывают, что предложенный подход позволяет точно диагностировать рассматриваемые неисправности, независимо от уровня нагрузки.

Статистические параметры, такие как среднее, минимальное и максимальное значения наклонов, полученных для всех рассмотренных АД, при всех рассмотренных уровнях нагрузки, представлены в таблице 2. Данная таблица может быть использована для принятия решений о состоянии неисправности АД.

Таблица 2. Статистические параметры наклонов ФОС

Тип АД	Среднее значение наклона ФОС	Максимальное значение наклона ФОС	Минимальное значение наклона ФОС
Исправный	0.84	1.07	0.71
Дефект в стержне ротора	2.37	4.07	1.52
Эксцентриситет	0.05	0.09	0.03

4. Заключение

В работе предложен метод обработки токовых сигналов фаз статора для решения задач диагностики и контроля АД. Предлагаемый подход представляет собой комбинацию двух методов: Быстрого Преобразования Фурье (БПФ) и Статистики дробных моментов (СДМ). Результаты показывают, что предложенный подход позволяет обнаружить и выделить все рассматриваемые неисправности: эксцентриситет и дефект в стержне ротора, независимо от уровня нагрузки.

Одной из специфических особенностей предложенного метода является независимость от уровня нагрузки, поэтому ввод дополнительной информация о

скольжении двигателя или частоте вращения ротора не требуется. Такая особенность подразумевает, что возможная автоматическая система обнаружения, основанная на предложенном подходе, имеет меньшую сложность, поскольку не требуется: датчик измерения частоты вращения ротора или ручной ввод этого значения.

Другой особенностью предложенного подхода является то, что необходимая выборка имеет очень малую длину, а именно 0.2 секунды. Кроме того, объем данных, хранящихся для анализа, также мал, поскольку используется децимация. Число точек, используемых для анализа (т.е. количество отсчетов, которые необходимо хранить при выполнении обработки данных) $N = TF_{dec} = 0.2 \cdot 1000 = 200$. Количество вычислений значительно сокращено по сравнению с методом в [9], поскольку для анализа используется отрезок Фурье спектра, определяемый ИЧД. Разработанный подход, имеет низкую вычислительную сложность и требует малый объем памяти, может быть реализован его во встраиваемых системах, для мониторинга технического состояния АД.

Список литературы: 1. P. Waide and C. Brunner, «Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems,» *IEA Energy Papers,* 2011. **2.** Jee-Hoon Jung, Jong-Jae Lee, and Bong-Hwan Kwon, "Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS,* vol. 53, no. 6, pp. 1842-1852, 206. **3.** El Houssin El Bouchikhi, Vincent Choqueuse, Mohamed Benbouzid, "Induction Machine Diagnosis using Stator Current Advanced Signal Processing," *International Journal on Energy Conversion,* vol. 3, no. 3, pp. 76-87, 2015. **4.** D. Morinigo-Sotelo, R. de J. Romero-Troncoso, P. A. Panagiotou, J. A. Antonino-Daviu and K. N. Gyftakis, «Reliable Detection of Rotor Bars Breakage in Induction Motors via MUSIC and ZSC,» *IEEE Transactions on Industry Applications,* т. 54, № 2, pp. 1224-1234,, 2018. **5.** A. Sapena-Bano, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, Z. Kanovic, «Low-cost diagnosis of rotor asymmetries in induction machines working at a very low slip using the reduced envelope of the stator current,» *IEEE Trans. Energy Convers,* т. 30, № 4, pp. 1409-1419, 2015. **6.** S. Sbaa, N. Bessous, R. Pusca and R. Romary, «A comparative study dedicated to rotor failure detection in induction motors using MCSA, DWT, and EMD techniques,» *International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2020,* pp. 1-11, 2020. **7.** S. M. K. Zaman, X. Liang and W. Li, «Fault Diagnosis for Variable Frequency Drive-Fed Induction Motors Using Wavelet Packet Decomposition and Greedy-Gradient Max-Cut Learning,» *IEEE Access,* т. 9, pp. 65490-65502, 2021. **8.** W. Dehina, M. Boumehraz and F. Kratz, «Diagnosis and Detection of Rotor Bars Faults in Induction Motor Using HT and DWT Techniques,» *18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD),* pp. 109-115, 2021. **9.** A. L. Morozov, R. R. Nigmatullin, P. Lino, G. Maione, S. Stasi, "An Improved Nonparametric Method for Fault Detection of Induction Motors Based on the Statistics of the Fractional Moments," *Conference on Control Technology and Applications (CCTA),* pp. 386-391, 2018. **10.** R. R. Nigmatullin, «The statistics of the fractional moments: Is there any chance to “read quantitatively” any randomness?,» *Journal of Signal Processing,* т. 86, p. 2529–2547, 2006. 11. R. R. Nigmatullin, C. Ceglie, G. Maione, D. Striccoli, «Reduced fractional modeling of 3D video streams: the FERMA approach,» *Nonlinear Dynamics,* т. 80, № 4, p. 1869–1882, 2015.

МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Набокин В.Н., Степанова Е.А. *(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)*
Тел. +7(914)6221790; e-mail: len_sta@rambler.ru; oliberprod@yandex.ru

Abstract: *Methods for enhancing oil recovery are presented, new methods for enhancing oil recovery are considered.*
Key words: *oil, field development, enhanced oil recovery, method, technology.*

Средняя нефтеотдача составляет 30…40%, извлекается только 45% от общего количества природного ресурса. Увеличение нефтеотдачи —эффективный инструмент освоения трудноизвлекаемых запасов и повышения добычи.

Различают 6 методов:

- тепловые методы – термическое воздействие на пласты в месторождениях:, паротепловое воздействие, вытеснение нефти из пластов горячей водой, а также внутрипластовое горение;
- газовые методы – закачка воздуха в пласты, воздействие углеводородом, дымовыми газами;
- гидродинамические методы –циклическое заводнение, форсированный отбор жидкости, ступенчато-термальное заводнение и использование недренируемых запасов;
- химические методы –подразумевают применение целого ряда методов, которые направлены на вытеснение нефти при помощи воды, щелочи, кислоты, растворов полимеров, а также микробиологического воздействия;
- комбинированные методы улучшения нефтеотдачи – сочетают несколько методов – тепловые и гидродинамические, физические и химические.
- расширение дебита скважин – физические методы: гидроразрывы пластов, горизонтальные скважины, форсированный отбор жидкости. Эти методы являются временной мерой, позволяя некоторое время получать больше нефти.

К новым технологиям относят технологию сшитых полимерных систем и применение эмульсионных систем. Рассмотрим их кратко.

Технология сшитых полимерных систем. Временное тампонирование пропластков разреза, обладающих высокой проницаемостью. Достигается снижение расхода воды через промытые высокопроницаемые слои при высоких темпах выработки нефтяных запасов, а также уменьшение дебита жидкости и увеличение давления на пласт в эксплуатационных скважинах. Результат – увеличение зоны охвата нефтеносных пластов, что, позволяет увеличить объемы добываемой нефти.

Применение эмульсионных систем – в пласт посредством нагнетательных скважин закачиваются специальные эмульгаторы. Это способствует их гидрофобизации, снижается фазовая водопроницаемость обводненных участков нефтяного коллектора, происходит перераспределение нагнетаемого водного потока и, соответственно, приток воды в ствол добывающей скважины ограничивается. Отдача нефти повышается.

Разработка новых технологий является залогом решения проблемы повышения нефтеотдачи пласта на поздних стадиях разработки месторождения.

Список литературы: 1. Брагинский О.Б. Нефтегазовый комплекс мира – М.: Издво «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2006. – 640 с. **2.** Методы и способы повышения нефтеотдачи [Электронный ресурс]. – URL: https://www.neftegaz-expo.ru/ru/articles/sposoby-povysheniya-nefteotdachi/ (дата обращения: 26.05.2021). **3.** Гумерова Г.Р., Яркеева Н.Р. Технологияприменения сшитых полимерных составов [Электронный ресурс]. – URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2017/ogbus_2_2017_ p63-79_ GumerovaGR_ru.pdf (дата обращения: 26.05.2021).

УДК 621.7/.8.001.57.4

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Надуваев В.В., Фролов Е.Н. *(БГТУ, г. Брянск, Россия)*
Тел/факс:(4832) 588-220; E-mail tm.bgtu@andex.ru

Abstract: *The analysis of model types, as well as the design sequence for production systems operating in real production conditions in the machine-building complex is Presented.*
Key words: *models, systems, stages, design stages, planning, performance criteria, structures.*

Главным и основным признаком моделей по определению должен быть признан вид подобия модели и объекта. Однако, видов подобия может быть бесчисленное множество, поэтому предложить всеобъемлющую и в тоже время обозримую классификацию по одному признаку практически невозможно.

По этой причине в основу первичной классификации моделей чаще всего закладывают другой признак, а именно – «способ представления объекта». Это объясняется тем, что каждому виду подобия свойственен один или несколько способов представления объекта. Эти способы в определенной мере отражают и само подобие. Но в отличие от последнего, они повторяются, их количество ограничено, и они хорошо поддаются группированию. Это и используется для классификации, которая представлена на рис. 1.

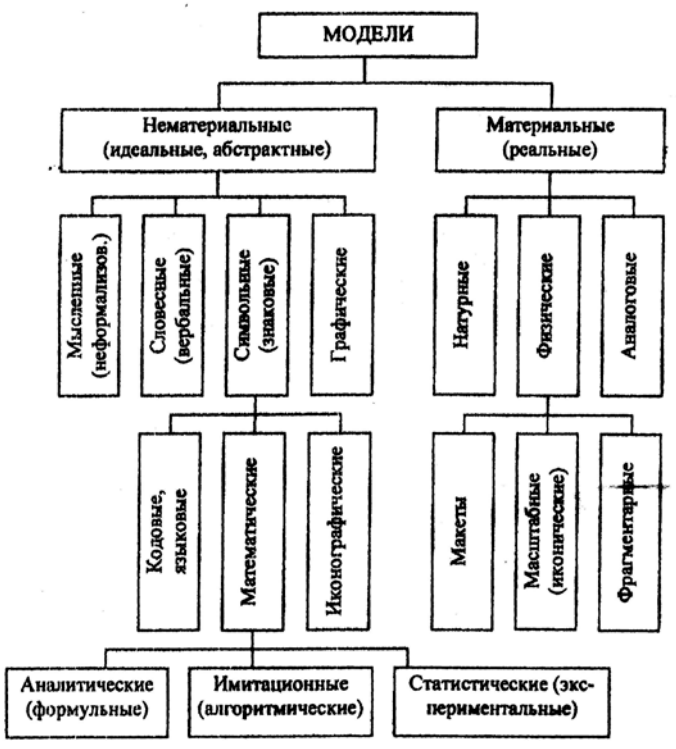


Рис. 1. Классификация видов моделей

В иерархии производственных систем (ПС) принято выделять следующие структурные уровни: предприятие, цех, участок, рабочее место, технологическое

оборудование. Естественно, что ключевое место в этой иерархии занимает участок и нижестоящие уровни, то есть обрабатывающие ПС, в которых предметы производства имеют исходное состояние в виде цельных заготовок.

При этом рассматривать целесообразнее всего механообрабатывающие ПС, как наиболее распространенные, однако их модели при соответствующей интерпретации будут пригодны и для других обрабатывающих ПС, для изготовления деталей путем соединения частей (сварка), а также путем образования из жидкой фазы (литье, полимеризация) с точки зрения имитационного моделирования. Обрабатывающие ПС преобразуют предметы из состояния заготовок в состояние деталей требуемого качества, в нужном количестве и разнообразии, с заданными затратами регламентированных ресурсов. Ресурсы могут быть финансовыми, временными, материальными, трудовыми, энергетическими, информационными. На рис. 2 представлены различные виды ПС.

Рис.2 Эффективность различных ПС

Качество изготовления при моделировании также необходимо учитывать, в виде процента брака, т.е. дополнительных работ по исправлению или восстановлению бракованных деталей.

Структуры моделей функционирования различных систем можно представить следующим выражением:

$$Y(t)=F(X, Z, A, E, U, t), \quad (1)$$

где: Y – вектор выходных характеристик; X – вектор входных воздействий; Z – вектор собственных внутренних воздействий; A – вектор внутренних параметров; E – вектор возмущающих воздействий внешней среды; U – вектор управляющих воздействий; t – время.

Вообще модель должна строится под определенную задачу, а не воспроизводить ПС с учетом различных многообразных нюансов. Ошибкой является попытка моделировать ПС во всех подробностях, полагая, что от этого модель становится совершеннее, т.к. приближается к оригиналу.

Системный подход предусматривает всестороннее рассмотрение объектов с учетом их целостности. Для обеспечения такого учета модель ПС сама должна быть единой. Но, с другой стороны, одна модель не в состоянии обеспечить всестороннее

рассмотрение, т.к. по определению отражает только часть свойств. Даже если предположить, что все же удалось создать такую всеобъемлющую супермодель, то она окажется практически бесполезной, т.к. будет столь же сложной в изучении, как и сама система. Выход заключается в использовании для анализа сложной ПС системы нескольких взаимодополняющих моделей, т.е. моделирующего комплекса (МК).

Первичным признаком классификации МК должен быть признан вид специализации его моделей. Чаще всего модели МК для ПС специализируются по анализируемым аспектам. Обязательно оценивается баланс между временем, требуемым плановыми работами, и временем, которым фактически располагает ПС. Часто включаются модели для оценки эффективности инструментального обеспечения или обслуживания персоналом. В зарубежных МК очень часто присутствует экономический аспект в явном виде.

Комплексы модели, которые выполняют помимо функций собственно моделирования дополнительно еще какие-нибудь, называются гибридными. Такими функциями могут быть планирование модельного эксперимента, оптимизация, принятие решений, заочная или интерактивная экспертная поддержка и пр. В гибридных МК широко используются технологии искусственного интеллекта (экспертные системы, генетические алгоритмы, нейронные сети, нечеткие множества и пр.).

Как правило, настройка на объект и формирование нужной конфигурации МК носит не однократный, а итерационный характер. Более того, ставится вопрос о необходимости постоянного самосовершенствования модели уже в процессе эксплуатации по мере накопления новых знаний, полученных, в том числе и от самой модели. В этом случае говорят об эволюционном моделировании. Перечислим требования к моделям эволюционной системы (рис. 3):

– использовать единый формат информационной среды;
– обмениваться знаниями и данными;
– допускать легкую настройку на конкретные условия;
– использовать результаты работы друг друга;
– допускать динамическую модификацию в процессе эксплуатации знаний и данных об объекте.

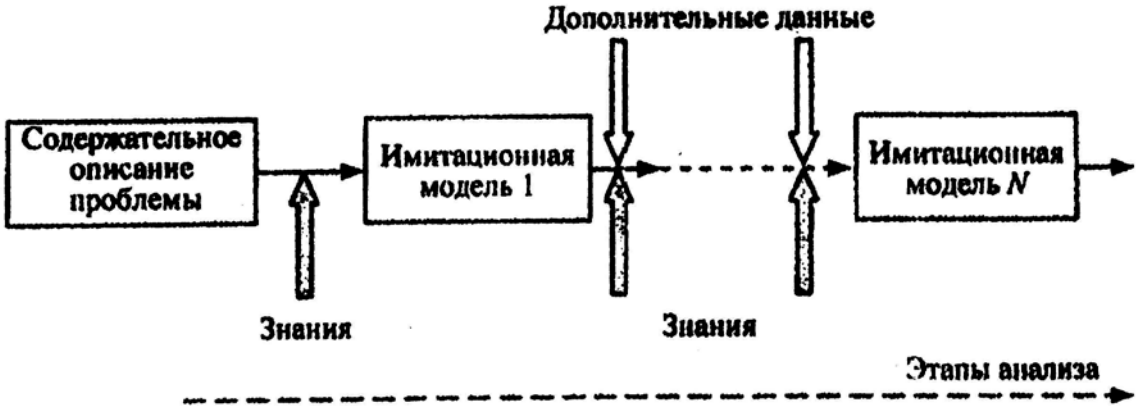


Рис. 3. Эволюция моделей в процессе анализа сложной системы

Несмотря на объективную необходимость МК и их распространение сдерживается рядом факторов, а именно:

– сложностью и трудоемкостью в разработке;

– ограниченной универсальностью;

высокими требованиями к подготовке пользователя

Подход совершенно оправдан для частных случаев, но не обеспечивает общности и полноты охвата всех существующих и перспективных технических решений. Кроме того, он не предоставляет способа однозначной последующей детализации.

А между тем, имеется способ однозначной, исчерпывающей и не избыточной декомпозии структуры ПС, который не должен вызывать возражений, в силу своего общефилософского характера. Действительно, трудно оспорить, что любое производство содержит предмет труда, орудие труда и человека. Очевидно также, что природу любого объекта определяют три фундаментальные категории: материя, энергия и информация. В свою очередь, каждой из этих категорий присущ один и тот же набор базовых функций (процессов, действий): преобразование, передача, прием-выдача. хранение.

Однако, в структурах ПС работ отсутствует отражение в явном виде и детализация самого главного элемента, того элемента, ради которого ПС собственно и создаются – предметов труда. И если наличие главных объектов воздействия (деталей) конечно подразумевается, то основные и вспомогательные объекты воздействия из рассмотрения выпадают полностью или же не находят себе однозначного места. Например, не понятно, к какому типу структурных элементов должна относится позиция подготовки спутников в ПС типа участка, или, чем будут отличаться в структуре разные транспортные средства, предназначенные соответственно для деталей, оснастки и стружки. Точно так же участие человека предусматривается в качестве возможного средства воздействия только на детали (преобразование, загрузка, транспортирование)

Отсутствие в структуре ПС объектов воздействия, как самостоятельных и детализируемых элементов, ведет к явному нарушению принципов учета целостности и связности при рассмотрении сложных систем.

Остается открытым вопрос: куда следует отнести средства контроля качества деталей. Если контроль выступает самостоятельной операцией и осуществляется на отдельном рабочем месте, то он должен быть причислен к преобразованию. Действительно, измерения и отбраковка и есть преобразование детали, только рассматривается изменение не физического состояния, а информационного. Дискретно изменяется статус детали: от объекта с неизвестными характеристиками, возможно даже, что это заготовка, не прошедшая запланированную обработку по каким-либо причинам – к годной детали или браку. Для сборки совершенно безразлично, по какой причине деталь не готова: потому что еще не обработана или потому что неизвестно была ли обработана и надлежащим ли образом. В случае, если контроль осуществляется внутри операции преобразования, то его и не следует из нее выделять. Аналогичный подход нужно применять так же к средствам ориентирования, мойки.

Принципы и правила функционирования ПС отличаются большим разнообразием, изменчивостью в процессе работы, неполной формализацией. Именно это обстоятельство вынуждает прибегать в наиболее совершенных моделях ПС к экспертным системам и другим технологиям искусственного интеллекта.

Система показателей ПС в комплексной модели должна включать:

- выходные показатели функционирования;
- внутренние показатели для межмодельного обмена.

В свою очередь, выходные показатели должны отражать выполнение заданных показателей назначения ПС и достигнутые при этом показатели эффективности.

Кроме того, для детального анализа работы ПС требуется раскладка показателей на составляющие и идентификация их отдельным элементам ПС. Внутренние показатели определяются частными моделями и должны отражать результирующее действие анализируемых ими аспектов и работу других частных моделей.

Для всех частных моделей и для данного периода моделирования единственным общим и неизменным компонентом в структуре фонда времени оборудования и деталей является суммарное время обработки Тшт, которое заключено в плановых заданиях. Тогда систему поправочных показателей можно представить следующим образом:

$$F_i = \sum T_i / \sum T_{шт}\ , (F_i \geq 0\ ,\ \sum F_i > 1), \qquad (2)$$
$$F_{Дj} / \sum T_{шт}\ , (F_{Дj} \geq 0\ ,\ \sum F_{Дj} > 1),$$

где F_i и $F_{Дj}$ – приведенные коэффициенты нахождения основного технологического оборудования (ОТО) и детали в различных состояниях;

$\sum T_i$ – суммарное время нахождения ОТО в ***i*** состоянии за период *Т* ($T_ф$ *или* $T_{вып}$);

$\sum T_Д$ – суммарное нахождение детали в ***i*** состоянии (обработка, транспортирование) за время производственного цикла.

Физический смысл приведенного коэффициента F_i для ОТО: время простоя, приходящееся на каждую единицу машинного времени работы. При этом продуктивное состояние обработки также представляется приведенным коэффициентом с постоянным значением F_i =1.

Физический смысл приведенного коэффициента $F_{Дj}$ для детали: непроизводительное время (пролеживание, транспортировка, загрузка), приходящееся на каждую единицу машинного времени обработки.

При разработке имитационной модели ПС первостепенное значение имеет не выбор метода и математического аппарата, а так же тщательная проработка постановочной части.

Разработка имитационной модели ПС должна вестись поэтапно. Начинать нужно с простой модели и постепенно ее усложнять – добавлять факторы, элементы, состояния и переменные, переводить константы и параметры в переменные, заменять детерминированные величины случайными, снимать ограничения, отказываться от допущений и т.д.

Для объектов, относящихся к категории сложных систем, к каковым относятся и ПС, имитационное моделирование объективно необходимо, что обусловлено их сложностью, высокой стоимостью, уникальностью и недоступностью для натурального эксперимента. [1]

Список литературы: 1. Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н. Характеристика моделируемых производственных систем в машиностроении. – Тезисы межд. н/т конф. «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь, 2019, с 6-9.

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕСТЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ШТУЦЕРА МАЛОГО ДИАМЕТРА С ОБЕЧАЙКОЙ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА

Нгуен Ван Ань, Москалев Л. Н., Поникаров С. И. *(КНИТУ, г. Казань, Республика Татарстан, Россия)*
Тел./Факс: +7 (432)31-42-41; E-mail: lejnya@yandex.ru

Abstract: *The article presents the results of numerical experiments for calculating the strength of the joints of the nozzles with the shell. It was found that small diameter fittings, relative to the apparatus body, have rather large equivalent stresses. Which significantly affect the strength characteristics of this connection. A numerical experiment is set up for welded joints that are influenced by the simultaneous effect of temperature and pressure, for example, in cases of emergency situations: fires or a sharp hit into a stream of hot medium.*
Key words: *shell, fitting, thin-walled shells, equivalent stresses, strength characteristics*

Ведение. Во многих сферах промышленности, например в газовой, в химической, в строительстве, в машиностроении и т.д. находят частое применение такой элемент, как обечайка. Обечайка это деталь в основном с формой цилиндра или конуса, сечение которой имеет вид кольца. Она является составным элементом, узлом конструкции, либо заготовкой, например труба, корпусы колонного, теплообменного, реакторного и другого технологического оборудования.

Любой сосуд или аппарат в промышленности состоит из обечайки, крышки, днища и штуцеров, которые необходимы для подвода или отвода сырья-продукта, а также для установки средств измерений или автоматизации технологических процессов. Кроме того, сосуды и аппараты, применяемые в промышленности делятся на тонкостенные и толстостенные. Считаются, что тонкостенным является сосуд при толщине стенки до 36 мм. включительно [1]. Иначе говоря, эта инженерная конструкция является оболочкой в виде пересечения двух и более цилиндров.

Однако в месте соединения штуцера с обечайкой возникают напряжения от действия давления и/или температуры как рабочих так и от окружающих конструкцию сред влияющих на прочностные характеристики оборудования и соответственно на безопасность и экономику предприятия. Таким образом, в настоящее время важной и непростой задачей является исследование этих напряжений в местах пересечений двух цилиндров, место таких пересечений являются пространственными кривыми. А объектом этого исследования являются напряжения, возникающие от одновременного воздействия нагрева и давления на соединения штуцера малого диаметра с обечайкой, а именно пересечение штуцеров, размер которых составляет до 25% от диаметра обечайки. Конструктивные исполнения этих соединений описаны в литературе [2, 3]. По существующим методикам из нормативно-технической документации проведение расчетов напряжений для таких соединений возможно лишь при условии воздействия на них либо избыточного давления, либо температуры [1]. Поэтому значительный интерес этих исследований, заключается в расчетах напряжений в сварных соединениях при одновременном воздействии температуры и давления. Эти напряжения могут возникать в случае аварийных ситуаций связанных с резким повышением температуры из-за пожара вблизи сосудов работающих под давлением или резкого попадания в струю горячей среды.

Исследователи прошлого и настоящего столетия рекомендуют проводить расчет этих соединений на прочность с применением метода конечных элементов, описанного в различной литературе, в том числе [1, 4-8].

Постановка задачи. Математические модели для определения напряжений в соединениях тонкостенных оболочек при воздействии на них температуры до 800°С или допустимого для металла давления, методом конечных элементов, приведены в литературе [9-16]. Для анализа напряженно-деформируемого состояния узла «обечайка-штуцер» под влиянием на него нагрева и давления строилась модель в программном комплексе ANSYS R17.0 (учебная версия).

Таким образом, основной задачей этого исследования является расчет эквивалентных напряжений в сварных соединениях при одновременном воздействии на них нагрева и давления.

Математическая модель и граничные условия. Расчет напряженно-деформированного состояния системы «обечайка-штуцер», где внутренний диаметр обечайки составляет 1600 мм., а диаметр штуцера менялся в пределах 10-25% диаметра обечайки. Анализ напряжений в рассматриваемом узле при нагреве штуцера до T_1 = 800 °С (патрубок $l_2/2$) проводился на геометрической модели конструкции штуцер-обечайка представленной на рис.1. Сеточная модель и её построение для применяемого программного пакета описаны в литературе [10, 14].

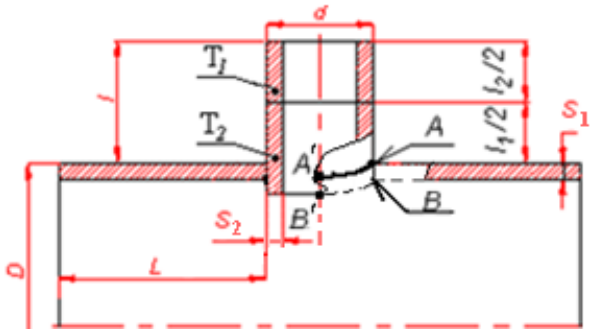


Рис. 1. Геометрия узла штуцер-обечайка

Геометрические параметры:

$$\frac{d}{D};\quad \frac{S_1}{D};\quad L=\frac{D}{2};\quad \frac{L}{D};\quad \frac{D}{l}.$$

где: D = 1600 мм. - диаметр обечайки
d / D = 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 - отношение диаметров штуцера к обечайке;
L / D = 0.5 - отношение расстояния от края обечайки до края штуцера к диаметру обечайки;
D / l - отношение диаметра обечайки к длине вылеты штуцера, где l = d, 1.5·d;
S_1 / D = 0.0100 - отношение толщины обечайки к её диаметру;
S_1 / S_2 = 1.00 - отношение толщины стенки штуцера к толщине стенки обечайки.

Граничные условия:

- в начальный момент времени температура обечайки (T_2) и первой половины патрубка $l_1/2$, (рис. 1) составляет 20^0С. Время анализа напряжений составляет 5 минут (0-300 секунд). Параметры рабочей среды (газа) подаваемой в узел:

1. Температура половины патрубка (T_1) $l_2/2$: $t_{раб}$ = 800°С;
2. Коэффициент теплопередачи: k = 160 (Вт/мм^2.К);
3. Давление рабочей среды – является допустимым давлением для материала из которого построено соединение «штуцер-обечайка», а именно 09Г2С.

- физико-механические свойства стали 09Г2С в зависимости от температуры принимались на основе литературных данных [17] и путем экстраполяции.

ν = 0.28 - коэффициент Пуассона;
λ = 60,5 Вт/(м·К) - коэффициент теплопроводности;
c = 434 Дж/(кг·К) - удельная теплоемкость.

Результаты и обсуждения. При влиянии высокой температуры с избыточным давлением на соединение штуцер-обечайка, происходит изменение структуры металла. В этом исследовании нагрев соединения осуществлялся за счет передачи тепла от

патрубка T_1 с температурой 800 °С к патрубку T_2 с одновременным воздействием избыточного давления на в течении 5 минут. Результаты численных экспериментов в программном комплексе ANSYS R17.0 отображены на рисках 3 и 4 (рис. 3 – напряжение на внешнем пересечении со временем, т.А и рис. 4 – напряжение на внутреннем пересечении со временем, т. В). Макси-мальные значения эквивалентных напряжений в месте соединения штуцера с обечай-кой в зависимости от геометрических характеристик соединения «штуцер-обечайка» и силовых нагрузок действующих на металл при нагреве сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Максимальные значения эквивалентных напряжений в месте соединения штуцера с обечайкой в зависимости от различных характеристик

Наименование	Место пересечения	Отношение диаметров штуцера к обечайке - $^{d}/_{D}$			
		0.10	0.15	0.20	0.25
$t_{раб}$, °С		800	800	800	800
$P_{изб}$, МПа		1.305	1.195	1.035	0.99
σ_t	Снаружи, т.А	132.1	77.179	74.151	99.696
	Внутри, т.В	230.03	153.95	125	196.97
σ_p	Снаружи, т.А	100.73	88.209	163.27	154.09
	Внутри, т.В	163.1	163.28	93.721	163.69
σ_{t+p}	Снаружи, т.А	168.12	146.53	111.63	166.3
	Внутри, т.В	263.38	189.47	164.23	163.51

*-σ_{t+p} - суммарное напряжение в пересечении тонкостенных оболочек от одновременного воздействия температуры и давления рабочей среды (газа), МПа.

По результатам из таблицы 1 видно, что максимальные эквивалентные напряжения от одновременного воздействия нагревания и избыточного давления на соединение «штуцер-обечайка» уменьшаются при увеличении диаметра штуцера.

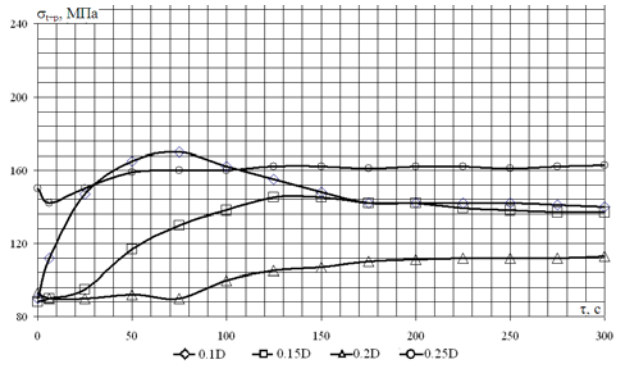


Рис. 2. Наибольшее эквивалентное напряжение на внешнем пересечении со временем, т.А

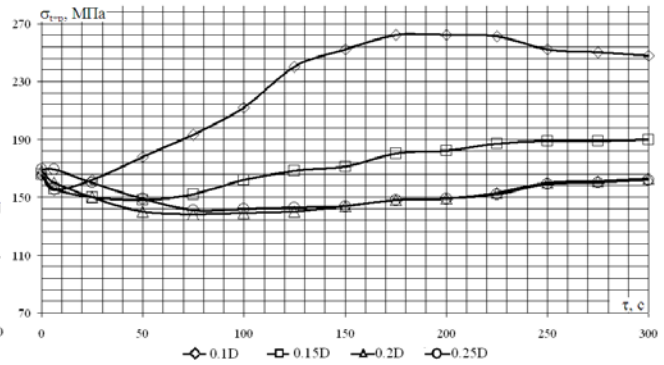


Рис. 3. Наибольшее эквивалентное напряжение на внутреннем пересечении со временем, т.В

Графики (рисунок 3 и 4) показывают, что эквивалентные напряжения внутри или снаружи соединения стремительно растут в различных временных диапазонах:

- эквивалентные напряжения на внешнем пересечении, т.А (рисунок 3) в не зависимости от диаметра штуцера увеличиваются в диапазоне от 0 до 150 секунд, далее напряжения стабилизируются;

- эквивалентные напряжения на внутреннем пересечении, т. В (рисунок 4) возрастают плавно на протяжении всего численного эксперимента. Однако при размере

штуцера соответствующего 10% от диаметра обечайки напряжения резко возрастают в первые 200 секунд от начала численного эксперимента. Такие эквивалентные напряжения могут привести к потери прочности, а следовательно к разрушению штуцера.

Заключение

1. Максимальные эквивалентные напряжения из-за одновременного влияния температуры и избыточного давления стремительно возрастают при уменьшении диаметра штуцера относительно обечайки. Таким образом, штуцеры с относительно малыми диаметрами являются слабым местом обечайки;

2. Эквивалентные напряжения в металле являются значительными в первые 100–200 секунд от начала воздействия нагрева и силовых нагрузок на конструкцию пересечения двух тонкостенных оболочек.

3. Очевидно, что одновременное воздействие температуры и избыточного давления на пересечение тонкостенных оболочек, например при попадании в струю горячей среды, должны учитываться при конструировании и расчете элементов оборудования.

Список литературы: 1. Берлинер Ю.И., Балашов Ю.А. Технология химического и нефтяного аппаратостроения М.: Машиностроение, 1976. – 256 с. 2. ГОСТ 34233.3-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. 3. РД 26-18-8-89. Сварные соединения приварки люков, штуцеров и муфт. Основные типы, конструктивные типы и размеры. Singiresu S. Rao. The finite element method in engineering. Fourth edition. Elsevier Science & Technology Books, Miami, - 2004, 658 c. Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu, Introduction to Finite Elements in Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 2002, 473 c. Харламов И.Е. Возможная эксплуатация емкостного оборудования с технологическими дефектами на нефтегазохимическом производстве / И.Е. Харламов, С.И. Валеев, В.А. Булкин // Вестник технологического университета. – 2015 – Т. 18 – № 22 – С. 82-83. Валеев С.И. Прочность элементов оборудования длительное время находящегося в эксплуатации / С.И. Валеев, Н.В. Пластинкин // Фундаментальные основы механики.-2018.-№3.-С.129-130. Шакирова Ю.И. Эксплуатация технических устройств (сосудов и аппаратов) с дефектами типа расслоение / Ю.И. Шакирова, С.И. Валеев, В.А. Булкин // Вестник Казанского технологического университета.-2012.-Т.15.-№ 16.-С 157-158. L. R. Herrmann, D. M. Campbel, AIAA Journal, 6, 10 c.141-147 (1968). Москалев Л.Н. Компьютерное моделирование температурных напряжений в технологических сосудах в местах врезки штуцеров в SOLIDWORKS / Москалев Л.Н., Нгуен Ван Ань, Поникаров С.И., Поникарова И.Н. // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22. № 7. С. 144. Daryl L. Logan, A First Course in the Finite element Method. Cengage Learning,6th Edition, 2017. C. 727. T. Ahmad, M. A. Khan and D. Redekop, Transactions SMiRT, 5, 19, 1-8 (2007). Nilam B. Bankar, P. Swaminathan & M.S.Lohate, IJIR, 2, 9, c.41-49 (2016). Москалев Л.Н. Влияние нестационарных режимов нагружения сосудов на прочность в местах соединения штуцера с тонкостенной оболочкой / Москалев Л.Н., Нгуен В.А., Поникаров С.И. // МНТК «ИМТОМ - 2019». Материалы X Международной научно-технической конференции. Казань, 2019. С. 83-86. Vijayraj g Parmar, D. S. Shah, IJAPME, 2, 3, c.16-24 (2016). Andrade, Tatiana Lima et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications, 5, 9, c.84-91 (2015). ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПОДШИПНИКА БУКСОВЫХ УЗЛОВ С АДАПТЕРАМИ

Невмержицкая Г.В. *(БГТУ, г. Брянск, Россия)*
Тел./Факс: 89605649682; E-mail: galka_nevm@mail.ru

Abstract: *The estimate of durability of the two-row conical roller bearing for two variants of car axle-boxes with adapter is given by the method of statistical testings. The work on stress of the parts of bearing is carried out, variable loading on the axle-box are taken into account. The spreading surfaces of normal efforts on the bearing's bodies of rolling from vertical forces in the range of 40 – 192 (kN) with the help of the numerical method using three-dimensional analytical models. The blocks of stress of the bearing's parts when the carriage moves at different speeds are obtained.*

Key words: *three-dimensional design circuits, load distribution over axle box bearing rolling bodies, particulate and mixed loading blocks of bearing roller, reliability of car axle box bearing.*

В работе представлены результаты исследования буксовых узлов грузовых вагонов нового поколения с применением трехмерных конечноэлементных расчетных схем. В качестве объектов исследования выбраны два буксовых узла: узел с жестким опиранием рамы тележки на адаптер и узел с опиранием рамы тележки на адаптер через амортизатор.

Для расчетов использован программный комплекс DPMFEM с блоком решения контактных задач RSFEM [1]. При построении конечноэлементных схем деталей буксовых узлов их геометрические модели использованы без существенных упрощений. В расчетных схемах были использованы 6- и 8- узловые конечные элементы.

В качестве контактных поверхностей в расчетных схемах рассмотрены внутренняя поверхность корпуса буксы, внешняя поверхность наружного кольца подшипника, а также поверхности роликов и контактирующие с ними поверхности колец. Условия контактного взаимодействия колец подшипника и оси не рассматривались.

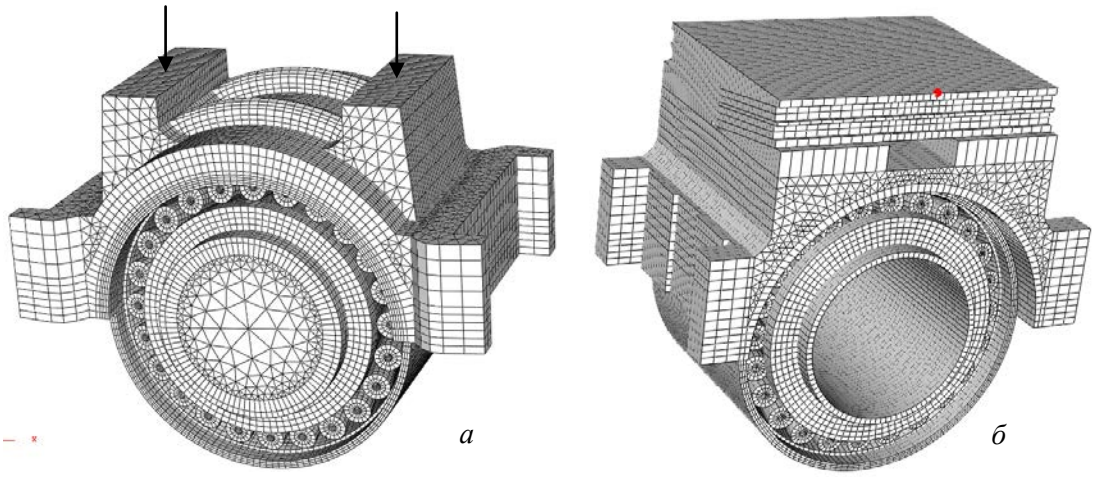


Рис. 1. Конечно-элементные схемы буксовых узлов:
а) - с адаптером; б) - с адаптером и амортизатором

Для обоих вариантов буксовых узлов использованы одинаковые конечноэлементные схемы подшипников и оси колесной пары. Для обеспечения сопоставимости результатов расчетов в качестве буксового подшипника использован двухрядный конический подшипник ВПЗ-15 с числом роликов 24 в каждом ряду и углом контакта 10°.

Расчетные схемы двух рассматриваемых вариантов букс показаны на рис. 1.

Расчетная схема всего буксового узла с адаптером содержит 133086 конечных элементов и 135284 узла; буксового узла с адаптером и амортизатором, соответственно, 143802 конечных элементов и 144500 узлов.

Расчёты выполнены при вертикальных нагрузках на буксу 40, 60, 80, 100, 116, 136, 156, 176 и 192 кН. Диапазон изменения нагрузок определён по результатам компьютерного моделирования движения гружёного и порожнего полувагона с различными скоростями. Динамика компьютерной модели вагона была исследована с помощью программного комплекса Д.Ю. Погорелова "Универсальный механизм".

Среди прочих результатов интерес представляет распределение давлений на поверхностях контакта корпуса букс и наружных колец подшипников (рис.2).

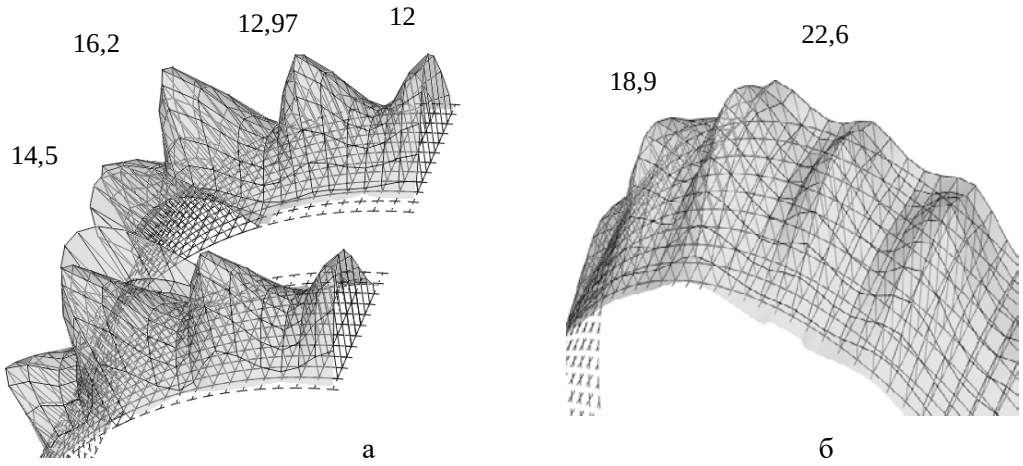


Рис. 2. Эпюры контактных давлений (МПа) на поверхности корпусов букс: а) - с адаптером;б) - с адаптером и амортизатором

Эпюры давлений в контакте адаптера с наружными кольцами подшипника для первого варианта буксового узла характеризуются следующими особенностями. На эпюрах чётко прослеживаются повышенные давления напротив роликов подшипника. Между ними давления снижаются. Соотношение давлений между вершинами и впадинами эпюр достигает 3,5. Наибольшее давление наблюдается над третьим сверху роликом. Над верхним роликом оно на 27% меньше. При нагрузке на буксу 116 кН, максимальное давление составляет 16,2 МПа.

Для варианта буксового узла с амортизатором эпюры давлений в контакте адаптера с наружными кольцами подшипника имеют более плавный характер, соотношение давлений между вершинами и впадинами эпюр снижается. Зато значения экстремальных давлений повышаются, в среднем, на 25-30%. Наибольшее давление наблюдается над верхним роликом подшипника и при нагрузке на буксу 116 кН составляет 22,6 МПа.

В расчётах варьировался радиальный зазор в контакте адаптера и наружного кольца подшипника. Рассмотрены варианты с нулевым зазором и равным 0,145 мм.

Получены законы распределения нагрузок на ролики подшипника для всего диапазона изменения вертикальных сил. На рис. 3 приведены поверхности распределения нормальных усилий N в зоне контакта наружного кольца подшипника и роликов обеих букс.

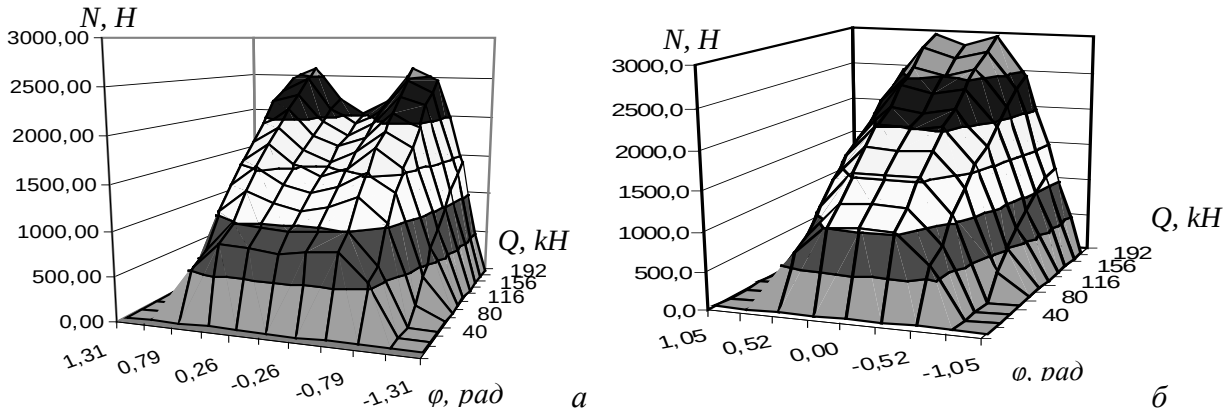


Рис.3. Поверхности распределения максимальных нормальных усилий N на тела качения буксовых узлов: а) - с адаптером; б) - с адаптером и амортизатором

Для буксы с адаптером характер этих законов во всем диапазоне варьирования нагрузки на буксу не меняется. Получены определенно выраженные двухмодальные законы распределения нагрузок на ролики (рис.3а). Наибольшая нагрузка приходится на третий ролик при отсчете от вертикальной оси подшипника. При отсутствии зазоров в корпусе нагруженными оказываются– 7-9 роликов; угол охвата нагруженных роликов составляет 90 - 120˚. Зазор в сопряжении адаптера с наружным кольцом подшипника существенно влияет на распределение нагрузок на ролики. Так, при номинальной нагрузке 116 кН в случае отсутствия зазора на наиболее нагруженный ролик приходится 10,55 кН, а при зазоре 0,145 мм – 12,93 кН. При наличии зазора в контакт попадают лишь 7 роликов, и угол охвата составляет 90^0.

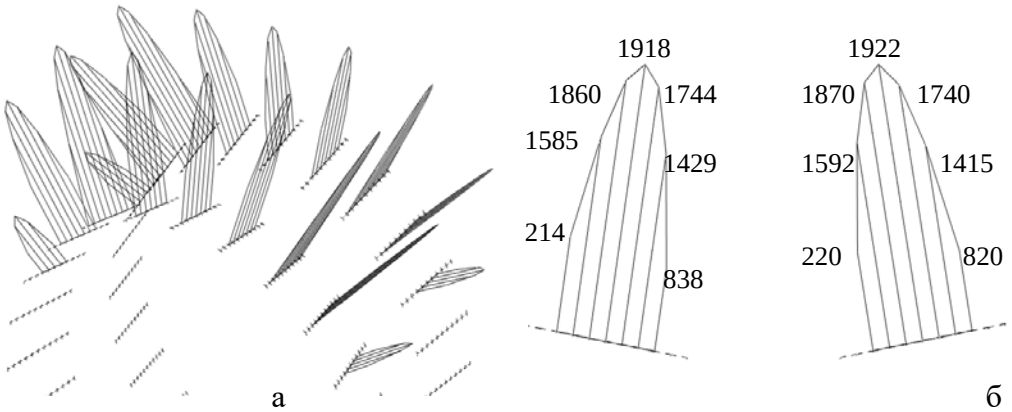


Рис.4. Эпюры напряжений (МПа) в контакте роликов и наружного кольца подшипника буксы с адаптером: а) – для всех роликов; б) – для верхних роликов

Благодаря бочкообразности ролика (образующая его описана дугой окружности радиуса 29,4 м) нагрузка по длине ролика распределена неравномерно с ярко выраженным экстремумом посередине (рис. 4).

Для буксы с адаптером и амортизатором законы распределения нагрузок на ролики одномодальное (рис.3б). Лишь при больших нагрузках на буксовый узел проявляется слабая тенденция к двухмодальному закону. Законы распределения неблагоприятные: в варианте без зазора в сопряжении адаптера с наружным кольцом подшипника угол охвата роликов контактом составляет 90°, причем полноценно нагружено только пять роликов. В варианте с зазором угол охвата роликов контактом еще меньше, он составляет всего 60°. Для варианта без зазора в сопряжении максимальные усилия на наиболее нагруженный ролик на 25…16% ниже, чем для варианта с зазором. Так, при номинальной нагрузке на буксовый узел 116 кН сила, приходящаяся на наиболее нагруженный ролик, составляет 13,35 кН, а при нагрузке 192 кН - 21,05 кН. Нагрузка по длине ролика распределена также неравномерно, экстремальные контактные напряжения посередине наиболее нагруженного ролика принимают значения равные 2140 МПа.

Контактные напряжения в деталях подшипника были получены для всего скоростного режима движения вагона и двух вариантов загрузки вагона, затем по этим данным были построены ступенчатые функции распределения контактных напряжений (частные блоки нагружения) исследуемых точек подшипника [2].

На основе частных блоков нагружения с учетом относительных долей времени движения вагона с различными скоростями и относительных долей времени работы вагонов в груженом и порожнем режимах получены смешанные блоки нагружения (рис. 5) для колец и тел качения подшипника.

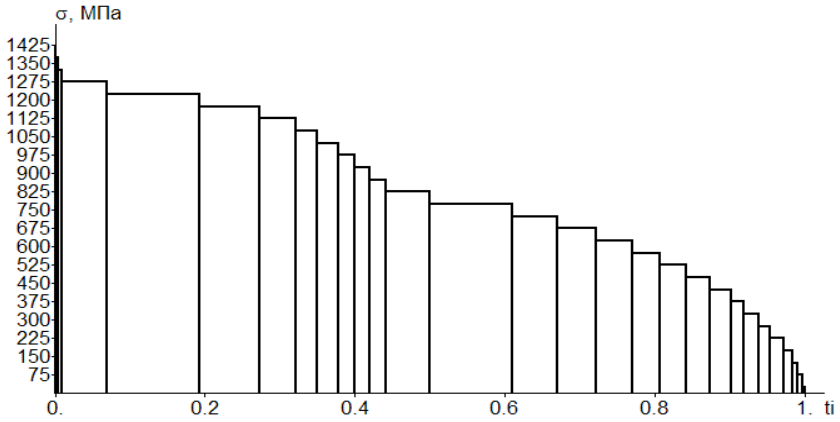


Рис. 5. Смешанный блок нагружения ролика подшипника буксы с адаптером

Для построения функции распределения усталостной долговечности буксового подшипника использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). В качестве критерия отказа подшипника рассмотрен один из наиболее вероятных его видов - усталостное выкрашивание. Для оценки наработки до отказа использована линейная модель накопления повреждений Пальмгрена-Майнера.

Предел контактной выносливости рассмотрен как нормально распределенная случайная величина со средним значением, равным 1600 МПа и коэффициентом вариации, равным 0,1.

Контактные напряжения ступеней смешанного блока нагружения на множестве букс рассмотрены как нормально распределенные случайные величины. При этом использовалось предположение, что преобразование блока нагружения от буксы к буксе происходит подобно с сохранением значений относительных параметров блока со средним значением нормально распределенной случайной величины, равной единице, и коэффициентом вариации, равным 0,2.

При оценке надежности подшипника предполагалось, что выкрашивание одного его элемента приводит к отказу подшипника в целом. В качестве наработки до отказа подшипника *j*-й буксы принималось минимальное из полученных значений наработок. Путем повторения вычислительных опытов M раз (M=1000), получена выборка наработок до отказа, по которой рассчитан показатель безотказности подшипника - вероятность безотказной работы.

Сравнивая графики функции вероятности безотказной работы подшипника для разных вариантов корпусов букс (рис. 6), можно увидеть, что фактор распределения нагрузки по телам качения оказывает существенное влияние на безотказность подшипника.

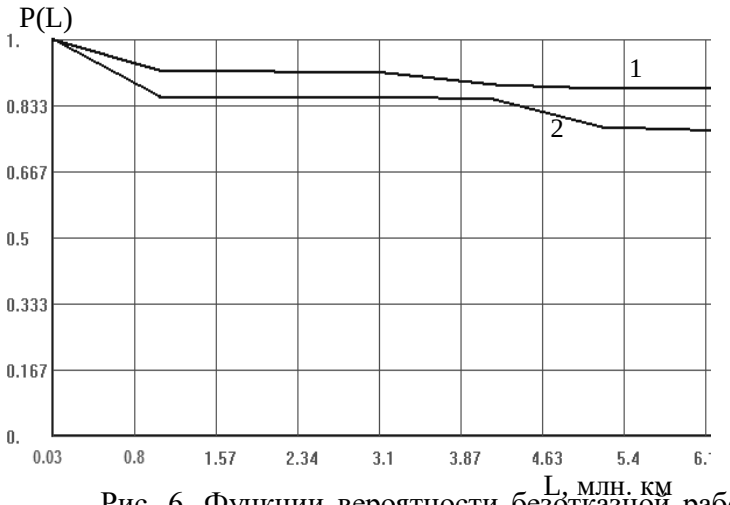


Рис. 6. Функции вероятности безотказной работы подшипника ВПЗ-15 : 1 - букса с адаптером; 2 - букса с адаптером и амортизатором

Вероятность безотказной работы подшипника при наработке 1 млн. км пробега составила 0,89 и 0,82 соответственно для буксового узла с адаптером без амортизатора и с амортизатором. Таким образом, более благоприятное распределение нагрузки по телам качения буксы с адаптером снизило вероятность отказа его подшипника в 1,54 раза.

Наиболее эффективным способом повышения долговечности подшипника является снижение максимальной нагрузки на ролик подшипника, так как накопление повреждений в деталях подшипника зависит от погонной нагрузки в третьей степени.

Список литературы*:* 1. Sakalo V.I., Olshevsky A.A., Shevchenko C.V. RSFEM program package for contact units investigation/consideration of railway transport problems// 4-th Int. Conf. Railway bogies and running gears. - Budapest, 1998. - P 447 -452. **2.** Невмержицкая Г.В. Нагруженность элементов буксовых узлов железнодорожного подвижного состава и ее влияние на надежность буксового подшипника. Дис. … канд. техн. наук.- Брянск, БГТУ, 2003.- 198 с. **3.** Невмержицкая Г.В., Ольшевский А.А., Сакало В.И. Исследование нагруженности деталей буксового подшипника. Вестник БГТУ, №4 -Брянск, 2004.-5 с. **4.** Невмержицкая Г.В., Ольшевский А.А., Сакало В.И. Компьютерное моделирование распределения контактных давлений в подшипнике буксы грузового вагона и оценка его долговечности. – М.: Машиностроение, «Вестник компьютерных и информационных технологий», №2, 2006. – С.18-21.

ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОДБОРА ДЕТАЛЕЙ ПРИ СБОРКЕ

Непомилуев В.В. *(РГАТУ имени П. А. Соловьёва», г. Рыбинск, Россия)*
Тел. +7 (980) 654 22 26; E-mail: vvvvnn@yandex.ru

Abstract: *The article presents the results of a study of the method of individual selection of parts when assembling machines containing multi-link dimensional chains. It is shown that the use of the proposed algorithm for the selection of parts can significantly increase the accuracy of such machines at low cost, which makes it possible to provide the required quality of their assembly at a lower cost.*
Keywords: *assembly, process, quality, size, technology.*

В условиях современного производства актуальны задачи гарантированного обеспечения качества и достижения максимальной идентичности изделий. Научно-технический прогресс в машиностроении неизбежно сопровождается постоянным усложнением конструкций, повышением требований к качеству и технико-экономическим характеристикам выпускаемых изделий. Однако создание новых изделий в значительной мере сдерживается имеющимся уровнем технологии их изготовления.

Процесс сборки является завершающим и наиболее ответственным этапом производства любого изделия. Упрощенно, его можно представить как процесс формирования замыкающего звена размерной цепи. Такой подход позволяет использовать основные методы и понятия теории размерного анализа при рассмотрении возможностей повышения качества изготовления изделия. Поскольку понятия "размер" ("величина") и "допуск" могут быть отнесены к любому количественному показателю качества, приведенные ниже рассуждения носят универсальный характер.

Известно, что для повышения качества изготовления изделия необходимо стремиться к уменьшению вариабельности, т.е. разброса величины замыкающего звена. Эта задача может быть решена несколькими методами, в том числе, методом индивидуального подбора деталей при сборке.

При использовании традиционных методов взаимозаменяемости и компенсации для обеспечения точности замыкающего звена процесс суммирования погрешностей деталей неуправляем. Индивидуальные особенности конкретной собираемой детали не учитываются, а показатели качества собранного изделия становятся случайными величинами, распределенными внутри некоторой области. Оценить качество собранных таким образом изделий можно только после сборки. Все корректирующие действия предпринимаются также только после того, как процесс сборки завершён.

Предварительное упорядоченное комплектование собираемых деталей в настоящее время имеет довольно ограниченное применение в машиностроительном производстве и чаще всего ограничивается применением сборки по методу групповой взаимозаменяемости. Однако, сборка по методу групповой взаимозаменяемости является лишь относительно простым случаем применения идеи предварительного упорядоченного комплектования деталей на сборку. Между тем оно может применяться значительно шире, способствуя существенному повышению технико-экономических показателей сборочных процессов.

Метод индивидуального подбора деталей основан на предваряющем сборку рассмотрении всех или некоторой части возможных вариантов соединения деталей (количество возможных вариантов может превышать десятки миллионов) и выборе лучшего из них для практической реализации. В этом случае перед осуществлением реального процесса сборки с помощью компьютера производится расчет возможных вариантов и

выбор наилучших из них. В результате рабочий сборщик получает указания, какие именно конкретные детали из имеющихся в его распоряжении необходимо соединить в данном комплекте. Автоматизация процесса индивидуального подбора деталей с помощью компьютера превращает этот метод в компьютерную технологию и позволяет создать управляемый по качеству процесс сборки. Виртуальность этого процесса позволяет выполнять эти операции очень быстро и с небольшими затратами, несоизмеримыми с затратами на физически выполняемую сборку.

Как показали проведенные исследования [1, 2, 3], метод индивидуального подбора обеспечивает уменьшение погрешности замыкающего звена в 10-15 раз даже для двузвенных размерных цепей и самых неблагоприятных сочетаний законов распределения размеров деталей. Метод может быть использован для сборки высокоточных изделий в ситуации, когда необходимое качество изготовления деталей существенно превышает возможности имеющихся технологий изготовления их.

Очевидно, что, в отличие от традиционных методов, достигаемое при использовании метода индивидуального подбора качество будет повышаться при увеличении возможностей выбора, в частности, количества составляющих звеньев в размерной цепи. Многозвенные размерные цепи обладают гораздо большими возможностями подбора по сравнению с двухзвенными, поскольку резко увеличивается количество возможных вариантов сочетания имеющихся деталей в одном сборочном комплекте, что повышает как возможности взаимной компенсации погрешностей изготовления деталей, так и трудоемкость самого процесса подбора.

Уменьшение возможностей выбора, например, уменьшение количества деталей на сборочном складе, теоретически приводит к ухудшению результата сборки и повышению его нестабильности. Тем не менее, метод индивидуального подбора может применяться даже в единичном производстве, если собираемые детали могут занимать друг относительно друга различные относительные положения.

Применение такой технологии дает возможность таким образом подобрать собираемые детали и их относительное положение, чтобы они в максимально возможной степени компенсировали погрешности друг друга. Таким образом, наиболее эффективной областью использования является сборка высокоточных изделий с многозвенными размерными цепями, в которых невозможно изменять детали непосредственно перед сборкой и во время ее осуществления.

Недостатки этой технологии связаны как с некоторыми недостатками самого метода индивидуального подбора (потеря собранными изделиями свойства взаимозаменяемости их деталей при ремонте), так и являются специфическими (повышение трудоемкости контроля деталей и комплектации). Оба эти недостатка, однако, не являются слишком большими.

Так, требование сохранения взаимозаменяемости деталей далеко не всегда является существенным для многих изделий, которые могут быть собраны с использованием метода индивидуального подбора. С одной стороны, многие детали не заменяются в процессе ремонта машины, а служат весь срок ее эксплуатации. С другой стороны, большинство машин при эксплуатации претерпевают столь существенные изменения, что при ремонте их с заменой наиболее точных деталей новые детали все равно приходится подбирать, пригонять или регулировать по месту, даже если при изготовлении машины и использовался принцип полной взаимозаменяемости.

При использовании такой технологии повышается трудоемкость операции сборки, однако общая трудоемкость изготовления машины может быть существенно снижена за счет отсутствия необходимости проведения дополнительных мероприятий для достижения требуемой точности. Кроме того, процессы измерения деталей и введения полученных размеров в базу данных легко автоматизируются с помощью достаточно

простых технических средств, а на многие ответственные детали, например, авиационных двигателей, существуют «паспорта качества», содержащие информацию о их действительных показателях качества.

Для практического использования метода индивидуального подбора деталей необходимо обеспечить предсказуемость (возможность априорного определения) и повторяемость (робастность) результатов процесса сборки, что подразумевает устойчивость функциональных характеристик этого процесса к воздействию факторов, вызывающих их нарушение.

С точки зрения организации процесса сборки важен факт, что точность, достигаемая этим методом, носит вероятностный характер и зависит от достаточно большого количества разнородных факторов, например, количества составляющих и подбираемых звеньев в размерной цепи, вида закона распределения размеров составляющих звеньев и его параметров и т.д. Таким образом, в отличие от методов взаимозаменяемости, метод индивидуального подбора чувствителен к не контролируемым «шумам» (по Г. Тагути [4]) технологических процессов изготовления деталей.

К факторам, вызывающим неустойчивость функциональных характеристик процесса сборки по методу индивидуального подбора деталей (порождающим, по Г. Тагути, «шумы» процесса), можно отнести возмущения, которые приводят к изменению результата, а именно:

- не контролируемые изменения контролируемых параметров качества деталей, например, закона распределения размеров и его параметров (чертеж и технические условия на изготовление детали содержит требования к границам допусков контролируемых параметров качества деталей, но не регламентирует, каким образом должны распределяться действительные параметры качества внутри этих допусков);
- изменение неконтролируемых параметров качества деталей, например, характера отклонения формы и относительного расположения базовых поверхностей деталей;
- изменение технологических условий процесса сборки, например, величины сборочных усилий и способы их приложения;
- изменение внешней среды.

Перечисленные выше возмущения неизбежны в реальном производстве. Для практического применения метода подбора, поэтому, необходима разработка:

- расчетного метода определения достигаемой при его использовании точности,
- методологии обеспечения робастности процесса сборки,
- алгоритмов и программ для компьютерного моделирования процесса сборки,
- схемы организации информационных потоков процесса производства.

Для выполнения исследований метода индивидуального подбора необходима компьютерная модель, имитирующая процесс индивидуального подбора. С этой целью в программе MS Excel было выполнено компьютерное моделирование процесса сборки размерной цепи, полное описание которого представлено в работе [2]. Для реализации этого:

- генерировались соответствующие массивы данных, имеющие случайный разброс и заданное среднее значение размеров деталей, которые имитировали составляющие звенья рассматриваемой размерной цепи;
- задавался закон распределения размеров деталей;
- задавалось количество значений в каждой выборке, которое имитировало количество деталей на сборочном складе;
- статистическая обработка проводилась по результатам 1000 компьютерных экспериментов.

Такого рода исследования проводились для различных алгоритмов подбора,

начиная с простейшего «Алгоритма с сортировкой» [2], наиболее сложного «Алгоритма с частичным перебором» [5] и наиболее трудоемкого алгоритма полного перебора.

Индивидуальный подбор деталей может осуществляться по различным алгоритмам, существенно различающимся по трудоемкости их осуществления. Исследования показывают, что самый простой алгоритм подбора - «Алгоритм с сортировкой» - путем упорядочения массивов действительных размеров деталей - обладает соизмеримыми возможностями по сравнению с другими, гораздо более сложными алгоритмами.

Сущность алгоритма заключается в следующем. Величины действительных размеров собираемых деталей, находящихся в данный момент на сборочном складе, вносятся в базу данных компьютера. Имеющиеся в базе данных значения размеров деталей A_{1i} и A_{2j} упорядочиваются по убыванию. Затем столбцы упорядоченных таким образом значений A_{1i} и A_{2j} почленно вычитаются, образуя замыкающее звено $A_{\Delta k}$, т.е.:

$$A_{\Delta k} = A_{1i} - A_{2j} , \qquad (1).$$

В качестве примера на рисунке 1 представлена схема размерной цепи из четырех составляющих звеньев, а в табл. 1 - рассчитанные значения стандартных отклонений σ и величин полей рассеяния замыкающего звена ωA_{Δ}.

Номинальные размеры составляющих звеньев, целевой размер замыкающего звена, величины допусков не принципиальны и были выбраны лишь исходя из удобства и наглядности их использования и интерпретации.

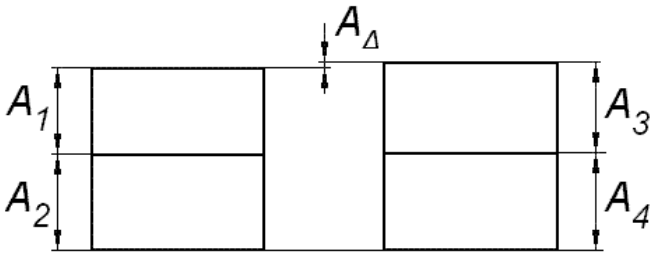


Рис. 1. Схема размерной цепи из четырех составляющих звеньев

Таблица 1. Стандартные отклонения и величины полей рассеяния замыкающего звена

Количество составляющих звеньев в размерной цепи	Без подбора		Результат моделирования с подбором
	Расчет для полной взаимозаменяемости	Результат моделирования	
2	ωA_{Δ} =2	σ=0,269 ωA_{Δ} =1,614	σ=0,025 ωA_{Δ} =0,15
4	ωA_{Δ} =4	σ=0,358 ωA_{Δ} =2,148	σ=0,044 ωA_{Δ} =0,264

В всех случаях получились практически идентичные результаты: разброс качества собранного изделия для ограниченной выборки в 100 штук сокращается в 6-12 раз, а по сравнению с теоретическими расчетами (для метода полной взаимозаменяемости) - в 13-15 раз.

Таким образом, самым существенным преимуществом данного способа является возможность резкого роста качества изготавливаемого изделия без повышения требований к его деталям и без риска получения дефектного изделия при физическом осуществлении процесса сборки (поскольку при компьютерном моделировании процесса сборка носит виртуальный характер).

Основным недостатком «Алгоритма с сортировкой» является невозможность

обеспечения робастности процесса сборки без контроля не контролируемых обычно параметров качества деталей (вида закона распределения размеров составляющих звеньев и его параметров).

«Алгоритм частичного перебора» основан на стохастических методах оптимизации [6]: задача подбора деталей при сборке размерной цепи формализуется как задача комбинаторной оптимизации, что позволяет использовать классические подходы к решению подобных задач. В частности, в основу «Алгоритма частичного перебора» положены генетические алгоритмы оптимизации.

В результате проведенных компьютерных экспериментов с имитационной моделью было установлено, что:

- индивидуальный подбор деталей перед сборкой в многозвенных размерных цепях позволяет резко снизить, теоретически почти до нуля, погрешность замыкающего звена размерной цепи;

- «Алгоритм с частичным перебором» является наиболее эффективным: при невысокой трудоемкости он позволяет таким образом подобрать собираемые детали в многозвенных размерных цепях, что они практически полностью взаимно компенсируют погрешности изготовления друг друга;

- проведенные исследования демонстрируют практически полную невосприимчивость результата процесса сборки при использовании «Алгоритма с частичным перебором» к существенным изменениям значений параметров закона распределения случайной величины, характеризующей размеры комплектующих деталей, и несущественность возникающих отклонений;

- разработки специальной методики обеспечения робастности процесса сборки, позволяющей удерживать результат сборочного процесса в нужных границах допуска, в данном случае не требуется.

Следовательно, использование метода подбора позволяет в несколько раз повысить качество изделия, не завышая требований к деталям и не допуская риска получения дефектного изделия.

Список литературы: 1. Непомилуев В.В. Технология виртуальной сборки - способ автоматизации индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2000. - № 1. - С. 31-35. **2.** Майорова Е.А., Непомилуев В.В. Исследование возможностей повышения качества сборки путем использования индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2006. - № 10. - С. 34-38. **3.** Непомилуев В.В., Олейникова Е.В., Тимофеев М.В. Обеспечение устойчивости процесса сборки на основе метода индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. - № 11. - 2015. - С. 7-12. **4.** Genichi Taguchi. Taguchi's Quality Engineering Handbook. John Wiley & Sons, Inc. ASI Consulting Group, LLC, Livonia, Michigan. - 2005 - 1804 p. **5.** Задорина Н.А., Непомилуев В.В. Обеспечение качества сборки высокоточных изделий на основе метода индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2020. - № 4. С. 152-157. **6.** Задорина Н.А. Разработка модели процесса индивидуального подбора деталей с использованием методов стохастической оптимизации // Сборник научных трудов 5-й Международной молодежной научно-практической конференции «Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование». Т. 1, Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2018. С. 213-217.

ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ СФЕРЫ

Овсянникова С. Н. (*РАНХиГС, Москва, Россия*)
Тел./Факс: +79099800601; E-mail: Ovsyannikova-sn@ranepa.ru

Abstract: *The case of high technology has been thoroughly studied in the research. The principal aim of the paper is to establish ways of increasing the production level and export of high technology. In addition, the main objectives are to identify factors that influence high-tech exports and to understand which ones should be influenced in order to achieve the predetermined goal. Modern methods of scientific analysis have been applied, such as correlation and regression analysis, nonlinear model and time series based on the data of two countries were constructed. Finally, meaningful conclusions and recommendations were inferred from studies conducted, and data collected.*
Keywords: *export of high technologies, correlation and regression analysis, nonlinear model, social and economic factors, time series.*

В современных условиях важным инструментом государственной стратегии развития отечественной экономики является научно обоснованная инновационная политика. Она способствует устранению устаревших, неконкурентоспособных производственных структур и формированию новых; ускорению научно-технического и управленческого прогресса, адаптации к объективным требованиям глобализации мировой экономики. Наступила эра автоматизации процессов, и инновации с каждым разом открывают всё новые возможности. Однако во всех странах уровень продвижения разный, потому как он зависит от совокупности многих факторов. Данное исследование поможет выявить, на какие из них нужно повлиять, чтобы технологический прогресс распространялся по всему миру.

В ходе исследования была проведена простая бесповторная выборка данных по критерию «экспорт высоких технологий, выраженный в миллионах долларов США», на основании которой в рассмотрение были взяты данные 108 стран.

Приведённая гистограмма (Рисунок 1) позволяет зрительно оценить распределение выбранных статистических данных, сгруппированных по частоте попадания в определенные, заранее установленные интервалы.

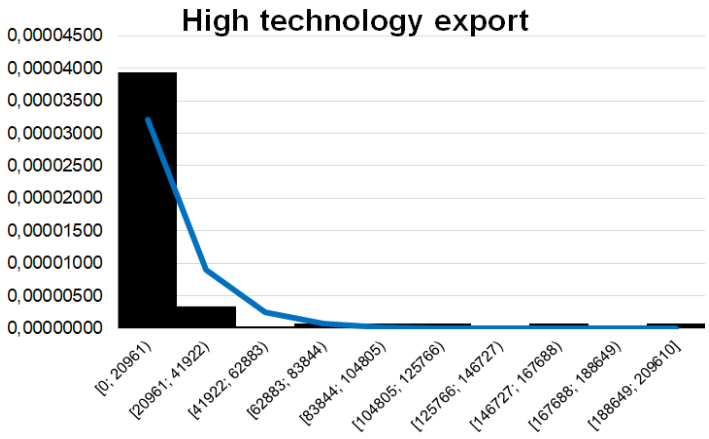


Рис. 1. Закон распределения значений

Первый интервал включает в себя 89 из 109 (82%) исследуемых стран, в то время как частота попадания в последующие интервалы значительно сокращается. Для того, чтобы выявить причины, по которым уровни высоких технологий в странах различаются, было выявлено 20 социально-экономических факторов. В качестве результативного признака (Y) был принят экспорт высоких технологий, выраженный в миллионах долларов США. Отобранные факторы, на основе которых была построена корреляционная матрица, приведены ниже (данные взяты за 2019 год):

$\mathbf{X_1}$ – индекс инноваций. Данный показатель рассчитывается как взвешенная сумма оценок двух групп показателей:

1. Располагаемые ресурсы и условия для проведения инноваций (Innovation Input): институты, человеческий капитал и исследования, инфраструктура, развитие внутреннего рынка, развитие бизнеса.

2. Достигнутые практические результаты осуществления инноваций (Innovation Output): развитие технологий и экономики знаний и результаты творческой деятельности.

$\mathbf{X_2}$ – общее число патентов, выданных в период 2018 го9да;

$\mathbf{X_3}$ – государственные расходы на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) в проценте от ВВП; $\mathbf{X_4}$ – ВВП, выраженный в миллиардах долларов США; $\mathbf{X_5}$ – инфляция: относительное изменение в индексе потребительских цен; $\mathbf{X_6}$ – уровень рабочей силы, количество занятых, выраженное в миллионах человек; $\mathbf{X_7}$ – степень открытости торговли, выраженная в процентном соотношении экспорта и импорта к ВВП страны; $\mathbf{X_8}$ – прямые иностранные инвестиции, выраженные в проценте от ВВП страны; $\mathbf{X_9}$ – счёт текущих операций в миллиардах долларов США. Текущие операции платёжного баланса состоят из: операций с товарами, услуг, движения дохода и текущих трансферты; $\mathbf{X_{10}}$ – торговый баланс, выраженный в миллионах долларов США. Разница между стоимостью всех экспортированных и импортированных товаров и услуг; $\mathbf{X_{11}}$ – государственные расходы, выраженные в миллиардах долларов США; $\mathbf{X_{12}}$ – внешний долг страны в проценте от ВНП; $\mathbf{X_{13}}$ – валютный курс, выраженный в единице местной валюты за 1 доллар США; $\mathbf{X_{14}}$ – суммарное количество ВУЗов в стране; $\mathbf{X_{15}}$ – индекс восприятия коррупции. Индекс ранжирует страны и территории по шкале от 0 (самый высокий уровень коррупции) до 100 (самый низкий уровень коррупции) на основе восприятия уровня коррумпированности государственного сектора; $\mathbf{X_{16}}$ – количество зачисленных в высшие учебные заведения, процент от всех детей, имеющих на это право; $\mathbf{X_{17}}$ – государственные расходы на образование, процент от ВВП; $\mathbf{X_{18}}$ – соотношение студентов женского и мужского пола, обучающихся в ВУЗах; $\mathbf{X_{19}}$ – процент нерелигиозного населения страны.

	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
Y	1										
X_1	0,46	1									
X_2	0,62	0,25	1								
X_3	0,60	0,28	0,87	1							
X_4	0,56	0,29	0,81	0,98	1						
X_5	-0,13	-0,10	-0,06	-0,05	-0,02	1					
X_6	0,20	0,08	0,29	0,39	0,42	0,15	1				
X_7	0,13	0,37	-0,14	-0,16	-0,16	-0,15	-0,22	1			
X_8	-0,04	-0,20	-0,04	-0,05	-0,05	-0,01	-0,03	0,05	1		
X_9	0,09	0,05	-0,26	-0,51	-0,58	-0,11	-0,26	0,15	-0,04	1	
X_{10}	-0,03	0,05	-0,50	-0,68	-0,72	-0,10	-0,33	0,22	-0,01	0,92	1
X_{11}	0,62	0,33	0,83	0,97	0,99	-0,05	0,38	-0,17	-0,07	-0,50	-0,64
X_{12}	-0,02	0,18	-0,02	-0,02	-0,02	-0,07	-0,06	0,57	-0,10	0,02	0,05
X_{13}	-0,05	-0,07	-0,02	-0,05	-0,02	0,05	0,16	-0,13	0,03	-0,05	-0,02
X_{14}	0,35	0,17	0,51	0,65	0,68	0,11	0,91	-0,22	-0,04	-0,43	-0,50
X_{15}	0,32	0,46	0,16	0,19	0,20	-0,24	-0,11	0,30	-0,10	0,05	0,04
X_{16}	0,32	0,69	0,21	0,23	0,24	-0,20	-0,03	0,19	-0,07	0,02	0,05
X_{17}	0,29	0,19	0,19	0,21	0,20	-0,11	0,31	0,18	0,15	-0,07	-0,05
X_{18}	-0,06	0,10	-0,04	-0,02	0,00	-0,12	-0,06	0,07	-0,06	-0,03	0,02
X_{19}	0,42	0,70	0,25	0,24	0,23	-0,16	-0,01	0,16	-0,27	0,10	0,09

Рис. 2. Корреляционная матрица выбранных факторов

В соответствии с вышеперечисленными данными, была построена корреляционная матрица (см. Рисунок 2).

	Y	X_1	X_2	X_{17}
Y	1			
X_1	0,46	1		
X_2	0,62	0,25	1	
X_{17}	0,29	0,19	0,19	1

Рис. 3. Корреляционная матрица новой линейной модели

На результативный признак достаточно высокое влияние оказывают такие факторы как: индекс инноваций, количество патентов, государственные расходы, расходы на

НИОКР, государственные расходы на образование, ВВП, количество ВУЗов по стране, индекс восприятия коррупции, количество студентов и процент нерелигиозного населения.

Во избежание мультиколлинеарности, в модель были включены факторы X_1, X_2 и X_{17} (см. Рисунок 3).

На основе выбранных факторов была построена нелинейная регрессионная модель.

$$Y=0{,}095X_1^{\,3}+2327{,}59\sqrt[3]{X_2}+0{,}006X_{17}^{\,5}-11274{,}1 \quad (1)$$

Коэффициент детерминации составил $R^2=0{,}69$.

Таким образом, в 69,1% случаев изменение экспорта высоких технологий объясняется изменением выбранных нами факторных признаков.

С целью оценки степени влияния каждого фактора на зависимую переменную Y были рассчитаны такие показатели, как средние частные коэффициенты эластичности, ß-коэффициенты и Δ-коэффициенты.

Согласно коэффициенту эластичности (см. Рисунок 6), изменение X_1 на 1% приведёт к изменению результативного фактора на 0,39%; изменение фактора X_2 влечёт изменение Y на 1,18%; при изменении X_{17} на 1% зависимая переменная изменяется на 0,10%. Однако коэффициент эластичности не учитывает степень колеблемости факторов.

β-коэффициент (см. Рисунок 5) показывает, что увеличение X_2 на величину его среднеквадратического отклонения приведёт к изменению среднего значения Y на 0,66 среднеквадратического отклонения.

На основании приведённых расчётов Δ-коэффициентов (см. Рисунок 7) можно сделать вывод о преобладающем влиянии (72%) второго фактора, а именно общего числа патентов, выданных в период 2019 года, на экспорт высоких технологий.

Regression Statistics	
Multiple R	0,83
R Square	0,69
Adjusted R Square	0,68
Standard Error	22253,94
Observations	108

Рис. 4. Регрессионная статистика

Elasticity coefficient	
X_1^3	0,39
$\sqrt[3]{X_2}$	1,18
X_{17}^5	0,10

Рис. 5. Коэффициент эластичности

ß-coefficient	
X_1^3	0,17
$\sqrt[3]{X_2}$	0,66
X_{17}^5	0,28

Рис. 6. β-коэффициент

Δ-coefficient	
X_1^3	0,14
$\sqrt[3]{X_2}$	0,72
X_{17}^5	0,14

Рис. 7. Δ-коэффициент

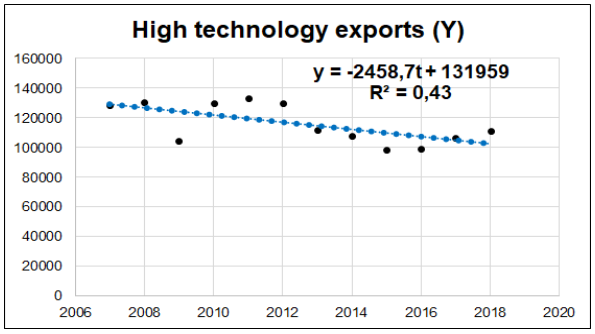


Рис. 8. Динамика экспорта высоких технологий

В работе предложен подход анализа влияния наиболее значимых факторов на результативный признак в динамике. В качестве основного фактора влияния был выбран X_2 – общее число патентов, ввиду большей доли воздействия на экспорт высоких технологий. Динамику взаимосвязи проиллюстрируем на примере страны с высоким уровнем экспорта инноваций Японии.

Тренды показателей Японии постепенно убывали в связи со стагнацией японской экономики в течение двух последних десятилетий (см. Рисунок 8 и Рисунок 9).

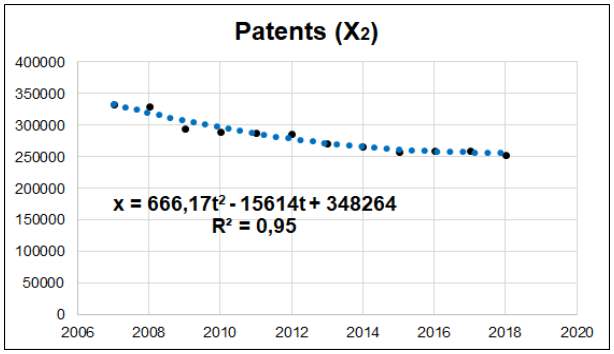


Рис. 9. Динамика количества патентов

	t	X_2	*Y*
t	1		
X_2	-0,94	1	
Y	-0,66	0,70	1

Рис. 10. Двухфакторная модель динамическая модель

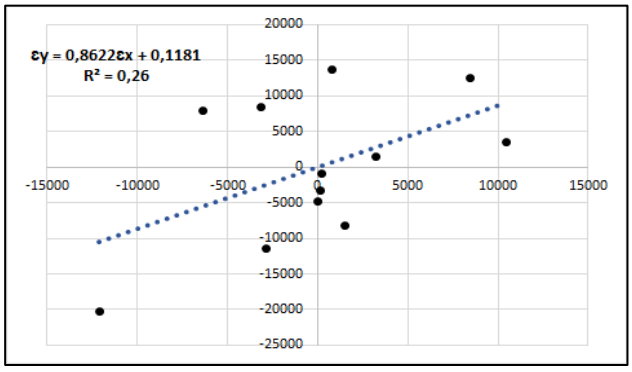


Рис. 11. Зависимость между факторами при устранении фактора времени

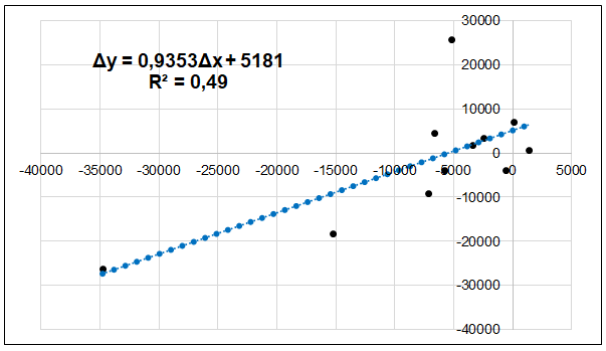


Рис. 12. Цепные приросты

Однако, согласно двухфакторной модели, аналогично с Бельгией, наблюдается сильная взаимосвязь между двумя исследуемыми факторами, но время так же значительно влияет на них (см. Рисунок 10).

Несмотря на такую зависимость, устранение фактора времени привело к незначительному снижению корреляции между факторами до 0,51 (см. Рисунок 11).

Исследование цепных приростов показало достаточно сильную зависимость (0.70) между количеством патентов и экспортом высоких технологий (см. Рисунок 12), которая значительно ухудшается при временном лаге в 1 год до -0.02.

Таким образом, можно отметить достаточно тесную зависимость между исследуемыми факторами, на которые так же сильно влияет фактор времени. В Японии не происходит лага во времени между выдачей патента и экспортом высоких технологий, в то время как, например, в Бельгии лаг составляет 1 год. Данный факт может быть обоснован разными темпами развития данных стран.

Данная работа позволила выявить основные факторы, на которые следует обратить внимание для поддержания устойчивого технологического роста. Следующие рекомендации могут поспособствовать распространению высоких технологий: стимулирование развития инновационной сферы, финансирование научной деятельности, государственная поддержка образовательной деятельности, а также создание оптимальных условий для проведения различных исследований и испытаний.

Список литературы: 1. Федеральная государственная служба государственной статистики https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 26.02.2021).ru.theglobaleconomy.com/ – Business and economic data for 200 countries. **2.** https://russian.doingbusiness.org/ru/rankings **3.** https://russian.doingbusiness.org/ru/rankings/russia **4.** https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/32436/9781464814402_Ch06.pdf

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СООСНОСТИ МНОГООПОРНЫХ ВАЛОВ ГТД

Озеров К.М., Семенов А.Н. *(РГАТУ имени П. А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия)*
Тел.: +7 (4855) 222334; E-mail:semenov.an@mail.ru

***Abstract**: The article addresses the issues of improving the quality of assembly of rotor units of gas turbine engines.The problems of ensuring the alignment of multi-support shafts of gas turbine engines are considered. The use of laser methods for monitoring and adjusting the position of the shafts is proposed.*

***Key words:** Accuracy, size, technology, machine quality, assembly.*

Сборка является заключительным этапом, поскольку на этом этапе окончательно формируется качество любого изделия машиностроения. Качество сборки изделия определяется совокупностью большого числа различных показателей, однако при монтаже роторов газотурбинных двигателей достаточно важным показателем является обеспечение соосности многоопорных валов (рис.1).

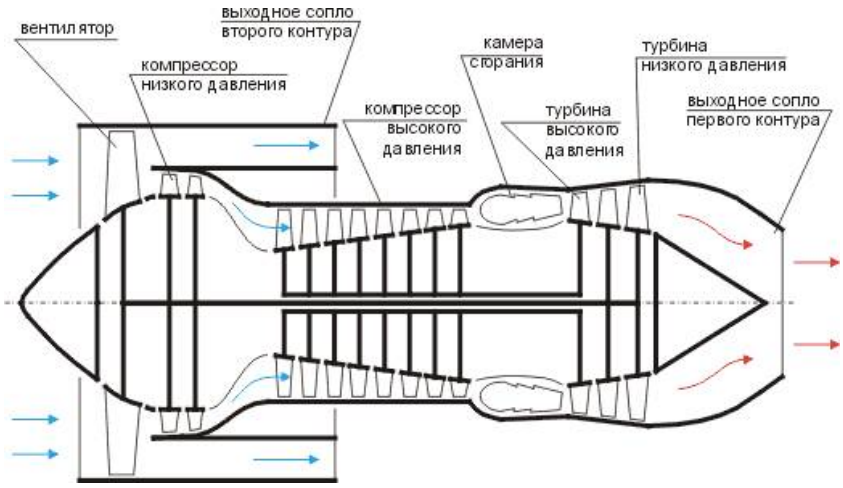


Рис. 1. Принципиальная схема турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД)

В настоящее время двухвальная схема является классической и в гражданских ТРДД и в военных ТРДД.

Вентилятор, подпорные ступени на валу вентилятора и турбина низкого давления, образуют турбокомпрессор низкого давления, называемый часто турбовентилятором. Компрессор высокого давления и турбина высокого давления образуют турбокомпрессор высокого давления, которые вместе с камерой сгорания образует газогенератор. Турбокомпрессоры кинематически не связаны, поскольку имеют газодинамическую связь и разные частоты вращения.

В процессе испытаний двухвальных ТРДД встречаются случаи касания роторов компрессоров, что приводит к аварийным ситуациям, изменению структуры металлов и прочностных свойств. Такие дефекты определяются в процессе вибродиагностики, поскольку в момент касания уровень вибраций возрастает [1,2]. Разборка двигателей после испытаний выявила, что причиной касаний валов роторов стала несоосность расположения одного из подшипников (рис. 2).

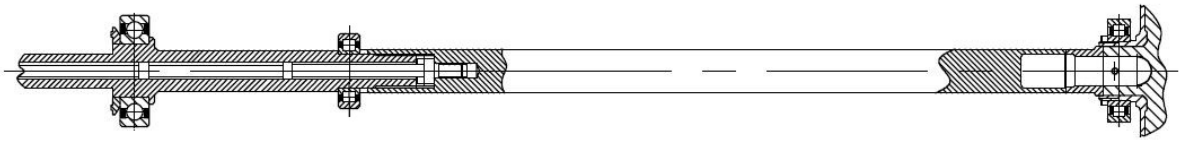


Рис. 2. Многоопорный вал КНД

Причинами возможных отклонений могут быть:

- недопустимая посадка подшипника из-за погрешности монтажа;
- несоосность частей вала из-за большего зазора в шлицевом соединении и чрезмерной затяжки гайки;
- неблагоприятное сочетание допусков сопрягаемых поверхностей;
- использование контрольных средств несоответствующей точности;
- низкая квалификация сборщиков.

Анализ перечисленных причин показывает, что большинство из них имеет человеческий фактор и может быть устранено при более тщательном контроле исполнителями, а также путем совершенствования технологии сборки, в которой важное место имеет используемый метод центровки валов.

Традиционные методы, основанные на использовании ручного метрического инструмента: штангенциркуля, приспособлений с индикаторами часового типа, методики и схемы измерения, а так же требования к контролю биений подшипников приведены в соответствующем стандарте. Однако, они имеют недостаточно высокую достоверность правильности результатов, вследствие необходимости сложения измерений, сделанных в верхнем и нижнем положениях приборов и необходимости сопоставления полученной суммы с суммой измерений в боковых положениях (рис. 3).

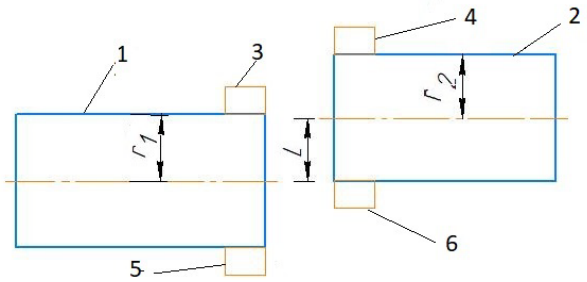


Рис. 3. Процесс измерения несоосности с помощью штангенциркуля

Ножки 3, 4 электронного штангенциркуля фирмы TOPEX с рабочим диапазоном измерений до 150 мм и точностью измерения 0,02 мм устанавливают между валами 1, 2 в положение, обозначенное цифрами 3, 4 или 5, 6. После чего нажимают кнопку алгебраического суммирования и получают удвоенное значение величины вертикальной несоосности. Лучший результат достигается в случае, если ввести корректирующую величину в виде суммы радиусов. При повороте штангенциркуля вокруг валов измерительные ножки будут расходиться, и штангенциркуль зафиксирует максимальную несоосность, поскольку ее величина возрастает при наличии горизонтальной и вертикальной погрешностей. Данный метод центрирования прост, универсален, но имеет недостаточную точность, поэтому в настоящее время ограничивается в применении.

Повысить качество и точность центровки валов и, соответственно, соосности, целесообразно использованием современных лазерных измерительных систем (ЛЦИС)

[3]. Простейшая схема ЛЦИС представляет собой: излучатель *1*, состоящий из лазера *2*, модулятора *3*, коллиматора *4*; блока питания *5*; целевого знака *6 со* светофильтром *7*, анализатором положения луча *8* и фотоприемником 9; блока усиления сигналов *10* и блока индикации *11* (рис. 4).

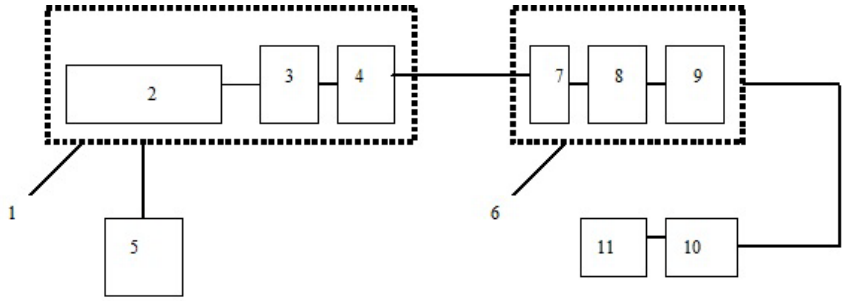


Рис. 4. Блок-схема лазерной центрирующей измерительной системы

Измерение происходит по схеме (рис. 5). Излучатель прибора устанавливается на опору или поверхность одного вала. Приемник устанавливают на другой вал. На пульте или дисплее, входящем в состав прибора, выбирается нужная команда, например, замер соосности. Прибор проводит измерение и выдает результат на экран дисплея. Если к прибору подключить принтер, то результаты можно вывести на бумажный носитель.

Рис. 5. Измерение несоосности лазерным прибором

Использование лазерно-оптических устройств имеет следующие достоинства:

- более высокая точность измерений по сравнению с индикаторами часового типа;
- исключение контакта между точками измерения и деформаций механических устройств от сил тяжести;
- возможность наблюдения за режимом измерения в режиме "on-line";
- возможность установки лазерных систем на большей дистанции;
- снижение трудоемкости и повышение эффективности за счет автоматизация расчетов [1, 2].

Список литературы: 1. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. [Текст] / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с. **2.** Сайт фирмы BALTECH: www.baltech.ru. 3. сайт фирмы EASY-LASER: www.easy-laser.com.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Павлов В.Ф., Вакулюк В.С., Сазанов В.П., Петрова Ю.Н., Катанаева Ю.А.
(Самарский университет, ДонНУЭТ, г. Самара, г. Донецк, Россия, ДНР)
Тел./Факс: +78462674526; E-mail: pavlov.vf@ssau.ru

Abstract: *On the ground of a great number of carried out experiments on parts and specimens with stress concentrators (cuts, thread, fillets, splines, a shaft with a pressurized hub) made of various steels and allows machined by various types of surface hardening (hydro- and pneumo- shot blasting , rolling, diamond burnishing, micro balls processing, ultrasonic hardeining, nitriding, cementation, borating) it's been stated that the method of an endurance limit increment evaluation by the average integral residual stresses criterion should be used for an endurance limit prediction in cases of bending, stretching – compression and torsion.*
Key words: *surface hardening, endurance limit, residual stresses.*

Для повышения сопротивления усталости деталей машин широкое применение на практике находят различные методы поверхностного упрочнения, после которых в тонком поверхностном слое деталей наводятся сжимающие остаточные напряжения, изменяется структура и увеличивается твёрдость материала. Многочисленными исследованиями [1-12] установлено, что основную роль в повышении характеристик сопротивления многоцикловой усталости поверхностно упрочнённых деталей машин играют сжимающие остаточные напряжения.

Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости обычно используются два критерия: осевые остаточные напряжения $\sigma_z^{пов}$ на поверхности опасного сечения детали и среднеинтегральные остаточные напряжения $\overline{\sigma}_{ост}$ [2], вычисленные по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости, по следующей формуле:

$$\overline{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi}\int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}}d\xi, \qquad (1)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали по толщине поверхностного слоя y; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в опасном сечении упрочнённой детали при работе на пределе выносливости.

Для примера на рис. 1 изображены участок цилиндрической детали диаметром *D* в опасном сечении с концентратором напряжений в виде кругового надреза полукруглого профиля радиуса *R* и нераспространяющаяся трещина усталости $t_{кр}$.

Приращение предела выносливости ΔP_R($\Delta\sigma_R$ – изгиб, растяжение-сжатие; $\Delta\tau_R$– кручение) упрочнённой детали с концентратором напряжений при использовании критериев $\sigma_z^{пов}$ и $\overline{\sigma}_{ост}$ определяется по следующим формулам:

$$\Delta P_R = \psi_p \cdot \left|\sigma_z^{пов}\right|, \qquad (2)$$
$$\Delta P_R = \overline{\psi}_p \cdot \left|\overline{\sigma}_{ост}\right|,$$

где ψ_p(ψ_σ – изгиб, растяжение-сжатие; ψ_τ – кручение), $\overline{\psi}_p$($\overline{\psi}_\sigma$ – изгиб, растяжение-сжатие; $\overline{\psi}_\tau$ – кручение) – коэффициенты влияния остаточных напряжений на предел выносливости по критериям $\sigma_z^{пов}$ и $\overline{\sigma}_{ост}$, соответственно.

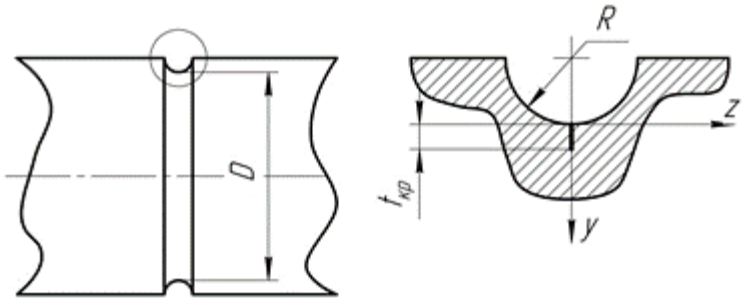


Рис. 1. Цилиндрическая деталь с надрезом и нераспространяющаяся трещина усталости

Следует отметить, что критерий $\overline{\sigma}_{ост}$ учитывает влияние на сопротивление многоцикловой усталости не только величины, но и характера распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

На кафедре сопротивления материалов и НИЛ-31 Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва с целью проверки возможности использования обоих критериев ($\sigma_z^{пов}$ и $\overline{\sigma}_{ост}$) для оценки влияния поверхностного упрочнения на многоцикловую усталость (предел выносливости) при изгибе, растяжении-сжатии и кручении были проведены исследования на образцах и деталях с различными концентраторами напряжений: надрезами и галтелями различных радиусов, резьбой, шлицами, втулкой, напрессованной на вал.

На основании проведённых расчётно-экспериментальных исследований установлено:

1. Для исследованных видов поверхностного упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка, обкатка роликом, алмазное выглаживане, обработка микрошариками, ультразвуковое упрочнение, азотирование, цементация, борирование), различных материалов (стали 30ХГСА, 12Х18Н9, 12Х18Н10Т, ЭИ961, ЭИ696, ВНС40, 16ХСН, ЭП479Ш, 38Х2МЮА, 40Х, 40ХН, 45, 40, 20; сплавы ЭИ437Б, ЭИ698ВД, ВКС-5, ВНС-17, ЭП718, ЖС6У, В93, В95, Д16Т, Д1П, 1953Т1, ВТ16, ВТ9, ВТ3-1), степеней равномерного и неравномерного наклёпа, величин (-29 – -2200 МПа) и характера распределения сжимающих остаточных напряжений, типов и размеров концентраторов, поперечных размеров деталей критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$ (формула (1)) хорошо отражает связь между остаточными напряжениями и приращением предела выносливости ΔP_R (формулы (2)).

2. Оценка предела выносливости упрочнённых деталей по величине сжимающих остаточных напряжений $\sigma_z^{пов}$ на поверхности опасного сечения не представляется возможной, так как соответствующий коэффициент влияния $\psi_p(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ в проведённых экспериментах при симметричном цикле изменяется в широких пределах – от 0,030 до 1,143, то есть в 38 раз.

3. Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости в опасном сечении упрочнённых деталей с концентраторами напряжений определяется только размерами поперечного сечения и не зависит от вида поверхностного

упрочнения, материала, последовательности изготовления и упрочнения концентратора, наклёпа, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации и асимметрии цикла напряжений. Например, для сплошных цилиндрических образцов и деталей зависимость для $t_{кр}$ имеет следующий вид:

$$t_{кр} = 0{,}0216D \ ,$$

где D – диаметр опасного сечения образца или детали (рис. 1).

4. Коэффициент $\overline{\psi}_p(\overline{\psi}_\sigma, \overline{\psi}_\tau)$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$ зависит от типа деформации (изгиб, растяжение-сжатие и кручение), асимметрии цикла и степени концентрации напряжений. По результатам исследований разработаны методики учёта влияния этих факторов при определении коэффициента $\overline{\psi}_p(\overline{\psi}_\sigma, \overline{\psi}_\tau)$.

5. В случае симметричного цикла для образцов и деталей с надрезами коэффициент влияния поверхностного упрочнения по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений при изгибе и растяжении-сжатии в среднем составляет – $\overline{\psi}_\sigma$ = 0,36, при кручении – $\overline{\psi}_\tau$ = 0,18. В случае асимметричного цикла напряжений на основе критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$ предложена методика построения диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений и определения предельной амплитуды для упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

6. Исследования, проведённые на гладких и корсетных образцах, показали, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений можно использовать и для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых гладких деталей, но лишь в том случае, когда сжимающие остаточные напряжения не изменяются под действием переменных напряжений.

7. Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$ может быть использован и в случае работы детали при повышенной температуре, но при этом в расчёт необходимо брать остаточные напряжения детали в конце её ресурса, то есть с учётом релаксации. Эти напряжения можно определить путём термоэкспозиции.

8. Уменьшением предела выносливости, локализацией очага разрушения, параметрами зоны упрочнения образцов с одиночным кольцевым следом при обкатывании роликом без продольной подачи подтверждено выявленное расчётным путём возникновение растягивающих остаточных напряжений при упрочнении малых по протяжённости зон деталей.

9. Экспериментально подтверждены закономерности распределения остаточных напряжений, выявленные расчётом по первоначальным деформациям: повышение остаточных напряжений на поверхности концентратора и уменьшение толщины слоя со сжимающими напряжениями при увеличении степени концентрации напряжений; повышение остаточных напряжений в области концентратора с увеличением толщины упрочнённого слоя; увеличение остаточных напряжений сплошной гладкой детали с увеличением размера поперечного сечения при одной и той же упрочняющей обработке.

Таким образом, на основании проведённых расчётно-экспериментальных исследований с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений разработан метод оценки влияния поверхностного упрочнения на многоцикловую усталость (предел выносливости) деталей машин с концентраторами напряжений с

различными размерами поперечного сечения, при различных деформациях, при симметричном и асимметричном циклах напряжений.

Список литературы: **1.** Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27. **2.** Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32. **3.** Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. – 2009. – №2 (19). – С. 264-268. **4.** Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с. **5.** Иванов, С.И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Б.В. Минин, В.А. Кирпичев, Е.П. Кочеров, В.В. Головкин – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2015. – 170 с. **6.** Павлов, В.Ф. Влияние термоэкспозиции на остаточные напряжения и предельную амплитуду накатанных роликами болтов из стали 16ХСН / В.Ф. Павлов, В.П. Радченко, М.Н. Саушкин // Известия вузов. Авиационная техника (Казань). – 2015. – № 3. – С. 103-105. **7.** Павлов, В.Ф. Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных деталей / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичев, В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 5. – С. 32-42. **8.** Сазанов, В.П. Оценка эффективности упрочняющей обработки цилиндрических деталей из конструкционных сталей / В.П., Сазанов, В.Ф. Павлов, О.Ю. Семёнова, А.А. Прохоров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т.17. – №2. – С. 164-173. **9.** Радченко, В.П. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных втулках с учетом остаточных касательных напряжений / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов, М.Н. Саушкин // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – №1. – С. 140-152. **10.** Павлов, В.Ф. Исследование влияния размеров поперечного сечения поверхностно упрочнённых деталей на предел выносливости / В.Ф. Павлов, В.С. Вакулюк, Ю.Н. Петрова, Ю.А. Катанаева // Вестник Луганского национального университета имени Тараса Шевченко. – 2019. – Вып. 3. – № 3 (39). – С. 84-92. **11.** Радченко, В.П. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных трубопроводах в состоянии поставки и после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения дробью / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов, Т.И. Бербасова, М.Н. Саушкин // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2020. – №2. – С. 123-133. **12.** Павлов, В.Ф. Назначение оптимальных по сопротивлению усталости видов поверхностного упрочнения деталей с использованием распределения остаточных напряжений / В.Ф. Павлов, Ю.Н. Петрова, В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, Ю.А. Катанаева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения (Донецк). – 2021. – Вып. 1 (72). – С. 65-70.

ПРОБЛЕМЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ВРАЧЕЙ В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19

Павлова Т.В., Хохлунов С.М., Авраменко А.А. *(ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава РФ, ГБУЗ СОККД, Самара, Россия)*
Тел. +79272032183; E-mail: ptvsam63@mail.ru

Abstract: *COVID-19 pandemic has led to significant changes in the professional physician's education. On-line trainig have significantly reduced the opportunities for obtaining practical skills. Off-line lessons in small groups and distane lectures preserve the quality of education.*
Key words: *Pandemic COVID-19, physician's education*

Согласно Федеральному закону от 29.12.2012 N 273-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Об образовании в Российской Федерации" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.06.2021), п. 1 статьи 82 [1], подготовка медицинских работников осуществляется путем реализации следующих профессиональных образовательных программ медицинского образования:

1) образовательные программы среднего профессионального образования;
2) образовательные программы высшего образования;
3) дополнительные профессиональные программы.

Выпускники, освоившие программу специалитета в соответствии с образовательными программами высшего образования, получают подготовку, позволяющую им обеспечивать оказание профессиональной медицинской помощи в соответствии с установленными требованиями и стандартами в сфере здравоохранения [2]. После окончания медицинского ВУЗа будущие врачи два года обучаются в ординатуре, которая является конечной ступенью высшего медицинского образования. Обучение в ординатуре обеспечивает приобретение необходимого уровня знаний, умений и навыков для самостоятельной практической деятельности по выбранной специальности.

Особенностью медицинского образования является необходимость постоянного совершенствования знаний и навыков, и ещё Гиппократ утверждал, что совершенствование искусства врачевания – процесс беспредельный. В настоящее время профессиональное медицинское образование также базируется на непрерывном совершенствовании знаний и навыков в течение всей жизни врача, постоянном повышении его профессионального уровня и расширении квалификации [1]. Концепция развития непрерывного медицинского образования в Российской Федерации подготовлена в рамках исполнения Указа Президента РФ № 598 от 07.05.2012г., в котором поставлена задача разработки современной программы повышения квалификации и оценки уровня знаний медицинских работников [3], и в целях реализации положений Федерального закона «Об основах охраны здоровья граждан в РФ» (№ 323 от 21.11.2011) [4].

До недавнего времени обучение на всех этапах медицинского образования проходило, как правило, в очном режиме, однако в условиях пандемии COVID-19 все образовательные организации в первое время были вынуждены перевести процесс обучения в дистанционный формат в целях снижения рисков распространения коронавируса. В связи с этим все очные занятия, включая лекционные, практические и лабораторные при наличии виртуальных аналогов, были перенесены в онлайн-среду. В сфере высшего образования дистанционное обучение в большинстве случаев приняло форму трансляции записанных лекций и работы с онлайн-платформами, и данный опыт показал, что некоторую часть учебного курса можно достаточно успешно преподавать в удаленном формате, однако для некоторых видов занятий такой подход достаточно проблематичен. Например, в профессиональном медицинском образовании особое значение всегда имела практическая подготовка обучающихся на клинических базах, а необходимость изоляции привела к исключению данного вида обучения на некоторое время, при этом наиболее сложным с точки зрения обеспечения процесса обучения был апрель 2020 года.

Кроме того, возникла острая необходимость в неотложном создании новых образовательных циклов, посвященных особенностям ведения пациентов с различными

нозологиями в условиях пандемии. Большую методологическую помощь профессорско-преподавательскому составу в этой работе оказали отечественные регламентирующие документы – уже 30.01.2020 стала доступна первая версия временных методических рекомендаций Министерства здравоохранения РФ по лечению COVID-19, а 01.04.2020 Российским обществом кардиологов было опубликовано Руководство по диагностике и лечению болезней системы кровообращения в контексте пандемии COVID-19 [5]. Кроме того, данная работа потребовала и кропотливого изучения опыта зарубежных коллег, уже столкнувшихся с новой коронавирусной инфекцией и опубликовавших первые итоги борьбы с ней.

Распространение пандемии COVID-19 на территории Российской Федерации привело к получению собственного опыта лечения данной категории пациентов как среди ППС, так и среди обучающихся. Так, многие сотрудники медицинских ВУЗов в самые сложные периоды борьбы с пандемией работали в профильных инфекционных госпиталях, а обучающиеся в ординатуре оказывали помощь практическому здравоохранению, получая, таким образом, большой опыт работы с больными самого разнообразного профиля. Регулярное обновление временных рекомендаций Министерства здравоохранения позволяло использовать в практической работе самые новейшие подходы к лечению пациентов с COVID-19, и к настоящему моменту доступна уже одиннадцатая версия этого документа [6].

Возвращение к очному формату обучения в условиях продолжающейся пандемии вызвало необходимость внесения некоторых изменений в учебный процесс. Например, мы использовали формирование малых групп обучающихся (3-4 человека) для обеспечения социальной дистанции при очном проведении семинарских и практических занятий, при этом лекционный материал оставался доступен в дистанционном формате. Подобный комбинированный подход позволил сохранить на должном уровне качество учебного процесса, при этом как преподаватели, так и обучающиеся, отмечали необходимость личного контакта для формирования высокого профессионального уровня знаний, умений и навыков.

Выводы. Распространение новой коронавирусной инфекции привело к необходимости внесения изменений в процесс дополнительного профессионального образования врачей. Использование комбинированного образовательного подхода (очного и дистанционного) в условиях пандемии позволяет обеспечить сохранение качества учебного процесса.

Список литературы: 1. Федеральный закон "Об образовании в Российской Федерации" от 29.12.2012 N 273-ФЗ (http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/f6dc0e45add5602ee682128c92dd86a5e4dfb3b1/). **2.** Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 9 февраля 2016 г. n 95 «об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 31.05.01 лечебное дело (уровень специалитета)» (http://fgosvo.ru/news/2/1807). **3.** Указ Президента РФ № 598 от 07.05.2012г. «Об основах охраны здоровья граждан в РФ» (№ 323 от 21.11.2011), (http://base.garant.ru/70170948/). **4.** Федеральный закон от 21 ноября 2011 г. № 323-ФЗ "Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации" (https://minzdrav.gov.ru/documents/7025-federalnyy-zakon-323-fz-ot-21-noyabrya-2011-g). **5.** Руководство по диагностике и лечению болезней системы кровообращения (БСК) в контексте пандемии COVID-19 (https://scardio.ru/content/Guidelines/COVID-19.pdf). **6.** Временные методические рекомендации. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Версия 11 от 07.05.2021 (https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/055/735/original /B %D0%9C%D0%A0_COVID-19.pdf).

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ

Павлыш В.Н., Дегонский А.И. *(ДОННТУ, ДОНМУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел. *+38 (062) 301 03 91; E-mail: pavlyshvn@mail.ru*

Abstract: *The problem of modifying the methods of organizing the storage and processing of text information in the systems of technical and medical diagnostics is considered.*
Key words: *Information, text, system, method, diagnostics.*

Актуальность работы. На современном этапе развития технологий особую актуальность приобретают работы по созданию систем анализа, систематизации и управления специализированной текстовой информацией, так как даже высококвалифицированные эксперты испытывают затруднения по организации поиска документов и распределении полученных текстовых данных по тематикам [1].

Одним из способов систематизации, управления данными и их анализа является классификация информации, состоящая из сортировки текстовых документов по заранее определенным категориям [2].

Цель работы – обоснование структуры и разработка математического обеспечения процессов обработки информации в компьютеризированных системах.

Основное содержание работы. В большинстве организаций значительная часть полезных знаний содержится в документальных базах данных, а темпы роста, содержащегося в них количества документов, постоянно увеличивается. Своевременное получение знаний в автоматическом режиме затрудняется слабой упорядоченностью текстов на естественном языке. Такие знания могут быть извлечены экспертом, но с учетом огромного числа электронных документов их эффективная обработка человеком становится весьма затратной как по времени, так и по используемым ресурсам. А отсутствие возможности вовремя и быстро получить необходимую информацию по нужной теме сделает бесполезной большую часть накопленных знаний, как следствие появляется необходимость в управлении, анализе и систематизации текстовой информации.

Анализ и систематизация данных предполагает работу с информацией, ее глубоким осмыслением и принятием адекватных решений по управлению ею. Под систематизацией понимаются объекты, организующиеся в некую систему, на базе выбранного принципа, а система представляет собой совокупность разнородных элементов, предназначенных для достижения поставленной цели.

Основной функцией систем извлечения знаний является информационный поиск полезных сведений в документальных базах. Более точное и быстрое извлечение знаний имеет своей конечной целью информационную поддержку эксперта или автоматизированной системы при принятии решения в поставленной задаче (вопросе). Так изучение процедур принятия решений и организация системы составляет актуальную проблему создания и эксплуатации сложной системы. Сложная система включает в себя системы с большим числом элементов различного типа и с разнородными связями между ними. Связь обеспечивает возникновение и сохранение целостных свойств системы. Она определяется как ограничение степени свободы элементов. Под элементами понимается предел членения системы. Установлением систематизированных связей между элементами исследуемой системы занимается системный анализ. Системный анализ и управление информацией подразумевает под собой совокупность процедур, системных идей, подходов, теорий и методов, предназначенных для анализа объектов и процессов как систем [3].

Применение системного анализа для построения такой системы означает применение специально разработанных приемов, методик, типовых моделей организации системы и принятия ращений. Рассмотрим основные результаты выполненного в иссле-

довании анализа существующих подходов, тенденций и закономерностей управления и систематизации текстовой информации.

Появление новых технологий способствует научному прогрессу. Тенденция увеличения объемов и распространения информации в электронном виде стимулирует активное развитие автоматических систем обработки информации. В большинстве организаций значительная часть полезной информации содержится в электронных базах данных.

Организации в ходе своего существования формируют достаточно большие архивы документации. В данных архивах содержатся не только результаты официального документооборота (распоряжения, приказы и пр.), но и техническая документация по выполненным и текущим проектам: планы, технические отчеты, проектная документация и т.д.

Значительная часть хранящейся информации оформляется в виде текстового описания, анализ и систематизация которой предполагает ее глубокое осмысление, работу с данными, принятием адекватных решений относительно анализа и управления той или иной ситуацией:

– получение дополнительной информации;
– анализ имеющейся в наличии информации, относящейся к анализируемой проблеме;
– тематическую обработку информации;
– визуализацию и подготовку аналитических отчетов, их верификацию;
– принятие управленческих решений на основе новых знаний.

Большая часть используемых документов формируется в виде текстового описания. В связи с ростом используемых персональных компьютеров в организациях чрезвычайно быстро растет и количество текстовой информации на естественном языке хранящейся в электронном виде.

Статистика увеличения объема данных, создаваемых на протяжении последних лет, поражает воображение. В 2013 г. количество информации, хранящейся в мире составило 1,2 зеттабайта, что приравнивается к 1,2 млн. петабайт или 1,2 трлн. гигабайт [4]. Так по прогнозам компании специализирующейся на аналитике, в сфере информационных технологий, а именно IDC, общее количество информации будет удваиваться каждые 2 года. Как следствие к 2020 г. достигнет порядка 40 зеттабайта, это говорит о том, что на каждого жителя Земли будет приходиться по 5200 ГБ данных в соответствии с рисунком 1 [5].

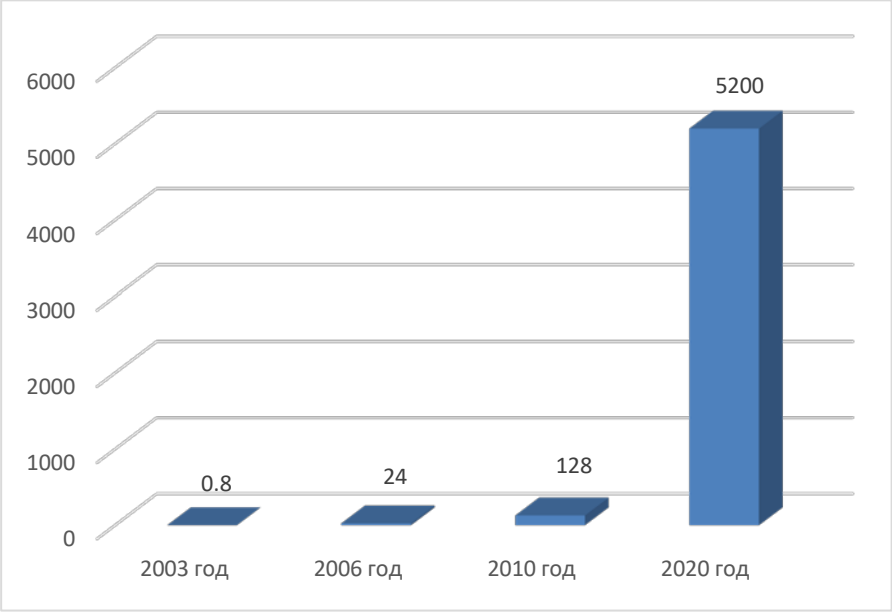


Рис. 1. Прогноз количества ГБ информации в мире на человека

Таким образом, рост информации делает задачи управления и систематизации текста актуальными для проведения исследований и разработки средств обработки текстовой информации, которая позволит повысить качество и облегчить работу эксперта.

С ростом объема информационного потока специалистам–

аналитикам становится все труднее заниматься тематическим анализом информации и ведением аналитических задач вручную при существующих средствах автоматизации. В соответствии с оценками экспертов около 70% используемых и накопленных цифровых данных находится в несистематизированной текстовой форме и лишь 30% образуют другие виды данных. Экспоненциальное с течением времени увеличение количества несистематизированных данных приведет по существу к коллапсу традиционной системы распределения и получения текстовой информации. Как следствие рутинная операция анализа и поиска необходимых данных превращается в малоэффективный и трудоемкий процесс, вызывающий информационную перегрузку пользователей. В данной ситуации особую актуальность приобретают работы по созданию систем автоматически систематизирующих и управляющих текстовой информацией. Как показывает практика, результаты распределения по предметным областям документом «вручную», то есть путем экспертного отнесения к имеющейся тематике, как правило, не превышает 80% [1, 5].

Классификация текса является одним из способов систематизации данных, которая подразумевает распределение текстовых документов по заранее определенным категориям [3]. На стыке двух областей находятся методы классификации текстовых документов, а именно машинного обучения и информационного поиска. Объединяет данные области средства оценки качества классификации информации и средства представления документов. Различия заключаются лишь в способах отнесения документа к соответствующей тематике. Точность используемых методов классификации существенно зависит от выполнения априорных допущений и предположений, также стоит учитывать структуру текстовых данных, например, количество классов, вид «пограничной» области между классами, однородность и размеры классов. Программные разработки, обесточивающие автоматическую классификацию информационных массивов, существуют [6], но они, как правило, лишь частично решают проблему автоматической систематизации и управления информацией или ведения аналитических задач. В этой связи возникает необходимость в решении задач создания усовершенствованной системы анализа информации, состоящей в управлении и систематизации текстовых документов.

При построении системы систематизирующей текстовую информацию необходимо учесть следующие факторы [5]:

– количество информативных, то есть полезных для классификации терминов, или признаков, которые как правило существенно превосходят количество имеющихся в выборке документов, что затрудняет определение наилучших оценок параметров и обучение методов;

– чрезвычайно велик объем вычислительных операций, используемых для анализа и обработки текстовых документов, что делает процесс классификации крайне трудоемким и дорогостоящим;

– получаемая матрица «документ – термин» оказывается сильно разреженной, так как большое число терминов встречается только в нескольких или в одном документе;

– несистематизированная информация не имеет общепринятых правил и единого текстового формата, что делает анализ и обработку документов практически невозможным без разработки комплексной модели процесса обрабатывающего текстовую информацию, в отличие от систематизированной информации, которая, как правило содержит фактические сведения, представленные числами.

Для создания эффективных систем управления и систематизации информацией требуется совместное применение методов классификации на основе машинного обучения и методов, основанных на знаниях. Поскольку содержимое и состав анализируемых документов постоянно изменяется, и одним из направлений адаптации к этой динамике является использование данных методов. Целью методов машинного обучения для задачи классификации текстовых документов является построение модели класси-

фикации, основанной на обучающем наборе, а далее применении построенной модели для предсказания набора или одного класса, релевантных для нового документа. Представленный подход обеспечивает качество классификации, сравнимое с качеством классификации, производимой человеком.

В задачах текстовой классификации лучше всего зарекомендовали себя метод опорных векторов и метод построения алгоритмических композиций на основе бустинга (улучшения). Анализ российских и зарубежных публикаций демонстрирует, что основные усилия исследователей [5, 6] направлены на построении классификаторов, обладающих высокими показателями точности и полноты. Стоит учитывать, что при разработке методов классифицирующих текстовую информацию, которая имеет высокую размерность, большое число терминов, описывающих документ, отдельное внимание требуют также вопросы быстродействия, то есть уменьшение времени, затрачиваемого на отнесение документа к одному из классов. В литературе практически нет работ, посвященных проблемам производительности классификаторов, как следствие, проблема быстродействия классификации ложатся на плечи разработчиков систем машинного обучения [7].

Вывод. При решении практических задач реализация мер, направленных на повышение точности классификации, как правило, приводит к снижению быстродействия. Гарантия высокого быстродействия в крупных поисковых системах являешься особо важным свойством, для решения задач анализа поисковых запросов, предоставляемых пользователем в режиме реального времени, приоритизация URL (Uniform Resource Locator) адресов web страниц, число которых движется в направлении нескольких миллиардов, для их загрузки в поисковые машины. Стоит учитывать, что подобные системы принадлежат к классу высоконагруженных, то есть обладают либо большим объемом данных, либо большим количеством одновременных сессий пользователей, или совокупностью данных критериев. Для решения определенной задачи качество и быстродействие работы являются ключевыми факторами, влияющими на выбор метода, используемого для таких систем.

Таким образом, для построения системы является актуальным проведение исследований и разработка программных средств, классификации текстовых документов на основе методов машинного обучения, обеспечивающих высокое быстродействие при сохранении или повышении качества (полноты и точности) классификации.

Список литературы: 1. Муна, Д. В. OPEN ACCESS: Системные риски для научного прогресса / Д. В. Муна, Е. В. Угриновича, В. А. Цветковой // [Электронный ресурс] XXI научно–практический семинар «Информационное обеспечение науки: новые технологии» 03–07 июня 2017. МЦНТИ–ICSTI 2017 – Режим доступа: http://www.benran.ru/SEM/Sb_17/present/pr_4.pdf. (по состоянию на 21.03.2019). 2. Фролов, А. В. Принцип конечной топологии распознавания топологических форм [Текст] / А. В. Фролов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – №1. – С. 68–76. 3. Бринк, Х. Машинное обучение [Текст] / Х. Бринк, Дж. Ричардс, М. Феверолф; СПб.: Питер, 2017. – 336 с. 4. Nefedov, A. Support Vector Machines: A Simple Tutorial New York: / A. Nefedov // [Электронный ресурс] 2016. – P. 35. – Режим доступа: https://svmtutorial.online/download.php?file=SVM_tutorial.pdf (дата обращения: 21.03.2019). 5. Флах, П. Машинное обучение [Текст] / П. Флах; Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. ДМК Пресс, 2015. – 402 с. 6. Российский семинар по Оценке Методов Информационного поиска [Электронный ресурс] Труды РОМИП 2010 Казань, 2010. – 214 с. – Режим доступа: http://romip.ru/romip2010/index.html (по состоянию на 21.03.2019). 7. Орельен, Ж. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow [Текст]/ Ж. Орельен; СПб.: Диалектика, 2019. – 683 с.

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ БАЗ ДАННЫХ СЛОВАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМАХ

Павлыш В.Н., Зайцева М.Н. *(ДОННТУ, ДОННУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел. *+38 (062) 301 03 91; E-mail: pavlyshvn@mail.ru*

Abstract: *The problem of convective type apparatus parameters modification using mathematical modeling and automatic projecting systems is considered. The computer technology application as process simulation is most effective.*
Key words: *process. mathematical model, parameter, project, system.*

Актуальность работы. Анализ и систематизация данных предполагает работу с информацией, ее глубоким осмыслением и принятием адекватных решений по управлению ею. Под систематизацией понимаются объекты, организующиеся в некую систему, на базе выбранного принципа, а система представляет собой совокупность разнородных элементов, предназначенных для достижения поставленной цели. Большая часть используемых документов формируется в виде текстового описания. В связи с ростом используемых персональных компьютеров в организациях чрезвычайно быстро растет и количество текстовой информации на естественном языке хранящейся в электронном виде.

Целью методов машинного обучения для задачи классификации текстовых документов является построение модели классификации, основанной на обучающем наборе, а далее применении построенной модели для предсказания набора или одного класса, релевантных для нового документа. Представленный подход обеспечивает качество классификации, сравнимое с качеством классификации, производимой человеком.

Таким образом, рост информации делает задачи управления и систематизации текста актуальными для проведения исследований и разработки средств обработки текстовой информации, которая позволит повысить качество и облегчить работу эксперта.

Цель работы – обоснование структуры и разработка математического обеспечения для формирования баз данных в компьютерных обучающих системах.

Основное содержание работы. Потребность в построении сложных моделей и развитии технологий во многом связано с тем, что объём информации, хранимой на электронных носителях, с каждым годом значительно возрастает, как следствие возникает необходимость в эффективных алгоритмах, предназначенных для анализа и обработки документов, созданных на естественном языке. Усовершенствование алгоритмов, в свою очередь, становится возможным благодаря увеличению производительности и мощности современных компьютеров [1, 2].

Синтаксис языка представляет собой набор структурных компонентов языка, а также правил и характеристик, определяющих связи между компонентами языка.

Для решения задач моделирования сложных систем используются – методологии семейства ICAM (Integrated Computer – Aided Manufacturing) – IDEF, использование которых предоставляет возможность анализировать и отображать в различных разрезах модели деятельности широкого спектра сложных систем. При этом глубина и широта обследования процессов в системе определяются самим разработчиком, что предоставляет возможность не перегрузить создаваемую модель излишними данными. Правила, блоки, диаграммы и стрелки являются компонентами синтаксиса IDEF0. Блоки демонстрируют функции, определяемые как преобразование, деятельность, действие, процесс или операция. Стрелки демонстрируют материальные объекты или данные, связанные с функциями. Необходимость применения компонент определяют правила, а формат словесного и графического описания моделей обеспечивают диаграммы. Основу для управления конфигурацией модели образует формат [3].

IDEF – методологии создавались в рамках программы компьютеризации промышленности – ICAM, в ходе реализации которой выявилась потребность в разработке методов анализа процессов взаимодействия в производственных системах. Принципиальным требованием, при разработке рассматриваемого семейства методологий, была возможность эффективного обмена информацией между всеми специалистами – участниками программы ICAM (отсюда название: Icam DEFinition – IDEF другой вариант – Integrated DEFinition). После опубликования стандарта он был успешно применен в самых различных областях, показав себя эффективным средством анализа, конструирования, отображения и трансформации процессов [3].

К семейству IDEF в настоящий момент в соответствии с рисунком 1 можно отнести следующие стандарты [3]:

IDEF0 – Function Modeling – «технология функционального моделирования сложных систем». Используя наглядный графический язык *IDEF0*, исследуемая система появляется перед аналитиками и разработчиками в виде набора взаимосвязанных функциональных блоков. Первый этап изучения любой системы заключается в построении ее модели средствами *IDEF0*. Методология *IDEF0* является следующим этапом развития известного графического языка описания функциональных систем *SADT* (*Structured Analysis and Design Technique*) [3].

IDEF1 – Information Modeling – «технология моделирования информационных потоков внутри системы». Использование которой предоставляет возможность анализировать и отображать взаимосвязи и структуру потоков информации [3].

IDEF1X (*IDEF1 Extended*) – *Data Modeling* – технология построения реляционных структур, то есть баз данных, состоит в построении инфологических моделей данных типа «сущность-связь» (*ERD – Entity-Relationship Diagram*). Обычно, используется для моделирования реляционных баз данных, имеющих непосредственное отношение к рассматриваемой системе [3].

IDEF2 – Simulation Model Design (проектирование модели поведения) – «технология динамического моделирования систем». Развитие этого стандарта приостановилось на самом начальном этапе из-за достаточно серьезных сложностей анализа динамических систем. Сейчас существуют алгоритмы и их компьютерные реализации, предоставляющие возможность преобразовывать набор статических диаграмм *IDEF0* в динамические модели, созданные на базе «раскрашенных сетей Петри» (*CPN – Color Petri Nets*) [3].

IDEF3 – Process Description Capture (сбор данных по описанию процессов) – «технология документирования процессов, происходящих в системе». При построении и исследовании технологических процессов на предприятиях и в организациях используются подобные системы. Последовательность операций и сценарии для каждого процесса описываются, посредствам использования стандарт *IDEF3*, который имеет прямую взаимосвязь с технологией *IDEF0*, причем каждая функция *IDEF0* может быть отображена при помощи отдельного процесса *IDEF3* [3].

IDEF4 – Object–Oriented Design – «технология построения объектно-ориентированных систем». Использование средства *IDEF4* позволяет наглядно демонстрировать структуру объектов, а также заложенные принципы их взаимодействия, чем позволяет оптимизировать и анализировать сложные объектно-ориентированные системы. Имеет связь с технологией *UML* [3

IDEF5 – Ontology Description Capture – «технология онтологического исследования сложных систем». Определение терминов, относящихся к какой-либо предметной области, является онтологией. Набор правил и использования определенного словаря терминов позволит описать онтологию системы технологи *IDEF5*. На основании которых, в некоторый момент времени, могут быть сформированы достоверные утверждения о состоянии рассматриваемой системы. Выводы о дальнейшей оптимизации и развитии системы формируются на основании данных утверждений [3].

IDEF6 – Design Rational Capture – «технология использования рационального опыта проектирования». Ее назначение заключается в сохранении рационального опыта проектирования информационных систем используемых для предотвращения структурных ошибок при новом проектировании.

IDEF7 – Information System Auditing – «технология аудита информационной системы».

IDEF8 – User Interface Modeling – «технология проектирования интерфейса пользователя». Применение *IDFE8* фокусирует внимание разработчиков интерфейса на программировании желаемого взаимного поведения пользователя и интерфейса на трех уровнях [3]:

- выполняемой операции, что представляет собой данная операция;
- сценарии взаимодействия, определение которого осуществляется специфической ролью пользователя, то есть по какому сценарию она должна выполняться тем или иным пользователем;
- на деталях интерфейса, другими словами, какие элементы управления рекомендует интерфейс для выполнения операции.

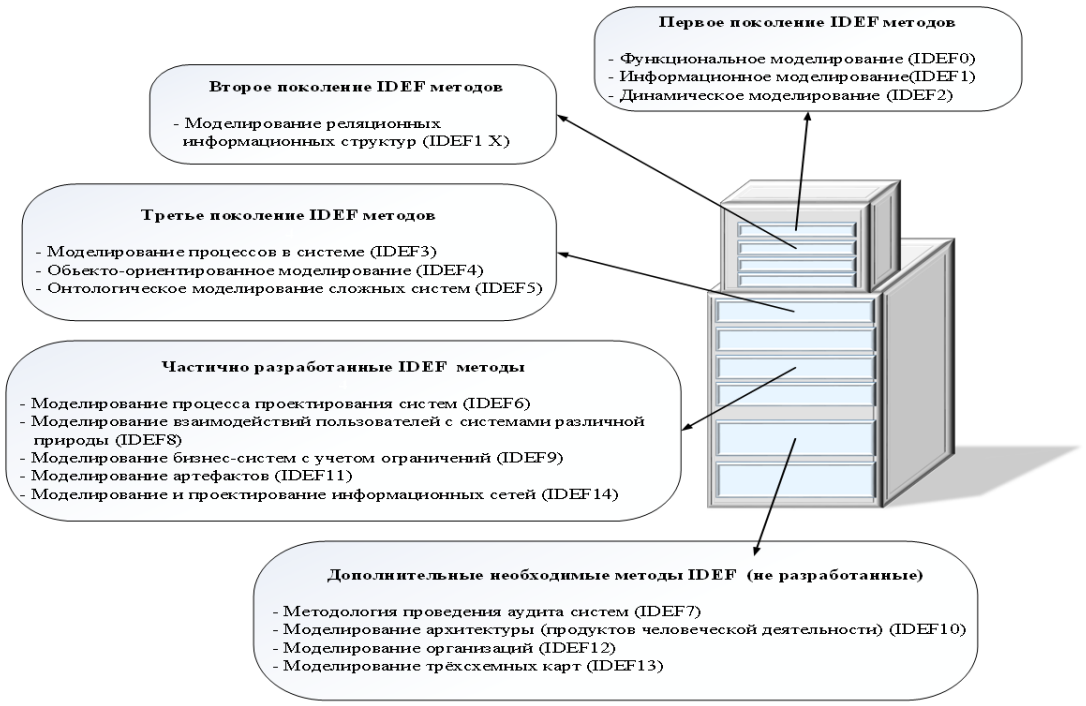


Рис. 1. Семейство стандартов структурного моделирования *IDEF*

IDEF9 – Scenario – Driven IS Design – технология анализа имеющихся ограничений и условий, в том числе политических, юридических, физических и их влияния на принимаемые решения в процессе вторичного проектирования.

IDEF10 – Implementation Architecture Modeling – «моделирование архитектуры выполнения, то есть физической реализации системы» [3].

IDEF11 – Information Artifact Modeling – «информационное моделирование артефактов».

IDEF12 – Organization Modeling – «организационное моделирование».

IDEF13 – Three Schema Mapping Design – «трехсхемное проектирование карт».

IDEF14 – Network Design – «технология моделирования компьютерных сетей». Технология предоставляет возможность выполнять анализ и представление данных при проектировании компьютерных сетей на графическом языке с описанием требований к надежности конфигураций, сетевых компонентов, очередей и тому подобное [3].

Стандарты технологий *IDEF13, IDEF12, IDEF11, IDEF10, IDEF7* определяются как востребованные, но так и не были до конца разработаны [3].

При использовании методологий семейства *IDEF,* появляется возможность эффективного анализа и отображения модели деятельности широкого спектра сложных систем. Наибольшее применение и распространение получили методологии *IDEF1* (*IDEF1X*) и *IDEF0* [4].

Вывод. Искусственные системы почти всегда определяются, как целенаправленные [5].

Понятие цели системы определяется, как задача достижения желаемого состояния или получения ожидаемого выходного воздействия системы [6].

Стоит обратить внимание на то, что двоякая трактовка цели – через состояние системы или через выходное воздействие – удобна в приложениях. Теоретически есть возможность считать цель только выходным воздействием, а желаемое состояние ввести в список данных воздействий. В частных случаях такая интерпретация состояния системы имеет возможность вносить дополнительные сложности, а в отдельных случаях приводит к неразберихе.

Постановка цели для системы в целом, то есть глобальной цели, приводит к потребности:

- в формулировке локальных целей, стоящих перед группами элементов и элементами системы;
- в целенаправленном вмешательстве в функционирование, создание и строение системы.

Обе данные операции плотно связаны, однако с точки зрения решения практических задач обычно сначала разделяют глобальную цель на набор локальных, а затем ищут средства достижения локальных целей [7].

Многоуровневое иерархическое строение, как правило, имеет набор локальных целей, которое в некоторой степени соответствует общей иерархии системы. В данном случае понятие «локальные цели» подразумевает собирательный термин для целей всех иерархических уровней. Для каждой цели есть возможность указания, к какой цели более высокого уровня она относится, исключением являются цели самого низшего уровня. Используя модульное строение системы, локальные цели представляются как требования к выходам, входам и характеристикам модулей. Благодаря продуманным требованиям на входах согласовывают модули таким образом, что состоящая из них система выполняет глобальную цель в соответствии с рисунком 1. Как следствие, локальные цели выступают важным регулятором организации элементов и частей в целенаправленную систему, а их скоординированность направляет проводимые в системе изменения в единое русло [7].

Список литературы: 1. Голицына, О. Л. Информационные системы [Текст] / О. Л. Голицына, Н. В. Максимов, И. И. Попов; У 2. чебное пособие -2-е изд. – М.: Форум: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 448 с. **2.** Иванов, Д. Ю. Унифицированный язык моделирования UML [Текст] / Д. Ю. Иванов, Ф. А. Новиков; Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 249 с. **3.** Черемных, С. В. Моделирование и анализ систем. IDEF–технологии [Текст] / С. В. Черемных, И. О. Семенов, В. С. Ручкин; Учебник–практикум. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 188 с. **4.** Горлушкина, Н. Н. Системный анализ и моделирование информационных процессов и систем [Текст] / Н. Н. Горлушкина; учебное пособие. - СПб: Университет ИТМО, 2016. –120 с. **5.** Абраменко, Г. В. Практические рекомендации по применению системного анализа к проектированию сложных систем [Текст] / Г. В. Абраменко, К. В. Власов, М. А. Краснощеков; – Москва: Оргсервис-2000, 2015. – 300 с. **6.** Андрейчиков, А. В. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций [Текст] / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова; Изд. 2-е.– М.: URSS: [Книжный дом ЛИБРОКОМ"], 2013. – 304 с. **7.** Рассел, С. Искусственный интеллект. Современный подход [Текст] / С. Рассел, П. Норвиг; 2е издание. – Вильямс, 2015. – 1407 с.

АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

Павлыш В.Н., Лазебная Л.А. *(ДОННТУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел. +38 (062) 3010391; E-mail:pm@donntu.org, L_Lazebnay@mail.ru

Abstract. *The numerical solution algorithm of coal stratum hydraulic treatment task is considered. The approximate formulas based on end-difference method application are proposed.*

Key words: *numerical method, algorithm, formula, treatment, equation.*

В комплексе методов решения задач борьбы с основными опасностями при подземной добыче угля очень важное место занимают процессы воздействия на угольные пласты, позволяющие изменить их состояние и за счет этого снизить интенсивность проявления опасных и вредных свойств.

Воздействие осуществляется в соответствии с разработанными технологическими схемами, параметры которых рассчитываются на основании теоретических представлений о процессе и описывающих их зависимостей.

В числе способов воздействия выделяются технологические (схемы вскрытия, системы разработки, порядок отработки пластов, управление проявлениями давления горных пород, системы проветривания) и специальные (предварительное гидравлическое воздействие, увлажнение, пневматическое, физико-химическое воздействие, дегазация, комплексное воздействие).

Одним из важных путей совершенствования способов гидравлического воздействий на угольный пласт является исследование процессов движения жидкости в массиве и определение на основе этого рациональных технологических схем, режимов, параметров нагнетания. Наряду с экспериментальными методами значительных результатов в этой области можно достичь с помощью математического моделирования процессов, происходящих при нагнетании в угольный пласт веществ, обладающих текучестью (жидкости, газы, аэрозоли, суспензии).

Учитывая сложную структуру обрабатываемого массива и нелинейно-упругий характер гидродинамических процессов, наиболее адекватной математической моделью является краевая задача, основанная на уравнениях математической физики. В результате получается детерминированная математическая модель, реализация которой выполняется с использованием численных методов (метод сеток, конечно-разностные схемы, метод конечных элементов).

Рассмотрим краевую задачу, в основу которой положено нелинейное параболическое уравнение нестационарного режима движения жидкости в неоднородной сплошной среде.

Исходное уравнение записывается в виде:

$$\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[k(\mathrm{P}) \frac{\partial \mathrm{P}}{\partial x} \right], \qquad (1)$$

где

P – давление фильтрующейся жидкости,

k – проницаемость среды,

x – пространственная координата,

t – время.

Введем безразмерные (нормированные) переменные:

$$\left.\begin{aligned} p^* &= \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{P}_{хар}};\ \ \mathrm{P} = \mathrm{P}_{хар}\, p^*; \\ x^* &= \frac{x}{L};\qquad x = Lx^*; \\ k^* &= \frac{k(\mathrm{P})}{k_{хар}(\mathrm{P})};\ k(\mathrm{P}) = k_{хар}(\mathrm{P})\cdot k^*; \\ t^* &= \frac{t}{t_{хар}};\qquad t = t_{хар}\cdot t^* \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

где

L – размер зоны воздействия,

$\mathrm{P}_{хар}, k_{хар}(\mathrm{P}), t_{хар}$ - некоторые характерные значения соответствующих величин (часто максимальные, как, например, в данном случае для x: $x_{хар} = x_{\max} = L$).

Подставляем полученные переменные в (1):

$$\frac{\mathrm{P}_{хар}}{t_{хар}}\frac{\partial p^*}{\partial t^*} = \frac{k_{хар}(\mathrm{P})\mathrm{P}_{хар}}{L^2}\frac{\partial}{\partial x^*}\left(k^*\frac{\partial p^*}{\partial x^*}\right). \tag{3}$$

Если положить, что:

$$t_{хар} = \frac{\mathrm{P}_{хар}L^2}{k_{хар}(\mathrm{P})},$$

то получится:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial x^*}\left(k^*\frac{\partial p^*}{\partial x^*}\right). \tag{4}$$

Как видно, уравнения (4) и (1) различны только в обозначениях, поэтому символ звездочки (*) можно опустить.

Итак, замена (2) позволяет перейти к нормированным безразмерным переменным, уравнение (4) записывается в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial p}{\partial x}\right). \tag{5}$$

Таким же преобразованиям подвергаются начальные и граничные условия.

Область, внутри которой нужно отыскать функцию $p(x,t)$, покрывается сеткой, образованной прямыми линиями, параллельными осям координат, а непрерывная функция $p(x,t)$ отыскивается в виде таблицы дискретных ее значений в узлах сетки [1]:

$$\left.\begin{aligned} x_i &= i\cdot\Delta x;\quad i = 0,1,2,...,n \\ t_j &= j\cdot\Delta t;\quad j = 1,2,3,... \\ p(x,t) &\to \left\{p(x_i,t_j)\right\} = \left\{p_{i,j}\right\}; \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

Аппроксимируем производные по неявной четырехточечной схеме [2]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} \approx \frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta t}; \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial p}{\partial x}\right) \approx \frac{k_{i+0,5,j}\,p_{i+1,j} - (k_{i+0,5,j} + k_{i-0,5,j})\,p_{i,j} + k_{i-0,5,j}\,p_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \qquad (8)$$

Приравняв (8) и (7), получим:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2}k_{i+0,5,j}\,p_{i+1,j} - \left[\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\left(k_{i+0,5,j} + k_{i-0,5,j}\right)+1\right]p_{i,j} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2}k_{i-0,5,j}\,p_{i-1,j} = -p_{i,j-1}. \qquad (9)$$

Решение полученной системы находится методом прогонки [2].

Поскольку коэффициент $k(p)$ является функцией давления, необходимо применять итерационный процесс. В качестве первого приближения задается значение давления на предыдущем шаге по времени, затем итерационный расчет повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность.

Таким образом, исходя из начальных условий, можно рассчитать распределение давлений в любой момент времени. Критерием окончания может служить момент достижения фронтом фильтрации границы отрезка 0L. Для контроля за ходом расчета можно использовать метод материального баланса и другие методы [1, 3, 4]. На рис.1 приведена обобщенная блок-схема алгоритма.

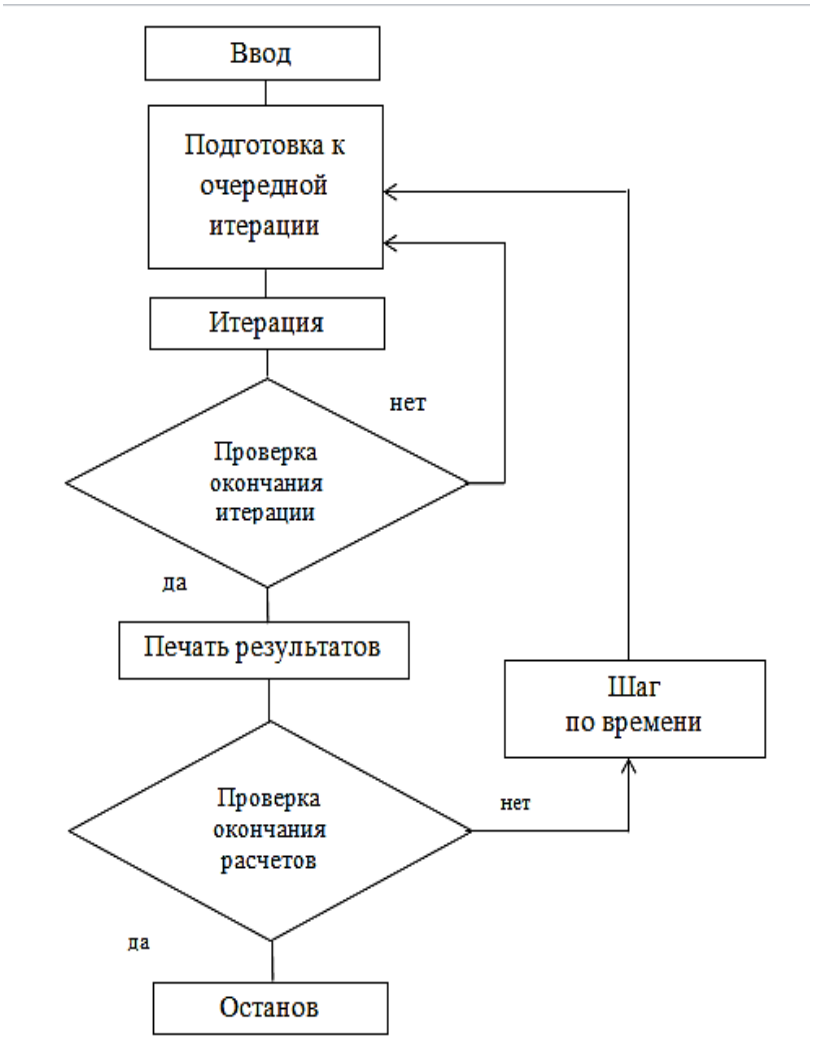


Рис. 1. Общая блок-схема программы моделирования процесса фильтрации

Если решить задачу для единичных величин всех характеристик (проницаемости, пористости, вязкости, давления и т.д.), то на основании этого решения можно построить методику инженерного расчета основных параметров процесса гидравлической обработки пластов, если используется технологическая схема нагнетания жидкости через одиночные скважины (галерею скважин).

Основные параметры технологической схемы в данном случае следующие: диаметр скважины *d*; длина скважины l_c; глубина герметизации $l_г$; расстояние между скважинами $L_{M.C.}$; давление нагнетания p_c; темп нагнетания *q*; расход воды на скважину Q_c; время нагнетания T.

В соответствии с постановкой задачи, в качестве граничного условия должно быть задано давление на скважине или темп нагнетания.

Время фильтрации определяется из следующих соображений. Нагнетание должно быть прекращено, когда жидкость достигнет кровли (почвы) и появится возможность ее выхода на штрек по контакту пласта с боковыми породами. Приняв $L = \frac{m}{2}$, можно рассчитать нормирующую величину по времени t_0:

$$t_0 = \frac{\mu_0 n_{Э0} \left(\frac{m}{2}\right)^2}{k_{oz} p_c}.$$

Величина k_{oz} - это коэффициент фильтрации по мощности (вдоль оси 0Z). Вводом такого коэффициента учитывается анизотропия пласта.

Кроме расчета основных параметров, полученные результаты могут быть использованы для расчета некоторых других величин. Допустим, необходимо определить ориентировочно максимальный размер зоны, которую можно обработать через одну скважину. Для этого применяются следующие рассуждения.

Для достижения возможно большего радиуса обработки *L* необходимо производить нагнетание как можно дольше. При этом внедрение текучего возможно до того момента, пока жидкость не выйдет на выработки, оконтуривающие обрабатываемый массив. Следовательно, источник фильтрации должен располагаться по возможности дальше от этих выработок. Это возможно в том случае, если фильтрующая часть скважины будет «стянута в точку», расположенную посредине между оконтуривающими штреками [5].

Зададим величину $l_ф$.Тогда

$$l_г = l_0 = 0{,}5(L - l_ф),$$
$$l_c = l_г + l_ф$$

Время фильтрации по оси O_y до выработки:

$$T_y = \frac{\mu_0 n_{Э0} l_0^{\,2}}{12 k_{oy} p_c},$$

где

k_{oy} - коэффициент проницаемости вдоль оси O_y (по падению).

Размер отработанной зоны по оси O_x :

$$L_x = l_0\sqrt{\frac{k_{ox}}{k_{oy}}};\ L_{м.с.} = 2L_x.$$

Необходимо отметить, что в полученных формулах в конечном виде должны появиться коэффициенты, учитывающие размерности величин. Эти коэффициенты должны быть введены при построении полной инженерной методики расчета [2].

В данном случае показан принцип расчета основных параметров. Приведенный расчет может быть выполнен без проведения опытных нагнетаний, он не требует никаких исходных данных, кроме тех, которые характеризуют конкретные параметры пласта: глубину залегания, проницаемость, пористость, а также вязкость жидкости. Следовательно, это дает возможность предварительного расчета и прогноза параметров нагнетания любой жидкости (полимера, микробиологической суспензии и пр.).

В частности, метод применялся для исследования параметров нагнетания в пласт микробиологической эмульсии с целью расчета градиентов давления и установления возможности внедрения бактерий в пласт без их разрушения.

Исследования показали, что при широких пределах изменения расхода (5 – 35 л/мин) и параметров пласта (=1%,3%,5%, k=0,01, 0,1, 0,15, 1 мд) градиент по времени не превышает 60 ат за 1 час, а по пространству – 50 ат на 1 м. При таких величинах жизнедеятельность бактерий не нарушается.

Одномерная постановка задачи дает возможность рассчитывать параметры нагнетания более совершенным методом, чем применявшиеся ранее. Однако такая постановка не дает возможности более глубоко исследовать технологические схемы нагнетания, следовательно, не позволяет найти пути совершенствования схем воздействия. Поэтому необходимо рассматривать двумерный случай (плоскостная фильтрация).

Список литературы: 1. Павлыш В.Н. Развитие теории и совершенствование технологии процессов воздействия на угольные пласты: Монография. - Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. - 347с. 2. Павлыш В.Н., Гребенкин С.С. Физико-технические основы процессов гидравлического воздействия на угольные пласты / Монография. – Донецк: «ВИК», 2006. – 269 с. 3. Павлыш В.Н. Научные основы технологии комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты / Монография. – Донецк: «ВИК», 2008. – 400 с. 4.Математические модели и методы расчета параметров процессов подземных горных работ и добычного оборудования / Монография / Под общ. ред. Гребенкина С.С., Павлыша В.Н. // Гребенкин С.С., Рябичев В.Д., Павлыш В.Н., Должиков П.Н., Зензеров В.И. – Донецк: «ВИК», 2007. – 385 с. 5. Павлыш В.Н. Технология каскадной гидрообработки пласта как способ преодоления его анизотропии //Известия Донецкого горного института. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – Вып.2. - С.58-60.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Павлыш В.Н., Перинская Е.В. *(ДОННТУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел. *+38 (062) 301 03 91; E-mail: elenaperinskaya@mail.ru, pm@donntu.org*

Abstract: *The problem of developing methods for increasing the efficiency of the process of dynamic mixing of an inhomogeneous mass in convective-type apparatus is considered. As one of the options for solving the problem, it is proposed to develop an automated process control system.*
Key words: *control, process, diffusion, parameter, system.*

Актуальность работы: Технология производства многих материалов промышленного назначения включает как базовый этап процесс конвективной обработки многокомпонентных смесей. Вместе с тем, традиционные технологии пока не обеспечивают планируемой эффективности.

В этой связи актуальной является задача модернизации технологических схем и оптимизации параметров процессов.

Цель работы - обоснование структуры и параметров системы автоматизированного управления процессом функционирования аппаратов конвективного типа.

Основное содержание работы: Исследованиями установлено, что основное влияние на процесс конвективного перемешивания многокомпонентных материалов оказывают геометрические параметры (координаты установки элемента вращения, координаты расположения входных трубопроводов для поступающих компонентов) и технологические (скорость вращения конвективного элемента и его позиционирование).

Выбор критериев оценки повышения эффективности при модификации параметров производится в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объёме аппарата.

Модернизация геометрических параметров проводится на основании результатов математического моделирования процесса, и являются стационарными характеристиками.

Динамической характеристикой являются технологические параметры – скорость вращения лопасти и её положение, следовательно, управляя этими параметрами, можно влиять на качество процесса согласно разработанным критериям. Для реализации методов повышения эффективности процесса и качества продукции предлагается разработать систему автоматизированного управления процессом.

На первом этапе считаем, что стационарные параметры определены по результатам компьютерных исследований на основании разработанных математических моделей и программ, а процессом управляет система путём контроля и при необходимости коррекции динамических параметров (скорость вращения конвективного элемента и его положение). При этом в процессе работы оборудования проводится постоянный контроль качества и эффективности на основании критериев.

На втором этапе разработки системы можно ввести блок вариации стационарных параметров с последующими рекомендациями по их модификации. Технически поставленную задачу можно решить на основе использования универсальных компьютеров, которыми в настоящее время оснащается каждое предприятие. Преимуществом этого пути является то, что для реализации задачи достаточно разработать специализированный пакет прикладных программ и обеспечить

связь управляющей аппаратуры с компьютером. Однако при этом возникает ряд проблем, вызванных характером работы: объекты управления находятся нередко под землей, зачастую на большом удалении, нагнетание производится одновременно на нескольких участках, установки периодически передвигаются, а это требует создания дорогостоящих линий связи, их защиты, обеспечения мобильности. Поэтому на практике более предпочтительным является путь создания специализированного устройства управления, которое работает в непосредственной связи с технологическим оборудованием.

Исследования показали, что наиболее приемлемым в данном случае является применение специализированных устройств на базе микроконтроллера [1, с.135, 113].

Контролируемые параметры: скорость вращения $\omega(t)$, t – текущее время). Перед началом процесса задаются исходные данные, устанавливается $t = 0$, запускается устройство контроля и управления (УКУ).

Проект системы включает набор специализированных электронных устройств, функционирование которых координируется с помощью программируемого микроконтроллера, и пакета программ. Структура базовой единицы системы приведена на (рис. 1).

Рис. 1 Структура базовой единицы системы автоматизированного контроля и управления процессом

Сигналы с датчиков в виде синусоидального напряжения поступают на вход преобразователей с целью согласования выходного напряжения датчика с уровнем входного напряжения микроконтроллера. В микроконтроллере реализуется прием, хранение и обработка данных, расчет фактических параметров и их сравнение с паспортными, а также выработка и выдача на регулятор управляющих сигналов, если необходимо корректировать их величину.

Критерий окончания процесса – достижение заданного показателя качества либо времени воздействия.

В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом, реализуемый микроконтроллером. Аппарат может быть выполнен либо на базе общепромышленных (универсальных) контроллеров, либо в специализированном исполнении для использования в специальных условиях. В настоящее время свободно-программируемые контроллеры (ПК) приобрели законченную форму программно-технических устройств – это

компьютер на микропроцессорной основе, отличающийся простотой программирования и технического обслуживания и приспособленный к эксплуатации в различных (в том числе и неблагоприятных) промышленных условиях (вибрация, нагрев, запыленность и т.д.) [2, 3, 4, 5, 6, 7,8, 9, 10].

Обобщенная схема ПК приведена на (рис. 2).

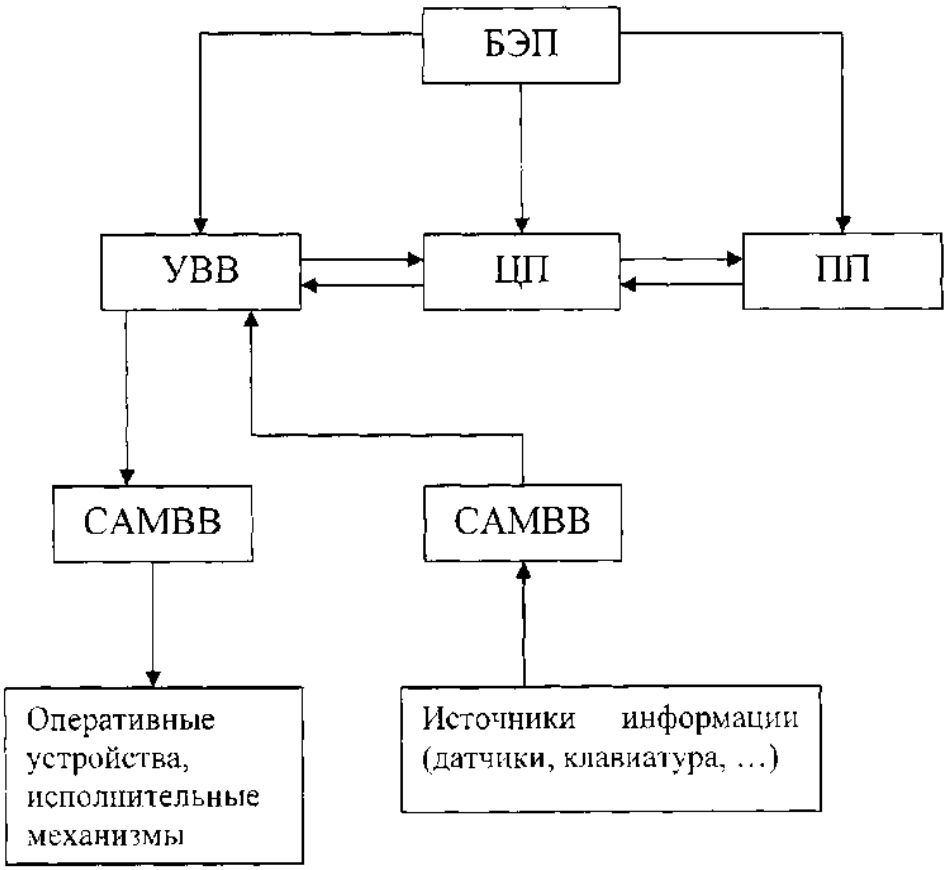


Рис. 2. Обобщенная схема программируемого контроллера (ПК)

ПК состоит из четырех основных компонентов: центральный процессор (ЦП), устройство ввода-вывода (УВВ), блок электропитания (БЭП), память программ (ПП). ЦП представляет собой основной блок ПК, координирующий обработку информации. В нем находится микропроцессорная логика, сканирующая программу и состояние блоков оборудования. УВВ состоит из модулей, применяющихся для сопряжения ПК с оперативными устройствами и механизмами. Модули УВВ действуют в качестве преобразователей сигналов так, чтобы напряжения высокого уровня были представлены на уровне, приемлемом для ПК.

УВВ состоит из модулей, применяющихся для сопряжения ПК с оперативными устройствами и механизмами. Модули УВВ действуют в качестве преобразователей сигналов так, чтобы напряжения высокого уровня были представлены на уровне, приемлемом для ПК. Источники сигналов ввода – датчики, кнопки, клавиатура и др. Адреса вывода – пускатели электродвигателей, контакторы, насосы и т.д. Дополнительно могут применяться специализированные аналоговые модули ввода-вывода (САМВВ).

БЭП преобразует сетевое напряжение в отфильтрованное стабилизированное электропитание ПК, ПП сохраняет программы управления.

Особенностью является то, что память программируется пользователем. ПК программируют по цепной схеме, т.е. на языке, схожем с релейной логикой управления. При внесении изменений в программу к ПК подключают программирующее устройство и соответствующие изменения выполняют без пере монтажа. В течение кванта времени, определяемого частотой устройства управления, производится контроль текущего значения параметров и показателя качества.

Характеристики устройства управления процессом определяются параметрами управляющего автомата. В этой связи важное значение имеют быстродействие автомата и аппаратурные затраты, т.к. устройства устанавливаются на каждую установку.

Выводы: Рассмотрена структура и принципы построения системы автоматизированного управления процессом функционирования аппаратов конвективного типа. Комплекс исходных данных, контролируемых, управляемых и управляющих параметров определяется характеристиками объекта и целями воздействия.

Направлением дальнейшего развития и совершенствования системы является разработка проекта, на основании которого осуществляются все последующие мероприятия, а также выбор и модификация элементной базы конструирования системы и её подсистем.

Список литературы: **1**. Мороз О.К., Павлыш В.Н., Аль-Дахле М.З. Автоматизация управления процессом гидродинамической обработки угольного пласта //Матер.междунар. конф. «III школа геомеханики». - Польша, Гливице-Устронь, 1997. - Часть II. - С.133-136. **2.** Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В.Кафаров, М.Б.Глебов – М.: «Высшая школа», 1991.– 399 с.: илл. **3**. Уэйкерли Дж. Проектирование цифровых устройств, том 2. / Дж.Уэйкерли. – М.: Постмаркет, 2002.– 1064 с. **.4.** Крамер Г. Математические методы статистики /Г. Крамер – М: «Мир», 1975.– 648 с.: илл. **5.** Пьявченко Т.А. Автоматизированные информационно-управляющие системы / Т.А. Пьявченко, В.И. Финаев. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 271 с. **6.** Geering H.P. Optimal control with engineering applications / H.P. Geering. – Springer, 2007. – 141 p. **7.** Павлыш В.Н., Лазебная Л.А., Турчанин Г.И. Совершенствование системы управления процессом гидравлического воздействия на угольный пласт в режиме фильтрации / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. Т. 2. – с. 64-67. **8**. Павлыш В.Н., Лазебная Л.А. Модификация характеристик аппаратурного обеспечения системы управления процессом увлажнения угольного пласта / Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров // Сборник трудов IX Международной научно-методической конференции в городе Сухум с 01 – 09 октября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. – с.183-187. **9.** «Автоматизация управления процессом нагнетания жидкости в угольный массив» /Сост.: Павлыш В.Н., Лазебная Л.А. Материалы международной конференции по управлению «Автоматика – 2002», 16 – 20 сентября 2002 г., Донецк, стр. 231 – 235. **10.** «Разработка структуры специализированного вычислительного устройства для контроля параметров и управления технологическим процессом гидравлического воздействия на угольные пласты»/ Сост.: В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная. Материалы седьмого международного научно-технического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». Книга 2, Таганрог - Донецк, 2006. - стр. 146 – 149.

FORMATION OF MULTI-LAYER COMPOSITE PLASMA OXIDE COATINGS

Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Volodko A. S., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M. *(Belarusian national Technical University, Lykov Institute of heat and mass transfer of the national Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)*
Tel. / Fax +375 17 284-24-91, +375 17 293-95-99, E-mail: ast@hmti.ac.by
niil_svarka@bntu.by

Abstract: *Presents the results of studying the process of deposition of multilayer composite plasma oxide coatings and optimizes the technological parameters of the deposition of multilayer plasma coatings based on hafnium oxide stabilized with yttrium oxide. A gradient plasma coating with a smooth change in physical and mechanical properties has been developed. The technologies of plasma spraying in air (APS) and in vacuum (VPS) were used. ZrO_2 - 25 мас. % CeO_2 was chosen as a ceramic powder for spraying, since after spraying this powder, the maximum amount of the tetragonal phase (up to 99%) remains in the coating, which has a major effect on the heat-shielding properties. Nickel-based alloys was selected as the sublayer: NiCrAlYb u NiCrAlCe.*

Key words: *multilayer plasma coatings, zirconium dioxide, thermomechanical stresses, residual stresses, technological modes of coating deposition, crystal lattices.*

Introduction

The main method used for applying heat-protective coatings made of zirconium dioxide is plasma sputtering (up to 90% of developments) [1-11]. Positive results were also obtained using electron-beam, ion-plasma sputtering, and magnetron sputtering. Nevertheless, the predominant spread of plasma deposition of TP remains, primarily due to its high performance and universality, which allows the application of metal and ceramic materials of a given chemical and phase composition. In General, the TSP is a multi-layer system that includes a metal sublayer, an external ceramic layer, and transition ceramic layers [2-5]. The main reason for the destruction of plasma TPMS is thermomechanical stresses that occur during heat transfer in engines, due to mismatch of the thermal expansion of the base metal and the ceramic layer, as well as the uneven distribution of the temperature field in the coating. Thermomechanical stresses are aggravated by the action of residual stresses that occur in the coating during deposition, and are weakened by the effects of plasticity and creep, which are realized in the metal sublayer. Improving the properties of heat-protective coatings is carried out by changing the structure of the ceramic layer of the heat-protective coating, creating gradient layers. Gradient layers combine the thermal stability of ceramics with the plasticity of metals. Gradual changes in the microstructure without sharp interfaces, smooth changes in microhardness, and convergence of the elastic modulus of the ceramic and metal layers lead to an increase in the strength of the TPP and its durability [6, 7].

Optimization of parameters of plasma deposition of materials based on zirconium dioxide stabilized with cerium oxide

The coatings were applied on a set of plasma spraying equipment manufactured by Plasma-Tech, which included a computer control panel for coating modes, a robot for moving the plasma torch, and a table for attaching the sprayed samples. Coatings were applied to the end surface of disk samples made of ZHS-32 alloy with a diameter of 30 mm and a thickness of 10 mm. Before applying a layer of ceramic coating with a thickness of 0.30-0.40 mm, a sublayer with a thickness of 0.10 mm was applied by plasma spraying in dynamic vacuum from NiCrAlYb and Nicralce powders according to the proposed method. A layer of ceramic coating made of partially stabilized zirconium dioxide according to the

source [12] and the developed method [13] was applied in the same mode: arc voltage-70 V, arc current -550 A, spray distance-100 mm, argon consumption-40 l / min, hydrogen consumption-8 l / min, powder consumption-2 kg / hour, transport gas (argon) consumption-8 l / min. The phase composition of powders and coatings was determined by x-ray diffraction analysis using a DRON-3 x-ray diffractometer. The quantitative content of phases was determined using a scanning electron microscope " Nanolab-7". The adhesion strength was determined on the Instron tear-off machine. Quantitative parameter estimates were defined as averaged over five dimensions. After coating, they were subjected to cyclic testing in a furnace at a temperature of 1170 °C. The temperature in the furnace was measured with a platinum temperature sensor and maintained within 1170 °C ± 8 °. The cycle consisted of heating for 10 minutes, holding at 1170 °C for 60 minutes, and cooling for 60 minutes at 300 °C. For every 10 cycles, samples were removed from the oven for testing when the temperature dropped to 300 °C. Tests continued until the destruction of the ceramic coating, which was taken as the formation of a crack visible to the naked eye. Data on the thermal stability and adhesion strength of coatings obtained from the source [12] and developed by the authors [13] are shown in table 1(the numerator and denominator show the phase composition of plasma coatings before and after thermal Cycling). As can be seen from table 1, the coatings obtained from the powders of ZrO_2 - 25 wt. % CeO_2 manufactured according to the proposed method can withstand 1.5 times more heating-cooling cycles than the coating obtained from the powder manufactured according to [12], while the adhesion strength of the coatings increases by 1.25 times.

Table 1. data on heat resistance and adhesion strength of coatings

Chemical composition of the material	Method of obtaining powder	Phase content, %			Number of thermal cycles	Adhesion strength, MPa
		monoclinic	tetragonal	cubic		
ZrO_2-12% мас.% Yb_2O_3	[12]	-/4	98,9/78,9	1,1/17,1	620	22,6
ZrO_2-15 мас.% CeO_2	пред-	2/27	94/62	4/11	520	18,1
ZrO_2-20 мас.% CeO_2	лагае-	2/6	96/90	2/4	860	26,1
ZrO_2-25 мас.% CeO_2	мый	-/6,1	98,9/93,9	1,1/-	936	28,3
ZrO_2-30 мас.% CeO_2		-/1,5	53/60,6	47/37,9	490	20,2

Thus, the developed method makes it possible to increase the heat resistance of heat-protective coatings to thermal Cycling at temperatures exceeding 1170 °C and provides increased adhesion strength, which leads to longer protection of the substrate from the effects of high temperatures. Optimization of deposition modes for materials based on ZrO_2 - 25 wt powders. % CeO_2 was carried out according to the criterion of maximum material utilization (CMM). At the first stage, the modes were optimized for a constant sputtering distance L = const with a change in the current I and the content of the plasma-forming gas H2. At the second stage, the deposition distance was changed for the optimal constant values of I and H2. At the third stage, the values of the current I varied for optimal parameters of the plasma-forming gas content H2 and the deposition distance L. A NiCrAlCe sublayer with a thickness of 0.10 mm was applied by plasma spraying in a dynamic vacuum on a VPS installation of the company "Plasma-Tech AG". Summary information about the results obtained and the application of multilayer coatings is given in tables 2-4.

Table 2. KIM values (%) for different values of the current and flow H_2

Coating		ZrO_2-25 мас.% CeO_2			
Content H_2, l/min		7	8	9	10
Plasma torch current, A	500	37	40	43	46
	600	50	54	59	60
	700	54	60	68	65
	800	57	54	51	45

Table 3. Оптимальные режимы напыления покрытия ZrO_2 – 25% CeO_2

Coating	Content H_2, l/min	Spray distances, mm	Value of current I, A	Powder consumption, kg/h
ZrO_2 - 25 мас. % CeO_2	9	100	750	2,5

Table 4. KIM values (%) for different spray distances and current values

Coating	Spray distances, mm				
	80	90	100	110	120
ZrO_2 - 25 мас.% CeO_2	58	60	68	47	54
Note-Spraying was performed at I = 700 A, H_2 = 9 l/min					
Coating	Value of current I, A				
	500	600	700	750	800
ZrO_2 - 25 мас.% CeO_2	43	59	68	70	51
Note-Spraying was performed at L =100 mm, H_2 = 9 l/min					

Development of a multi-layer coating with a smooth change in physical and mechanical properties

At the same time, plasma sputtering in air (APS) and vacuum (VPS) technologies were used. ZrO_2 with a SeO_2 concentration in the range of 24 – 26% was chosen as a ceramic powder for spraying, since it is within these limits that the maximum amount of the ZrO_2 tetragonal phase (up to 98%) is stored in the coating after spraying, which has a decisive effect on the heat-protective properties. A Nickel-based alloy comprising 21 wt was selected as the sublayer. % chromium, 9 wt. % aluminum and 0.6 wt. % cerium's. The mentioned alloy has high heat resistance. Two types of coatings were sprayed for comparative analysis: a) five – layer coating: ceramic layer ZrO_2 - 12 - 15% Yb_2O_3 – 100 microns, intermediate layers -80 % (ZrO_2 – 12 – 15% Yb_2O_3) - 20% NiCrAlYb – 100 microns; 50% ZrO_2 – 12 – 15% Yb_2O_3 - 50% NiCrAlYb – 100 microns; 20 % (ZrO_2 – 12 – 15% Yb_2O_3-80% NiCrAlYb -100 microns and finally a sub - layer nicralyb-100 microns. NiCrAlYb sublayer and the first two intermediate layers (20 % (ZrO_2-12-15 % Yb_2O_3-80 % NiCrAlYb; 50% ZrO_2 – 12 – 15% Yb_2O_3 – 50% NiCrAlYb) was applied in a vacuum at low pressure, with a gradual increase in it with an increase in the amount of ceramics in the mechanical mixture, the two upper layers (80%(ZrO_2-12-15% Yb_2O_3-20% NiCrAlYb; ZrO_2-12-15% Yb_2O_3) were sprayed in air (APS) with intensive cooling; b) the five-layer coating developed by the authors: the ceramic layer ZrO_2-CeO_2-100 Microns, Intermediate Layers - 80 % (ZrO_2 - CeO_2) – 20% nicralse - 100 microns; 50% ZrO_2 - CeO_2 - 50% NiCrAlCe - 100 microns; 20 % (ZrO_2 – CeO_2) – 80% NiCrAlCe - 100 microns and Finally the sublayer Nicralse – 100 Microns.

The Nicralce sublayer and the first two intermediate layers (20 % (ZrO_2 - CeO_2) - 80% NiCrAlCe; 50% ZrO_2 - CeO_2 – 50% NiCrAlCe) were applied in vacuum at reduced pressure with a gradual increase in it with an increase in the amount of ceramics in the mechanical mixture. The two upper layers (ZrO_2-CeO_2; 80% (ZrO_2-CeO_2) - 20% NiiCrAlCe) were sprayed in air (APS) with intensive cooling. The gradient ratio of ceramics and a Nickel-based alloy in the intermediate layers was created according to the prototype scheme. Modes of deposition of both layers are shown in table 6. When forming the gradient coating, four ceramic powders were sprayed - zirconium oxide stabilized with cerium oxide, with a different percentage of cerium oxide: ZrO_2-15 wt. % CeO_2; ZrO_2-20 wt. % CeO_2; ZrO_2 - 25 wt. % CeO_2; ZrO_2 - 30 wt. % CeO_2. The phase composition of the coatings was determined by x-ray diffraction analysis using a DRON-3 x-ray diffractometer the Quantitative content of the phases was determined using a scanning electron microscope “Nanolab-7“. The coatings were cyclically tested in an oven at 1150 °C. The temperature in the furnace was measured with a platinum thermocouple and maintained within 1150 °C ± 8°. The cycle consisted of heating for 10 minutes, holding at 1150 °C for 60 minutes, and cooling for 60 minutes at 300 °C. During every 10 cycles, samples were removed from the oven for testing when the temperature dropped to 300 °C. Tests continued until the ceramic coating was destroyed. A sign of destruction was the formation of a crack visible to the naked eye. Comparative data on the heat resistance of coatings obtained from the prototype and the proposed invention are shown in figure 1. As can be seen from figure 1, gradient coatings sprayed from ZrO_2 powders are 20 wt. % CeO_2; ZrO_2 - 25 wt. % CeO_2 according to the technology developed by the authors, the heat resistance is 1.4-1.5 times higher in comparison with the prototype deposition.

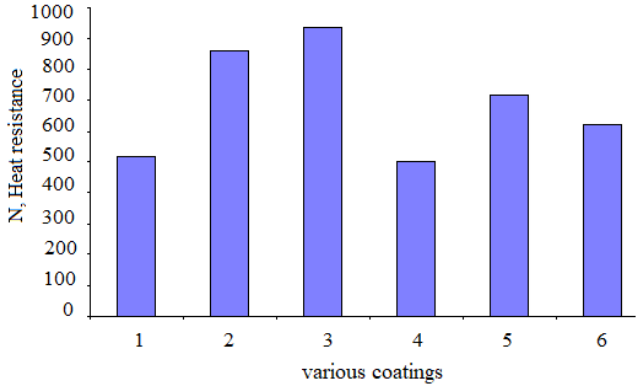


Fig. 1. Heat resistance for various coatings. : 1 - ZrO_2-15 мас.% CeO_2 -NiCrAlCe; 2 - ZrO_2-20 мас. % CeO_2 - NiCrAlCe; 3 - ZrO_2 - 25 мас.% CeO_2-NiCrAlCe; 4 - ZrO_2- 30 мас.% CeO_2-NiCrAlCe; 5 - ZrO_2-25 мас.% CeO_2-NiCrAlYb; 6 - ZrO_2-12-15 мас.% Yb_2O_3-NiCrAlYb .

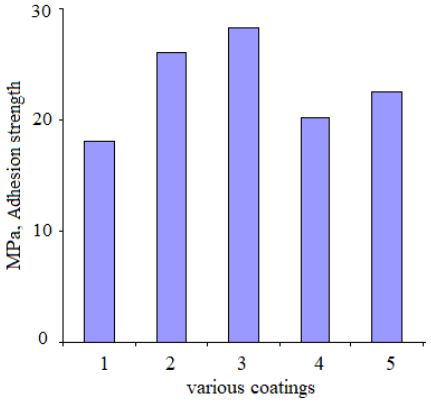


Fig. 2. Adhesion strength for various coatings : 1 - ZrO_2-15 мас.% CeO_2 – NiCrAlCe-18,1; 2 - ZrO_2-20 мас.% CeO_2-NiCrAlCe-26,1; 3 - ZrO_2-25 мас.% CeO_2-NiCrAlCe- 28,3; 4 - ZrO_2-30 мас.% CeO_2-NiCrAlCe-20,2; 5 - ZrO_2-12-% Yb_2O_3-NiCrAlYb .

The heat resistance also increased by 1.8 times in comparison with the deposition of ZrO_2 - 15 wt powders. % CeO_2 and ZrO_2 - 30 wt. % CeO_2, which is associated with the minimum content of the ZrO_2 tetragonal phase (up to 67 wt. %) in the developed TOR. In this case, the ZrO_2 coating is 25 wt. % CeO_2 sprayed on the NiCrAlCe sublayer, all other things being equal, usually have a heat resistance 1.3 times higher compared to the NiCrAlYb sublayer, which is associated with a deterioration in the heat resistance of the latter. Thus, the developed method makes it possible to increase the heat resistance of heat-protective adhesion

Strength was determined on the “ Instron " tear-off machine. Quantitative parameter estimates were determined as averaged over five dimensions. Data on the adhesion strength of coatings are shown in Fig. 2, as well as in table 1. The adhesion strength of coatings obtained from ZrO_2 powders is 25 wt. The % of CeO_2 produced by the proposed method increases by 1.25 times. The structure of the coatings after thermal Cycling in Fig.3. it is resistant to thermal Cycling at temperatures exceeding 1170° C and provides increased adhesion strength, which leads to longer protection of the substrate from high temperatures. Based on Fig. 3, it can be stated that as the temperature increases during the heating cycle, the monoclinic phase is transformed into a tetragonal one, and as a result of volume changes, the resulting stress is compensated by the processes of crack nucleation. During the cooling cycle, the reverse transformation of the tetragonal phase into the monoclinic phase leads to high internal stresses that generate destructive micro-cracking. Examination of the sample after the test revealed the presence of cracks. The destructive nature of this transformation raises serious doubts about the use of zirconium dioxide - cerium oxide alloys containing 20% by weight CeO_2 or less for heat-protective coatings.

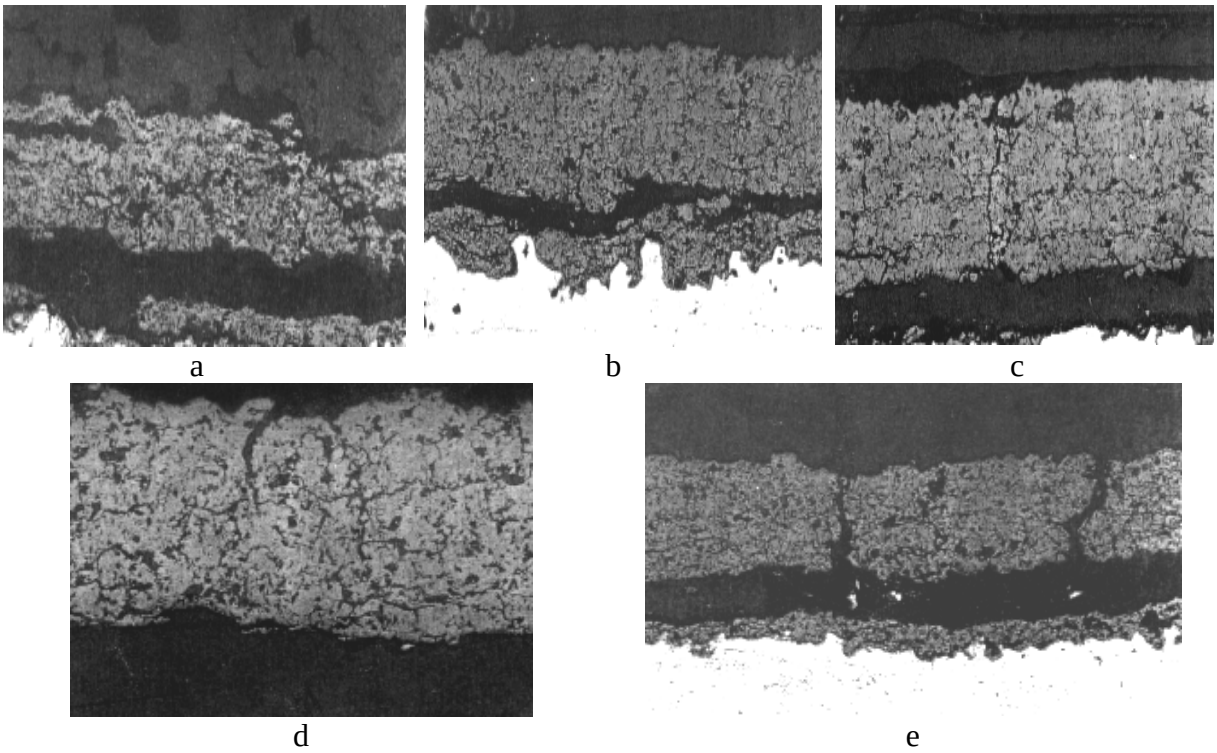


Fig. 3. Structures of coatings after heat treatment (table .1): a-ZrO_2-12 - % Yb_2O_3; b-ZrO_2-15 wt.% CeO_2; c-ZrO_2-20 wt.% CeO_2; d-ZrO_2-25 wt.% CeO_2; e-ZrO_2-30 wt.% CeO_2

Conclusion

Optimization of the production modes of a material based on zirconium dioxide stabilized with cerium oxide was performed to obtain the maximum content of the tetragonal phase in the powder. The coatings obtained from the powders of ZrO_2-25 wt.% CeO_2 produced by the proposed method can withstand 1.5 times more heating-cooling cycles than the coating obtained from ytterbium oxide-stabilized zirconium oxide powder. Thus, the proposed method makes it possible to increase the resistance of the coating to thermal Cycling at temperatures exceeding 1150° C, which leads to longer protection of the substrate from high temperatures. Graded coatings deposited from powders of ZrO_2-20 wt.% CeO_2; ZrO_2-25 wt.% CeO_2 according to the technology developed by the authors showed a thermal stability 1.4-1.5 times higher than that of the ytterbium oxide-based TPP and 1.8 times higher than that of ZrO_2-15

wt powders.% CeO_2 and ZrO_2-30 wt.% CeO_2, which is associated with the minimum content of the ZrO_2 tetragonal phase (up to 67 wt.%) in the TP. Moreover, the ZrO_2 coating is 25 wt.% CeO_2 deposited on the NiCrAlCe sublayer on average have a heat resistance under equal conditions of deposition 1.3 times higher compared to the NiCrAlYb sublayer, which is associated with the worst heat-the bone of the latter.Thus, the use of gradient TPMS developed by the authors leads to an increase in heat resistance by 1.4-1.5 times compared to previously known TPMS, while the adhesion strength of coatings increases by 1.25 times.

References: 1. Ilyushenko, A. F. Plasma coatings based on ceramic materials / A. F. Ilyushenko, V. A. Okovity, A. I. Shevtsov // Minsk: Besprint, 2006. - 316 p. **2**. Panteleenko, F. I. Formation of multifunctional plasma coatings based on ceramic materials / F. I. Panteleenko, V. A. Okovity // BNTU-Minsk. 2019. - 231. **3**. Okovity V. A. Formation and research of plasma two-layer composite coatings (viscous metal layer NiCr and solid ZrO_2) / okovityi V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., S. B. Sobolevsky S. B. // Science and technology, BNTU-Minsk. - 2018. Issue 1. - P. 21-28.**4**. Okovityi, V. A. Technological features of formation of plasma powder coatings from ceramics with non-equilibrium structure / Okovity, Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., okovityi V. V. // Science and technology, BNTU-Minsk. - 2018. Issue.3. - P. 183-189. **5**. Okovity, V. A. Formation and research of plasma powder coatings from oxide ceramics modified by high-energy effects / Okovity V. A., Panteleenko F. I., okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V. / Science and technology, BNTU-Minsk. - 2018. Issue.5. - P. 377-389. **6**. Panteleenko, F. I. Formation of coatings based on zirconium dioxide on elements of anti-meteor protection screens/ Panteleenko, F. I., okovityi, V. A., Okovity, V. V., Astashinsky, V. M., Uglov, V. V. // Bulletin of the Kuzbaz technical University. 2018. №6 (130). Pp. 94-101.**7**. Gao, J. G. Fabrication and high temperature oxidation resistance of ZrO_2/Al_2O_3 micro laminated coatings on stainless steel / J.G. Gao, Y.D. He, D.R. Wang // Materials chemistry and physics. -2010. -№ 123. – P. 731–736**. 8**. S. Sathish, S. Comparative study on corrosion behavior of plasma sprayed Al_2O_3, ZrO_2, Al_2O_3/ZrO_2, ZrO_2/Al_2O_3 coatings / S. Sathish, M. Geetha // Transactions of nonferrous metals so-ciety of China. – 2016. - № 26. - P. 1336–1344. **9.** Microstructural studies of stabilized NiCrAlY - Y_2O_3 cermet coatings ZrO_2 deposited by a plasma arc (PTA) / C.Demian. [et al.] // Mater. Sci. Forum. – 2010. - No. 65. - P. 248-261. **10.** Mechanical properties and thermal shock resistance of HVOF sprayed NiCrAlY coatings without and with nano segiat / X. Sun [et al.] // Thermal spraying technology. – 2012. - № 21. - P. 818–824. **11.** Microwave dielectric properties of low power plasma sprayed NiCrAlY/Al_2O_3 composite coatings / L. Zhou [et al.] // Surface and coatings technology. -2012. - No. 210. - P. 122-126. **12.** Pat. No. 13690 RB IPC S04V 35/10. A method of producing kompozitsionnogo ceramic materi-al./ Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. Applicant and patent holder of BNTU-application no. a 20090464; application 30.03.2009; Byul. No. 5, 2010. **13.** Method for obtaining ceramic powder: Pat. 13736 Rep. Belarus, IPC S04V 35/48 / Okovityi V. A., Sobolevsky S. B., Panteleenko F. I., Shevtsova.I., okovityi V. V.; applicant-GNU " Institute of powder metallurgy - application no. a 20090431; application no. 24.03.2009; publ. 30. 10. 10 // Afitsyny Byul. NATs. Tsentr intelektual. ulasnasci. - 2010. - No. 4.

DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR PREDICTING THE PROPERTIES OF FORMED PLASMA COATINGS

Panteleenko F. I., Okovity V. A., **Devoino O. G.**, **Volodko A. S., Sidorov V. A.**, **Okovity V. V., Astashinsky V. M.** *(Belarusian national Technical University, Lykov Institute of heat and mass transfer of the national Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)*

Tel. / Fax+375 17 293-95-99, +375 17 284-24-91, E-mail: niil_svarka@bntu.by, ast@hmti.ac.by)

Abstract: *Presents the results of studying the criteria should take into account the operating conditions of the formed coatings, the dominant processes of their destruction, as well as factors that hinder these processes. The developed wear-resistant plasma coatings are designed for operation under adverse conditions. At the same time, there are destructions due to microcontact setting, abrasive effects, contact fatigue damage, as well as due to corrosion and mechanical wear. The necessary wear-resistant structure must include elements that contribute to resistance to the specified destruction processes. Active influence on the formation of the structure is possible at the stages of development (selection) of the source material and optimization of the technological parameters of its application to the substrate. Accordingly, it is proposed to use criteria that take into account the composition and particle structure of the initial powders for plasma spraying, as well as the application technology.*

Key words: *wear resistant, plasma coatings, microcontact setting, abrasive effects, contact fatigue damage, corrosion and mechanical wear.*

Introduction

Most developments in the field of plasma spraying of protective coatings reflect the technological aspects of the spraying process, the strength indicators of the obtained coatings, the relationship between the structure and physical and mechanical properties of the applied materials are studied. In such works, it is not taken into account that high-quality plasma spraying is provided by optimizing the composition of the initial materials and technological parameters of the application. When optimizing the composition, first of all, the operating conditions and the mechanism of destruction of the working surfaces of products are taken into account. Based on this, as a rule, two, three or more possible compositions of the material are selected. Studies are carried out to optimize the technological parameters of the application of selected materials with metallographic and X-ray phase analysis of samples. Finally, the performance of the selected materials is judged and, if necessary, the modes of their application are adjusted based on the results of coating tests under conditions that correspond to a certain degree of real operation. Thus, the optimization process requires a lot of time and material costs, and before starting it, it is necessary to determine the criteria that allow the formation of plasma coatings with high performance. Given the urgency of the problem, the purpose of these studies is to develop criteria for predicting the properties of formed plasma coatings.

Criteria for predicting the properties of formed plasma coatings

The criteria should take into account the operating conditions of the formed coatings, the dominant processes of their destruction, as well as factors that hinder these processes. The developed wear-resistant plasma coatings are designed for operation under adverse conditions. At the same time, there are destructions due to microcontact setting, abrasive effects, contact fatigue damage, as well as due to corrosion and mechanical wear. The necessary wear-resistant structure must include elements that contribute to resistance to the

specified destruction processes. Active influence on the formation of the structure is possible at the stages of development (selection) of the source material and optimization of the technological parameters of its application to the substrate. Accordingly, it is proposed to use criteria that take into account the composition and particle structure of the initial powders for plasma spraying, as well as the application technology. The first criterion is based on the requirements for the composition of powders. The composition can be provided by mass-produced products or the production of experimental batches of powders. The second criterion is based on the requirements for a wear-resistant structure, the elements of which are created by optimizing the technological parameters of plasma spraying and subsequent effects on coatings. These elements are usually formed by modifying the fine structure of the raw powder materials. An important element is the porosity (density) of the coating. Criterion that takes into account the composition and particle structure of the initial powders for plasma spraying :

1. To reduce the wear rate, Ni and Cr compositions are preferred, which create prerequisites for increasing the hardness of the sprayed compositions.

2. To reduce the wear rate, multi-layer composite coatings are preferred – a viscous metal sublayer and solid combined layers of ceramics. In such coatings, conditions are created for effective dissipation of the energy supplied during friction in order to avoid stress concentration on the friction surface. In this case, the scale of inhomogeneity should be comparable to the scale of plastic friction deformation at the level of bulk structural elements.

3. To increase wear resistance, powder compositions with elements that activate corrosion - mechanical wear of coatings are recommended. Brittle oxide films formed and destroyed block wear in the thin surface layer. Chromium and nickel contribute to the rapid formation of dense protective films from the corresponding oxides. These elements cause the development of oxidative wear, the rate of which is lower in comparison with wear by microcontact setting.

A criterion that takes into account the technology of applying powder coatings. According to the criterion, the properties of coatings are predicted when analyzing the factors limiting the processes of destruction of the friction surface due to the technology of applying materials. As shown by the results of studies published in sources [1-20], these factors are mainly due to the modification of the fine structure of the initial materials of the applied powders. In accordance with the results obtained, it is possible to identify factors limiting the processes of destruction of the friction surface, which correlate with the following requirements for the technology of applying antimeteorite coatings.

1. The formation of dense coatings with minimal porosity should be ensured. At the same time, the strength of the coating increases, the prerequisites for reducing the rate of wear by microcontact setting are created. To implement the requirements of paragraph 1, high-energy effects can be applied during plasma spraying of materials on the substrate, as well as effects during additional heat treatment of the applied compositions. Plasma sputtering significantly increases the level of kinetic energy, which, when particles collide with the substrate, is spent on their thin-layer spreading and the formation of adhesive bonds with the base material.

2. For the grinding of the grain structure, the formation of nanocrystalline and amorphous phases of increased strength and wear resistance, ultra-fast cooling of melts of local volumes of material should be provided during the formation of a plasma powder coating. This is facilitated by the solidification mechanism of the sprayed particles on the substrate. In the case of plasma deposition on a thin-walled substrate, the particles solidify separately when cooled at a high rate, and the probability of the molten particle hitting the not yet solidified one is not taken into account. In addition, ultra-fast cooling is achieved when coatings are treated with compression plasma jet pulses. In this case, the coating

layers with a thickness of 30 – 250 microns are melted with intensive heat removal into the substrate.

3. For efficient grinding of the grain structure, the formation of nanocrystalline and amorphous phases, ultra-fast cooling of the molten material must be combined with a high level of its plastic deformation. Shifts of the deformable crystal lattice represent new boundaries of crystals with excess free energy. There is a crushing of the grain structure of the material with an improvement in its physical and mechanical properties. In addition, due to the increasing thermal motion, prerequisites are created for changing the type of chemical bonds between the atoms of the crystal lattice. Metallic bonds can become covalent with a decrease in the short-range order of atoms and a strengthening of bonds. According to the results of [11], the plastic flow in crystals promotes the formation of dissipation structures (SD) with the rearrangement of atoms and the transition of the material to an amorphous state. The higher the degree of plastic deformation, the greater the probability of obtaining SD and amorphization as a factor of wear resistance. For the implementation of point 3, high – energy shock-wave effects are promising during plasma spraying of materials on the substrate, with additional heat treatment of sprayed compositions. This is achieved by the use of plasma spraying and pulsed plasma treatment of coatings.

4. To reduce the rate of the main types of wear (microcontact setting, abrasive destruction of the surface, contact fatigue damage), the coating technology should provide secondary fine-dispersed strengthening phases. The duration of the thermal effect of the compression plasma on the material is sufficient to activate chemical processes at the boundaries of the main phases of the composite coating. As a result, fine-dispersed (including nanoscale) compounds are formed, which strengthen the boundaries of the main phases and the coating as a whole. Due to these formations, the number of disoriented phases increases, which contribute to the formation of a dislocation structure. Dislocations are also formed by microcracks and micropores. Such a structure, saturated with energy dissipation channels, significantly reduces the rate of accumulation of internal energy concentrations of the coating from friction. This reduces the possibility of developing foci of destruction of the friction surfaces of coatings.

5. The presence of compressive stresses on the friction surface is also one of the limiting factors of the main wear processes. They complicate the mechanical destruction of rubbing surfaces, especially in contact fatigue damage. Therefore, one of the signs of wear resistance, predicted when applying the coating, is the prospect of creating these stresses through the use of a particular technology. When choosing a technology, it is necessary to give preference to the application of a coating with intensive plastic deformation of its material, which is provided by high-energy effects on the operations of spraying and subsequent processing of the sprayed powder. An example is the combination of the effects of a plasma jet and the impulses of a compression plasma jet. These effects cause plastic deformation and hardening of the fused particles and layers on the substrate, which contributes to the formation of compressive residual stresses.

Conclusion.

Criteria for predicting the properties of formed plasma wear-resistant coatings are developed. The criteria should take into account the operating conditions of the formed coatings, the dominant processes of their destruction, as well as factors that hinder these processes.

References: 1 Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with the inclusion of solid lubricants . Okovity // Welding production -M., 2002. - № 6. - P. 41-43. **2** Okovity,

V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ V. Okovity // J. Welding International, 2003.- vol.16, - No. 11.- P. 918-920. **3** Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V. A. Okovity [et al.] // High Temperature Material Processes, 2014. - No. 18, P. 45-62. **4** Okovity, V. A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / V. A. Okovity, A. F. Panteleenko // Pro-cessing of metals. - Novosibirsk, 2015. - № 67. - P. 46-54. **5** Okovity, V.A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / V.A. Okovity [et al.] // Science and Technology BNTU. - Minsk, - 2018. Issue 3. - P. 183-189**. 6** Theory and practice of applying protective coatings / P.A. Vityaz [et al.] - Minsk, 1998. **7** Vityaz, P.A. Basics of application of wear-resistant, corrosion-resistant and heat-protective coatings / P.A. Vityaz, A.F. Ilyuschenko, A. I. Shevtsov. - Minsk, 2006. - P. 205-243, 280-300, 314-351. **8** Ilyushenko, A. F. Plasma coatings based on ceramic materials / A. F. Il-yushenko, V. A. Okovity, A. I. Shevtsov / / Besprint. - Minsk, 2006. - 316 p. **9** Obuchenie i issledovanie elementov ekrannoy protivometeornoy zashchita na osnove mnogosloynykh kompozitsionnykh plazmnykh pokrytii nial-Al_2O_3 / V. M. Astashinsky [et al.] // 15 Minsk international forum on heat and mass exchange: trudy mezhdunarodnogo forum, Minsk, 23-26 May 2016 / ITMO; ed.: O. G. Penyazkov. - Minsk, 2016. - p. 40-44. **10** Formation of gas-thermal coatings: theory and practice / A. F. Ilyushchenko [et al.]. - Minsk: Besprint, 2002. - 480 p. **11** Heat-protective coatings based on ZrO_2 / A. F. Ilyushchenko [et al.]. - Minsk: Remika, 1998. - 128 p.12 Dostanko, A. P. Processes of plasma coating: theory and practice / A. P. Dostanko, A. F. Ilyushchenko, S. P. Kundas. - Minsk.: Armita-Marketing, Management, 1999. - 436 p. **13** Ivashko, V. S. Modern technologies of applying heat-protective ceramic coatings / V. S. Ivashko, A. F. Ilyushchenko, V. A. Okovityi // News of the Belarusian Engineering Academy. - 1997. № 2(4). - P. 28-32. **14** Technological features of the formation of heat-protective coatings based on zirconium dioxide / V. V. Okovityi [et al.]. // Science and Technology, BNTU. - 2016. - Issue 3. - p. 193-199. **15** Formation and research of multilayer composite oxide plasma coatings on the elements of screen anti-meteor protection / V. A. Okovityi [et al.] // Nauka i tekhnika, BNTU. - 2016. - Issue 4. - pp. 270-276. **16** Development of technology for applying plasma composite coatings based on zirconium dioxide for spacecraft systems / F. I. Panteleenko [et al.] // Nauka i tekhnika, BNTU. - Minsk, 2015. - Issue 3. - p. 5-9. **17**. Liang Zhou. Microwave dielectric properties of low-energy plasma-coated NiCrAlY / Al_2O_3 composite / Liang Zhou Wancheng Zhou, Fa Luo, Jinbu Su, Dongmei Zhu, Yanli // Dong Surf. Coat. Technol.-2015. - P. 69-85. **18.** Nicola Bowler, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 13. -2006. – P. 703-707. **19** G.Bolelli. Thermal protective properties of the gradient ceramic coating NiCrAlY / Al_2O_3 are made by plasma spraying and spraying of a suspension/ G.Bolelli, A.Candeli//Wear 344-345.-2015. P. 69–85. **20** Tolpygo, V.K. Surface rumpling of a (Ni, Pt)Al bond coat induced by cyclic oxidation / V.K. Tolpygo, D.R. Clarke // Acta Mater. – 2000. - № 48. -P. 3283–3293.

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ДИСКОВЫХ БУНКЕРНЫХ ЗАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

Пантюхина Е.В., Прейс В.В. *(ТулГУ, г. Тула, Россия)*
Тел.: +7(4872)734493; E-mail: elen-davidova@mail.ru

Abstract: *The paper considers the mathematical model of the actual feed rate of mechanical disk hopper feeding devices proposed by the authors, taking into account the impact on the feed rate of the device of its parameters and parameters of feeding products, and its verification is carried out using experimental studies of four classical designs of hopper feeding devices.*

Key words: *automatic feeding, hopper feeding device, feed rate, mathematical modeling.*

В различных отраслях промышленности для подачи различных видов штучных изделий небольших размеров и массы в оборудование для сборки в упорядоченном ориентированном положении, с заданным темпом и требуемой производительностью широко используют системы автоматической загрузки (САЗ). Необходимость применения таких систем обусловлена тем, что в большинстве случаев штучные изделия поступают на предприятие «навалом», неориентированными или теряют ориентацию в процессе производства.

Для приведения таких изделий к требуемому положению в САЗ предусмотрено бункерное загрузочное устройство (БЗУ), которое является основным элементом САЗ. БЗУ является уникальным устройством, так как надежная работа каждого конкретного БЗУ будет обеспечена для изделия со строго определенной формой и размерами. Если же происходит незначительное изменение формы или размеров изделия даже в пределах 5-7%, то эффективность и надежность работы БЗУ резко падает [1-2]. В связи с этим постоянно возникают задачи проектирования новых конструкций БЗУ, которые в совокупности с САЗ будут способны обеспечить выполнение своих основных функций.

На ранних этапах разработки и создания новой конструкции БЗУ перед проектировщиками встает задачи определения его главной характеристики – фактической производительности БЗУ. Решение поставленных задач усложняется вероятностным принципом захвата штучных изделий движущимися захватывающими органами БЗУ в процессе его работы. Оно должно базироваться на математических моделях, которые учитывают влияние на производительность БЗУ его конструктивных параметров, окружной скорости захватывающих органов, формы и размеров штучного изделия, коэффициентов трения между самими изделиями, а также изделиями и элементами конструкции БЗУ.

Фактическая производительность $П_{БЗУ}$ [шт./мин] БЗУ с вращающимися захватывающими органами определяется по известному выражению

$$П_{БЗУ} = 60\frac{\upsilon}{t}\eta, \qquad (1)$$

где υ, t – соответственно окружная скорость [м/с] и шаг захватывающих органов [м], определяемые по оси их расположения; η – коэффициент выдачи [3].

Анализ работ советских и зарубежных ученых показал, что они, основываясь на экспериментальных исследованиях и законах классической механики, позволяют получить только области граничных значений кинематических параметров и эмпирические модели производительности конкретных БЗУ для изделий определенной формы и размеров [4]. Данный подход наиболее подробно и широко был изложен в работах В.Ф. Прейса и охватывал различные конструкции БЗУ, описывая коэффициент выдачи в математической модели их производительности в виде общей эмпирической модели, коэффициенты которой определялись экспериментально для каждого БЗУ [5].

Первой работой, в которой был изложен подход, позволяющей получить теоретическое описание коэффициента выдачи на базе теории вероятностей, была монография М.В. Медвидя [6]. Вероятность захвата штучного изделия захватывающим органом описывалась произведением вероятностей перехода изделия из произвольного положения в БЗУ в положение благоприятное для захвата p_i, отсутствием помех при реализации данного перехода со стороны других изделий p_c и слишком высокой окружной скорости захватывающих органов p_υ. Последняя из трех вероятностей некорректно описывала влияние скорости захватывающих органов на вероятность захвата штучного изделия.

Авторами статьи предложен комплексный теоретический подход, в основе которого для описания коэффициента выдачи лежит полученная экспериментальным путем эмпирическая зависимость В.Ф. Прейса вида $\eta = \eta_{max} - \varepsilon\upsilon^4$, приведенная к следующему виду:

$$\eta = \eta_{max}(1 - \varepsilon_{пред}\upsilon^4), \quad (2)$$

где η_{max} – максимальная величина коэффициента выдачи БЗУ, соответствующая окружным скоростям захватывающих органов близким к нулю; ε – коэффициент, определяемый из начального условия невозможности захвата изделия из-за слишком высокой (предельной) скорости $\upsilon_{пред.}$ захватывающего органа, при которой производительность БЗУ становится равной нулю.

Для теоретического определения максимальной величины η_{max} коэффициента выдачи, соответствующего малым окружным скоростям захватывающих органов, было предложено выражение в виде произведения не трех (из-за некорректности вероятности отсутствия помех со стороны слишком высокой окружной скорости захватывающих органов), а двух вероятностей, определяемых по методике М.В. Медвидя:

$$\eta_{max} = p_i p_c. \quad (3)$$

Вероятность отсутствия помех со стороны слишком высокой окружной скорости захватывающих органов учитывается предложенным коэффициентом ε, для определения которого получили выражение

$$\varepsilon = \upsilon_{пред.}^{-4}, \quad (4)$$

в котором предельное значение окружной скорости захватывающих органов определяем с помощью физической модели процесса захвата, разработанной для случая, когда невозможен захват ни одного изделия. Математическая модель производительности представлена выражениями (1) – (4).

Для подтверждения корректности и адекватности предложенной математической модели производительности, проведем ее верификацию с использованием результатов экспериментальных исследований В.Ф. Прейса, полученных для четырех конструкций дисковых БЗУ: с зубьями (тип I), с тангенциальными профильными карманами (тип II), карманчикового наклонного БЗУ с ориентированием на ножах, расположенных в прямоугольных карманах (тип III), вертикального БЗУ (тип IV). В работе [5] приведены схемы и параметры конструкций БЗУ и загружаемых изделий, полученные В.Ф. Прейсом в результате экспериментальных исследований. Для каждого БЗУ были получены выражения для определения коэффициента η_{max} с использованием подхода М.В. Медвидя (табл. 1) и для получения $\varepsilon_{пред}$ была найдена окружная скорость захватывающих органов, при которой производительность будет равна нулю $\upsilon_{пред.}$ (табл. 2).

Таблица 1. Выражения для определения коэффициента η_{max} для всех типов БЗУ

Вероятность	Тип БЗУ	Выражения, описывающие вероятности и другие параметры математической модели
p_i	I	$1-(1-p_{i\,p_{\max}})^3(1-p_{i\,p_{\min}})^{n-3}$
	II	
	III	
	IV	$(p_{k_1}+(1-p_{k_1}-p_{k_2})p_{l_3})p_m$
$p_{i\,p_{\max}}$	I	$p_{k_1}\frac{1}{\pi}(\arccos\frac{l_1-x_c}{\sqrt{(l_1-x_c)^2+\frac{d^2}{4}}}-\arcsin\frac{\mu}{\mathrm{tg}\alpha_{\text{бун}}})$
	II	$\frac{p_{k_1}}{\pi}\left(180^\circ-\arccos(\frac{x_c}{\sqrt{{x_c}^2+0{,}25d^2}})-\arccos(\frac{l_1-x_c}{\sqrt{(l_1-x_c)^2+0{,}25d^2}})-\right.$
	III	$\left.-2\arcsin\frac{\mu}{\mathrm{tg}\alpha_{\text{бун}}}\right)$
$p_{i\,p_{\min}}$	I	$p_{i\,p_{\min}}=p_k\frac{1}{\pi}(\arcsin\frac{d+\Delta t}{\sqrt{{l_1}^2+d^2}}-\mathrm{arctg}\frac{d}{l_1})$
	II	
	III	
p_{k_i}	I	$p_{k_1}=\frac{x_c}{\sqrt{4{x_c}^2+d^2}}+\frac{l-x_c}{\sqrt{4(l-x_c)^2+d^2}}$
	II	
	III	
	IV	$p_{k_1}=\frac{1}{2}-\frac{1}{2\sqrt{1+\left(\frac{0{,}5d-r}{l-x_c}\right)^2}}$, $p_{k_2}=\frac{1}{2}-\frac{1}{2\sqrt{1+\left(\frac{d}{2x_c}\right)^2}}$
p_{l_3}	IV	$\frac{\arccos\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{0{,}5d-r}{l-x_c}\right)^2}}+\arccos\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{d}{2x_c}\right)^2}}-2\arcsin\frac{\mu}{\tan\alpha_{\text{бун}}}}{\pi}$
n	I	$\frac{\pi(0{,}5D-d)+D}{2d}$
	II	$\frac{\pi(0{,}5D-d)+D}{2l}$
	III	
p_m	IV	$\frac{2l}{l+d}$
p_c	I	$1-\frac{\arctan\mu_1}{\pi}\frac{0{,}9+1{,}4l/d}{1+2l/d}$
	II	
	III	
	IV	

В табл. 1 приведены параметры: x_c – расстояние координаты центра масс изделия от его основания с наибольшим диаметром; Δt – величина зазора между стенкой захватывающего органа и расположившегося в нем изделия; l_1 – длина цилиндрического торца изделия; μ – коэффициент трения изделий об элементы БЗУ; μ_1 – коэффици-

ент трения изделий друг о друга; m – показатель, зависящий от длины отрезка линии стыка, свободного от деталей ($m = 1...3$); r – радиус основания колпачка; $\alpha_{бун}$ – угол наклона бункера БЗУ; D – диаметр вращающегося диска по оси захватывающих органов; k – количество захватывающих органов в БЗУ; l, d – длина и диаметр изделия.

Таблица 2. Выражения для определения предельной скорости $\upsilon_{пред.}$ для всех типов БЗУ

Тип БЗУ	Выражение, описывающее предельную окружную скорость
I	$\left[\frac{\pi(D-d)}{k} - 0{,}5\frac{(h_з^2 + d^2) + h_з\sqrt{h_з^2 + d^2}}{h_з + \sqrt{h_з^2 + d^2}}\right]\sqrt{\frac{g\ \sin\alpha}{d}}$, где $h_з = \frac{2D}{k} - d - \Delta t$
II IV	$\left(\sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 0{,}25} - \frac{x_c}{d}\right) \cdot \sqrt{\frac{d \cdot g}{1 + 0{,}5(1 - \frac{x_c}{l}) - \sqrt{1 - \frac{0{,}25d^2}{l^2}}}}$
III	$\sqrt{g(d + 0{,}8\Delta t) + g\sqrt{0{,}04(4\Delta t + 5d)^2 - 0{,}8(\Delta t + d)^2}}$

В табл. 2 приведен параметр: $h_з$ – ширина зуба. Затем с помощью полученных выражений по формуле (4) определяется коэффициент ε.

Значения коэффициентов η_{max} и $\upsilon_{пред.}$ для всех типов БЗУ, полученных авторами с помощью предложенных теоретических выражений и полученных В.Ф. Прейсом путем аппроксимации экспериментальных данных, сведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты верификации

Тип БЗУ	Экспериментальные значения (по В.Ф. Прейсу)		Теоретические значения (по предложенной модели)	
	η_{max}	$\upsilon_{пред.}$	η_{max}	$\upsilon_{пред.}$
I	0,420	0,362	0,431	0,355
II	0,350	1,007	0,374	0,986
III	0,900	0,426	0,928	0,413
IV	0,330	0,799	0,321	0,762

На рис. 1 представлены сравнительные графики зависимости коэффициента выдачи и производительности БЗУ от окружной скорости захватывающих органов, построенные по экспериментальным данным В.Ф. Прейса и на основе разработанных математических моделей. Как показано на рисунке, графики экспериментальных и теоретических зависимостей совпадают с отклонением не более 11%. Учитывая, что колебания производительности могут достигать 20%, то предложенный подход к математическому описанию коэффициента выдачи и производительности БЗУ можно считать адекватным и корректным. Предложенная модель учитывает влияние на производительность БЗУ как его параметров, так и свойств загружаемых изделий.

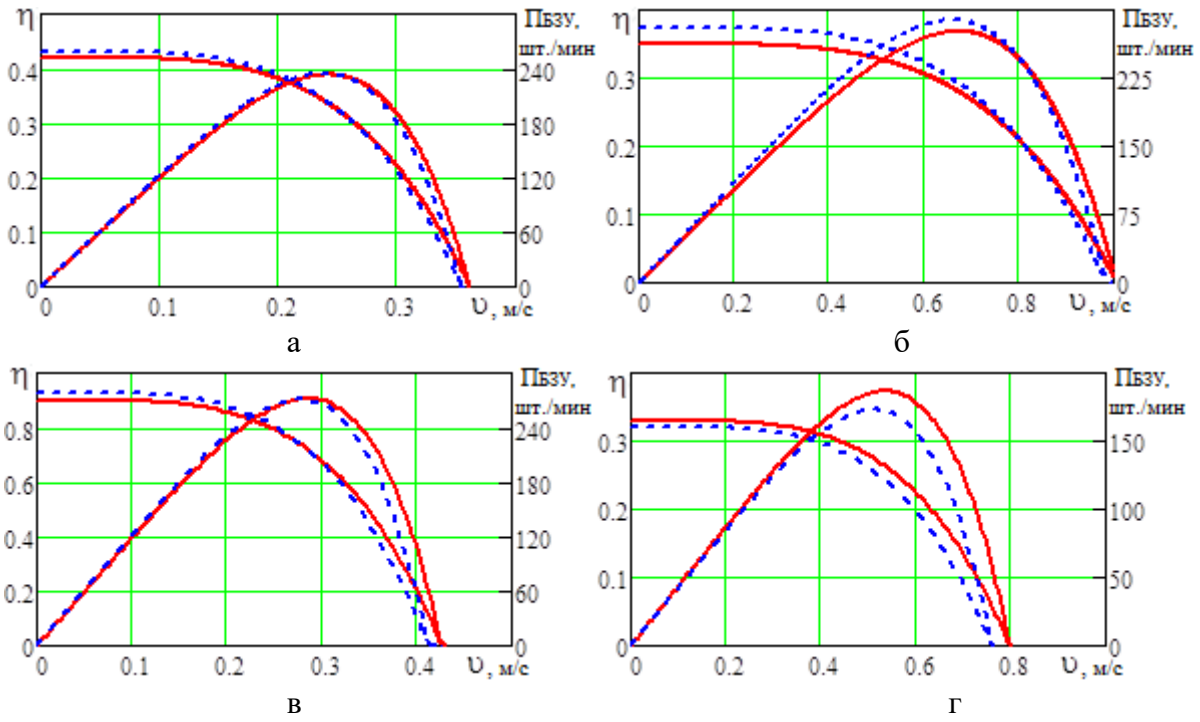


Рис. 1. Сравнительные графики зависимостей коэффициента выдачи и производительности БЗУ от окружной скорости захватывающих органов:
а – тип I; б – тип II; в – тип III; г – тип IV:
(————) – экспериментальные зависимости по В.Ф. Прейсу;
(– – – –) – теоретические зависимости, полученные авторами

Таким образом, предложенный авторами подход к математическому моделированию производительности БЗУ, заключающийся в сочетании методов классической механики и теории вероятностей, позволяет получить корректные математические описания процессов захвата деталей движущимися захватывающими органами и производительности различных конструкций механических БЗУ.

Список литературы: **1.** Прейс В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий// Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2003. № 10. - С. 17-22. **2.** Прейс В.В. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в роторные и роторно-конвейерные линии// Вестник машиностроения. - 2002. № 12. - С. 16-19. **3.** Давыдова Е.В., Прейс В.В. Развитие теории производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств// В сборнике: Производительность и надежность технологических систем в машиностроении. Материалы конференции, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы Российской Федерации, д-ра техн. наук, проф. Волчкевича Л.И.. Под научной редакцией д-ра техн. наук, профессора В.В. Прейса и д-ра техн. наук И.Л. Волчкевича. - 2015. - С. 88-92. **4.** Пантюхина Е.В. Методология комплексного подхода для оценки производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств// В сборнике: Проблемы машиноведения. Материалы IV Международной научно-технической конференции. - 2020. - С. 380-388. **5.** Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками / В.Ф. Прейс [и др.]; под ред. В.Ф. Прейса. - М.: Машиностроение, 1975. - 280 с. **6.** Медвидь М.В. Автоматические ориентирующие загрузочные устройства. - М.: МАШГИЗ, 1963. - 299с.

ОСАДКА С КРУЧЕНИЕМ КАК МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЗАГОТОВОК

Петров П.А., Нгуен Х. Т., Бурлаков И.А.
(Московский Политехнический университет, Москва, Россия)
Тел./Факс: 223-05-23 доб. 2344 E-mail: petrov_p@mail.ru

Abstract: *The work solves the problem of finding rational methods for the manufacture of hybrid blanks for the automotive and aviation industries based on the study of world experience. The advantage of using upsetting with torsion for the formation of a hybrid billet made of БрХ08-Ш alloy is shown.*

Цель работы: на основе обзора результатов исследований российских и зарубежных учёных, а также результатов собственных исследований, определить рациональный метод изготовления гибридных заготовок.

Во многих отраслях промышленности, например, в автомобилестроении, находят широкое применение так называемые гибридные заготовки, которые позволяют учесть особенности работы готовой детали под действием эксплуатационных нагрузок. Как следствие такого подхода, открывается возможность получения облегченных и экономичных деталей методами обработки давлением, что особенно актуально в автомобильной и авиакосмической отраслях промышленности.

Существует большое количество методов получения гибридных заготовок, в том числе с помощью сварки лазерным лучом [1, 2], электронно-лучевой сварки [3], электродной сварки [4, 5] и сварки трением с перемешиванием (Friction-Stir Welding, FSW) [6, 7]. Методы позволяют получать гибридные заготовки со сложной линией разъема. Разработка специальной штамповой оснастки позволяет обеспечить дифференцированные давления в различных точках заготовки, что дает возможность получать высококачественные детали. В работе [8] отмечается, что твердофазное соединение позволяет избежать процессов, связанных с плавлением и затвердеванием, т.к. соединение происходит при температуре ниже точки плавления, что позволяет получать сварные швы с более высокими пластическими характеристиками. Особенно полно данный процесс рассмотрен Xiaocong He и др. в работе [9], где приведены данные по конструкции инструмента для сварки трением с перемешиванием, его износу, анализу возникающих в очаге деформации температур, возникающим напряжениям и моделированию процесса.

Одной из современных прогрессивных несистематизированных для большого спектра материалов и малоизученных технологий пластического формоизменения, позволяющих изготавливать тонкостенные осесимметричные поковки, является штамповка (осадки) с кручением [10].

Существо процесса осадки с кручением заключается в том, что осадка производится между вращающимися друг относительно друга бойками. Ось вращения бойков совпадает с осью осаживаемой заготовки. За счет сил трения на контактной поверхности заготовки с инструментом крутящий момент от инструмента передается деформируемой заготовке и производит ее скручивание. В зависимости от шероховатости поверхностей заготовки и инструмента скручивание чередуется с проскальзыванием. В результате приложения к

заготовке наряду с осевой силой крутящего момента возникает сложная схема напряженно-деформированного состояния. Технологический процесс штамповки с кручением в сравнении с традиционным процессом штамповки характеризуется возможностью получения особотонкостенных деталей методом объемной штамповки и был нами применен для изготовления гибридных заготовок. Применение современных программ для моделирования процессов обработки металлов позволяет существенно оптимизировать режимы деформации гибридных заготовок.

Материал и методы исследования. Исходные заготовки диаметром 10 мм и высотой 10,3 мм были изготовлены из медного сплава марки БрХ08 методом электроэрозионной резки. Исходные образцы (заготовка А и Б на рис. 1) имели диаметр и высоту 10 мм. Перед осадкой их поверхность тщательно протирались спиртом. После подготовки поверхности каждый образец осаживался на гидравлическом прессе на 5 мм от исходной высоты (см. рис. 1). Далее, осаженные образцы (заготовка А и Б) собирались в одну (гибридную) заготовку и устанавливались на плоский инструмент, смонтированный на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1,6 МН, которая осаживалась до высоты 1,63 мм. Твердость исходного материала составляла 110 - 115 HV.

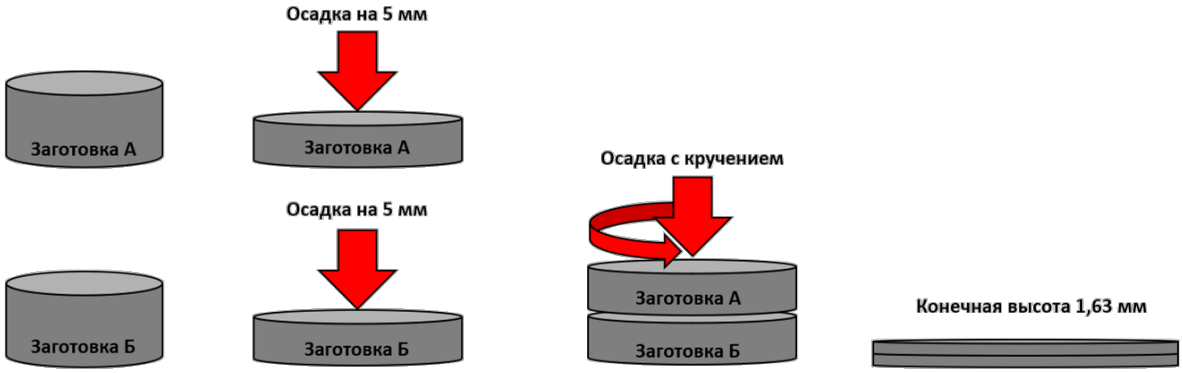


Рис. 1. Схема осадки образцов.

Испытание. Полученные заготовки разрезались электроэрозионным методом в меридиональной плоскости и подвергались металлографическому исследованию на бинокулярном микроскопе. Механические характеристики определяли методом растяжения вырезанных из осаженных заготовок образов на испытательной машине мод. LFM50 со скоростью 2 мм/мин. Моделирование процесса осадки с кручением осуществляли с применением программы QForm VX.

Исследование микроструктуры. Металлографические исследования осуществляли на бинокулярном микроскопе “Olympus Delta” и “FEI QUANTA 650” с увеличениями 500 и 10000. С целью оценки качества соединения образцов осадкой с кручением была проведена их термообработка со следующими режимами: нагрев до температуры 900°С, выдержка в течение 4 часов и охлаждение на воздухе.

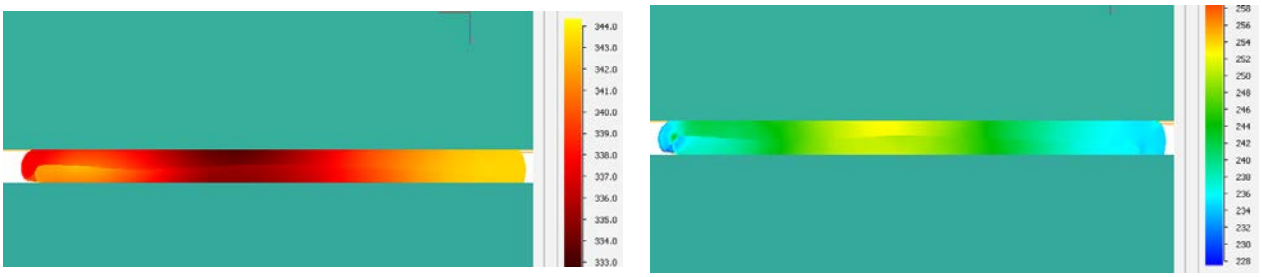
Моделирование. Для моделирования процесса изготовления гибридной заготовки осадкой с кручением применено компьютерное моделирование процесса в программном комплексе QForm VX. В качестве деформируемого материала была применена предложенная Хензелем–Шпиттелем [11] и полученная нами реологическая модель σ_s =

f(ε, $\dot{\varepsilon}$, T), где σ_s – напряжение текучести, ε – величина деформации, $\dot{\varepsilon}$ - скорость деформации, T – температура заготовки

$$\sigma_i = Aexp(m_1T)T^{m_9}{\varepsilon_i}^{m_2}\exp(\frac{m_4}{\varepsilon_i})(1+\varepsilon_i)^{m_5T}\exp(m_7\varepsilon_i)\dot{\varepsilon}^{m_3}\dot{\varepsilon}^{m_8T}$$, где

Температура деформации	A	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_7	m_8	m_9
20 и 400°C	10.049	–0.012	0.436	0.009	–0,029	0.0004	–0.924	0	1.3935

Моделирование позволило установить, что максимальная сила составляет 0,3 МН, которая не превышает возможностей применяемого оборудования, температура в зоне контакта не превышает 400 °С (2а), а интенсивность напряжений в зоне контакта образцов достигает 260 МПа (2б). Высокие контактные напряжения в сочетании с повышенными температурами должны способствовать протеканию диффузионных процессов и обеспечить надежное соединение заготовок (рис. 2).



а б

Рис. 2. Результаты моделирования процесса осадки заготовок с кручением, распределение температуры (а) и интенсивности напряжений (б) в меридиональном сечении

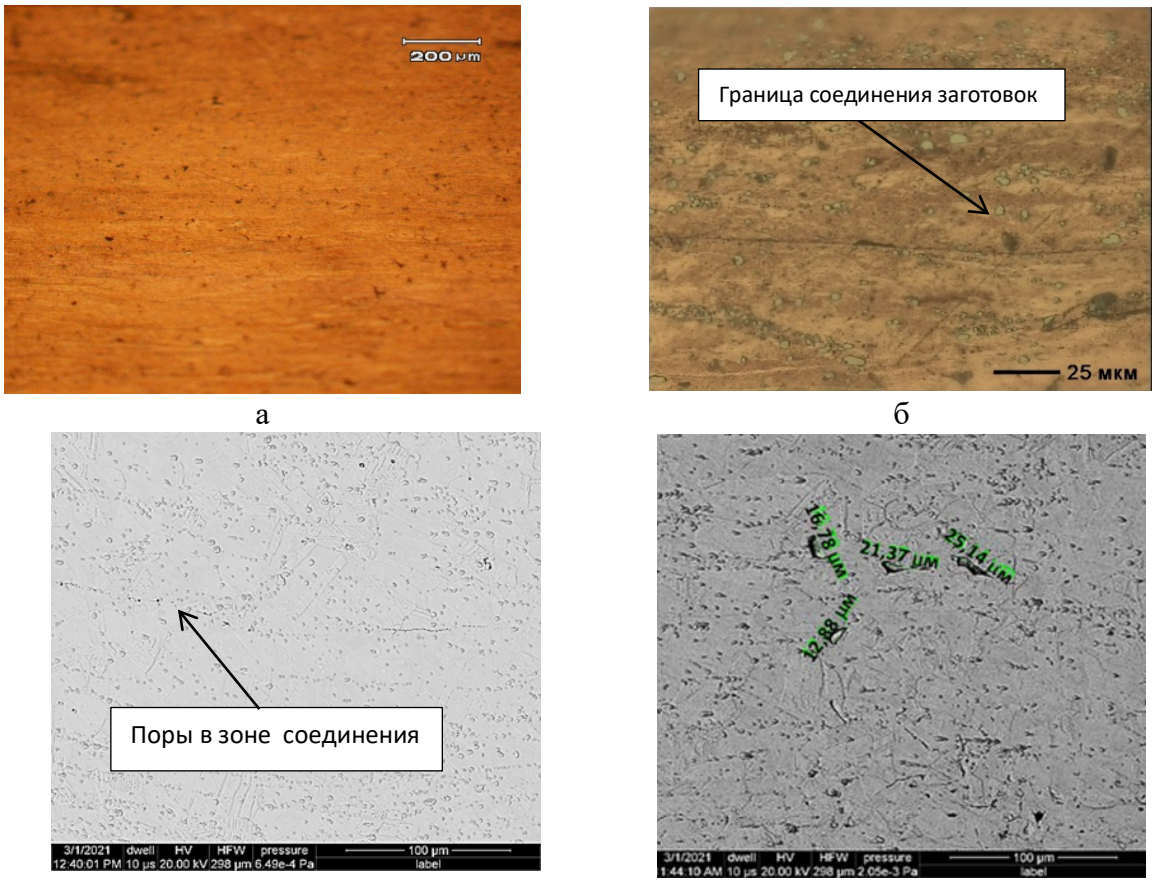
Результаты и обсуждение. После осадки толщина верхней заготовки составляла 0,54-0,93 мм; нижней – 0,26-0,70 мм (рис. 3). Твердость образцов и вблизи границы соединения заготовок различий не имеет и составляет 135-143 HV. Граница соединения заготовок визуально практически не видна (рис. 4а) и обнаруживается только после травления (рис. 4б), что говорит о его высоком качестве.

После термической обработки образцов в результате рекристаллизации полностью исчезли следы границ соединения исходных заготовок за исключением мелких пор (рис. 4в), что говорит о необходимости тщательной очистки соединяемых поверхностей.

Рекристаллизация приводит к образованию новых зерен размером около 12 – 25 мкм и граница соединяемых заготовок практически исчезает. Результаты изучения микроструктуры позволяют сделать вывод о том, что применение осадки с кручением для формирования гибридной заготовки позволяет избежать нагрева соединяемых материалов в области стыка до температуры плавления и это предотвращает неоднородность свойств гибридной заготовки и обеспечивает практически 100% контакт соединяемых заготовок.

а б в

Рис. 3. Внешний вид сварного образца из сплава БрХ08-Ш после осадки с кручением (а), половина образца до травления (б), макрошлиф поперечного сечения (в)



а б

в г

Рис. 4. Микроструктура гибридного образца из сплава БрХ08-Ш после осадки с кручением: а – до травления, б – после травления, в и г – после термообработки

Выводы:

1. Применение гибридных заготовок позволяет снизить весовые характеристики изделий автомобильной и авиационной техники. Использование современного лазерного оборудования позволяет получать гибридные заготовки со сложной линией разъема, что существенно расширяет возможности данной технологии. Дополнительные возможности данного метода возникают в связи с разработкой специальной штамповочной оснастки, обеспечивающей дифференцированные давления в различных точках заготовки. Большой вклад в развитие данного метода вносят так же современные программы, позволяющие предварительно осуществлять моделирование процесса формообразования деталей.

2. Соединение заготовок деформацией кручением под давлением заготовки обеспечивает более плотный контакт соединяемых заготовок за счет смятия микронеровностей и надежное холодносварочное соединение, и является перспективным направлением расширения применения таких соединений.

Список литературы: 1. Xiao Rongshi, Zhang Xinyi. Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys. // Journal of Manufacturing Processes, 16 (2), (2014), 166-175. **2.** Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications. // Journal of Manufacturing Processes, 36 (2018), 571-600. **3.** Slobodyan M., Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review. // Nuclear Engineering and Technology, 2021 (в печати), https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573320308986 **4.** Kang Zhou, Ping Yao. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. // Mechanical Systems and Signal Processing, 124 (1) (2019), 170-198. **5.** Singh V.P., Patel S.K., Ranjan A., Kuriachen B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review. // Journal of Materials Research and Technology, 9(3), (2020), pages 6217–6256. **6.** Fengxiang Xu, Guangyong Sun, Guangyao Li, Qing Li, Experimental investigation on high strength steel (HSS) tailor-welded blanks (TWBs), Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 925– 935. **7.** Xiaocong He, Fengshou Gu, Andrew Ball. A review of numerical analysis of friction stir welding. Progress in Materials Science 65 (2014) 1–66. **8.** Yuri Hovanski, Piyush Upadhyay, John Carsley, Tom Luzanski, Blair Carlson, Mark Eisenmenger, Ayoub Soulami, Dustin Marshall, Brandon Landino, And Susan Hartfield-Wunsch, Friction-Stir Welding to Enable Aluminum Tailor-Welded Blanks, JOM, Vol. 67, No. 5, 2015, 2015 The Minerals Materials and Design 31 (2010) 1365–1383, Metals & Materials Society. **9.** Xiaocong He, Fengshou Gu, Andrew Ball. A review of numerical analysis of friction stir welding. Progress in Materials Science 65 (2014) 1–66. **10.** Субич В.Н., Демин В.А., Шестаков Н.А., Власов А.В. Штамповка с кручением: Монография. –М.: МГИУ, 2008. – 389 с. **11.** Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справ. изд. пер. с нем. М.: Металлургия, 1982. 360 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Петряева И.А., Грубка Р.М., Трубников Д.К. *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
E-mail: irina_petryaeva@mail.ru

Abstract: *Comprehensive accounting and analytical determination of variable parameters will allow you to most accurately simulate the processes in the cutting zone when processing a shaped surface. At the same time, the process of processing a shaped surface is characterized by a constant change in the parameters of the cutting process, which necessitates a detailed study of their mutual influence, the establishment of relationships and patterns of their influence on the processes in the cutting zone.*
Key words: *cutting force, plan angles, dimensionless coordinate, shaped surface.*

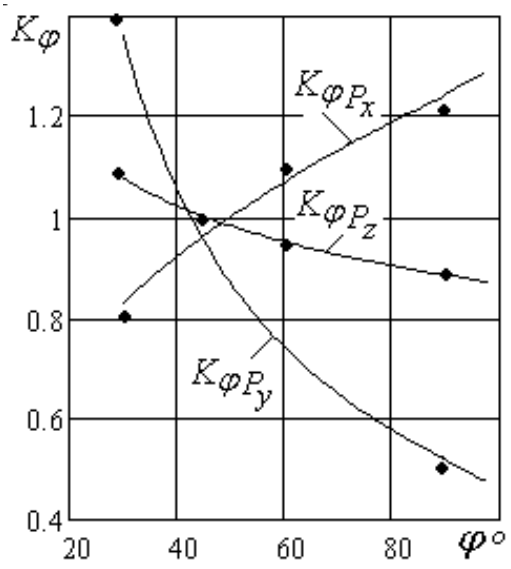


Рис. 1. Графики зависимости коэффициентов изменения сил резания Px, Py, Pz от главного угла в плане φ
(- ● - экспериментальные исследования [1])

При токарной обработке поверхностей силы резания изменяются в зависимости от изменения углов в плане, которые изменяют толщину среза и усадку стружки.

С ростом главного угла в плане φ увеличивается толщина среза, уменьшается усадка стружки, вследствие чего уменьшается и сила резания P_z. Изменение главного угла в плане φ влияет на P_y и P_x: $P_y = P_N \cos\varphi$; $P_x = P_N \sin\varphi$, то есть с увеличением главного угла в плане сила P_y существенно снижается, а сила P_x - растет. Зависимости коэффициентов изменения сил резания P_x, P_y, P_z от главного угла в плане φ, построенные по данным справочно - нормативной литературы [2], представленные на рисунке 1. С использованием регрессионного анализа (с погрешностью до 5%) на базе данных справочно - нормативной литературы установлены следующие зависимости коэффициента изменения сил резания P_x, P_y, P_z от главного угла в плане φ:

$$\boldsymbol{K}_{\varphi Pz} = 0{,}68\varphi^{-0{,}18};\ \boldsymbol{K}_{\varphi Py} = 3{,}28\varphi^{-0{,}87};\ \boldsymbol{K}_{\varphi Px} = -1{,}44\varphi^{0{,}37}. \quad (1)$$

При токарной обработке фасонных поверхностей с учетом переменности кинематического угла в плане $\varphi_K(\xi) = (\varphi_C - \arcsin\xi)$ вдоль безразмерной координаты ξ коэффициенты изменения сил резания P_x, P_y, P_z имеют вид:

- для вогнутой поверхности:

$$\boldsymbol{K}_{\varphi Pz}(\xi) = 0{,}68(\varphi_C - \arcsin(-\xi))^{-0{,}18};$$

$$\boldsymbol{K}_{\varphi Py}(\xi) = 3{,}28(\varphi_C - \arcsin(-\xi))^{-0{,}87}; \quad (2)$$

$$\boldsymbol{K}_{\varphi Px}(\xi) = -1{,}44(\varphi_C - \arcsin(-\xi))^{0{,}37}.$$

- для выпуклой поверхности:

$$\boldsymbol{K}_{\varphi Pz}(\xi) = 0{,}68(\varphi_C - \arcsin\xi)^{-0{,}18};$$

$$\boldsymbol{K}_{\varphi Py}(\xi) = 3{,}28(\varphi_C - \arcsin\xi)^{-0{,}87}; \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{K}_{\varphi Px}(\xi) = -1{,}44(\varphi_C - \arcsin\xi)^{0{,}37}.$$

Графики зависимости коэффициентов изменения сил резания P_x, P_y, P_z от безразмерной координаты ξ приведены на рисунке 2. Заштрихованная область и отвечает зоне невозможной обработки инструментом с ромбической пластиной для вогнутой поверхности, область II - для выпуклой.

Для вогнутой криволинейной поверхности коэффициенты изменения сил резания P_z и P_y уменьшаются, а силы P_x - увеличиваются. Для выпуклой фасонной поверхности коэффициенты изменения сил резания P_z и P_y увеличиваются, а силы P_x - уменьшаются. В точке, соответствующей главному кинематической углу в плане $\varphi_K = 45^o$, как для вогнутых, так и выпуклых фасонных поверхностей они имеют значение 1.

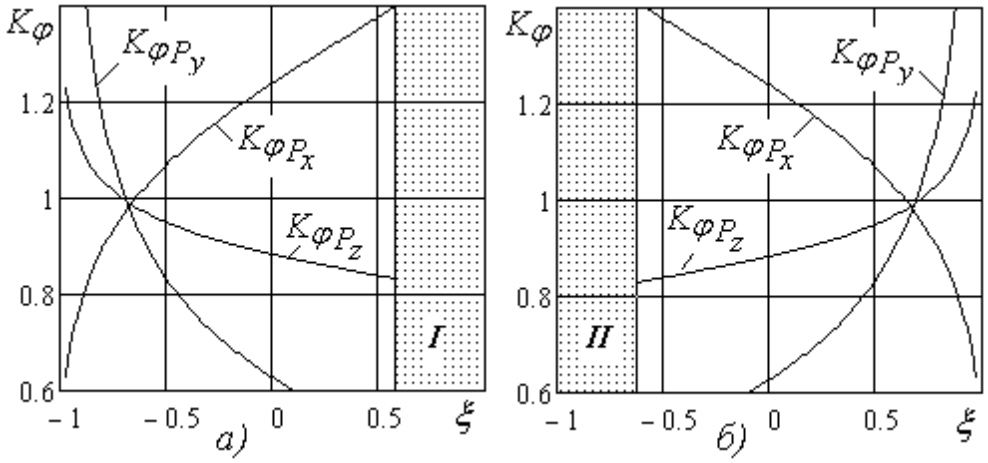


Рис. 2. Графики зависимости коэффициентов изменения сил резания P_x, P_y, P_z от безразмерной координаты ξ для вогнутой - а) и выпуклой - б) фасонных поверхностей

Известная зависимость силы резания от режимов резания [125] с учетом переменности кинематических скоростей резания $V_K(\xi)$ и подач $S_K(\xi)$ позволяет определить характер изменения силы резания вдоль безразмерной координаты ξ фасонной поверхности для конструкционных сталей следующим образом:

$$P_Z(\xi) = C_{PZ}\, K_{PZ}\, \boldsymbol{K}_{\varphi Pz}(\xi) t S_K(\xi)^{0{,}75} V_K(\xi)^{-0{,}15}, \qquad (4)$$

где C_{PZ}, K_{PZ} – постоянный и переменный коэффициенты, зависящие от условий обработки.

Учитывая различный характер изменения подачи и скорости резания вдоль безразмерной координаты ξ фасонной поверхности для различных типов поверхностей и способов обработки, имеем различные возможные варианты изменения силы резания P_Z. Графики, приведенные на рисунке 3 (коэффициент $\boldsymbol{K}_{\varphi Pz}(\xi) = 1$) свидетельствуют о достаточно существенном изменении

сил резания при токарной обработке фасонных поверхностей - в разных точках поверхности сила P_z может изменяться до 2,5 раз.

Коэффициент $K_{PT}(\xi) = P_Z(\xi)/P_Z(0)$ (рисунок 3), рассчитанный по теоретической зависимости силы резания (4) характеризует относительное изменение силы резания.

При токарной обработке фасонных поверхностей с постоянной подачей на оборот S_o сила резания $P_Z(\xi)$ имеет наименьшее значение в точке, соответствующей началу системы координат. В других точках вдоль безразмерной координаты ξ сила резания $P_Z(\xi)$ увеличивается в связи с увеличением кинематической подачи S_K.. Во время обработки с постоянной кинематической подачей сила резания незначительно меняется только в связи с изменением скорости резания, влияние которой достаточно несущественно, и во время обработки вогнутых поверхностей сила резания уменьшается, при обработке выпуклых поверхностей сила резания увеличивается.

Графики, приведенные на рисунке 3 показывают, что результаты расчетов коэффициента относительной силы резания по теоретическим $K_{PT}(\xi)$ и регрессионным $K_P(\xi)$ зависимостям достаточно совпадают (с погрешностью, не превышающей 5%). Это подтверждает возможность использования полученных регрессионных зависимостей коэффициента относительной силы резания от безразмерной координаты ξ для практических расчетов силы резания в любых условиях токарной обработки фасонных поверхностей.

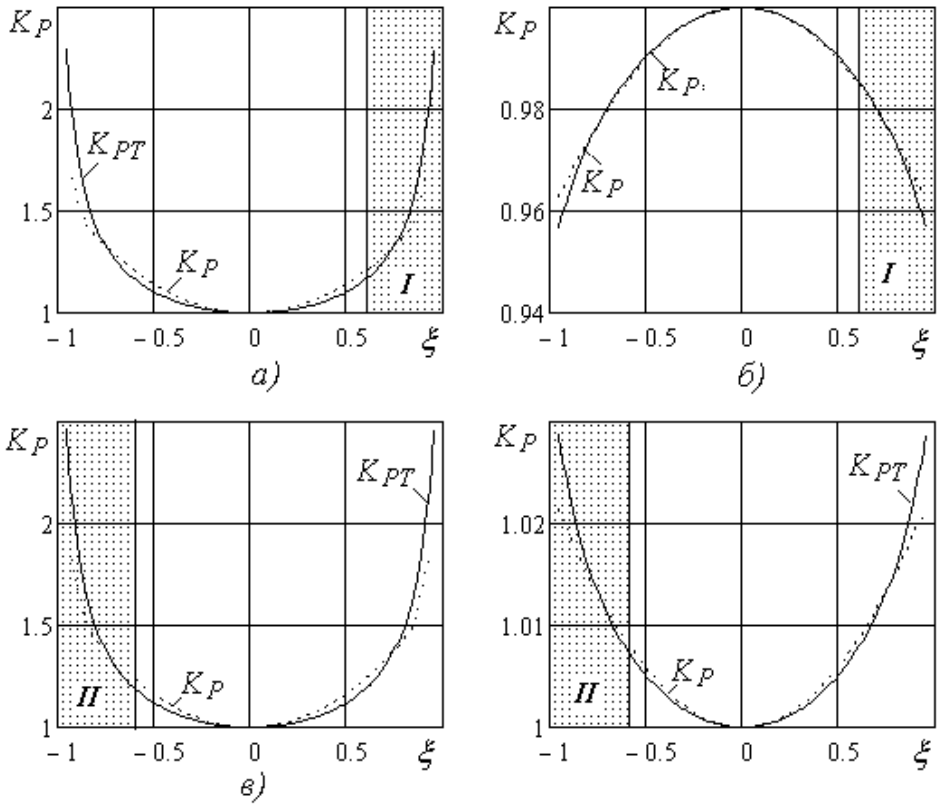


Рис. 3. Графики изменения коэффициента относительной силы резания K_P при обработке вогнутых - а), б) выпуклых - в), г) поверхностей;
с постоянной подачей на оборот S_o - а), в);
с постоянной кинематической подачей S_K - б), г);
___- коэффициент относительной силы резания K_P по теоретической зависимости;
..... - коэффициент относительной силы резания K_{PP} по регрессионной зависимости

С использованием множественного регрессионного анализа установлены зависимости коэффициента относительной силы резания K_P от безразмерной координаты ξ, которая определяет положение вершины лезвия на фасонной поверхности вдоль образующей:

$$K_P(\xi) = 1/\cos(c\xi); \quad c = \frac{1}{\xi_o}\arccos\left(\frac{P_z(0)}{P_z(\xi_o)}\right). \tag{5}$$

В том случае, когда сила резания имеет наибольшее значение в точке, соответствующей началу системы координат, и уменьшается в других точках вдоль безразмерной координаты ξ (при обработке с постоянной кинематической подачей вогнутых фасонных поверхностей) коэффициент относительной силы резания K_P в зависимости от безразмерной координаты ξ должен определяться следующим образом:

$$K_P(\xi) = \cos(c\xi); \quad c = \frac{1}{\xi_o}\arccos\left(\frac{P_z(\xi_o)}{P_z(0)}\right). \tag{6}$$

Значения параметра c при $\xi_o = 0{,}75$ следующие:

- при обработке с постоянной подачей на оборот S_o: c = 1,015 для выпуклой поверхности; c = 0,962 для вогнутой поверхности;
- при обработке с постоянной кинематической подачей S_K: c = 0,217 для выпуклой поверхности; c = 0,29 для вогнутой поверхности.

В общем виде зависимости сила резания $P_Z(\xi)$ от скорости резания V, подачи S, глубины резания t и безразмерной координаты ξ может быть рассчитана по известным зависимостям [2] с учетом коэффициентов относительного изменения силы резания $\boldsymbol{K}_{\varphi Pz}(\xi)$ та $K_P(\xi)$:

$$P_z(\xi) = C_P K_P K_{\varphi Pz}(\xi) K_P(\xi) V^{-n_p} S^{y_p} t^{x_p}. \tag{7}$$

где x_p, y_p, n_p – показатели степени влияния глубины, подачи и скорости резания на силу резания, зависящие от условий обработки.

С использованием регрессионного анализа определены зависимости коэффициента коэффициента изменения сил резания P_x, P_y, P_z от главного угла в плане φ с учетом изменения подачи и скорости резания вдоль безразмерной координаты ξ фасонной поверхности. Установлено, что вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности сила резания Pz может изменяться до 2,5 раз.

Список литературы: 1. Multicriterion optimization of the cutting regimes in the conditions of changeability of the operating limitations / I. Petryaeva, T Ivchenko, A. Mikhailov // International Journal of Modern Manufacturing Technologies. – 2016. No. 1 Vol. VIII. – P. 75-79. **2.** Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 2001. – 944 с.

УДК 622.233.39

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ДОБЫЧИ И ОБРАБОТКИ БЛОЧНОГО КАМНЯ ИЗ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Поветкин В.В.[1], Букаева А.З.[2], Нурмуханова А.З.[1], Бектибай Б.Ж.[1]
(*[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, [2]Каспийский государственный университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, г. Алматы, г. Актау, Казахстан,*)
Тел. 8 (727) 221-15-43; E-mail: vv1940_povetkin@mail.ru

Abstract: *The Republic of Kazakhstan has large reserves of hard rock building stone suitable for the production of facing and industrial products. The thermal tools developed have been used in the vast majority of blockstone mining and surface treatment facilities. It has been established that the performance of flame-jet fracture is proportional to the power of the heat flux going into the rock, the heat power, in turn, depends on the temperature of the gas jet, its speed and the geometric dimensions of the contact spot. The factors listed above are regime parameters of thermal tools. The study of their influence on the performance of fire-jet fracture is necessary for the design of target burners.*

Key words: *thermotool, rock, detonation burning, fuel components (gasoline, kerosene, air).*

Природный камень – древнейший строительный материал, используемый человечеством на протяжении всей истории существования цивилизации. Из глубокой древности дошли до нас египетские пирамиды, индийские и греческие храмы, дворцы Европы и Азии.

Республика Казахстан располагает крупными запасами строительного камня крепких горных пород, пригодного для производства облицовочных и промышленных изделий. Значительные запасы этих пород в Восточном, Центральном и Южном Казахстане представлены гранитами разнообразного состава и различных расцветок. К ним относятся уже разрабатываемые уникальной голубовато-зеленоватой окраски амазонитовые граниты месторождения Майкуль, красные граниты Курдайского и Акбакайского месторождений, гранодиориты месторождения Кайракты, граниты месторождений Курты, Арасан-Капал, Алатагыл, Желтау и другие [1,2].

Требования промышленности к физико-механическим свойствам и блочности пород определяются ГОСТ 6666-81 «Камни бортовые из горных пород», ГОСТ 9479-98 «Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий», ГОСТ 9479-2011 «Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий».

Сопоставительный анализ добычи и переработки природного камня в мире и в Казахстане показывает, что, несмотря на большие запасы и разнообразие природного камня в нашей стране, огромный рынок сбыта камнепродукции, эта отрасль сильно уступает мировому уровню. Ряд стран наращивает объемы добычи и поставок камня разных видов и качества, особенно высококачественных изделий, тогда как отечественная камнепродукция в своем большинстве неконкурентоспособна на мировом рынке.

Техническое оснащение и производственные технологии карьеров и камнеобрабатывающих предприятий, сформированные еще при централизованной плановой экономике, ненаукоемки и неэффективны в современных условиях рыночных

отношений. Все это обуславливает актуальность для отечественного камнепроизводства инновационной деятельности [3].

Увеличение объемов добычи и обработки камня было достигнуто путем широкого внедрения прогрессивного термического (огнеструйного) способа разрушения, коренным образом отличающегося от всех известных способов разрушения, как по характеру физического воздействия, так и по технологической схеме.

Способ заключается в том, что на породу воздействует сверхзвуковой высокотемпературный газовый поток, в результате чего в ней возникают термические напряжения, приводящие к разрушению поверхностного слоя, положительное явление которого используется при поверхностной обработке блочного камня [4].

Разработке принципов расчета и проектирования термобуров посвящены работы ученых А.В.Бричкина, М.И.Великого, И.П.Голдаева, А.П.Дмитриева, Е.П.Полевичека, И.П.Попова, А.Н.Москалева, А.А.Галяса, А.В.Моторненко, А.В.Ягупова, А.В.Болотова, Б.Р.Ракишева, Ю.Н.Бабина, А.Н.Генбача, В.В.Поветкина и др. В этих работах заложены основы теории реактивных горелок для термического бурения, обработки и резки горных пород, предложены методики их расчета и выбора конструктивных параметров.

Огнеструйный способ разрушения обеспечивает резание и обработку горных пород на современном уровне с высокими скоростями. Так, производительность резания кислородно-керосиновыми термоинструментами достигает 1,3 м^2 площади реза в час, а бензовоздушной – 0,8 м^2/ч [5].

Разнообразные инструменты, применяемые при ударной и термической обработке камня, могут быть разделены по принципу действия на три основных вида: ручные ударные, пневматические и термические. В зависимости от назначения они делятся на инструменты для приближенной и для точной обработки камня [1].

Рис. 1. Процесс распиловки гранитного блока дисковой алмазной пилой

В настоящее время на смену огнеструйной обработки поверхности блочного камня применяются алмазные диски и канатные пилы.

На рисунке 1 показан процесс распиловки гранитного блока дисковой алмазной пилой на Куртинском гранитном карьере.

На рисунке 2 представлены изделия, обработанные дисковой алмазной пилой.

Ввиду простоты работы и организации питания топливными компонентами бензовоздушных термоинструментов, их использование в качестве рабочих органов механизированных установок являются актуальным. Повышение мощности бензовоздушных термоинструментов, без значительного развития их габаритных размеров и увеличения размеров факела горелки, соизмеримого с размерами обрабатываемых поверхностей изделий из камня (бортовой камень, ступени и др.), возможно за счет интенсификации процессов горения [5].

Одним из средств интенсификации горения свободных струй за пределами среза сопла Лаваля является дожигание продуктов неполного сгорания в сверхзвуковой струе факела горелки [6].

а) б)

а – бортовой камень; б – распиловка на тонкие плиты

Рис. 2. Изделия, обработанные дисковой алмазной пилой

В настоящее время разработано большое количество конструкции термоинструментов, обладающих высоким термическим эффектом [6-9].

Разработанные конструкции терморезаков [6-9] решили ряд технологических задач – повысили производительность разрушения горных пород, автоматизировали запуск горелок в работу, что важно при разработке рабочих органов механических термоагрегатов, но существенного эффекта увеличения термодинамических параметров горения в этих конструкциях горелок не было достигнуто. Проводимые исследования для получения явления детонации в свободной струе горелок при сжигании в ней топливных компонентов в различных стехиометрических соотношениях не привел к созданию мощных ударных волн и, как следствие, детонационных явлений.

Однако введение в обогащенную горючим газовую струю горелки недостающего топливного компонента – окислителя и сжигание этих компонентов в призабойном пространстве, т.е. в отсоединенном от забоя скачке уплотнения, дало положительные результаты, но прирост производительности незначителен.

Проводимые исследования по интенсификации горения показывают перспективность применения явления детонационного горения для термического разрушения горных пород [10].

С увеличением ударного импульса струи (механической составляющей) разрушение горных пород протекает интенсивнее, а вероятность оплавления забоя уменьшается. Величина ударного импульса струи пропорциональна квадрату его скорости, следовательно, значительное увеличение динамической составляющей скорости струи можно получить, используя явление детонации.

Внедрение технологии добычи блоков с использованием термической резки на ведущих камнеобрабатывающих предприятиях Казахстана показало, что породы большинства гранитных месторождений хорошо разрушаются газоструйными термоинструментами с приемлемой для практики скоростью. Средняя производительность резания составляет 0,65-1,2 м^2 щели в час [10].

Наибольшее распространение в камнеобрабатывающей промышленности нашел керосино-кислородный терморезак ТР-14/22-5 (терморезак ручной, диаметр камеры сгорания – 14 мм, калибратора – 22 мм, модель – 5) конструкции КазНИТУ имени К.И.Сатпаева (рисунок 3). В рукояти терморезака размещены системы управления и защиты прибора.

Терморезак ТР-14/22-5 является усовершенствованной моделью прибора ТР-14/22 [23] и имеет следующие показатели:

-производительность обработки – 1...2 м^2/ч при толщине снимаемого слоя 0,05...0,06 м или 100...150 кг/ч отбиваемого материала;

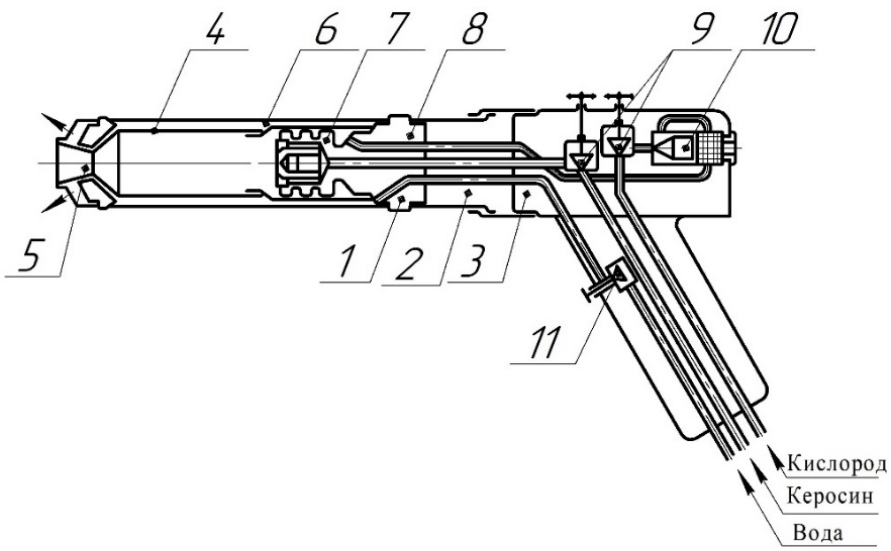


Рис. 3. Схема терморезака ТР-14/22-5
1 – наконечник; 2 – переходник; 3 – хвостовик; 4 – камера сгорания; 5 – сопло; 6 – форсунка; 7 – завихритель; 8 – распределительная головка; 9 – вентили дросселирующие; 10 – система защиты от обратных ударов; 11 – клапан водяной

- расход кислорода – 15..18 м^3/ч, керосина – 8...9 л/ч, охлаждающей воды – 160...200 л/ч;
- давление рабочих компонентов: кислорода – 1,2...1,5 МПа, керосина – 1,2...1,5 МПа, воды – 0,3...0,5 МПа.

В КазНИТУ имени К.И.Сатпаева была разработана более совершенная конструкция термоотбойника с вихревым энергоразделителем воздуха на горячий и холодный потоки. В новом инструменте горячий поток воздуха используется для воспламенения горючей смеси и непосредственного участия в процессе горения, холодный поток – для охлаждения камеры сгорания (рисунок 4).

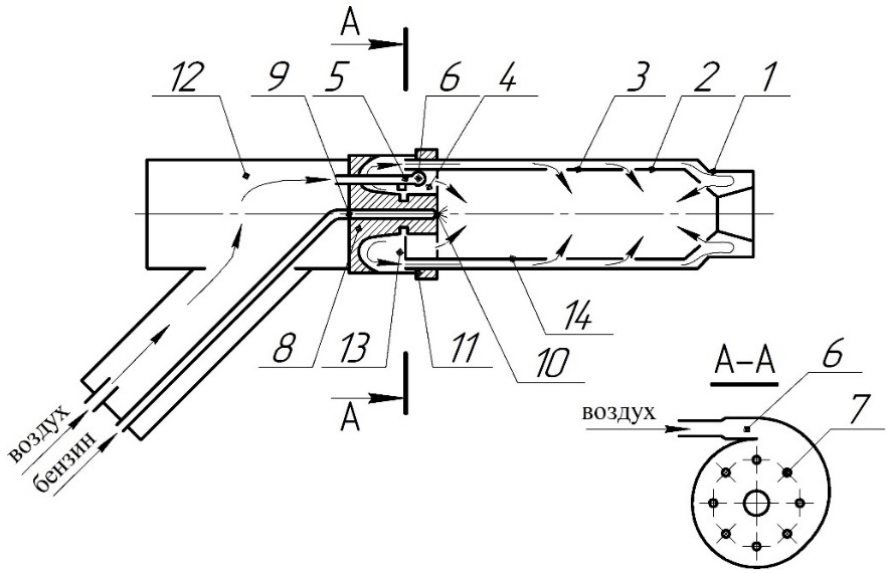


Рис. 4. Термоотбойник с энергоразделителем
1 – сопло; 2 – жаровая труба; 3 – кожух; 5 – вихревая камера; 6 – отверстия для прохода воздуха; 7 – наклонные отверстия; 8 – конус; 9 – центральный канал; 10 – форсунка; 11 – контргайка; 12 – рукоять

Созданы и работают бензовоздушные термоинструменты БВР-60 и ГВК-70, которые на 18...20 % экономичнее и производительнее терморезаков ТРВ-12 и имеют следующие показатели:

- производительность обработки при толщине снимаемого слоя 0,045...0,05 м составляет 1,3...1,4 м^2/ч или 100...110 кг/ч отбиваемого материала;

- производительность резки щели – 0,7...0,8 м^2/ч при ширине щели 0,1...0,12 м;

- расход сжатого воздуха – до 9 м^3/мин, бензина – 20-25 л/ч;

- давление компонентов: воздуха – 0,5...0,6 МПа, бензина – 0,5...0,6 МПа.

Механизм термического разрушения горных пород при их резании и поверхностной обработке такой же, как и при бурении шпуров и скважин, и носит характер потери устойчивости поверхностного слоя в том случае, когда его температура достигнет температуры разрушения T_p, которая определяется по выражению [11]

$$T_p = \frac{2K(1-\mu)}{\beta E} \quad (1)$$

где K – условный предел прочности (характеризует сжимающие напряжения в нагреваемом поверхностном слое породы, при которых происходит потеря его устойчивости);

μ – коэффициент Пуассона, Дж/кг·К;

β – коэффициент линейного теплового расширения;

E – модуль упругости, МН/м^2;

Время от начала нагрева поверхности до момента достижения температуры разрушения определяется выражением

$$\tau_p = \frac{x}{h^2 a} \quad (2)$$

где x – текущая координата;

h – характерный размер;

a – коэффициент температуропроводности,

а толщина отделяющего при этом слоя – выражением

$$\Delta = \frac{1}{h(U-1)} \quad (3)$$

где $U = \frac{\theta}{T_p}$.

Высокотемпературная газовая струя (температура до 2000...3000°С) со сверхзвуковой скоростью (свыше 2500 м/с) воздействует на поверхность горных пород. Под влиянием высокой температуры в горных породах происходит резкое увеличение объема отдельных минеральных зерен, что приводит к образованию внутренних напряжений в поверхностном слое породы с последующим ее разрушением, протекающем обычно в режиме шелушения.

Быстрота разрушения породы, под действием высокотемпературной газовой струи, зависит от теплофизических свойств породы, ее минералогического состава, структуры, текстуры, степени выветрелости, трещиноватости, рационального использования энергии газовой струи и др.

Наибольшая производительность терморезаков достигается обычно на монолитных крупнозернистых гранитах с высоким содержанием кварца (30...40 %) и минимальным содержанием биотита (до 10 %) – до 1,2 м^2/ч при ширине щели до 0,10 м, глубиной до 5 м. Важнейшим фактором, влияющим на производительность терморезаков, является рациональное использование энергии газовой струи, определяемое расстоянием от забоя щели до среза сопла горелки (оптимальное – 70 мм) и углом атаки газовой струи (оптимальный – 60°) [12].

Установлено, что производительность огнеструйного разрушения пропорциональна мощности теплового потока, идущего в породу, тепловая мощность, в свою очередь, зависит от температуры газовой струи, ее скорости и геометрических размеров пятна контакта. Перечисленные факторы являются режимными параметрами термоинструментов. Изучение их влияния на производительность огнеструйного разрушения необходимо для проектирования горелок целевого назначения.

Выводы:

1. Выполнен анализ современного состояния развития добычи и обработки природного камня из гранитов с применением огнеструйных горелок;
2. Рассмотрены процессы добычи и обработки блочного камня из крепких горных пород;
3. Рассмотрены этапы развития конструкций огнеструйных горелок для разрушения горных пород при добыче и обработке блочного камня из крепких горных пород по патентным материалам;
4. Выполнен анализ огнеструйного способа разрушения горных пород, используемого при добычи и обработки блочного камня и перспективы его развития;

Список литературы: 1. Чирков А.С. Добыча и переработка строительных горных пород: Учебник для вузов. - М.: Изд-во МГТУ, 2001. - 623 с. **2.** Мендекеев Р.А. Научно-прикладные основы создания техники и технологий для камнедобывающей промышленности: автореф. … д-ра техн. наук: 05.05.06. – Бишкек: Кыргызско-Узбекский университет, 2008. – 46 с. **3.** Поветкин В.В. Процессы и технология огнеструйной обработки блоков крепких горных пород: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.15.11. – Алматы: КазНТУ, 2001. – 42 с. **4.** Пат. 2381897 РФ. Устройство для распиловки камня алмазным канатом / Макарев Г.Г.; опубл. 20.02.2010, Бюл. №5. - 11 с. **5.** Гуров М.Ю. Обоснование технологических параметров добычи и разделки гранитных блоков канатно-алмазными пилами: автореф. ... канд. техн. наук: 25.00.22, 25.00.20. - М.: Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2002. - 16 с. **6.** А.с. 724720. СССР. Огнеструйная горелка для термического разрушения минеральных сред / Архипкин В.И., Поветкин В.В., Сеитов А.С., Спасенов М.И., Шапарев С.В.; опубл. 30.03.80, Бюл. №12. - 2 с. **7.** А.с. 1209855. СССР. Устройство для термического разрушения твердых пород / Поветкин В.В., Сейтбаталов С.М., Тлеуов М.Г.; опубл. 07.02.86, Бюл. №5. - 3 с. **8.** А.с. 1221346. СССР. Устройство для термического разрушения горных пород / Тлеуов М.Г., Поветкин В.В.; опубл. 30.03.86, Бюл. №12. - 3 с. **9.** Пат. 15191 РК. Горелка термоинструмента / Генбач А.А., Беркинбаев Г.Д., Абитов К.А., Алшымбаева Р.Т.; опубл. 16.07.2007, Бюл. №7. – 5 с. **10.** Першин Г.Д., Голяк С.А., Уляков М.С., Караулов Н.Г., Сорокин И.С., Домнин В.Ю., Иштакбаев Р.Ф. Современные технологии добычи блочного гранита // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – Москва, 2014. - №12, - С.163-167. **11.** Дмитриев А.П., Гончаров С.А., Германович Л.Н. Термическое разрушение горных пород. - М.: Недра, 1990, - 255 с. **12.** Povetkin V.V., Khandozhko A.V., Bukayeva A.Z., Nurymov Y.K. Study of the application high velocity thermal spraying tools used in technological processes and production // News of the academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. - Almaty, 2017. - №5. - P.190-201.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В БАЛКАХ С НЕРАВНОМЕРНЫМ НАГРЕВОМ ПО СЕЧЕНИЮ

Пожидаева Л.А., Смирнов В.М., Царенко С.Н.
(*ФГБОУ ВО «КамчатГТУ», г. Петропавловск-Камчатский, Россия)*
Тел. +7 (4152) 300977; E-mail: lorochka950@gmail.com

Abstract: *During operation, elements of structures, structures and machine parts can be exposed to temperature effects, at which the temperature across the cross section of the beam will be inhomogeneous, as a result of which additional deformations occur in the element in the transverse direction. In this work, we calculate the deformation using some fictitious load, which will cause deformation of the rod at an equivalent temperature.*
Key words: *bending, thermal deformation, uneven heating, stress.*

В процессе работы элементы конструкций, сооружений и деталей машин могут подвергаться температурным воздействиям, при которых температура по поперечному сечению балки будет неоднородна, вследствие чего в элементе возникают дополнительные деформации в поперечном направлении. К примеру, такое явление возникает при определенных технологических условиях работы в трубах вращающихся печей (рис. 1). В учебной литературе [1-4] вопрос температурных деформаций и напряжений преимущественно ограничивается рассмотрением статически неопределимых систем в случае растяжения, сжатия. Расчет конструкции с элементом, имеющим линейный перепад температур между слоями и защемленный с двух концов, рассмотрен в работе [5] с использованием метода перемещений. Таким образом, тема температурных деформаций, вызванных неравномерной температурой по поперечному сечению раскрыта в литературе недостаточно.

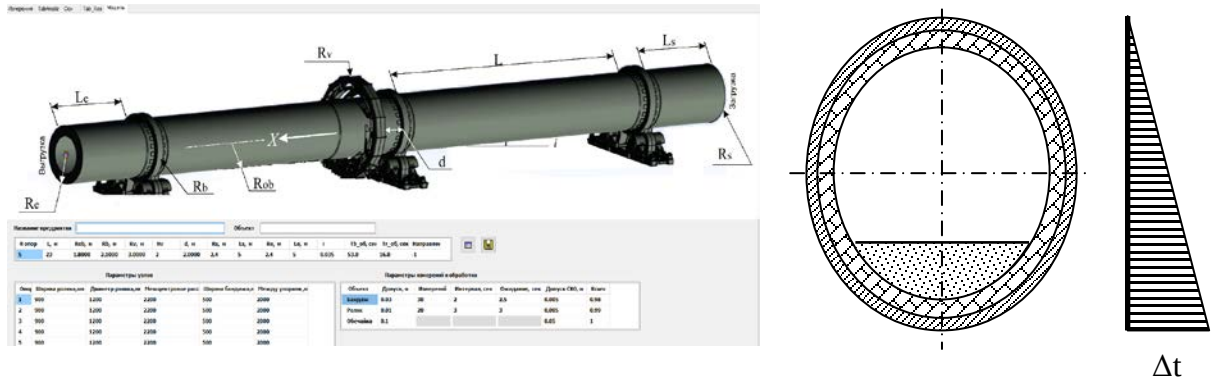


Рис. 1. Неравномерный нагрев труб вращающихся печей

Рассмотрим стержень, который имеет линейный перепад температур от верхнего к нижнему слою Δt (рис. 1), т.е. относительная температурная деформация волокон будет описываться линейной зависимостью от поперечной координаты

$$\varepsilon_t = \alpha_t \Delta t \frac{y}{h},$$

здесь α_t – температурный коэффициент линейного расширения, h – высота сечения, y – поперечная координата. Такая схема деформации соответствует гипотезе плоских сечений. Если стержень не будет иметь «лишних» связей в продольном направлении, т.е. продольная ось свободно удлиняется (укорачивается), то деформированное состояние стержня не измениться при определении температурных деформаций по

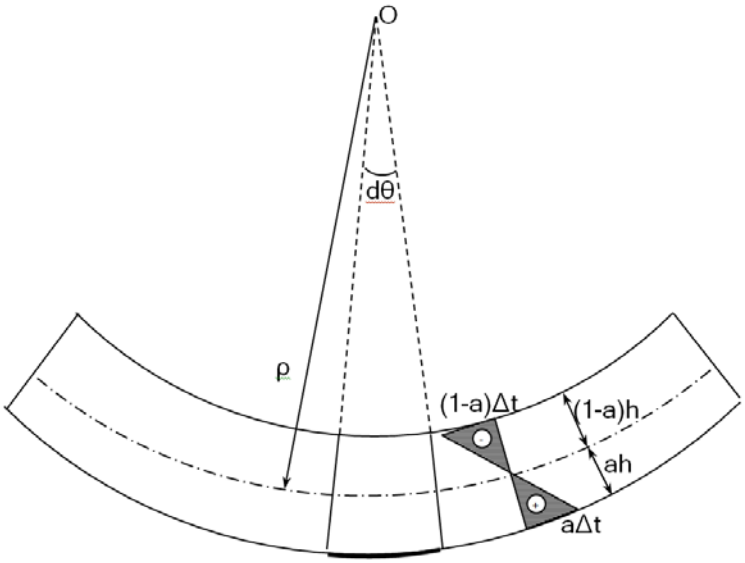


Рис. 2. Расчетная схема для определения деформаций при неравномерном нагреве по толщине балки

кривизны, получим

отношению к продольной оси вместо нижнего слоя (рис. 2). Составим выражение для определения относительной деформации нижнего волокна

$$\varepsilon_t = \frac{(\rho + ah)d\theta - \rho d\theta}{\rho d\theta} = \alpha_t a \Delta t, \quad (1)$$

где a – параметр определяющий положение нейтрального слоя (центра тяжести сечения). Из уравнения (1) получим выражение для определения кривизны

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\alpha_t \Delta t}{h}.$$

Используя упрощенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\alpha_t \Delta t}{h}. \quad (2)$$

В случае, когда разность температур Δt однородна по длине стержня (рис. 3), решение дифференциального уравнения (2) будет иметь вид

$$y(x) = \frac{\alpha_t \Delta t}{h} \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2, \quad (3)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, которые определяются из условий закрепления балки. Эпюры прогибов для консольной и двухопорной балки представлены на рис. 3.

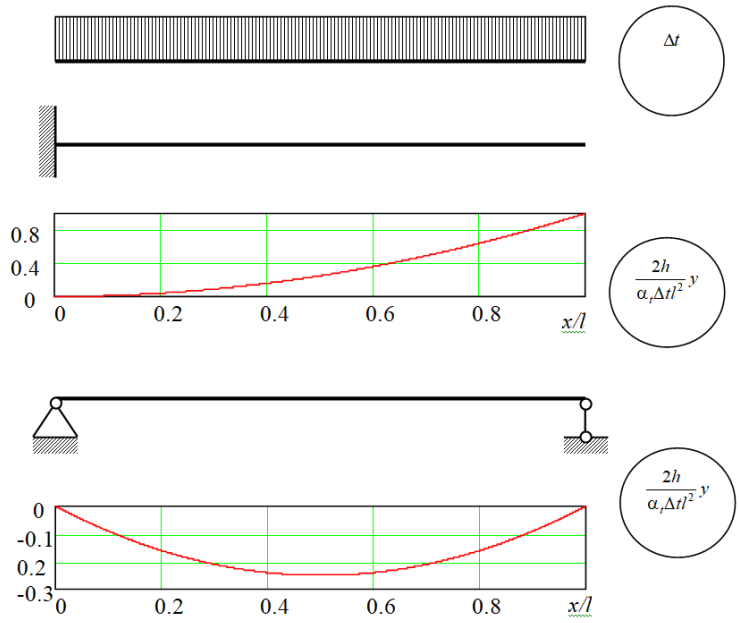


Рис. 3. Эпюры прогибов в консольной и двухопорной балке, вызванные неравномерным нагревом

Если разность температур Δt линейна по длине стержня, решением дифференциального уравнения (2) будет

$$y(x) = \frac{\alpha_t \Delta t_{\max}}{lh} \frac{x^3}{6} + C_1 x + C_2. \quad (4)$$

Когда расчетная схема имеет простой вид, полную деформацию балки можно определить по принципу суперпозиции, как сумму температурных перемещений найденных по зависимости (3) или (4) и перемещений от активной нагрузки, но для сложных схем используют более удобные методы, такие как метод начальных

параметров и правило Верещагина. Поэтому для того чтобы использовать единообразный подход к определению деформаций целесообразно использовать некоторую фиктивную нагрузку, которая будет вызывать деформацию стержня эквивалентную температурной. Такой нагрузкой может быть только моментная нагрузка, действующая на балку, так как рассматриваемое деформированное состояние аналогично состоянию чистого изгиба.

Составим уравнения прогибов для схем, представленных на рис. 4

$$y(x)=\frac{M_t}{EJ}\frac{x^2}{2}+C_1x+C_2; \tag{5}$$

$$y(x)=\frac{m_t}{EJ}\frac{x^3}{6}+C_1x+C_2. \tag{6}$$

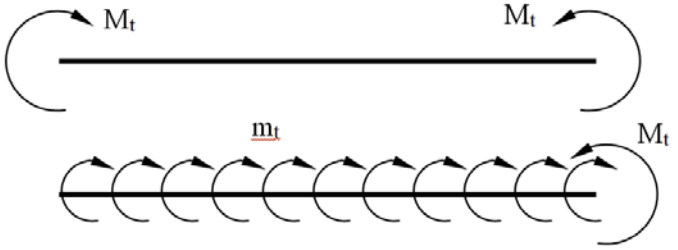


Рис. 4. Расчетная схема использования квазинагрузки для балок с постоянной и линейной неоднородностью температур по длине

Сравнивая уравнения (5) и (3), а также (6) и (4) несложно заметить, что температурное воздействие при определении перемещений и углов поворота можно учесть, если к расчетной схеме помимо активных сил добавить температурную квазинагрузку в виде пары сил с моментом

$$M_t=\frac{\alpha_t\Delta tEJ}{h},$$

или в виде распределенной моментной нагрузки интенсивностью

$$m_t=\frac{\alpha_t\Delta t_{\max}EJ}{lh}.$$

В качестве практического примера, определим наибольший прогиб в стержне на двух шарнирных опорах (рис. 5) со следующими параметрами: жесткость – $EJ=2{,}1\cdot10^{10}$ Нм^2; интенсивность распределенной нагрузки – $q=45$ кН/м; температурный коэффициент линейного расширения – $\alpha_t=1{,}25\cdot10^{-5}$ 1/^{o}C; высота сечения – $h=2{,}064$ м; длина пролета – $l=20$ м; разность температур между верхним и нижним слоем – $\Delta t=20$ ^{o}C. К исходной расчетной схеме (рис. 5) добавляем на опорах (в соответствии со скачками на эпюре Δt) фиктивные пары сил с моментом $M_t=\frac{1{,}25\cdot10^{-5}\cdot20\cdot2{,}1\cdot10^{10}}{2{,}064}=25{,}4\cdot10^5=2540$ кНм. Построив моменты для заданной нагрузки и единичной неизвестной, находим прогиб по середине пролета по правилу Верещагина

$$\delta=\frac{1}{EJ}\left(\frac{5ql^4}{384}-\frac{M_tl^2}{8}\right)=\frac{1}{2{,}1\cdot10^{10}}\left(\frac{5\cdot45\cdot10^3\cdot20^4}{384}-\frac{2540\cdot10^3\cdot20^2}{8}\right)=-1{,}58\cdot10^{-3}$$

м,

При равномерном нагреве сечения прогиб составил бы

$$\delta_0 = \frac{1}{EJ}\frac{5ql^4}{384} = \frac{1}{2{,}1\cdot 10^{10}}\frac{5\cdot 45\cdot 10^3\cdot 20^4}{384} = 4{,}46\cdot 10^{-3}\text{ м.}$$

Т.е. перемещение, вызванное за счет температурного воздействия, будет превышать прогиб от распределенной нагрузки. Таким образом, в случае наличия «лишних» кинематических связей (статически неопределимые балки) дополнительные, температурные усилия могут быть весьма существенными.

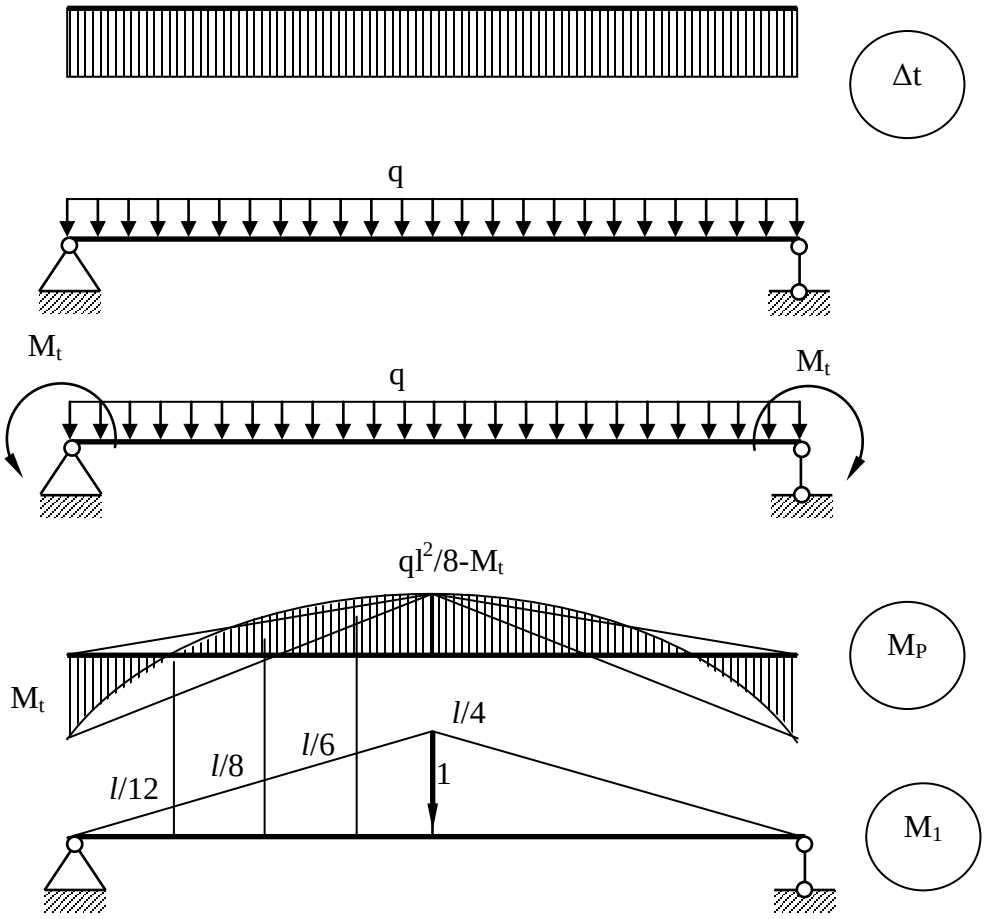


Рис. 5. Расчет двухопорной балки на распределенную нагрузку с учетом температурной деформации

Представленную в работе методику можно использовать непосредственно для расчета деформаций в балках при совместном действии активных сил и температурных воздействий, а также для расчета температурных усилий в статически неопределимых системах. Необходимо также отметить, что при расчете на прочность температурную квазинагрузку учитывать не следует.

Список литературы: 1. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: ГИТТЛ, 1958. – 856 с. **2.** Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1970. – 544 с. **3.** Посацький С.Л. Опір матеріалів. – Львів: Видавництво Львівського університету, 1973. – 403 с. **4.** Шевченко Ф.Л. Задачі з опору матеріалів / Ф.Л. Шевченко, С.М. Царенко. – Донецьк: ФОП Бабалік А.В., 2011. – 356 с. **5.** Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. – М.: Высшая школа, 1986. – 607 с.

РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. (ЮФУ, г. Таганрог, Россия
Тел: 89508609983, E-mail: nik1-58@mail.ru

Abstract. *The urgency of the problem of creating neural networks for assessing the capacity, calculation and prediction of the temperature of SCL cores in real time based on the data of the temperature monitoring system, taking into account changes in the current load of the line and the external conditions of the heat sink. A neural network was developed to determine the temperature regime of the current-carrying core of the power cable. A comparative analysis of the experimental and calculated characteristics of the temperature distributions was carried out, and various load modes and functions of the cable current change were investigated. The main field of application of the developed neural network for determining the temperature regime of the current-carrying conductor is the diagnosis and prediction of the electrical insulation resource (EI) of the power cable.*

Keyword. *Artificial intelligence, neural networks, thermal fluctuation processes, insulation materials, forecasting, reliability.*

Введение и постановка задачи. В процессе эксплуатации изоляция КЛ подвергаются тепловым, электрическим, химическим, механическим, атмосферным и другим видам воздействий, в результате чего происходит изменение её электрических свойств и, как следствие, изменения претерпевают и технические характеристики изоляционных материалов [1, 2]. В исследование характера отказов, разработку и внедрение методов контроля и диагностики изоляции по тепловым процессам КЛ, большой вклад внесён такими учёными, как Золотарев В.В., Меркулов В. И., Зализный Д.И., и др. Однако процесс старения изоляции с учетом комбинации факторов в полном объёме до сих пор не изучен. Важной характеристикой силовых кабельных линий (СКЛ) систем электроснабжения является нагрузочная способность, определяемая тепловым режимом, по которой рассчитывается их пропускная способность [3, 4]. Одним из решений указанной проблемы является мониторинг температуры кабеля во время работы [5].

Задачами исследования являются: – разработка интеллектуальной системы прогнозирования температуры жилы СКЛ для планирования режимов работы электросети с целью повышения надежности и энергоэффективности. Системы прогнозирования строятся на базе искусственного интеллекта с применением методов машинного обучения.

Прогнозирования термофлуктуационных процессов. Ресурс изоляционных материалов зависит от таких параметров как температура, ток, влажность [6-12.], поэтому необходимо исследования температурного поля в сечении СКЛ, рис.1.

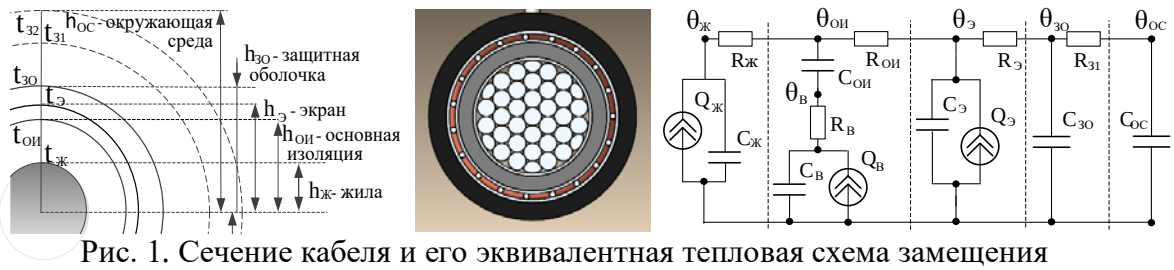


Рис. 1. Сечение кабеля и его эквивалентная тепловая схема замещения

Физические свойства материалов и_геометрические размеры элементов кабеля АПвПу г-1х240/25-10 [4,5], сведены в табл.1. Профиль температур в сечении силового

кабеля (рис.1) определялся системой уравнений, в соответствии с теорией теплопроводности, где $\lambda_{\text{о.с.}}, \lambda_{\text{о.и.}}, \lambda_{\text{э}}, \lambda_{\text{ж}}, -$ удельные теплопроводности окружающей среды, полиэтилена, экрана и жилы соответственно; $I_{\text{ж}}, I_{\text{э}}$ – токи на жиле и экране; $\varkappa$ – коэффициент теплопроводности; $\delta_{\text{ж}} = I_{\text{ж}}/S_{\text{ж}}$; $\delta_{\text{э}} = I_{\text{э}}/S_{\text{э}}$; $S_{\text{ж}}, S_{\text{э}}$– площади поперечного сечения жилы и экрана; $\gamma_{\text{ж}}, \gamma_{\text{э}}$ – электропроводности жилы и экран.

Таблица 1. Параметры кабеля

Материал / Параметр	Алюминий	СПЭ	Медь	Воздух
Удельная теплопроводность (Вт/(м·К))	209.3	0.38	400	0.024
Плотность (кг/м^3)	2700	2200	8700	1.2
Удельная теплоемкость (Дж/(кг·К))	920	1900	385	1005

Низкая теплопроводность изоляции кабеля рис.1, приводит к высокому температурному градиенту, поэтому температура наиболее нагретого участка в сечении кабеля (вблизи жилы) значительно отличается от измеренной температуры, а в переходных режимах эта разница может увеличиваться в несколько раз. Зависимость времени до пробоя может быть объяснена на основе термофлуктуационной теории разрушения, рис.2.

Рис. 2. Алгоритм связи повышения температуры и надежности СКЛ

Одним из решений указанной проблемы является мониторинг температуры кабеля во время работы [5]. Применение интеллектуальной системы прогнозирования приведет к повышению общей надежности энергосети и повышению энергоэффективности функционирования энергетического сектора, уменьшению влияния человеческого фактора и снижению аварийных ситуаций. Негативное действие на изоляцию повышенных температур подтверждается известным правилом

Монтзингера, используемым для выполнения экстраполяции результатов ускоренно проводи-мых испытаний на нагревостойкость: увеличение нормативной температуры на каждые Δθ = 8°С сокращает тепловой срок службы изоляции в два раза. Тепловое поле для КЛ описывается дифференциальным уравнением теплопроводности (1), которое в общем случае определяет изменение распределения температуры в объеме рассматриваемого объекта в зависимости от времени.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = div(\chi * grad(T)) + \frac{q_v}{c_v} \quad (1)$$

где, Т – температура, ˚К; t – время, с; qV – мощность объемных источников тепла (объёмная плотность тепловыделения), Вт/м3; cv – объемная теплоемкость, Дж/(К·м3); χ – температуропроводность, м2/с. Коэффициент χ определяют по формуле χ = λ cV , где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Поэтому актуальна задача создания нейросетей для оценки пропускной способности, расчёта и прогнозирования температуры жил СКЛ в режиме реального времени на основе данных системы температурного мониторинга, с учетом изменения токовой нагрузки линии и внешних условий теплоотвода.

Разработка ИНС. Построение нейронной сети решается в два этапа: выбор типа (архитектуры) нейронной сети и подбор весов (обучение) нейронной сети. На первом этапе выбираются: • типы нейронов, которые необходимо использовать (число входов, передаточные функции); • способы соединения нейронов между собой; • входные и выходные сигналы нейронной сети. Для решения задачи с помощью ИНС необходимо выбрать конфигурацию нейронной сети и сформировать окружение, в котором будет работать данная нейронная сеть. Под формированием окружения понимается реализация следующих этапов: • создание обучающего задачника; • обучение нейронной сети; • тестирование ИНС. В качестве обучающей выборки (задачника) были использованы результаты измерения динамики температуры на поверхности защитной оболочки силового кабеля в широком диапазоне значений токов жилы силового кабеля от 450,А до 650, А. Во входном слое сети находятся 2 нейрона (количество входных переменных), в скрытом слое – 10 (определены экспериментальным путем при настройке сети), в выходном – 1 (соответствует количеству необходимых выходных данных). В качестве входных параметров выбраны ток, проходящий по жиле (X_1) и температура внешней изоляции кабеля (X_2). Выходным параметром является температура токоведущей жилы (H_1). Обучение происходит следующим образом (рис. 2). Имеется некоторая база данных (задачник), содержащая примеры (величины тока жилы СКЛ (Iж), температуры внешней изоляции θз.о и температуры окружающей среды θо.с, рис.1). Предъявляя их на вход нейронной сети, получаем от нее некоторый ответ, не обязательно верный. Известен и верный (желаемый) ответ. Вычисляя разность между желаемым и реальным ответами сети, получаем вектор ошибки.

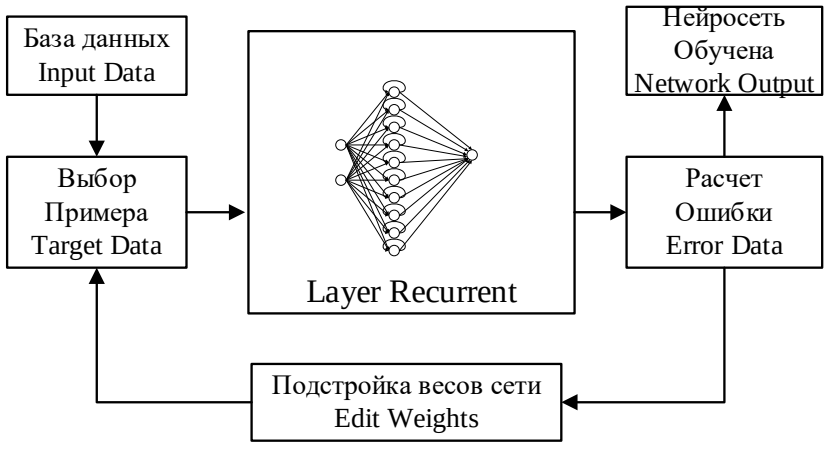


Рис. 3. Процесс обучения нейронной сети

Алгоритм обратного распространения ошибки – это набор формул, который позволяет по вектору ошибки вычислить требуемые поправки для весов нейронной сети. После многократного предъявления примеров веса нейронной сети стабилизируются. Когда величина ошибки достигает нуля или приемлемого малого уровня, тренировку останавливают, рис.3, а полученную нейронную сеть считают натренированной и готовой к применению с использованием новых данных.

После расчета градиентных спусков в пространстве весов W_{ji} и W_{kj} и их корректировки [20] вычисляется суммарная ошибка по всем образцам (блок 7) и производится проверка выполнения условия точности расчетов (блок 8). В случае выполнения условия точности расчетов процесс обучения заканчивается, в противном случае – процесс обучения повторяется. График ошибки прогнозируемой температуры жилы представлен на рис. 4.

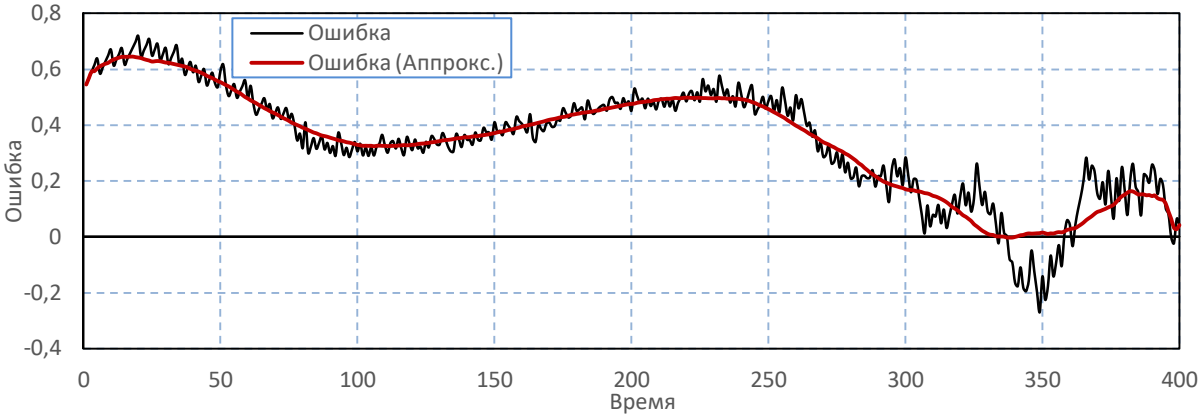


Рис. 4. График ошибки прогнозируемой температуры жилы

Поэтому качество обучения нейронной сети напрямую зависит от количества примеров в обучающей выборке, а также от того, насколько полно эти примеры описывают данную задачу. В работе для полноценной тренировки нейронной сети использовалось по каждому исследуемому образцу двадцать примеров в каждом по четыреста значений. Блок-схема алгоритма обучения искусственной нейронной сети представлена на рис. 5.

В статье моделирование нейронной сети для прогнозирования температуры жилы кабеля осуществлено с помощью Neural Network Toolbox в системе Mathlab.

Исследованы термофлуктуационные процессы в кабеле АПв Пу г-1х30/25-10 при реальной диаграмме действующего значения тока жилы кабеля, табл.1 и разработанной модели прогноза с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) на ретроспективных данных температур исследуемого кабеля за 2015-2019 годы. Для каждого значения тока жилы бралось по 400 точек температуры θз.о, θо.с. В статье приведены результаты прогноза температуры жилы кабеля (θж), с помощью ИНС, для исследуемого образца №1. Средняя ошибка прогноза температуры жилы кабеля θж при различных токах жилы (табл. 1) не превышает 2,5 %, что свидетельствует о возможности применения метода искусственных нейронных сетей для целей прогнозирования температуры жилы кабеля по температуре на поверхности θз.о, рис.1,б. Построены графики экспериментальной температуры исследуемых образцов и графики построенные на основе данных обучающей выборки нейросетью (рис. 6).

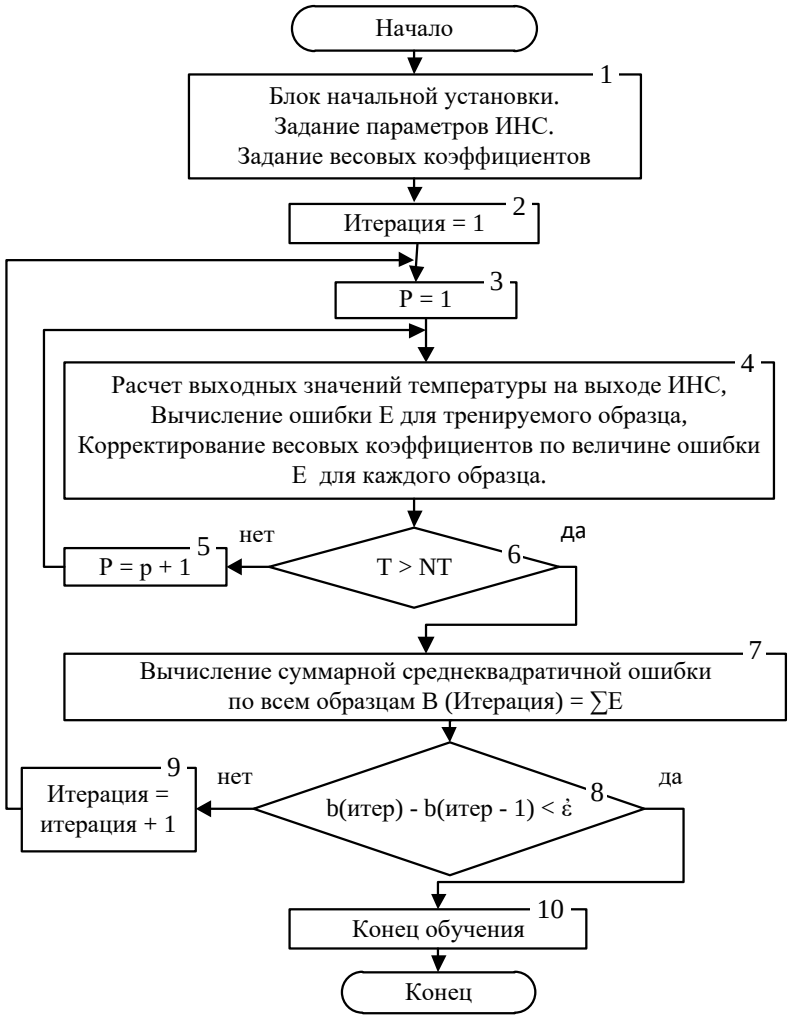


Рис. 5. Блок-схема алгоритма обучения ИНС

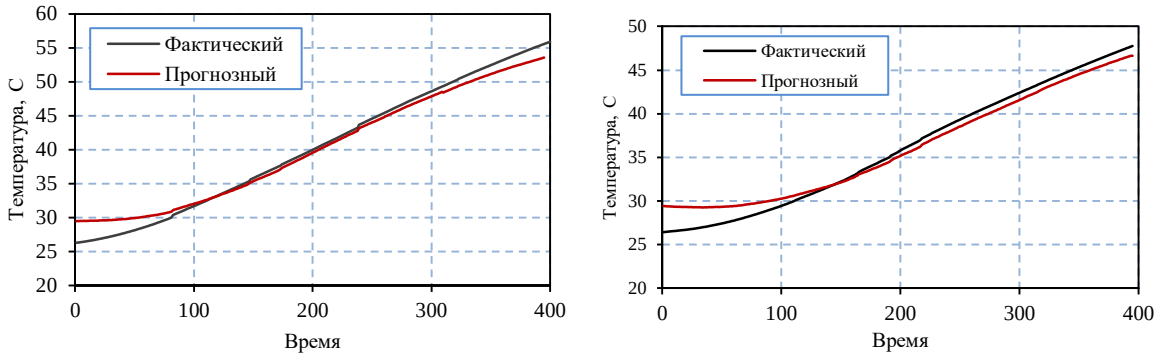


Рис. 6. График экспериментальной температуры образца №1 и график построенный на основе данных обучающей выборки нейросетью.

Заключение. Разработана нейросеть для определения температурного режима токоведущей жилы силового кабеля. При анализе данных было определено, что максимальное отклонение данных, полученных от нейросети от данных обучающей выборки, составило менее 2,5% что является вполне приемлемым результатом. Для повышения точности, необходимо использовать большее количество входных и выходных данных при обучении сети, а также некоторая доработка ее структуры. Основная область применения разработанной нейросети для определения температурного режима токоведущей жилы заключается в диагностике и

прогнозировании ресурса ЭИ силового кабеля. Модель позволяет оценивать текущее состояние изоляции и прогнозировать остаточный ресурс СКЛ.

Список литературы: **1.** Разработка алгоритма релейной защиты распределительной сети на основе математической модели. Полуянович Н.К. Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 1 (90). С. 240-245. **2.** Dubyago M.N. Mathematical description of interaction of the elements in the power network system. 2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013) Applied Mechanics and Materials Vols. 448-453 Trans Tech Publications, Switzerland. (2014) pp 2455-2460. **3.** М.Н. Дубяго. Разработка модели старения и определение остаточного ресурса изоляции силовых кабелей // Известия ЮФУ. Технические науки. − 2014. − № 4 (153). С. 107-114. **4.** Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Пшихопов В.Х. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. №7 (168) июль. 2015 г. С–230-237. **5.** Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Метод селекции сигнала ЧР с помощью Вейвлет-преобразования. Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 2 (139). С. 99-104. **6.** Poluyanovich N.K. Dubyago M.N. Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system. 2013 4th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (ICAMME 2013), October 11-12, 2013, Singapore, Applied Mechanics and Materials Vols. 459 Trans Tech Publications, Switzerland (2014) pp 70-75. **7.** Marina N. Dubyago, Nikolay K. Poluyanovich. Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges. Advances in Materials Science and Applications, Mar. 2015, Vol. 4 Iss. 1, PP. 23-32.**8.** Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE 2015), September 26-27, 2015 in Changsha, China. Published by Atlantis Press,ISSN:2352-5401pp.49-54. **9.** M.N. Dubyago & N.K. Poluyanovich. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 229 (2017). **10.** Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. 2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies (AMRMT 2017) 2–5 August 2017, Phuket, ThailandIOP Conference Series: Materials Science and Engineering. ISSN:1757-899X. Volume 229. (2017) 012036/. **11.** M. N. Dubyago, N. K. Poluyanovich. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations. EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies **18**(16): e3. ж. SJR SCImago Journal & Coutry Rank. **12.** Marina N. Dubyago and Nikolay K. Poluyanovich, "Estimation of Insulating Materials Depreciation and Forecasting the Residual Cable Resource Considering the Current Core Temperature," International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing vol. 7, no. 1, pp. 415-420, 2019. **13.** Шумилова, Г. П. Прогнозирование электрических нагрузок ЭЭС с использованием методов искусственного интеллекта / Г. П. Шумилова, Н. Э. Готман, Т. Б. Старцева // Сборник трудов Российского национального симпозиума по энергетике, Казань, 10–14 сент. 2001 г. – М.: КГЭУ, 2001. – С. 103–106.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Попиль С.В., Цой В.Э. *(НИУ МЭИ, г. Москва, Россия)*
Тел.: +7 (929) 5746051; E-mail: Stanislav.popili@gmail.com

Abstract: *The analysis of the influence of defects on the stress-strain state of the metal, the advantages and disadvantages of methods of strength and reliability of industrial pipelines containing thinning is carried out. The analysis of the spherical thinning of the pipeline was carried out, according to the problem solved by Jeffery G.B. Nonlinear dependences of the maximum stresses on the value of thinning and on the wall thickness are revealed. A linear analysis of the pipeline made of Russian steel grade 08X18H10T was also carried out.*
Keywords:*FEM; pipeline defects; industrial pipelines.*

Дефекты трубопроводов (рис.1) (коррозионные дефекты, механические повреждения, трещины, металлургические дефекты) представляют собой серьезную угрозу их нормальной работоспособности. Существуют различные этапы оценки опасности этих дефектов: проведение эксплуатационного контроля, проведение анализа по результатам предыдущего контроля и исследований, проведение расчетных исследований актуальных моделей и их анализ на основе критериев оценки. Авторы других работ в своих исследованиях ссылаются на различные нормативные документы, регламентирующие проведение анализа, а также предлагают новые подходы. Несмотря на прилагаемые усилия, не существует общепринятого правила анализа дефектов, который бы давал четкие указания к последовательности проведения расчетов, и инженерам приходится либо прибегать к компромиссу между различными методиками, либо использовать конкретные нормативные документы из отрасли, зачастую с заложенным большим коэффициентом запаса.Это ведет к потенциальному перерасходу финансов и трудовых ресурсов на замену или ремонт участка трубопроводной трассы.

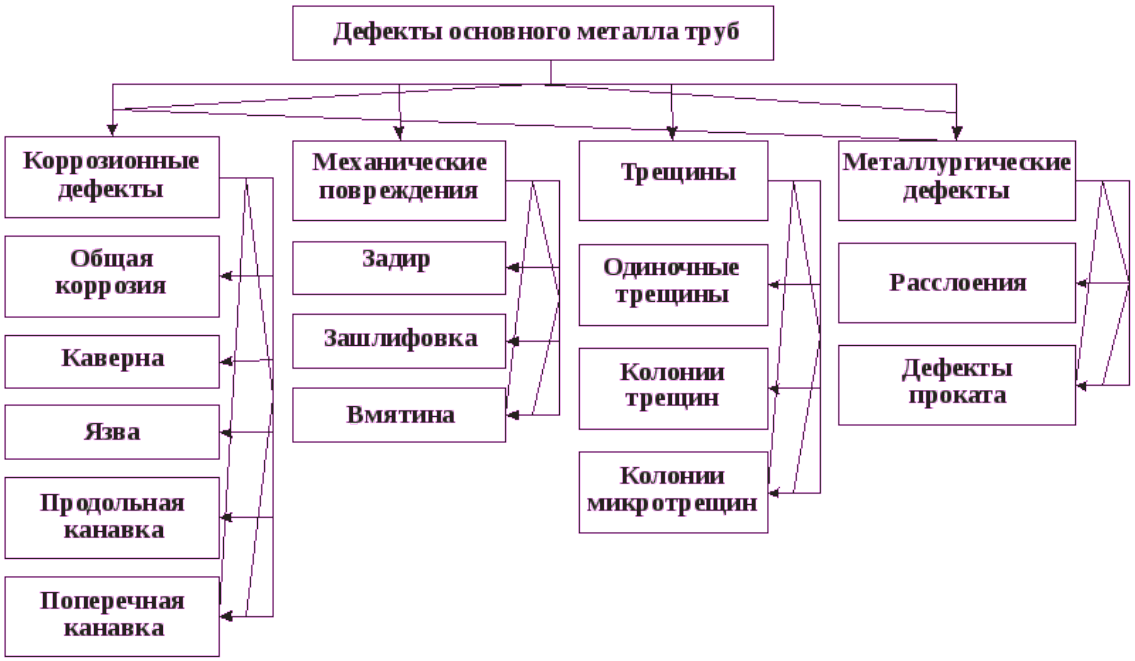


Рис.1. Принципиальная классификация дефектов трубопроводов

В связи с этим в работах исследователей, как в России, так и за рубежом, вплоть до настоящего времени, много внимания уделяется как вопросам повышения

достоверности выявляемости, так и вопросам прогнозирования развития и роста дефектов трубопроводов [1-17]. Например, при анализе влиянияна надежность и безопасность эксплуатации трубопроводов форм дефектов типа утонений, в своих исследованиях авторы используют как упрощения (рис.2), основанные на рекомендациях нормативных документов, так и численное моделирование уточненных форм дефектов, вплоть до точного воспроизведения формы и размеров в программах имитационного моделирования. Очевидна актуальность данного вопроса, научный интерес к его рассмотрению и практическая значимость.

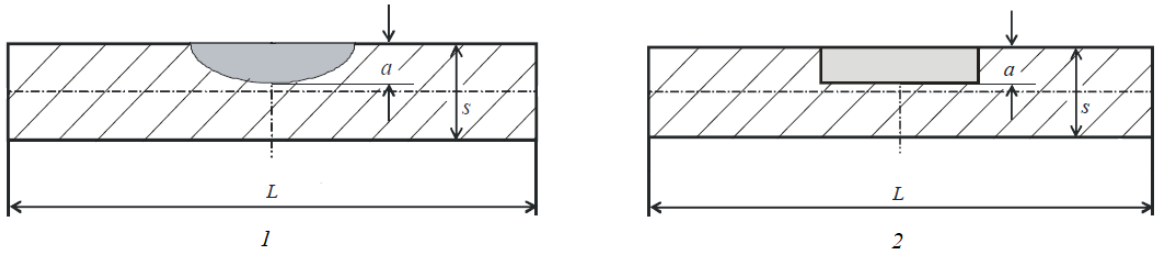
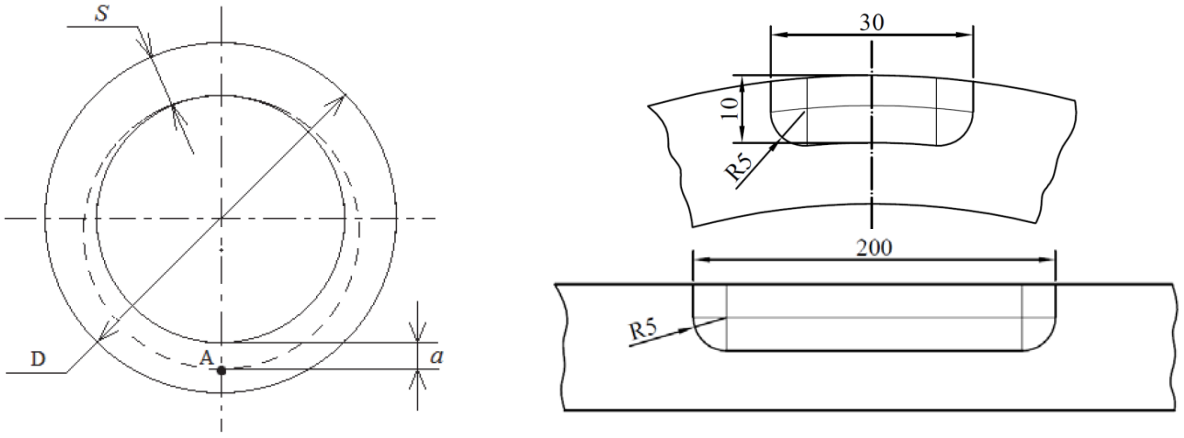


Рис.2. Схематизация дефектов трубопровода: 1) параболической формы, 2) прямоугольной формы

В работе было изучено влияние давления, температуры, формы дефектов, применяемых методов, используемых для анализа напряженно-деформированного состояния трубопроводов с утонениями. Выявлено влияние зависимости ресурса трубопровода от схематизации, формы, исходных параметров нагружения и типоразмеров трубопровода. Выявлены различия в применяемых разными странами и в различных отраслях промышленности нормативах и методиках расчетной оценки ресурсных характеристик трубопроводных систем.

Также в работе были проанализированы два вида дефектов: сферический, приведенный к задаче Джеффри (1) о напряжении в трубопроводе с эксцентричным утонением (рис.3(а)), и схематизация в виде параллелепипеда со скругленными внутренними ребрами (рис.3(б)).

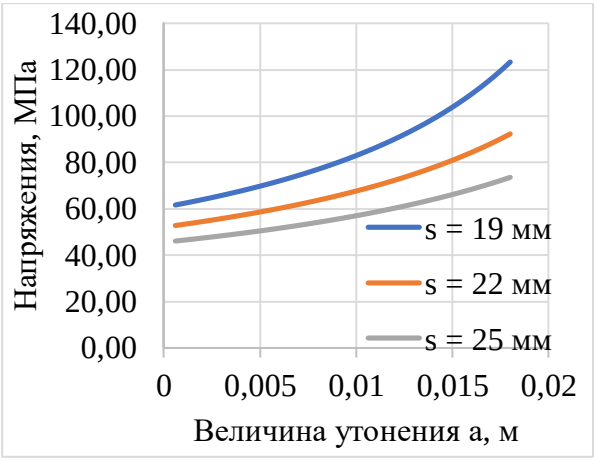
$$\sigma = P\left(\frac{2R^2\left(R^2+\left(R-s+\frac{a}{2}\right)^2-2\frac{a}{2}\left(R-s+\frac{a}{2}\right)-\frac{a^2}{2}\right)}{\left(\left(R-s+\frac{a}{2}\right)^2+R^2\right)\left(R^2-\left(R-s+\frac{a}{2}\right)^2-2\frac{a}{2}\left(R-s+\frac{a}{2}\right)-\frac{a^2}{2}\right)}-1\right) \quad (1)$$



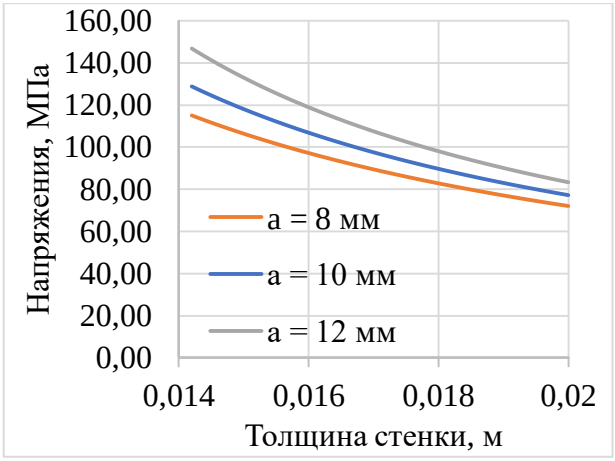
а) б)

Рис. 3. Типы анализируемых дефектов

При построении зависимостей для сферического дефекта было выявлено нелинейное возрастание максимальных напряжений, возникающих на внутренней поверхности трубопровода (рис. 4). Однако можно заметить, что данный подход не предполагает учет зависимости возникающих напряжений от физико-механических свойств металла, из которого изготовлен трубопровод.



а) в зависимости от величины утонения



б) в зависимости от толщины стенки

Рис. 4. Зависимость максимальных напряжений от варьируемых параметров

Напротив, при проведении анализа прямоугольной схематизации были учтены характеристики стали 08Х18Н10Т (рис.5), принятой в соответствии с результатами исследований [20].

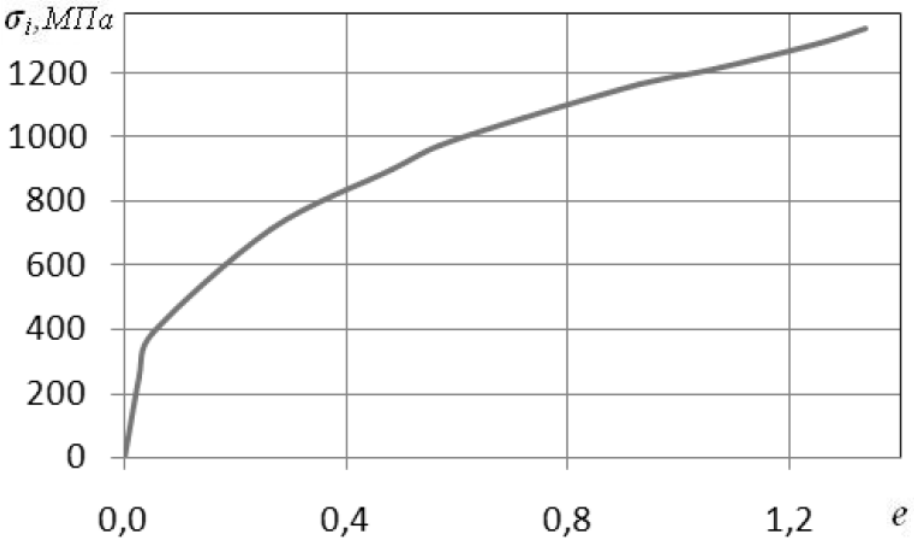


Рис. 5. Диаграмма деформирования стали 08Х18Н10Т

Размер анализируемого трубопровода был подобран согласно [19]. Несмотря на то, что обычно длина изготавливаемых трубопроводов такого диаметра составляет от 6 до 12 м, для избегания влияния краевого эффекта на анализируемый участок трубопровода и уменьшения затрат машинных мощностей на решение, создавалась модель, длиной L = 2 м с расположенным утонением по центру. Диаметр трубопровода принимался равным D = 159, 245, 273 мм.Один и тот же размер дефекта был

использован в данной работе для всех смоделированных трубопроводов. Он представляет собой объемный параллелепипед с размерами 200 мм в осевом направлении, 30 мм в окружном и глубиной 10 мм и со скругленными внутренними углами для исключения концентрации из анализа напряженно-деформированного состояния. Согласно [19], максимальное эксплуатационное давление не должно превышать 13,76 МПа. В результате параметрического решения была построена зависимость напряжения от задаваемой нагрузки (рис.6).Можно заметить, что напряжения в трубопроводе диаметром 273 мм меньше, чем в трубопроводе диаметром 245 мм. Это происходит в следствии того, что отношение диаметра к толщине стенки у модели диаметром 273 мм меньше, чем у 245 мм.

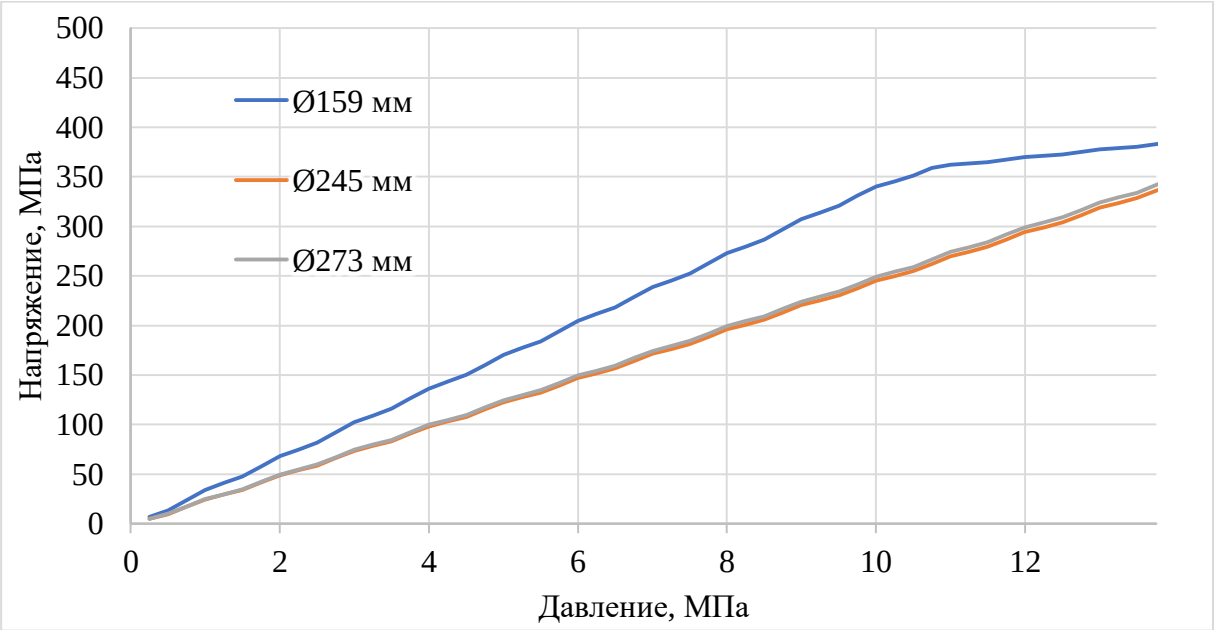


Рис. 6. Максимальные эквивалентные напряжения возникающие в трубопроводах

Можно заметить, что напряжения в трубопроводе диаметром 273 мм меньше, чем в трубопроводе диаметром 245 мм. Это происходит вследствие того, что отношение диаметра к толщине стенки у модели диаметром 273 мм меньше, чем у 245 мм.

Данные результаты можно применять для дальнейшего развития теории дефектов трубопроводов, и использовать для следующих аналитических экспериментов.

Список литературы: **1.**Семенов В.К., Беляков А.А., Щебнев В.С. Прогнозирование накопления дефектов на трубопроводах ТЭС № АЭС. «Вестник ИГЭУ», 2009. Вып. 2.**2.** Живучесть паропроводов стареющих тепловых электростанций /Под ред. Ю.Л. Израилева, Ф.А. Хромоченко. – Москва: Торус пресс, 2002. – 616 с.**3.**Ворков В.А., Капралова Е.О., Федотенко М.А., Агафонов А.В. Исследование влияния коррозионных дефектов на прочность трубопроводов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 14, №1(2), 2012. С.512-533.**4.** Увайсов С.У. Отчет о научно-исследовательской работе. Этап 1. Выбор направления исследований и разработка технического задания на создание

аппаратного комплекса по теме: Разработка методов и аппаратурных средств лазерно-информационной технологии мониторинга газотранспортных объектов. Москва: Высшая школа экономики. 2015. – 256 с.**5.** Канайкин В.А., Мирошниченко Б.И., Лоскутов В.Е., Патраманский Б.В., Ваулин С.Л., Пятов А.Д. Магнитный снаряд-дефектоскоп для обнаружения продольных трещин в магистральных трубопроводах // Безопасность труда в промышленности. №9, 2001. С. 30-31.**6.** S.S. Al-Owaisi, A.A. Becker, W. Sun. Analysis of shape and location effects of closely spaced metal loss defects in pressurised pipes. Engineering Failure Analysis 68 (2016). P:172–186.**7.** API 579, Parts 4&5 General and Local Thinning Assessments: Levels 1 & 2.**8.** MojtabaMokhtari, Robert E. Melchers. A new approach to assess the remaining strength of corroded steel pipes. Engineering Failure Analysis 93 (2018). P:144-156.**9.** Yen-Ju Lu, Chen-Hua Wang. Effects of geometry of a local thin area defect on remaining strength and fitness of pressure equipment. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 65 (2020). P:104-125.**10.** Recommended practice DNV-RP-F101. Corrodedpipelines (2010).**11.** ВансовичК.А., АистовИ. П., НахлесткинА. А., Беселия Д.С. Анализ несущей способности магистрального трубопровода приналичии дефектов коррозионного происхождения // Омский научный вестник. 2019, № 3. С. 5–10. **12.**Остсёмин А. А., Заварухин В. Ю. Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами // Проблемы прочности. 1993. № 12. С. 1–59. **13.** Кузьмин Д.А. Исследование влияния наплавки из аустенитной стали на раскрытие трещины в трубопроводе Ду850 из перлитной стали //Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2016, № 1. **14.** ТатянаАвджиева, Свойства на стомани за тръбопроводи от АЕЦ съсзароден дефект в стената на тръбата // Механика Транспорт Комуникации. Брой 1, 2008 г. Статия № 0216.**15.** MojtabaMokhtari, Robert E. Melchers. A new approach to assess the remaining strength of corroded steel pipes. Engineering Failure Analysis 93 (2018). P:144-156. **16.** JianPeng, Changyu Zhou, Qiao Dai. Interaction and assessment of multiple local wall thinning defects.Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, 2013.**17.** V.M.F. Nascimento, L.C.S. Nunes. Analysis of asymmetric radial deformation in pipe with local wall thinning under internal pressure using strain energy method.MechanicsofSolidsinBrazil (2009).**18.** Кузьмин Д.А., Андреенкова А.В. Исследование закономерностей напряженно-деформированного состояния при локальном утонении в прямолинейных участках трубопроводов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2019, № 15.**19.** ОСТ 24.125.01-89. Трубы бесшовные из коррозионностойкой стали для трубопроводов АЭС. Сортамент.**20.** Жегалов Д.В. Экспериментально-теоретическое исследование процессов упругопластического деформирования элементов конструкций при больших деформациях. Автореферат.

УДК 667.6,666.29.

ТИПЫ СОРБЦИОННЫХ КРИВЫХ КФ-СМОЛ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ

Папулова Г. Н., Квасников М. Ю. *(Московский государственный технологический университет, «Станкин» , Российский химико-технологический университет им. Менделеева, РХТУ, Россия)*
E-mail: *papulova_galina @ mail.ru*

Abstract: *The properties of the faience surface - acidity and alum silicate modulus-are determined, their changes depending on the chemical composition are explained when the content of $Al_2Si_2O_5$ mullet, quartz, and cristobalite (crystal modification of SiO_2 quartz) change and the presence of a negative surface charge is determined. The sorption of urea-formaldehyde oligomers of various compositions on faience and subsequent film formation in the presence of polyvinyl alcohol are considered.*

Keywords: *sorbtion, negative surface charge, silica, porous faience surface.*

1.Введение

Конструкционная керамика (с присутствием в составе оксида алюминия) по твердости находится вне конкуренции со всеми известными материалами конструкционного назначения. Уровень противокоррозионной защиты во многом определяет надежность, материалоемкость и эффективность производства. Использование плотной и высокоплотной конструкционной керамики в машиностроении, станкостроении, нефтегазовой промышленности значительно уменьшает износ под воздействием гидро- и аэроабразивного, коррозионного и температурного воздействия рабочей среды.В нефтегазовой промышленности для разделения нефтяных фракций на группы соединений в качестве адсорбентов используются силикагель(неорганические ВМС переменного состава молекулы которых содержат кремнекислородный каркас с рядом гидроксильных групп) ,активная окись алюминия, цеолиты – кристаллогидраты алюмосиликатов состава:$M_{2/n}0\cdot AL_20_3\cdot xSiO_2\cdot yH_20$,где n-валентность катиона, x>=2.Катионы Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba. Каркасная структура цеолита образована тетраэдрами $Si0_4$ и $AL0_4$,соединенными общими ионами кислорода в трехмерную решетку. Замещение Si на AL^{3+} приводит к появлению избыточного отрицательного заряда, который нейтрализуется катионом щелочного или щелочноземельного металла, расположенных в пустотах структуры.[1].

Освоение наноуровня – результат дальнейшего развития технологии технической керамики, применение наноматериалов в катализе, получении композитов, пористых структур. Удельная поверхность является целевой характеристикой, определяющей преимущества их использования. Чем выше степень дисперсности наноматериала, тем больше величина его удельной поверхности. Метод низкотемпературной сорбции паров азота на поверхности раздела твердое тело-газ используется для измерения удельной поверхности (м 2 /г)твердых дисперсных материалов. Удельная поверхность твердого тела данной массы обратно пропорциональна размеру составляющих его частиц.

Например, если Sуд = 20 м2/г, ρ = 3 г/см3, то средний размер составляет d =100 нм.

Все поверхности разделяются на три класса в соответствии со следующими признаками:

- на поверхности не содержится никаких ионов или положительно заряженных групп. Примером являются микрочастицы графитированной сажы;

- на поверхности имеются локализованные или сосредоточенные положительные заряды, например, гидроксильные -ОН группы кислотного характера; ионы металла. Примером являются поверхность кремнезема; стальная поверхность.
- на поверхности имеются локализованные или сосредоточенные отрицательные заряды, например, карбонильные группы [2].

Физико-химические свойства керамических материалов, в частности фаянса, зависят также от пористости и свойств поверхности. Для исследования пористости различных материалов и, в частности, керамики и фаянса наиболее применимы методы определения сорбции. В работе [3-5] предложен способ изучения сорбции на поверхности путем измерения массы проникающих молекул в решетку твердого тела и капиллярной конденсации в порах. Данный метод развился в измерение изотерм физической адсорбции. Анализ изотерм физической адсорбции состоит в ее отнесении к определенному типу, который зависит от природы адсорбционного процесса:1.моно- или полимолекулярная адсорция; 2.капиллярная конденсация;3.заполнение микропор.

Основные типы изотерм физической адсорбции приведены на рис.1. Они показывают зависимость количества адсорбированного газа от отношения P/P_0.

В настоящей работе для изучения адсорбции изучали ступенчатые изотермы.

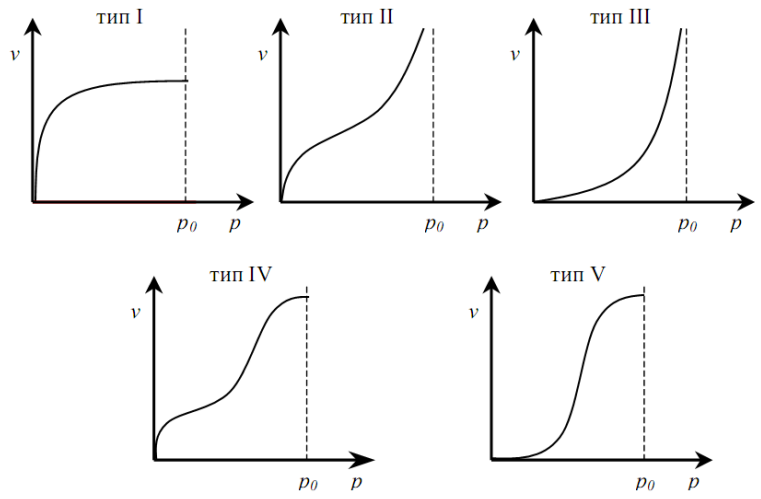


Рис. 1. Основные типы изотерм физической адсорбции

В связи с колебаниями минералогического состава сырья разных партий для получения фаянса, обусловленными различным содержанием оксидов кремния и алюминия, структура и кислотно-основные свойства поверхности фаянса меняются. Было бы интересно рассмотреть зависимость свойств поверхности от содержания количества оксидов алюминия и кремния в исходном сырье с точки зрения последующего декорирования полимерными материалами. Для этого в настоящей работе были исследованы процессы сорбции карбамидо-формальдегидных олигомеров (КФО) на пористом фаянсе с учетом присутствия ПВС, который вступает в реакцию этерификации с продуктами конденсации карбамидоформальдегидных смол, снижая эмиссию формальдегида из ЛКП за счет поглощения пористой структурой фаянса[6].Можно было рассмотреть аналогию при определении микроструктуры и свойств поверхностного слоя стальных образцов в зависимости от содержания элементов Fe C и количественного соотношения других присутствующих элементов(Si AI Mn) и др.

Целью работы является изучение зависимости свойств поверхности от содержания количества оксидов алюминия и кремния в исходном сырье

2. Изучение адсорбционной емкости керамических поверхностей с различным значением алюмосиликатного модуля

Для исследования адсорбции методом фронтальной жидкостной хроматографии были взяты образцы порошков различных видов фаянса с одинаковой дисперсностью 0,29 – 0,31 мм и одинаковой удельной поверхностью 0,8 $м^2/г$. Исследование проводили в

хроматографической колонке (высотой 300мм, внутренним диаметром 10мм), соединенной с пришлифованной приемной колбой емкостью 50мл. На решетчатое дно колонки укладывали слой крупного, а затем более мелкого кварцевого песка. Навеску сухого порошка фаянса (1,5 -2,0 г) укладывали плотным слоем на подслой песка и увлажняли водой. Этим достигалась необходимая плотность заполнения колонки. Адсорбцию различных КФО из концентрированных водных растворов (концентрации 14,8 – 29,3 масс.%) исследовали (с учетом их агрегативной устойчивости и независимости адсорбции от концентрации) в интервале алюмосиликатного модуля поверхности (М=1.35 -3,03) [7].

Исследование адсорбции основного красителя метиленового голубого на поверхности фаянса позволило судить о кислотности поверхности (К),а исследование степени насыщения поверхности (α и $\alpha_н$) - о количестве активных центров на поверхности. Результаты исследования представлены на рис.2

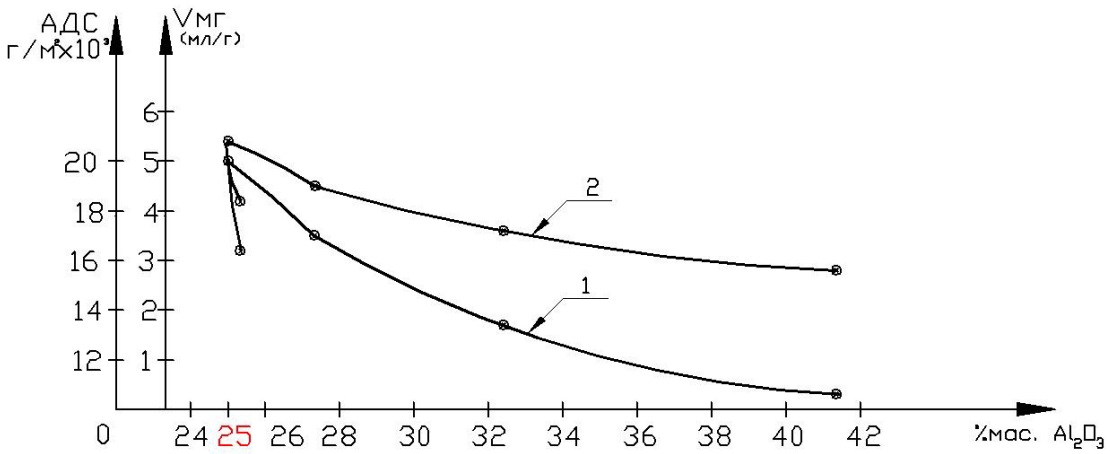


Рис. 2. Зависимость адсорбционной емкости, $V_{мг}$,мл/г, (кривая 2) и АДС, г/м^2, (кривая 1) алюмосиликатов от содержания оксида алюминия

Из рисунка 2 следует, что в интервале М=2,17-2,77 (интервал масс.% Al_2O_3 − 42-25) при практически неименной величине К происходит увеличение кислотных свойств поверхности, достигая максимального значения при 25 масс% Al_2O_3. Показано, что при М>2,77 (в интервале 23,9-25,1 масс.% Al_2O_3) происходит одновременное снижение адсорбционной емкости и кислотных свойств поверхности с увеличением при этом основных свойств.

3.Изучение адсорбции КФО из водных растворов на алюмосиликатных керамических поверхностях

Для экспериментов с образцами (М=2,17;2,77; 2,85; 3,03)) алюмосиликаты обжигали обычным способом при T = 1250 – 1280 °С с последующим измельчением до порошка. Экспериментально было установлено, что для исследуемых растворов пленкообразователей адсорбционное равновесие в основном устанавливается в течение 18 – 23 ч. Физико-химические характеристики использованных для экспериментов различных КФО представлены в табл. 2.

Согласно физико-химическим характеристикам КФО и степени их агрегативной устойчивости в красочные композиции добавляли ПВС (массовое содержание,%): для КФ-МТ – 5; для КФ-МТ-15 – 4; для КФ-Ж(1) – 3; для КФ-Ж(2) – 2.

Зависимость концентрации КФО в фильтрате (P, % по массе) от удельного удерживаемого объема (V_0, г/г) при адсорбции на керамических сорбентах различного модуля представлена на рис. 3 – 5.

Таблица 2. Физико-химические характеристики КФО

№ п/п	Марка КФ-олигомера	Массовая доля с.о., %	Массовое содержание метилольных групп %	Массовая доля свободного формальдегида, %*	Концентрация водородионов pH	Вязкость условная при 20 ± 0,5 ºС по вискозиметру ВЗ-4, с	Время желатинизации при 100 ºС (с NH_4Cl), с	Массовая доля с.о., %*
1	КФ-МТ	65,3	13,5	0,1	7,4	30	55,0	12,0
2	КФ-МТ-15	65,4	14,0	0,14	8,35	78	51,0	10,0
3	КФ-Ж(1)	62,5	19,1	0,6 – 0,8	7,2	60(ВЗ-1)	57,0	7,0
4	КФ-Ж(2)	69,4	19,5	0,6 – 0,8	7,0	48,0	49,0	7,5

с.о. – сухой остаток.
*Массовая доля с.о., %, при котором наблюдается коагуляция по объему при разбавлении смолы водой.

Из хроматограммам (см. рис. 3 – 5) виден ступенчатый характер кривых сорбции КФО на керамике, имеющей на поверхности группы активных центров с разной активностью (см. рис. 1) и неодинаковой равномерностью распределения пор, а также отличия кривых сорбции в зависимости от вида фаянса и марки КФО. Таким образом, наличие на пористой поверхности фаянса групп активных центров с разной активностью и неодинаковой равномерностью распределения пор отображает ступенчатый характер кривых сорбции.

4. Выводы

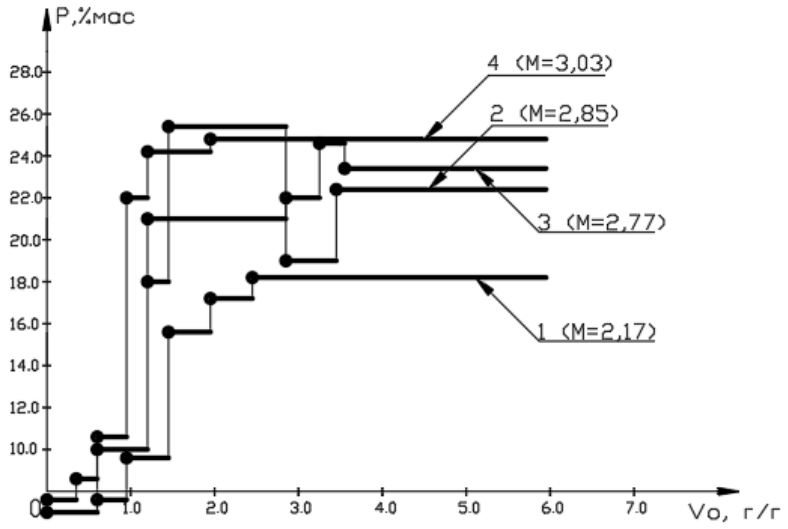


Рис. 3. Зависимость концентрации КФ-МТ олигомера в фильтрате P от удельного удерживаемого объема V_0 при адсорбции из концентрированных водных растворов на керамических сорбентах различного модуля

1. Определены кинетические характеристики и механизм сорбции из водных растворов КФО на пористых керамических поверхностях с различными значениями алюмосиликатного модуля M с разным количеством активных кислотных центров.

2. Предложен механизм сорбции агрегативно неустойчивых КФО, который заключается в понижении агрегативной устойчивости КФО при нанесении на отрицательно заряженную пористую поверхность керамики с последующей поляризацией, которая сопровождается уменьшением концентрации катионов водорода [H+] и, соответственно, увеличением гидроксил-ионов [OH^-] в водном растворе смолы, что приводит к коагуляции смол.

3. В будущем необходимо провести исследования по: установлению зависимости количества и типа фаз поверхностного слоя стальных образцов и его пористости от количественного соотношения химических составляющих сплава.

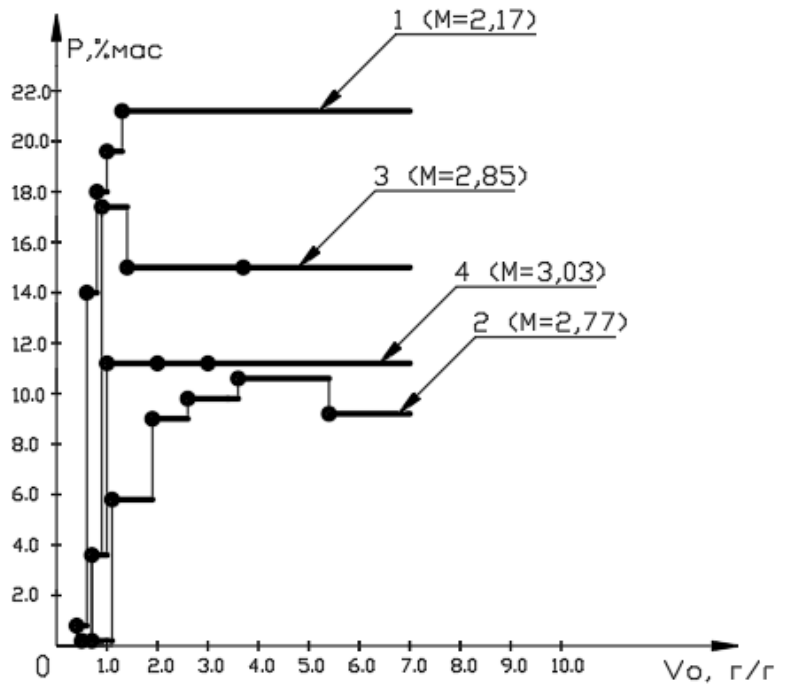


Рис. 4. Зависимость концентрации КФ-Ж(2) олигомера в фильтрате *P* от удельного удерживаемого объема V_0 при адсорбции из концентрированных водных растворов на керамических сорбентах различного модуля

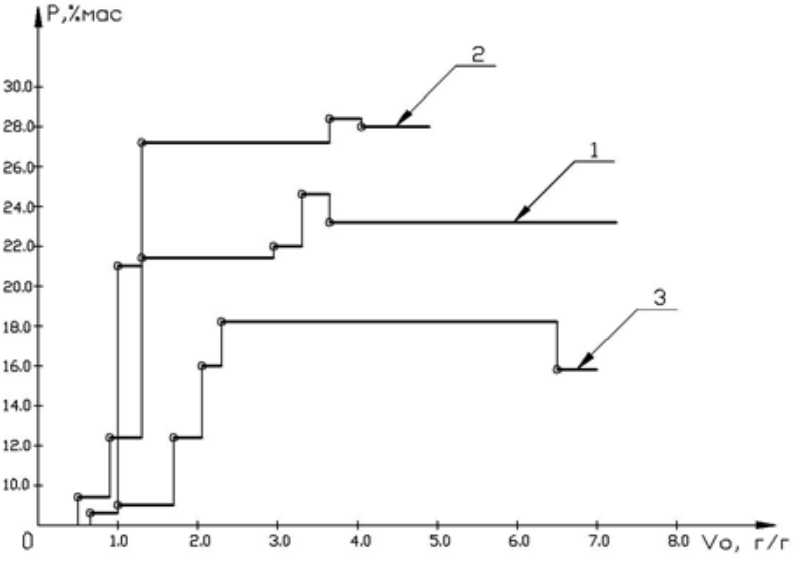


Рис. 5. Зависимость концентрации КФО *P* в фильтрате от удельного удерживаемого объема V_0 из концентрированных водных растворов при адсорбции на фаянсе с *M* = 2,77

Список литературы: 1. Калинина Т.А. Химия нефти и газа: учебно-методический комплекс: - М.: Проспект,2016. – 200 с. **2.** Киселев А.В., Яшин А.И. Адсорбционная газовая и жидкостная хроматография. - М.: Химия, 1979, - 288с. **3.** Л.В. Адамова, А.П. Сафронов. Сорбционный метод исследования пористой структуры наноматериалов и удельной поверхности наноразмерных систем Учебное пособие. – Екатеринбург, 2008. **4.** Сергеев Г.Б. Нанохимия. Учебное пособие. М.,КДУ. 2006. **5.** А.А. Малыгин. Химия поверхности и нанотехнология: взаимосвязь и перспективы. СОЖ. 2004г. Т.8, N 1, - С.32. **6.** Варанкина Г.С. Формирование низкотоксичных клееных древесных материалов . автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург. 2014. **7.** Папулова Г. Н. Влияние величины алюмосиликатного модуля (М) керамической поверхности на ее кислотность и адсорбционную емкость. Ч. 2 // Лакокрасочные материалы и их применение. 2011, № 7. - С. 46 – 49.

ADOLESCENCE AS A PERIOD OF INTELLECTUAL MATURITY

Prikhodchenko Y.I., Kapatsina N.N. *(SEIHPE «DONNTU», Donetsk)*
Tel.:071-306-89-14, E-mail: kapanata77@gmail.com)

Abstract: *Student age is considered by B.G. Ananyev as a special ontogenetic stage of an individual's socialization. He gives the following definition for the student's age: "The upbringing of a specialist, public figure and citizen, the development and consolidation of his many social functions, the formation of his professional skills - all this coincides with a period of life which is named the student's age."*
Key words: *adolescence, intellectual maturity, psychological development, neurophysiological features, youth, education.*

Physical development concerns various aspects of the physiological, sensory and motor functions of the body. It begins from the very first moment of a person's life and reaches its heyday at the age of 20-30 years, and is characterized by the highest level of indicators such as muscle strength, speed of reaction, motor dexterity and physical endurance, etc. As you know, the human brain reaches functional maturity at the beginning of adolescence. Due to the fact that the number of neurons has already been fully formed, further maturation of the nervous system is associated only with the processes of each neuron branching, nerve fibers and the development of glial cells, which are primarily responsible for the nutrition of neurons. Starting at the age of 25, and especially after 45 years, tens of thousands of nerve cells die off every day. However, this does not have any serious consequences for the brain. Indeed, according to the latest research, there are tens of billions of cells in the cerebral cortex.

B.G. Ananyev argued that "in the process of individual development, the analytical activity of the cerebral hemispheres progresses (does not stop and does not collapse) in accordance with the formation of complex systems of its synthetic activity. Moreover, it is the synthetic activity that provides for the allegedly expanded reproduction of information streams, its ordering, selection and organization of constant interaction of all communication channels with the environment". Among the neurophysiological features that are associated with the development of the student's central nervous system, the most important are:

- the smallest latent (latent) period of reactions to any effect of an external and internal stimulus (including a verbal signal), that is, a quick response to it;

- the optimum of the absolute and discriminatory sensitivity of all analyzers (for example, the threshold values of the sensitivity of peripheral vision, hearing and motor centers obtained for the age of 20, as suggested by P.P. Lazarev, can be used as a reference for the sensory optimum, comparing with which it is possible determine the age of any person); in other studies (L.A. Schwartz, C.B. Kravtsova) it is proved that the sensory optimum is reached by the age of 25;

- the largest volume of operational (short-term) memory of visual and auditory modality (there is a dependence of the dynamics of the development of mnemonic functions on the nature of human activity: active mental activity contributes to higher memory indicators);

- the highest indicators of attention (the level of volume, switching and selectivity of attention gradually increases from 18 to 33 years old);

- the optimum development of intellectual functions falls on 18-20 years (for example, if we take, according to J. Raven, the logical ability of a twenty-year-old person as a standard, then at 30 years old it will be equal to 96%, at 40 years old - 87%, at 50 years old - 80%, and at 60 years old - 75% of the standard);

- the highest speed of solving verbal-logical problems (the complex nature of mental operations with a high level of integration of various types of thinking, flexible transition from figurative to logical and vice versa);

- the most intensive development of all types of feelings, increases emotional sensitivity (irritability) to various circumstances of the surrounding life.

All these high indicators of the nervous system development and neurophysiological features make the adolescent period the most favorable for the education and training. Jean-Jacques Rousseau stated: "This is the time for the assimilation of wisdom."

In his student years, a young person acquires not only the experience of somatic maturity, but also sexual and psychophysiological one. He must attain intellectual maturity as well as maturity as a person, although the individual differences in personal development are very noticeable. Maturity is the highest psychological power when organizing and managing one's behavior. P.Y. Halperin gave the following definition for maturity: “Maturity is the ability to take into account the limits of one's capabilities independently, while acting freely, ie. according to psychological optimality "

An important aspect of the mental development of a person in adolescence is intensive intellectual maturation. An intellectual approach to the specifics of adolescence is implemented in the concept of J. Piaget. For mental development in adolescence is characterized by the complication of mental operations (transition to formal operations) and causes a tendency to theorization and reflection, which makes it possible to understand life, in general, to create a picture or concept of one's own life. However, adolescent thinking is peculiar, egocentric, which is guided mainly by the category of the possible, not the actual.

Indicators of intellectual maturity: breadth of mental outlook; flexibility and multivariate assessments of that; what is happening; willingness to accept conflicting information; the ability to be aware of information in terms of the past (causes) and future (consequences), and not in terms of the here-and-now; the ability to think in terms of the probability. Personal maturity, as defined by the author of the "behavioral model" of the life path V.A. Gitel, is a rather rare phenomenon, and it would be a mistake to replace it simply with the psychology of an adult. The basis of general maturity is formed by personal traits that determine the direction of the person’s activity. The main motive of the personal level of behavior is dignity. The main motive of the characterological level is a person's achievements. Dignity and achievements are directly related to the nature of relationships between people. A mature person recognizes in the other one a unique value and behaves in accordance with this recognition. The absence of such a position is evidence of infantilism, immaturity. Treating the other as an object of manipulation, as an inanimate thing is nothing more than despotism that V.A. Gitel quite strongly opposes humanistic relations. Distinctive maturity is the result of social relationships diversity. To behave within the other and at the same time to remain oneself means to appreciate the inimitability in the world, which is the passing infinite value of the unique, inimitable, that only a mature person can comprehend. The unicity is filled with the meaning of the path gone through. Maturity is the actual combination of the universality and the unicity

as the highest manifestation of the individual. A mature person contains a large world, the so-called microcosm of all humanity with all its passions. When one's maturity becomes able to distinguish between higher, transcendental values and vain values, the person outgrows himself.

According to the results of a longitudinal study (conducted under the leadership of B.G. Ananyev during the 60-70s, in which more than 1,800 people aged 18 to 35 years took part), it was found that student age is the "golden time of a man" - sensitive period for the development of the basic sociogenic potential of the individual as a person: 1) the formation of professional, ideological and civic qualities of the future specialist; 2) the development of professional abilities and the ascent to the heights of creativity as a prerequisite for further independent professional creativity; 3) the central period of the formation of intelligence and stabilization of character traits; 4) there is a transformation of motivation and the entire system of value orientations. At this period an active formation of an individual's style of activity takes place (A. Klimov). Abstract thinking begins to play a leading role in the student's cognitive activity, a generalized picture of the world is formed, and deep relationships are established between various spheres of reality that are being studied. Education is assessed by adolescences not only from the point of acquiring professionalism, but from other points as well: "training ensures the all-round development of the personality," "you get broader life prospects," "you receive a diploma of higher education," etc.

Thus, based on the idea that the development of moral consciousness occurs in parallel with the mental, the American psychologist L. Kohlberg substantiated the idea that the conventional and post-conventional level of moral consciousness development is a characteristic of adolescence. The conventional level is the level when a person evaluates actions as moral or immoral in accordance with on how they are perceived by other people. The post-conventional level supposes the ability to formulate moral norms clearly, the awareness of the relativity and convention, and the independence from the assessments of the immediate environment. Youth is a transition from a heteronomous moral to an autonomous one, to a creative moral self-realization.

Bibliography: 1. Андреев, В. И. Педагогика творческого саморазвития. Инновационный курс. Кн. 1/ В. И. Андреев// Казань, 1996. – 567 с. **2.** Бездухов, В. П. Ценностный подход к формированию гуманистической направленности студента-будущего учителя / В. П. Вездухов, А. В. Бездухов// Самара: Изд-во СамГПУ, 2000 – 185с. **3.** Булынин, А. Актуализация ценностного подхода в педагогическом образовании /А. Булынин// A1ma mater, 1997. – С.22-25. **4.** Краевский, В. В. Методология педагогики: новый этап: учеб. пособие/ В.В. Краевский, Е.В. Бережнова// Москва: Академия, 2006. – 400с. **5.** Основы педагогики и психологии высшей школы / под ред. Петровского// Москва: Изд-во МГУ, 1986. – 303 с**. 6.** Педагогическое наследие русского зарубежья, 20-е годы: кн. для учителя / сост. и авт. вступ. ст. П. В. Алексеев - Москва: Просвещение, 1993. – 288с. **7.** Талызина, Н. Ф. Управление процессом усвоения знаний / Н.Ф.Талызина // Москва: Изд-во МГУ, 1975. – 343с. **8.** Ананьев, Б. Г. Теория ощущений / Б.Г. Ананьев - Ленинград, 1963. – 455с.

УЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ СДВИГА И ИНЕРЦИИ ПОВОРОТА СЕЧЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ СВОБОДНОГО СТЕРЖНЯ

Радин В.П., Чирков В.П., Щугорев В.Н., Сапунова Л.С., Щугорев А.В. (*НИУ МЭИ, г. Москва, Россия*)
E-mail: Shchugorev.VN@gmail.com

Abstract: *When we using the dynamic method of stability research and drawing up the equation of perturbed motion, it is usually based on the classical Bernoulli oscillation equation. However, in the case of short rods and / or objects in which the shear deformations and the inertia of rotation of the cross sections are significant, and the idea of representing the structure in the form of a rod remains attractive, in this case it is advisable to refer to the Timoshenko oscillation equations.*
Keywords: *the dynamic method of stability research, the classical Bernoulli oscillation equation, rod, the Timoshenko oscillation equations, shear deformations.*

В различных областях механики, где объектом исследования является удлиненная конструкция, в первую очередь напрашивается мысль о принятии в качестве расчетной схемы рассматриваемой системы стержня или стержневой конструкции. Если проанализировать такую область механики как устойчивость положений равновесия упругих систем при неконсервативном нагружении, этим и объясняется большое количество работ [1–5], в которых в качестве объекта исследования выступает стержень. При использовании динамического метода исследования устойчивости и составлении уравнения возмущенного движения в его основу обычно закладывается классическое уравнение колебаний Бернулли. Однако в случае коротких стержней и/или объектов, в которых деформации сдвига и инерции поворота поперечных сечений существенны, а идея представления конструкции в виде стержня остается привлекательной, то в этом случае целесообразно обратиться к уравнениям колебаний Тимошенко. В общепринятых обозначениях разрешающее уравнение колебаний Тимошенко при отсутствии внешней нагрузки имеет вид

$$EI\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}-\rho I\left(1+\frac{E}{kG}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial t^2}+\rho F\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+\frac{\rho^2 I}{kG}\frac{\partial^4 w}{\partial t^4}=0\,. \qquad (1)$$

Здесь кроме классических, основанных на гипотезах Бернулли, изгибного и инерционного членов (первый и третий члены в правой части уравнения), деформации сдвига и инерцию поворота сечений учитывают второй и четвертый члены. Коэффициент k, стоящий при модуле сдвига G, учитывает неравномерность распределения касательных напряжений по поперечному сечению. Подробный анализ собственных частот и форм уравнения (1), как показано в работе [6], позволяет во многих случаях использовать усеченное уравнение, не содержащее четвертой производной от нормального прогиба по времени

$$EI\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}-\rho I\left(1+\frac{E}{kG}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial t^2}+\rho F\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=0\,. \qquad (2)$$

Тем более это справедливо для неконсервативных задач, когда динамическая потеря устойчивости реализуется при взаимодействии низших собственных форм колебаний. Напомним, что последний член в левой части уравнения (1) определяет по существу высшие собственные частоты и формы.

На основе высказанных выше замечаний рассмотрим весьма важную с точки зрения приложений задачу об устойчивости прямолинейной формы свободного стержня. Стержень длиной l совершает равноускоренное движение под действием

двух сил, постоянных по величине и приложенных к одному из торцов стержня. Одна из сил Q имеет постоянное направление, а вторая P – следящая. Направление последней при любых перемещениях и деформациях совпадает с направлением касательной к изогнутой оси стержня в точке приложения этой силы. При действии только следящей силы с использованием разложения решения уравнения возмущенного движения в степенные ряды эта задача была решена еще в шестидесятые годы прошлого столетия В.И. Феодосьевым [7]. Применяя динамический метод исследования устойчивости [1] для рассматриваемой системы, запишем уравнение малых колебаний (уравнение возмущенного движения относительно прогиба $w(x,t)$) с учетом деформаций сдвига и инерции поворота сечений в следующем виде

$$EI\left(1+b_i\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+b_e\rho F\frac{\partial w}{\partial t}-\rho I\left(1+\frac{E}{kG}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial t^2}+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\left[(P+Q)\left(1-\frac{x}{l}\right)\right]\frac{\partial w}{\partial x}\right\}+\rho F\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=0 \quad (3)$$

Уравнение (3) дополним граничными условиями:

$$\begin{gathered} EI\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=0,\quad EI\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+Q\frac{\partial w}{\partial x}=0,\quad (x=0),\\ EI\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=0,\quad EI\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}=0,\quad (x=l). \end{gathered} \quad (4)$$

В однородной краевой задаче (3), (4) обозначено: EI – жесткость стержня на изгиб, ρF – погонная масса стержня, b_i – коэффициент внутреннего трения с использованием модели Фойхта, b_e – коэффициент внешнего трения. Начало продольной координаты выбирается на загруженном торце стержня. Для перехода к безразмерным параметрам введем некоторую характерную частоту и радиус инерции поперечного сечения

$$\omega_0=\frac{1}{l^2}\sqrt{\frac{EI}{m}},\quad r=\sqrt{\frac{I}{F}}$$

Введем безразмерные параметры

$$\xi=\frac{x}{l},\quad \tau=\omega_0 t,\quad \varepsilon_i=b_i\omega_0,\quad \varepsilon_e=\frac{b_e}{\omega_0},\quad \alpha=\frac{Ql^2}{EI},\quad \beta=\frac{Pl^2}{EI},\quad \mu=\frac{r^2}{l^2}\left[1+\frac{2(1+\nu)}{k}\right],$$

где ν – коэффициент Пуассона, а параметр μ определяет удлиненность стержня. Кроме того, подразумевая в дальнейшем использование метода разложения решения возмущенного движения в ряд по собственным формам колебаний свободного стержня, уберем из граничных условий (2) силу Q и с помощью δ – функции Дирака введем ее проекцию в уравнение (3). Тогда граничные условия (4) заменятся на однородные, а безразмерная форма уравнения возмущенного движения примет вид

$$\left(1+\varepsilon_i\frac{\partial}{\partial\tau}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}-\mu\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^2\partial\tau^2}+(\alpha+\beta)\frac{\partial}{\partial\xi}\left\{\left[(1-\xi)\right]\frac{\partial w}{\partial\xi}\right\}-\alpha\frac{\partial w}{\partial\xi}\delta(0)+\varepsilon_e\frac{\partial w}{\partial\tau}+\frac{\partial^2 w}{\partial\tau^2}=0 \quad (5)$$

Решим задачу об определении собственных частот и форм незакрепленного по концам стержня. Собственные формы $\varphi_k(\xi)$ можно определить по формуле

$$\varphi_k(\xi) = S_1(\chi_k\xi) - \frac{S_2(\chi_k)}{S_3(\chi_k)} S_2(\chi_k\xi)$$

где χ_k – частотные коэффициенты, определяемые уравнением $1 - \mathrm{ch}\chi \cdot \cos\chi = 0$, а $S_j(\chi_k\xi)$ – известные функции Крылова ($j = 1,2,3,4$).

Исследование устойчивости прямолинейной формы стержня сводится к анализу устойчивости по Ляпунову тривиального решения уравнения (5). Применим для этого метод разложения по собственным формам. Представляем отклонения от прямолинейной формы (возмущения) $w(\xi,\tau)$ в виде ряда по формам собственных колебаний

$$w(\xi,\tau) = \sum_{k=1}^{n} q_k(\tau)\varphi_k(\xi), \quad \text{или} \quad w(\xi,\tau) = \mathbf{q}^{\mathrm{T}}(\tau)\boldsymbol{\varphi}(\xi), \tag{6}$$

где $q_k(\tau)$ – обобщенные координаты, n – число удерживаемых членов ряда. Подставим выражение (6) в уравнение (5) и применим процедуру метода Бубнова-Галеркина. В результате получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно обобщенных координат $q_k(\tau)$. Матричная форма этих уравнений имеет вид

$$(\mathbf{A} - \mu\mathbf{D})\lambda^2 + (\varepsilon_e\mathbf{A} + \varepsilon_i\mathbf{C})\lambda + \mathbf{C} + (\alpha+\beta)\mathbf{D1} - (\alpha+\beta)\mathbf{B} - \alpha\mathbf{B1} = 0, \tag{7}$$

где матрицы $\mathbf{A},\mathbf{B},\mathbf{C}$ и $\mathbf{D}$ определяются через интегралы от форм колебаний и их производных.

$$\mathbf{A} = \int_0^1 \boldsymbol{\varphi}(\xi)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\xi)d\xi,\ \mathbf{B} = \int_0^1 \boldsymbol{\varphi}'(\xi)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\xi)d\xi,\ \mathbf{C} = \int_0^1 \boldsymbol{\varphi}^{IV}(\xi)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\xi)d\xi,\ \mathbf{D} = \int_0^1 \boldsymbol{\varphi}''(\xi)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\xi)d\xi,$$

а матрицы $\mathbf{B1}$ и $\mathbf{D1}$ определяется выражениями

$$\mathbf{B1} = \boldsymbol{\varphi}'(0)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(0) \text{ и } \mathbf{D1} = \int_0^1 (1-\xi)\boldsymbol{\varphi}''(\xi)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\xi)d\xi.$$

Представляя решение уравнения (5) в виде $\mathbf{q}(\tau) = \mathbf{q}_0 \exp(\lambda\tau)$, где λ – характеристические показатели, для исследования устойчивости получим характеристический полином вида.

$$(\mathbf{A} - \mu\mathbf{D})\lambda^2 + (\varepsilon_e\mathbf{A} + \varepsilon_i\mathbf{C})\lambda + \mathbf{C} + (\alpha+\beta)\mathbf{D1} - (\alpha+\beta)\mathbf{B} - \alpha\mathbf{B1} = 0. \tag{8}$$

Характеристические показатели λ (в общем случае комплексные числа) полностью определяют поведение системы во времени в окрестности исследуемого на устойчивость положения равновесия. Очевидно, что положение равновесия будет асимптотически устойчивым, если действительные части всех характеристических показателей отрицательные, т.е. $\forall \mathrm{Re}\lambda < 0$. Для определения положения границ области устойчивости применялся критерий Рауса-Гурвица. Если в разложении прогиба используется n членов разложения, то соответствующая матрица Гурвица будет размерностью $2n \times 2n$. Как показали вычисления, равенства нулю главного минора матрицы Гурвица порядка $2n-1$, т.е. $\Delta_{2n-1} = 0$ определяет границу области

флаттера на плоскости параметров нагружения α,β. Граница области дивергенции может быть определена из условия равенства нулю определителя матрицы Гурвица или, что то же самое, равенства нулю свободного члена характеристического полинома $b_0 = 0$.

Проведем исследование влияния параметра μ на критические значения следящей силы β. Пусть $\alpha = 0$. Рис. 1 и рис. 2 при отсутствии демпфирования в системе демонстрируют зависимости мнимых и действительных частей первых двух характеристических показателей λ от величины β. Мнимые части λ_1 и λ_2, а это есть собственные частоты системы ω_1 и ω_2, с ростом следящей силы сближаются и сливаются при критическом значении β_*. Действительная часть одного из показателей при этом становится положительной, что соответствует динамической потере устойчивости – флаттеру, частота которого равна ω_*.

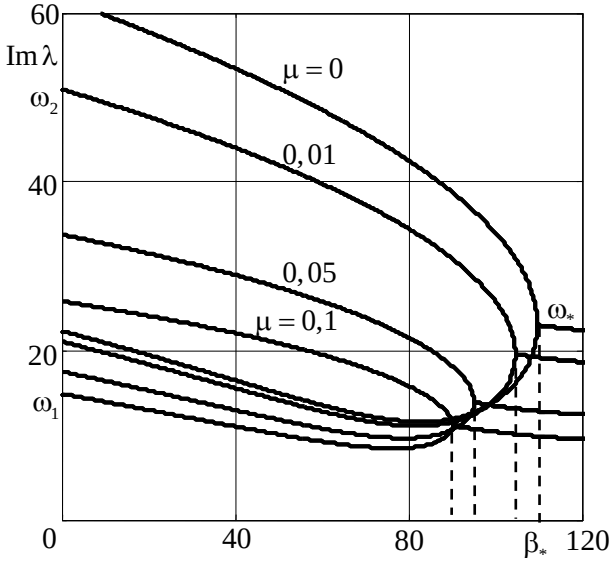


Рис. 1. Зависимость мнимых частей характеристических показателей от следящей силы

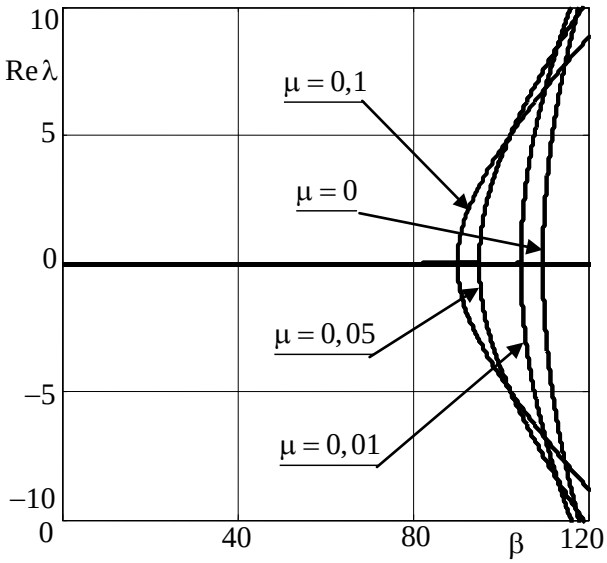


Рис. 2. Зависимость действительных частей характеристических показателей от следящей силы

С ростом параметра, учитывающего деформации сдвига и инерцию вращения сечений, критическое значение следящей силы уменьшается. Если при $\mu = 0$, как и у Феодосьева В.И., $\beta_* \approx 109,7$, то при $\mu = 0,01$ – $\beta_* \approx 104,7$, при $\mu = 0,05$ – $\beta_* \approx 95,1$, $\mu = 0,1$ – $\beta_* \approx 90,2$. Таким образом, Если вклад обсуждаемых факторов существенен, то их необходимо учитывать при определении критических значений неконсервативных нагрузок.

Для тех же значений параметра μ на рис. 3 на плоскости параметров нагружения построены границы области устойчивости. Положение границы дивергенции не зависит от μ, а граница флаттера несколько сужает область устойчивости. Цифры у границ флаттера соответствуют тому же порядку возрастания параметра μ, что и на предыдущих рисунках.

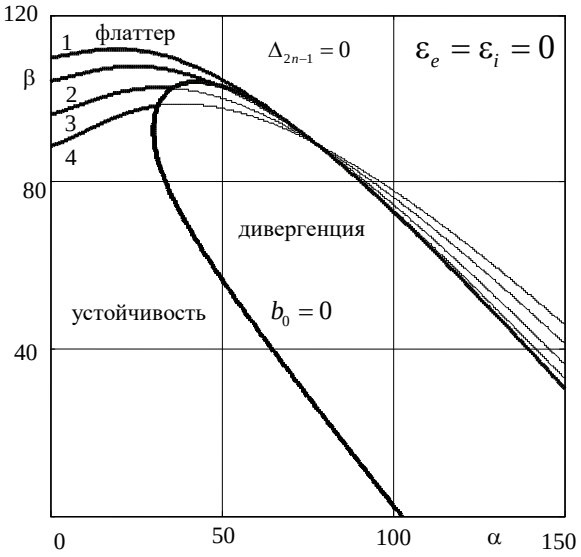


Рис. 3. Границы области устойчивости для системы при отсутствии демпфирования

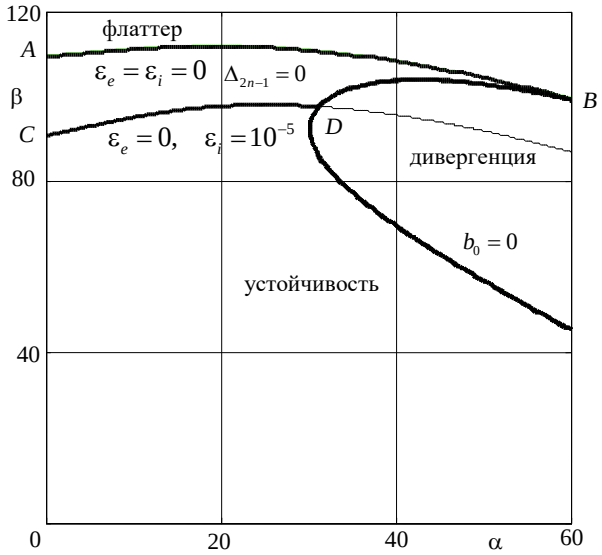


Рис. 4. Границы области устойчивости для случая $\varepsilon_e=0, \varepsilon_i=10^{-5}$ (CD)

Рис. 4 иллюстрирует эффект дестабилизации (парадокс Циглера) при введении в систему малого трения. Если малое внешнее трение несущественно влияет на критические значения нагрузок, то при введение в систему весьма малого внутреннего трения значительно уменьшает критические значения неконсервативных нагрузок. На рисунке для случая $\mu=0$ граница флаттера AB построена при $\varepsilon_e=\varepsilon_i=0$. Если принять $\varepsilon_e=0$, а $\varepsilon_i=10^{-5}$, то граница флаттера CD перемещается вниз примерно также, как при $\mu=0{,}1$.

Список литературы: 1. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. – М.: Физматгиз, 1961. – 339 с. **2.** Banichuk N., Barsuk A., Jeronen J., Tuovinen T., Neittaanmäki P. Stability of Axially Moving Materials. Springer, Solid Mechanics and Its Applications, 2020, 150 p., ISBN 978-3-030-23802-5. **3.** Kirillov O.N., Bigoni D. Dinamic Stabili and Bifurcation in Nonconservative Mechanics. Springer, CISM International Centre for Mechanical Sciences, v. 586, 190 p. **4.** Elishakoff, I. Controversy associated with the so-called ”follower forces”: critical overview, Appl. Mech. Rev. 58 (2005) 117–142. **5.** Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П., Щугорев А.В. Решение неконсервативных задач теории устойчивости. М., Физматлит, 2017, 236 с. **6.** Elishakov I., Kaplunov J., Nolde E. Celebrating the Centenary of Timoshenko’s Study of Effects of Shear Deformation and Rotary Inertia // Applied Mechanics Reviews, ASME, vol. 67, 2015, pp. 1 – 11. **7.** Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. М.: Наука. 1973. 400 с.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ, УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ В ВАКУУМЕ

Радченко М.В., Радченко Т.Б.
(ГАЦ АР НАКС, г. Барнаул, Россия)
Тел./Факс: 8 (3852) 22-65-22; E-mail: mirad_x@mail.ru

Abstract: *The results of coatings properties investigations, made by electron beam in vacuum and technological demands as well, are presented in the article.*
Key words: *welding, hardening, electron beam coating in vacuum.*

Практика эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС), особенно форсированных дизельных двигателей, показывает, что наиболее слабым местом поршней являются зоны кольцевых канавок под компрессионные кольца. Образование предельного зазора между компрессионным кольцом и кольцевой канавкой поршня в основном и определяет ресурс двигателя до переборки, расход топлива и масла, а также затраты на ремонт. Поэтому, решение проблемы повышения моторесурса кольцевых канавок поршней является основным направлением для практического использования результатов научных исследований как в России, так и за рубежом.

В Проблемной лаборатории процессов сварки и создания защитных покрытий АлтГТУ им. И.И. Ползунова (рис. 1) на основе более чем 20-летнего опыта в области электроннолучевых технологий авторами разработана технология электроннолучевого упрочнения наиболее технологически сложных поршневых алюминиевых сплавов заэвтектического состава марки АК21М2,5Н2,5. Технология упрочнения заключается в электроннолучевом переплаве слоя металла в том месте поршня, где в последующем выполняется проточка кольцевой канавки необходимых геометрических размеров.

Упрочнение проводится на поршневых заготовках, полученных методом литья в кокиль. Предпочтительным является вариант использования технологии упрочнения как одной из технологических операций при производстве поршней. Перед упрочнением заготовку поршня очищают от грязи, пыли, масла, затем закрепляют в приспособлении для обеспечения вращения заготовки вокруг своей оси. После закрепления проводят герметизацию вакуумной камеры до необходимого остаточного давления (не более 0,01 Па), и осуществляют процесс упрочнения с легированием или без него.

Основными проблемами при электроннолучевом переплаве в вакууме высококремнистого поршневого сплава, с которыми сталкиваются разработчики технологии, являются растрескивание зоны переплава и высокий уровень остаточной пористости металла.

Для анализа причин возникновения этих проблем были изучены технологии литья и дополнительной обработки алюминиево-кремниевых заготовок на специализированных предприятиях “Поршень” (г. Алма-Ата, Республика Казахстан) и Новосибирском авиационном производственном объединении им. В.П. Чкалова.

Разрешение этих проблем авторами данной статьи найдено в результате анализа структурообразования поршневых заготовок в процессе их отливки и модификации, анализа теплового состояния поршня в процессе переплава зоны упрочнения и рационального выбора траектории высокочастотного сканирования электронного луча.

Для осуществления принудительной дегазации жидкой металлической ванны и более равномерного распределения в ней легирующих элементов было необходимо оснащение электроннолучевых установок приборами управления луча (ПУЛ), позволяющими осуществлять перемешивание расплава за счет сканирования электронного луча по заданной траектории с определенной амплитудно-частотной характеристикой.

Для решения последней задачи в течение 1,5…2 лет была разработана и изготовлена серия специализированных приборов управления электронным лучом, обладающих большим объемом памяти, широким диапазоном частот и траекторий перемещения электронного луча, независимым регулированием развертки по осям координат, плавным регулирование амплитуды и универсальностью в использовании различными типами электроннолучевых пушек.

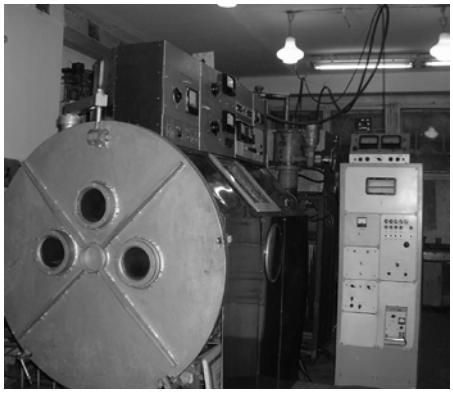


Рис. 1. Лабораторная аппаратура для электроннолучевой сварки и наплавки в вакууме

Такие характиристики ПУЛа позволяют выполнять технологические операции как исследовательского, так и производственного характера. Одна из конструкций таких приборов представлена на рис. 2.

Рис. 2. Панель прибора программного управления электронным лучом

В результате комплексных экспериментальных исследований установлены оптимальные технологические параметры режима упрочнения, позволяющие получать практически бездефектный металл в зоне переплава с высокими показателями износостойкости.

В процессе отработки опытно-производственной технологии электроннолучевого упрочнения поршней для дизелей ОАО “Барнаултрансмаш” было выявлено, что в данной технологии существует серьезный резерв повышения износостойкости первой кольцевой канавки - а именно, упрочнение с легированием, что позволяет значительно расширить области применения данного способа упрочнения [1-5].

Рис. 3. Заготовки поршней из сплава АК21М2,5Н2,5 с упрочненными электронным лучом в вакууме зонами под проточку кольцевых канавок (указаны стрелками)

В случае дополнительного легирования алюминиевого сплава с целью получения еще более высоких показателей износостойкости в качестве легирующего материала предложено использовать нихромовую или медную проволоку, содержание которых в наплавленном металле определяет требуемые механические свойства, например твердость, износостойкость.

Внешний вид поршневых заготовок с упрочненными зонами под кольцевую канавку показан на рис. 3. Геометрические размеры данных поршней составляют: диаметр 150 мм, высота 120 мм. Геометрические размеры компрессионных колец: радиальная ширина – $6{,}05_{-0{,}2}$ мм, толщина – 3,0 мм. Данными поршнями комплектуются быстроходные форсированные дизельные двигатели.

Практическая реализация разработанного способа упрочнения кольцевых канавок осуществлена на заводе ОАО “Барнаултрансмаш”, где был спроектирована и изготовлена электроннолучевая аппаратура с 14-ти позиционным манипулятором под данный типоразмер поршней. С использованием электроннолучевой пушки с “холодным катодом” и манипулятором, внешний вид которых показан на рис. 4 и 5, выполняли производственную программу упрочнения поршней методом электроннолучевой технологии без легирования.

Рис. 4. Заводская электроннолучевая установка с пушкой с “холодным катодом” и прибором управления лучом

Проведенные производственные испытания упрочненных поршней при работе на форсированных дизелях показали повышение их моторесурса в 3 раза. Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанной технологии составляет 200 рублей на 1 упрочненный поршень в ценах 2000 г.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о перспективности применения электроннолучевой технологии с легированием для упрочнения алюминиевых поршней двигателей внутреннего сгорания.

Разработанная технология может быть рекомендована к внедрению на предприятиях края, специализирующихся в области двигателестроения или производства деталей и комплектующих для двигателей внутреннего сгорания.

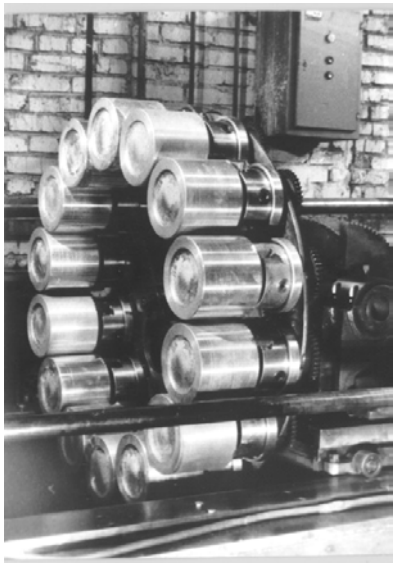


Рис. 5. 14-ти позиционный манипулятор для электроннолучевой сварки и упрочнения поршней в вакууме

Одной из проблем, возникающих при эксплуатации поршней, является сокращение их срока службы по причине растрескивания днища поршня вследствие термоусталостных напряжений. Существует ряд способов снижения термоусталостных напряжений, в том числе за счет изменения конструкции поршней, в частности создания в зоне первой поршневой канавки дополнительной полости, по которой циркулирует моторное масло.

В такой конструкции поршня благодаря более интенсивному охлаждению за счет циркуляции моторного масла, от днища поршня происходит более равномерный отвод тепла, что приводит к снижению термоусталостных напряжений и предотвращению растрескивания алюминиевого сплава вблизи днища поршня.

Предложенная авторами технология производства сварного поршня имеет определенные преимущества перед аналогичными технологиями, используемыми

для образования полости охлаждения в днище поршня, например, метод заливки соляных стержней. Использование электроннолучевой сварки в вакууме обеспечивает кинжальное проплавление, что предотвращает создание напряжений и последующих деформаций.

Такого рода конструкторские и технологические работы принципиально были известны ранее по результатам исследований германских (фирма “Мале”) и российских ученых-конструкторов, в том числе сотрудников ЦКБ ОАО “Барнаултрансмаш”. Однако во всех случаях использование электроннолучевой технологии относилось только к низкокремнистым алюминиевым поршневым сплавам, т.н. благополучным в отношении металлургических дефектов при переплаве высококонцентрированными потоками энергии (плазменные струи, электронные лучи).

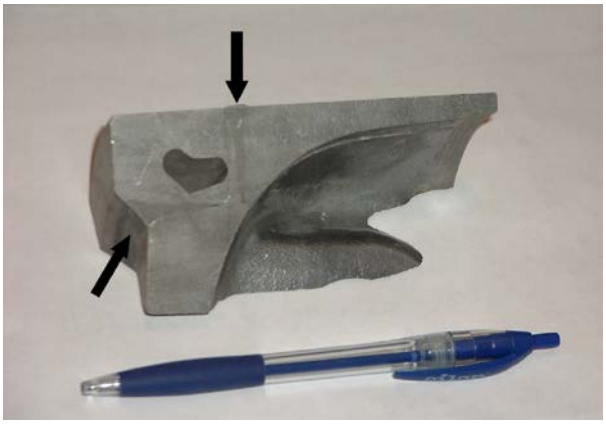


Рис. 6. Темплет составного сварного поршня с полостью охлаждения, выполненной с применением электроннолучевой сварки в вакууме (стрелками указаны сварные швы)

Авторами была разработана и прошла успешное тестирование технология производства составного поршня из высококремнистого алюминиевого сплава АК21М2,5Н2,5, изготовленного из двух частей с последующей их сваркой электронным лучом. Результаты комплексного тестирования качества металла и всей конструкции поршней в целом показали практическое отсутствие каких либо дефектов, что явилось принципиальным доказательством возможности использования данной технологии производства поршней с полостью охлаждения, как показано на рис. 6.

Разработанная технология электронно-лучевой сварки алюминиевых поршней рекомендована для дальнейшего использования на предприятиях страны, специализирующихся в области двигателестроения.

В связи с относительно высокой стоимостью оборудования, использование высококонцентрированного источника нагрева – электронного луча в вакууме – для сварки и создания упрочняющих и защитных покрытий целесообразно в тех случаях, когда оно приводит к получению качественно новых результатов, свойств сварных, упрочненных и наплавленных изделий, а также когда невозможно использовать другие методы поверхностного нагрева. В частности, авторами работы для предприятия ОАО «Барнаултрансмаш» был выполнен комплекс технологических работ по электроннолучевой сварке тела гильзы цилиндра с посадочным буртом. Это определило экономию дорогостоящей легированной стали 38Х2МЮА до 40 % за счет резкого уменьшения толщины стенки заготовки и устранения операции токарной обработки [6].

В развитие электроннолучевых технологий метод наплавки электронными пучками низких энергий (до 5 кэВ), разработанный коллективом авторов, благодаря сочетанию преимуществ порошковых материалов и вакуумной защиты металла позволяет создавать уникальные по эксплуатационным свойствам упрочняющие слои на поверхностях различных деталей дизелей [7-11].

Весьма эффективно с помощью упрочнения и наплавки электронным лучом создание защитных слоев на поверхности деталей с высоким уровнем функциональных свойств (твердость, износо- и коррозионная стойкость) на деталях или заготовках из относительно дешевых малоуглеродистых сталей. Благодаря возможности подачи энер-

гии точной дозировки с помощью наплавки электронным лучом (ЭЛН) формируются равномерные по толщине слои с минимальным проплавлением основы, исключаются деформации нежестких деталей. Прочность сцепления с основой наплавленных методом ЭЛН покрытий, находится на уровне металлической связи. Поэтому в отличие от напыленных они не растрескиваются и не отслаиваются в результате воздействия интенсивных многоцикловых контактных нагружений. Возможна многократная наплавка после перешлифовки наплавленных деталей. Как показывает практический опыт, стоимость ремонта деталей составляет порядка 30% от стоимости новых при существенно более высоких функциональных показателях свойств поверхности[12, 13].

Например, упрочнение с оплавлением рабочих кромок матриц для горячего деформирования распылителей дизельного топлива позволило на ОАО «Алтайдизель» повысить разгаростойкость поверхности в 2 раза.

Особенно актуальным является практическое использование электроннолучевой технологии наплавки высоколегированных порошковых сплавов на основе системы Ni-Cr-B-Si для ремонта и восстановления изношенных поверхностей тяжелонагруженных деталей: коленчатых и распределительных валов ДВС (рис. 7, 8), крестовин, шаровых опор, толкателей распределительного валика, ступиц шкивов клиноременных передач, ходовых винтов и др.

Использование высококонцентрированных электронных пучков для сварки, упрочнения с оплавлением и прямой порошковой наплавки является перспективной областью, в которой накоплен достаточно большой практический конструкторско-технологический опыт.

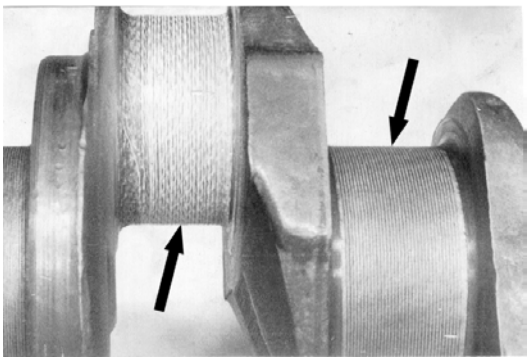


Рис. 7. Коленчатый вал форсированного дизеля с коренными и шатунными шейками, упрочненными методом электроннолучевого оплавления в вакууме (стрелками указаны места упрочнения)

Рис. 8. Распределительный вал ДВС после ремонта методом электроннолучевой порошковой наплавки в вакууме (стрелкой указано место износостойкой наплавки)

Перспективным представляется создание на тяжелонагруженных деталей дизелей с наплавленными композиционными покрытиями, когда каждая из фаз – пластичная матрица и твердые упрочняющие частицы карбидов, боридов, силицидов тугоплавких элементов – выполняет определенные функции, создавая в комплексе материалы с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Разработанные технологии могут быть рекомендованы к внедрению на предприятиях края, специализирующихся в области двигателестроения при производстве новых или восстановленнии и ремонте изношенных деталей и комплектующих для двигателей внутреннего сгорания.

Хорошая воспроизводимость результатов упрочнения и наплавки в автоматизированном режиме, возможность полной автоматизации технологического процесса с компьютерным управлением, экологическая чистота, возможность существенного улучшения свойств поверхностного слоя изделий в сочетании с наличием выпускаемого в России и странах ближнего зарубежья надежного, апробированного в течение 30-35 лет оборудования, значительно расширяет диапазон технологических операций обработки деталей дизелей с использованием электронных пучков в вакууме.

Наличие на предприятиях края внедренных электроннолучевых технологий сварки и создания упрочняющих и защитных паокрытий определяет приоритет Алтая в этой области.

В 2007 г. коллективу авторов за разработку и внедрение на предприятиях региона электроннолучевых технологий сварки, упрочнения и наплавки была присвоена премия Алтайского края в области науки и техники.

Практика эксплуатации трубопроводной и паровой котельной арматуры показывает, что ее ресурс во многом зависит от качества уплотнительных поверхностей, которые работают в сложных эксплуатационных условиях, а в настоящее время он меньше ресурса других основных элементов трубопроводов и энергетических установок. Арматура предназначена для управления движением, распределением и регулированием расхода потоков жидкостей, газов (паров) путем непосредственного на них воздействия.

По назначению арматуру можно разделить на следующие основные группы [14]: запорная, регулирующая, предохранительная, защитная, фазоразделительная.

В силу наиболее сложных эксплуатационных условий в работе рассматривалась первая группа, в частности вентили с условным диаметром прохода (номинальным диаметром отверстия в арматуре, служащий для прохода среды $Д_у$ = 100 мм.

Для изготовления паровой котельной и трубопроводной арматуры в зависимости от ее назначения и условий работы используются конструкционные и легированные стали – сталь 20, 20ХМЛ, 15Х1М1ФЛ, 20Х1М11Ф11Р, 08Х18Н10Т, 20Х13 и многие другие.

Вентили арматуры выполняются с плоскими, конусными и сферическими уплотнительными поверхностями. Плоские уплотнения используются, в основном, в арматуре с $Д_у$ более 40 мм, предназначенной для пара и жидкостей средних и высоких давлений и температур. Конусные и шаровые (сферические) уплотнения работают в арматуре с $Д_у$ менее 40 мм, для пара и жидкостей высоких давлений и температуры.

Шаровая запорная арматура (со сферическими уплотнительными поверхностями) имеет следующие преимущества в сравнении с традиционными вентилями, задвижками, поворотными заслонками:

1. Низкое гидравлическое сопротивление (в 3...4 раза меньше).
2. Высокий уровень регулировки расхода, давления.
3. Быстрое время срабатывания.
4. Экономный расход жидкости или пара.

Запорную арматуру с такими поверхностями выгодно применять в пульпированных трубопроводах, где взвешенные частицы быстро засоряют обычные задвижки и вентили.

В настоящее время для увеличения срока службы арматуры защитные покрытия на рабочие поверхности наносят, в основном, методом наплавки. Для создания герметичного соединения поверхности притираются до шероховатости R_a 0,025 и плотно сжимают нормальным усилием, что исключает наличие протечек рабочей жидкости или газа.

Уплотнительные поверхности работают в сложных условиях. В процессе работы они находятся в среде водяного пара или жидкости, рабочего давления и температуры. Запирание и отпирание запорных органов происходит многократно в условиях почти сухого трения при высоких контактных давлениях. При неработающем котле (парогенераторе) или трубопроводе уплотнительные поверхности подвергаются коррозионному воздействию конденсата или рабочего тела. Вышеперечисленные условия работы предъявляют определенные требования к уплотнительным поверхностям паровой котельной и трубопроводной арматуры, и материалам, применяемым для их изготовления. Наплавленный металл уплотнительных поверхностей должен отвечать следующим требованиям [15]:

1. Иметь стабильную структуру и твердость в процессе длительной эксплуатации при рабочих температурах.
2. Быть плотным, не иметь трещин, пор, раковин, сколов и обеспечивать герметичность при эксплуатации.
3. Обладать стабильностью химических и физических свойств в течение установленного срока службы.
4. Обладать достаточным сопротивлением термической и малоцикловой усталости.
5. Обладать стойкостью против образования горячих и холодных трещин при наплавке и иметь твердость больше 45 HRC.
6. Обеспечивать стойкость против задиров при удельных давлениях 1200…1500 кгс/см^2.
7. Обладать коррозионной и эрозионной стойкостью в рабочих средах (перегретый пар до температуры T = 515 ^{o}C, до давления P = 80 кгс/см^2, насыщенный пар до T = 300 ^{o}C, до P = 93 кгс/см, агрессивные жидкости).

Для удовлетворения жестких требований в отношении сопротивления изнашиванию, задирам, циклическим нагревам, ударным нагрузкам, коррозии, эрозии уплотнительные поверхности запорной арматуры упрочняются путем электродуговой наплавки под слоем флюса и в среде инертных газов, плазменной наплавки [16]. Наряду с этими традиционными методами все чаще применяют плазменную наплавку с подачей двух токоведущих присадочных проволок [17], импульснодуговую наплавку плавящейся электродной проволокой в среде аргона, а также лазерную наплавку [18]. В качестве наплавочных материалов в арматуростроении применяют следующие материалы:

1. Хромистые стали 48Ж-1 мартенситного класса.
2. Хромоникелевые стали – наплавка электродами ЦН-6Л, ЦН-6М.
3. Сплавы системы Fe-Cr-Ni-Si (Mo, B, Mn) – наплавка электродами ЦН-12Л, ЦН-12М, порошками ПН-АН 34.
4. Сплавы на основе Ni (колмонои).
5. Сплавы на основе Co (стеллиты).

Хромистые стали, широко применяемые для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры, обладают удовлетворительными коррозионными и эрозионными свойствами и имеют твердость наплавленного слоя менее 48 HRC. Но они используются только для наплавки поверхностей, работающих в паровой среде до 400 ^{o}C, т.к. при более высоких температурах значительно снижаются их служебные свойства.

Более высокими коррозионными свойствами по сравнению с хромистыми сталями обладают хромоникелевые нержавеющие сплавы ЦН-6М, ЦН-6Л, но из-за низкой твердости наплавки (28…37 HRC) они также имеют ограниченное применение. Сплавы ЦН-12Л и ЦН-12М из-за неудовлетворительных технологических свойств и недоста-

точного сопротивления термоусталости не применяются для паровой котельной арматуры, подверженной частым переменным тепловым воздействиям.

Наиболее высокими служебными характеристиками обладают сплавы на основе кобальта – стеллиты (от названия фирмы Delloro Stellit Limited (Англия)). Их применяют для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры фирмы Alfa-Laval (Франция), Siemens (Германия), Johnstone (США), Yamatake-Honeywell (Япония). Но они дороги и с трудом поддаются последующей механической обработке.

Для создания защитных покрытий на уплотнительных поверхностях запорной паровой котельной и трубопроводной арматуры – седел, тарелок и сфер – была предложена технология прямой порошковой электроннолучевой наплавки в вакууме (ЭЛН). Учитывая условия работы пары трения и необходимость обеспечения возможности последующей обработки, материалами для наплавки были выбраны хромоникелевый порошковый сплав ПГ-10Н-01 на тарелки и шаровые поверхности и бронзовый сплав ПГ-19М-01 на седла. Химический состав порошков показан в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав напалавленных порошков

Марка	C	Cr	Ni	Si	Fe	B	Al	Cu
ПГ-10Н-01	0,6-1	14-20	ост	4-4,5	3-7	2,8-4,2	-	-
ПГ-19М-01	-	-	-	-	до 5	-	8,5-10	ост.

Наплавка осуществлялась на электроннолучевой аппаратуре У-250А с использованием термонакальной пушки У-530М. Благодаря специально сконструированному манипулятору изделия со сферическими рабочими поверхностями с радиусом R = 45 мм в процессе наплавки вращались вокруг двух взаимноперпендикулярных осей относительно неподвижного луча и желоба питателя, что обеспечивало непрерывную наплавку валиков по винтовой линии с коэффициентом перекрытия валиков $К_п$ = 30…40 % .

Исходя из условий обеспечения прочного соединения наплавленного металла с основой и исключения их значительного перемешивания, в результате экспериментальных исследований были установлены следующие режимы ЭЛН:

- ускоряющее напряжение $U_а$ = 22 кВ;
- ток луча $I_л$ - до 100 mA (удельная мощность в пятне нагрева q – до 2,7 Вт/см^2) для тарелок и сфер и $I_л$ до 120 mA (q – до 3,4 Вт/см^2) для седел;
- окружная скорость вращения изделий – до 3 мм/с;
- массовый расход порошка $G_п$ – до 1 кг/ч;
- развертка луча в две линии с амплитудой А = 5 мм, частотой f = 25 Гц и ускорением на концах отрезков.

Нанесение покрытий без предварительного подогрева изделий привело к появлению в наплавленном слое на сферических поверхностях сетки трещин из-за разности коэффициентов термического расширения наплавленного материала и материала подложки (сталь 20). Поэтому, чтобы исключить эти дефекты, заготовки перед направкой подогревали до температуры 450…550 ^{0}С.

Поддержание в процессе наплавки установленного рационального соотношения основных технологических режимов позволило обеспечить толщину наплавленного слоя 1…2 мм, минимальное проплавление подложки и незначительное разбавление наплавленного металла железом (доля материала подложки в наплавленном слое γ до 5 %).

Сочетание оптимальных режимов и процессов рафинирования и дегазации расплава, проходящих во время наплавки в вакууме, обеспечило, как показывают резуль-

таты металлографического и рентгеноструктурного анализа, получение плотной мелкозернистой структуры защитного покрытия (без пор, раковин, неметаллических и газовых включений) с требуемым уровнем функциональных свойств.

В результате экспериментальных исследований установлено, что наплавленный порошком ПГ-10Н-01 слой металла по технологичности, по стойкости против задиров при сухом абразивном трении и против образования трещин при резких сменах температуры превосходит сплавы на основе кобальта и железа, а использование для наплавки седел бронзового порошка ПГ-19М-01 позволило снизить коэффициент трения в паре седло-палец и седло-сфера до 0,15.

Рис. 9. Запорная арматура с уплотнительными поверхностями, упрочненными методом ЭЛН в вакууме

Твердость наплавленных материалов составила 25…30 HRC на седлах и 45…50 HRC на шарах и пальцах, что позволило обрабатывать покрытия на токарных станках с ЧПУ с последующей финишной операцией магнитноабразивным способом.

На рис. 9 показана шаровая запорная арматура с рабочими поверхностями, наплавленными электронным лучом в вакууме.

Длительные производственные испытания на АО “ЭТЭМ” на базе Центрального котлотурбинного института им.И.И.Ползунова показали повышение стойкости пары трения палец – седло в 2,5 раза по сравнению с выполненными из стали 08Х18Н10Т.

Расчетный годовой экономический эффект от использования созданной технологии упрочнения уплотнительных поверхностей деталей котельной и трубопроводной запорной арматуры на АО “ЭТЭМ” составляет 850 тысяч рублей.

Применение в арматуростроении ресурсосберегающей экологически чистой технологии прямой порошковой электроннолучевой наплавки в вакууме позволяет повысить качество защитных слоев металла, достичь высокой надежности и долговечности защищенных узлов, уменьшить расход присадочных материалов, повысить производительность и улучшить условия труда за счет автоматизации процесса.

Полученные инженерные решения [19, 20] позволяют рекомендовать использование процессов сварки, упрочнения и наплавки электронным лучом в вакууме для решения проблемы износа деталей машин и механизмов в различных отраслях промышленности.

Список литературы: 1. *Патент РФ № 2148750.* Способ упрочнения зон кольцевых канавок поршня двигателя внутреннего сгорания / М.В. Радченко, Н.И. Батырев, К.С. Кровяков, Ю.О. Шевцов. Заявл. 21.12.1998. Опубл. 10.05.2000. **2.** *Радченко, М.В* Исследование структуры и свойств поршневого алюминиевого сплава, обработанного электронным лучом/М.В. Радченко, К.С. Кровяков // Сварочное производство. 1998. № 11. С.9-12. **3.** *Радченко, М.В,* Получение упрочненных слоев на поверхности поршней из силуминов методом электронно-лучевой наплавки / М.В. Радченко, В.Г. Радченко, К.С. Кровяков// Сварочное производство. 1999. № 11.

С.48-51. **4.** *Кровяков К.С.* Упрочнение кольцевых канавок поршня дизеля электронно-лучевой обработко // К.С. Кровяков, М.В. Радченко//Техника машиностроения. 2000. № 3. С.23-25. **5.** *Радченко М.В., Зубков А.В., Косоногов Е.Н.* Электроннолучевое упрочнение поршневого сплава АК21.- В кн.: Электроннолучевая сварка. М. 1986. С.27-30. **6.** *Радченко М.В., Батырев Н.И.* О структурообразовании в процессе электроннолучевого упрочнения стали 55Х2Н2МФА с оплавлением поверхности.- Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1987. № 4. Вып. 1. 4 с. **7.** *Ольшанский, Н.А,* Электроннолучевая сварка гильзы цилиндров дизельных двигателей/Н.А. Ольшанский, В.Г. Радченко, М.В. Радченко, Р.Ф. Балаян, // Материалы 8 Всесоюзной конф. по электроннолучевой сварке. М. 1983. С.16-19. **8.** *Radchenko M.V., Shevtsov Yu.O., Batyrev N.I.* Metallurgical coating made by electron beam surfacing/ 5 Int. Conf. On Electron beam techn. Varna, Bulgaria, 1991. P.487. **9.** *Радченко, М.В.* Оценка твердости и пластичности слоев, созданных электронно-лучевым наплавлением в вакууме/ М.В. Радченко, В.Г. Радченко, А.М. Кириенко, Ю.О. Шевцов // Металлург. 1997. № 8. С. 33-35. **10.** *Радченко М.В.* Исследование характера коррозионного износа защитных покрытий, выполненных методом электроннолучевой наплавки порошковых сплавов в вакууме/ М.В. Радченко, Т.Н. Белянина // Перспективные материалы. 1997. № 6. С.56-60. **11.** *Радченко, М.В.* Комплексный анализ износостойких защитных покрытий, наплавленных электронными пучками в вакууме / М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.Г. Радченко//Ползуновский вестник. 2005. № 2 (ч. 2). Барнаул: изд-во АлтГТУ. С.67-71. **12.** *М.В.Ралченко, В.Г.Радченко, Т.Б. Радченко.* Сварочное производство. Введение в специальность.-С.-Петербург: издательство Лань, 2020.-237 с. **13.** *Радченко М.В.* Анализ основных технологических параметров комбинированных способов создания защитных покрытий/М.В. Радченко, Т.Б. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.С. Киселев, О.И. Хомутов / Ю.С. Борисов, С.В. Петров// Ползуновский вестник, 2011.-№ 2-2. С. 236-243. **14.** *М.В.Ралченко, В.Г.Радченко, Т.Б. Радченко.* Производство сварных конструкций. Опасные производственные объекты.-Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2021, 530 с. **15.** *Андреев В.В.* Общая технология судостроения.- Л.: Судостроение, 1984.- С. 10. **16.** *Фрумин И.И., Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф.* Опыт применения плазменной наплавки стеллита для ремонта крупных задвижек//Автоматич. сварка.-1981.-№1.-С.67-68. **17.** *Быховский Р.Г.* Плазменная обработка металлов на ленинградских предприятиях // Сварочное производство.- 1983.- N 10.- С. 36. **18.** Разработка лазерной технологии по наплавке уплотнительных поверхностей паровой котельной арматуры порошковыми материалами типа ПН-АН34 и ПН-68Х21С5Р: Отчет о НИР (предварит.) / ЛКИ; Руководитель Манько П.А.; Г.р. N 01860006879.- 1986.- 91 с. **19.** *Радченко, М.В.* Практика использования концентрированных потоков энергии для сварки и создания защитных покрытий/ М.В. Рвадченко, С.Г. Уварова, Ю.О. Шевцов, В.Г. Радченко, В.А. Марков // Ползуновский вестник, 2012.- № 1/1.- С. 248-254. ***20.*** *М.В.Радченко, Шевцов, Ю.О., Т.Б.Радченко.* Создание защитных и упроянющих покрытий методами электроннолучевой обработки в вакууме.-Морсква: издательство Инфра-М,-2020.-251 с.

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СУДОВЫХ ВАЛОГЕНЕРАТОРОВ

Рак А.Н. (*ДонНТУ, г. Донецк*)
Тел.: +38(071)-358-45-49, E-mail: lion15ua@rambler.ru

Abstract. *Currently, the shipping industry around the world pays great attention to reducing greenhouse gas emissions into the environment. For this purpose, the ships use shaft generators driven by the main engines, which make it possible to generate electrical energy, but the issues of their technical operation are practically not considered. The purpose of this article is to develop a simplified calculation methodology that makes it possible to assess the operational characteristics of such systems not only in the nominal mode, but also in modes other than it. This article will be useful not only to electricians of sea vessels, but to other specialists involved in the technical operation of the fleet.*
Key words: *technique, definition, generation, system, shaft generator, main engine, motor vessel ship.*

В настоящее время для производства всех видов энергии на морских судах механической, тепловой и электрической применяется углеводородное топливо. При его сжигании в атмосферу выбрасываются окислы серы (SO_x), окислы азота (NO_x) и твердые частицы (ТЧ). Контроль за выбросами осуществляется в соответствии с требованиями Приложения VI к конвенции MARPOL 1973/78, направленными на снижение эмиссии парниковых газов (ПГ) [1].

Так, в соответствии с [1] выбросы ПГ рекомендуется учитывать с помощью индекса энергоэффективности (Energy Efficiency Design Index – EEDI), который *характеризует энергетические возможности технического средства при наименьших затратах ресурсов для выработки энергии.*

В ряде случаев, оценка EEDI производится с учетом установленного на судне оборудования, пренебрегая возможностями применения *инновационных технологий* в энергетике, интегрированным подходом к определению тех возможностей повышения EEDI, которые не очевидны, но присутствуют при проектировании судна. В простейшем случае оценка EEDI производится по комплексному показателю качества судовой энергетической установки (СЭУ), исходя из ее расходных и ресурсных показателей.

В то же время, в современном двигателестроении и судостроении не только декларируется, но и происходит переход от частных случаев повышения КПД агрегата к комплексной интегральной оценке всех аспектов влияния на энергетические показатели самого судна.

Повышение эффективности и экологической безопасности проектов были изучены на фоне необходимости удовлетворения требований ИМО, вступивших в силу в 2013г. Исследования показали, что потенциал для экономии энергии велик, в некоторых случаях он достигает 50%.

В связи с возникшей потребностью введения показателя, свидетельствующего об эффективности судна в отношении топливной экономичности и выбросов ПГ, предлагалось ввести конструктивный индекс CO_2, а также индикатор эксплуатационной эффективности, который определяет эффективность судна по количеству CO_2 в тоннах, выброшенного отдельной установкой за период рейса судна на тонну перевезенного груза на расстояние в 1 милю.

Снижение эмиссии ПГ определяется в соответствии с Поправкой к Приложению VI к МАРПОЛ по техническим мерам сокращения выбросов ПГ с судов в соответствии с Резолюцией ИМО МЕРС.203(62) вступившей в силу 1 января 2013 года.

Кроме того, вопросами производства всех видов энергии на судах: механической, электрической и тепловой занимаются механики, а вопросами распределения электрической энергии, контролем ее потребления и качеством отвечают электромеханики. Поэтому данные вопросы являются очень актуальными в настоящее время.

Цель работы – разработка методики, позволяющей определить возможности получения электроэнергии с помощью валогенераторов.

Прежде чем перейти к рассмотрению данного вопроса остановимся на следующем.

Достигнутый индекс EEDI должен определяться в соответствии с пересмотренным «Руководством ИМО по методу расчета Конструктивного EEDI для новых судов, 2012», приведённом в Резолюции MEPC.212(63) [ ]:

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\cdot\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)}\cdot C_{FME(i)}\cdot SFC_{ME(i)}\right)+\left(P_{AE}\cdot C_{FAE}\cdot SFC_{AE}\right)+}{f_i\cdot f_c\cdot Capacity\cdot v_C\cdot f_w}$$

$$+\frac{\left(\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\cdot\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)}-\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)}\cdot P_{AEeff(i)}\right)\cdot C_{FAE}\cdot SFC_{AE}\right)-\left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)}\cdot P_{eff(i)}\cdot C_{FME}\cdot SFC_{ME}\right)}{f_i\cdot f_c\cdot Capacity\cdot v_C\cdot f_w} \quad (1)$$

где ***SFC*** - удельный расход топлива двигателя [*г/кВт час*]; C_F - безразмерный переводной коэффициент между расходом топлива в двигателе (*г*) и выбросами CO_2 (*г*), определёнными по содержанию углерода в конкретном топливе [*г CO_2./ г топлива*]; P_{MEi}, – показатель мощности каждого ГД, равный 75% от его номинальной мощности за вычетом мощности, потребляемой валогенератором (ВГ) (в случае его наличия); P_{AE} – показатель требуемой мощности вспомогательных двигателей (ДГ) для обеспечения электроэнергией при максимальной загрузке судна; P_{PTI} – показатель, равный 75% номинальной мощности, потребляемой каждым гребным электродвигателем с учётом механических потерь в нем и без учёта потерь в генераторе; P_{AEeff} – показатель сокращения электрической энергии за счёт использованию энергоэффективных технологий (использование отходящего тепла ГД). P_{eff} – показатель сокращения мощности ГД за счёт применения эффективных инновационных технологий в пропульсивной установке (ПУ) при 75% мощности ГД; f_i – фактор вместимости судна, учитывающий необходимость выполнения требований по ограничению вместимости судна, например требований которые применяются к судам ледового класса; f_j – корректирующий фактор, учитывающий специфическую конструкцию элементов судов, например, судов ледового класса; f_w – безразмерный коэффициент, учитывающий снижение скорости при определённом неблагоприятном состоянии моря в зависимости от высоты и частоты волны, а также от скорости ветра; f_{eff} – коэффициент доступности каждой инновационной технологии; V_c– скорость судна, измеренная на глубокой воде с учётом соответствующей вместимости (дедвейт DWT/валовая вместимость GT в зависимости от типа судна) в соответствии с вышеуказанным Руководством [*узлы*]. Более детально с расчетом коэффициентов f_i, f_j, f_w и f_{eff} можно ознакомиться в [2].

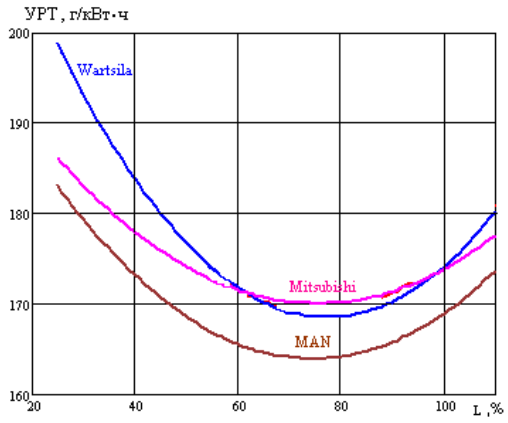


Рис 1. Удельный расход топлива для малооборотных двигателей в зависимости от нагрузки

Для того, чтобы понять почему именно 75% от мощности ГД, необходимо обратиться к рис.1.

Как следует из рис.1 минимальный удельный расход топлива ГД независимо от его производителя приходится именно на нагрузку 75% [3].

При этом в соответствии с рис.2 при данной нагрузке все виды электрических генераторов имеют максимальный КПД [4].

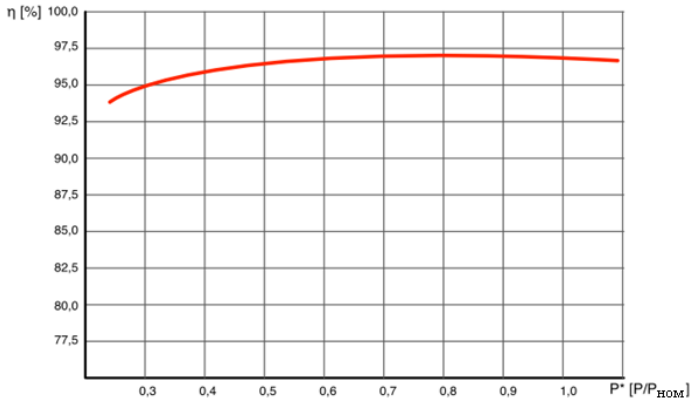


Рис. 2. Зависимость КПД генераторов от нагрузки

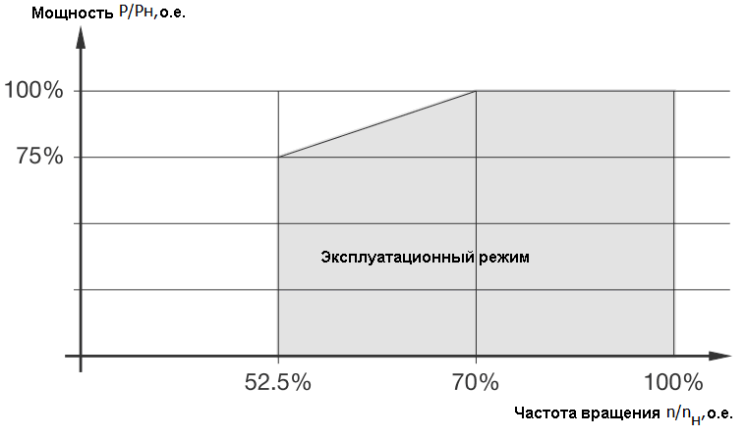


Рис. 3. Зависимость мощности, генерируемой валогенератором от частоты вращения

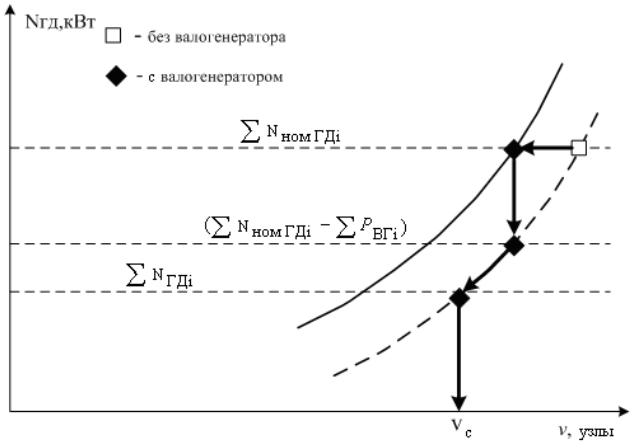


Рис. 4. Схема для определения мощности валогенератора на основании ходовых испытаний (v_c – скорость судна)

Зависимость мощности, получаемой от валогенератора в зависимости от частоты вращения представлена в [5] и на рис.3. Частота вращения $0{,}5 \cdot n_{ном}$ считается «условно» устойчивой.

Как следует из сравнения рис.1 и рис.3 при работе ВГ в заданном диапазоне частот вращения наблюдается снижение удельного расхода топлива, что естественно сказывается на снижении выбросов ПГ в атмосферу.

Руководящие документы IMO не дают четких рекомендаций по выбору ВГ. Например, в [2] указывается, что мощность ВГ устанавливается на основании ходовых испытаний и приводится схема (рис.4).

Так, в соответствии с [6] мощность ВГ составляет 5-6% от мощности ГД, а в некоторых источниках 7%. Какое же значение следует принимать? На этот вопрос мы и должны ответить в данной работе. Кроме того существуют разные схемы установки ВГ, которые представлены на рис.5.

Для примера рассмотрим прядок определения мощности судового ВГ при його работе от ГД WÄRTSILÄ – SULZER RTflex-96C, имеющего номинальную мощность 61774кВт и частоту вращения 98,5об/мин. при непосредственном его включении в линию гребного вала (рис.5,а). Как правило, это многополюсные малооборотные генераторы.

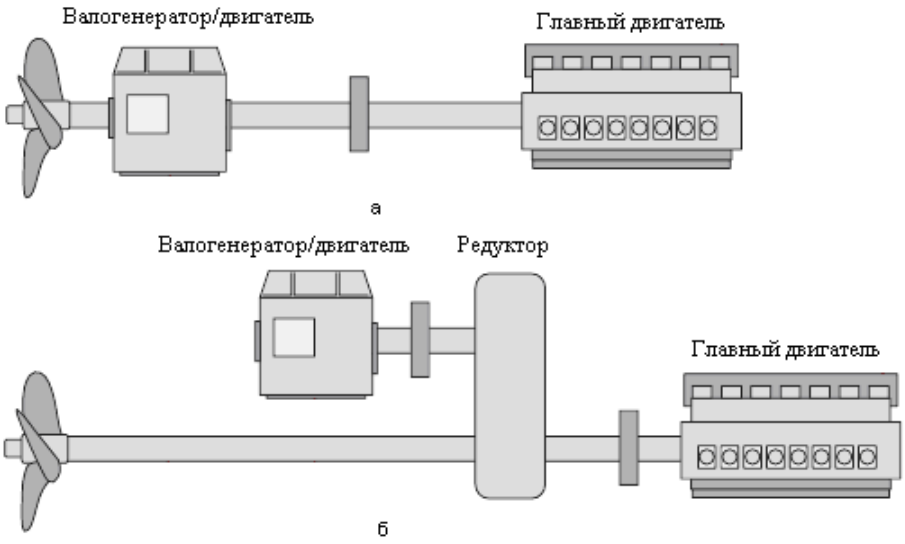


Рис. 5. Наиболее распространенные схемы установки валогенераторов: непосредственная установка валогенератора в линию гребного вала (а); привод валогенератора от вала отбора мощности (б)

В соответствии с рекомендациями представленными в [5] по зависимости (2) построим график подведенной к ВГ мощности от ГД, который представлен на рис.6.

$$P_{ВГ.МЕХ} \le N_H \cdot \left[\left(\frac{n}{n_H} \right)^{2,4} - \left(\frac{n}{1{,}05 \cdot n_H} \right)^3 \right], \qquad (2)$$

где $N_{\text{Н}}$ – номинальная мощность ГД, кВт; $n_{\text{Н}}$ – номинальная частота вращения, об/мин.; n –текущая частота обертання, об/мин. Первая составляющая уравнения (1) $N_H \cdot \left(\frac{n}{n_H} \right)^{2,4}$ - винтовая характеристика ГД с ВГ, а вторая составляющая $N_H \cdot \left(\frac{n}{1{,}05 \cdot n_H} \right)^3$ - винтовая характеристика при работе ГД с «запасом мощности»; 1,05 – коэффициент, учитывающий запас мощности при работе ГД. Обычно он должен составлять 4-7%.

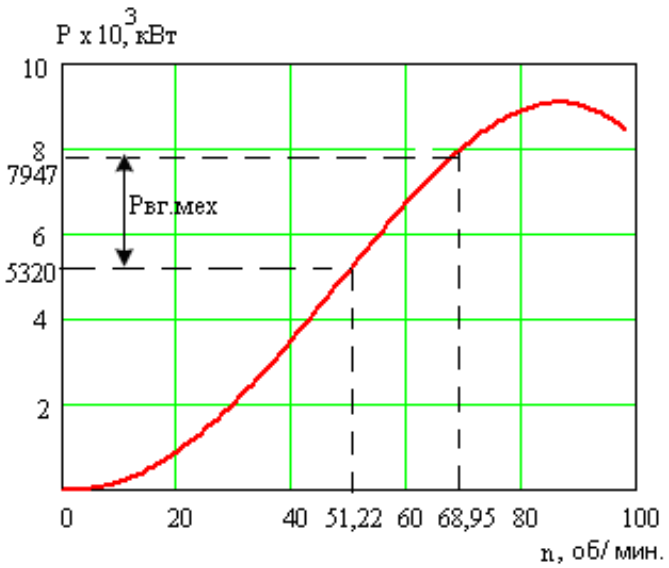


Рис. 6. Зависимость подведенной к валогенератору мощности в зависимости от частоты вращения главного двигателя

В соответствии с рис.3 для указанного диапазона частот вращения определяем соответствующие им мощности.

Определяем разность между ними, которая в данном случае является механической мощностью, подведенной к генератору:

$$\Delta P = P_{ВГ.МЕХ} = P_{70\%} - P_{52{,}5\%}, \text{ кВт} \quad (3)$$

Электрическая мощность, генерируемая ВГ, в этом случае составит:

$$P_{ВГ.Е} = P_{ВГ.МЕХ} \cdot \eta_{МЕХ}, \quad (4)$$

где $\eta_{МЕХ}$ - механический КПД системы. Для нашего случая он составит $\eta_{МЕХ} = 0{,}98...0{,}99$.

Также существует еще один способ определения мощности, генерируемой ВГ. который представлен в [7] и на рис.7. Он связан с построением винтовых характеристик ГД. В выражении (2) «скромно» умалчивается о номинальной винтовой характеристике, описываемой выражением $N_H \cdot \left(\frac{n}{n_H}\right)^3$. В данном случае она является вспомогательной, в отличие от от упомянутых выше в (2) характиристик, но при этом с ее помощью можно непосредственно определить мощность, генерируемую ВГ. Общий порядок определения мощности, генерируемой ВГ представлен на рис.8.

Рис. 7. Порядок определения мощности валогенератора

Результаты определения мощности ВГ для конкретного рассматриваемого выше типа ГД представлены на рис.8.

Для определения генерируемой мощности в схеме (рис.5,б), как правило это высокооборотные генераторы, следует пользоваться соотношением (5):

$$N_{ВГ} = N_{ГД} \cdot (1 - \eta_P \cdot \eta_M \cdot \eta_Г) \quad (5)$$

где $\eta_р$ – КПД редуктора. $\eta_М$ – КПД разъединительной муфты; $\eta_Г$ – КПД ВГ. В расчетах следует применять значения $\eta_р$=0,967; $\eta_М$ =0,99 и $\eta_Г$= 0,97, соответственно.

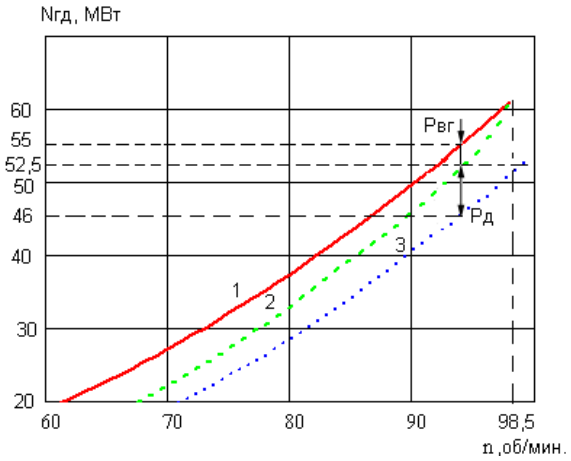


Рис. 8. Порядок определения мощности валогенератора при работе его с главным двигателем WÄRTSILÄ – SULZER RTflex-96C с номинальной мощностью 61774кВт и частотой вращения 98,5об/мин

Подводя итог изложенному можно сделать следующие выводы:

1. Производство электроэнергии с помощью ВГ соответствует всем требованиям конвенции MARPOL 1973/78, направленным на снижение эмиссии парниковых газов ПГ. Для определения мощности ВГ, установленного в линии гребного вала наиболее простым, не требующим дополнительной информации, кроме паспортных данных является метод винтовых характеристик. При этом погрешность расчетов не превышает ±5%, что является вполне приемлемой величиной для инженерных расчетов.

2. При определении мощности ВГ, приводимых в действие через вал отбора мощности, следует руководствовать методом, учитывающим потери в элементах системы.

Список литературы: 1. МАРПОЛ. Книга III, пересмотренное Приложение VI к МАРПОЛ «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов», Издание ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. 2. 2014 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships, as amended (resolution mepc.245(66), as amended by resolutions MEPC.263(68) and MEPC.281(70)) /MEPC.1/Circ.866 30 January 2017/http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/ AirPollution /Documents/ MEPC%201-CIRC%20866%20%28E%29.pdf. Дата обращения 29.01.20. 3. Рак А.Н., Корощенко А.В., Капанадзе Г.А. К вопросу настройки и эксплуатации дизелей с электронным управлением. Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы международной научно-технической конференции (17-19 октября 2018 г.): в 2ч./ отв. За вып. О.А. Белов. – Ч.1. – Петропавловск-Качатский: КамчатГТУ, 2019. – С. 97-102. 4. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2. – Машины переменного ока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л., «Энергия», 1973. 648с. с ил. 5. MAN B&W G45ME-C9. Project Guide. https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/epub/G45ME-C9_5.pdf. Дата обращения 28.04.2021. 6. MAN Energy Solutions. 11,000 teu container vessel. Future in the making. MAN Energy Solutions. 2450 Copenhagen SV, Denmark P16. www.man-es.com. Дата обращения 28.04.2021. 7. Marine installation manual. Issue May 2004/http://www.wartsila.com] і рис.3.25.

РАЗВИТИЕ ПОДСИСТЕМ: ПЕРВИЧНОЙ И СИНТЕЗИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЗОВОЙ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.
(НИУ Московский государственный строительный университет, Россия)
Телефон: +7 (916) 8107126; E-mail: Rakunov1991@mail.ru;

Abstract: *The scientific principles of the development and improvement construction of the primary subsystem and the synthesis of multilevel basic group technology (MBGT) are given. The development of the main subsystems of the MBGT is carried out: the primary (at the level of the passages) and the subsystems for synthesizing higher levels of the technological process connected with it logically and materially. A description of the methodology for parametric optimization of the types of the unified cutting tool (UCT), specially designed for group processing and modes of optimal cutting of structural and difficult-to-machine materials on precision turning universal and CNC machines, is given. The primary subsystem ensures the observance of the rule of the shortest path and the observance of the principle of the unity of bases for individual and group processing. The MBGT synthesis subsystem allows you to quickly and reliably synthesize the GIN, provides the maximum dimensional stability of all UCT models in the GIN and guarantees the best quality of the treated surfaces at the minimum cost of manufacturing the parts included in the group. Thus, the complex technological support of automatic lines, machining centers, sliding head machines, multi-purpose, universal and CNC machines is being established, as in the case of individual and group optimization of machining.*

Keywords: *primary subsystem, subsystem of synthesis, types unified cutting tools, method of parameter optimization, criterions of defining the optimum, method and stages of order machining cutting rate.*

1. Введение

Создание современных систем автоматизированного проектирования (САПР) групповых технологических процессов (ГТП) на основе конструктивно-технологических параметров предмета производства (в частности — детали) является одной из наиболее актуальных и нерешенных пока проблем автоматизации проектирования. Главной причиной этого является отсутствие общего решения проблемы синтеза структур объектов проектирования инвариантного их классу [1-4]. Эти трудности усугубляются при обработке труднообрабатываемых материалов (ТОМ).

2. Основное содержание и результаты работы

В исследованиях [1-5] убедительно показано, что сложность автоматизации проектирования (синтеза) структуру ТП объясняется большой совокупностью правил проектирования, слабой их формализацией, динамичностью схем их применения, определяемых конкретными производственными условиями. Современные системы проектирования технологии характеризуются применением эвристических алгоритмов формирования структур, строго ориентированных на ограниченное число производственных ситуаций, поэтому системы плохо тиражируемы и не адаптивны. Решения, формируемые системой, часто требуют глубокой корректировки. При проектировании структуры ТП требуется ввести большой объём необходимых исходных данных об изделии и производственной среде. Для корректировки решений, облегчения процесса кодирования и ввода исходных данных об изделии применяют диалог пользователя с системой. Однако, даже диалог не позволяет повысить эффективность проектирования структуры ТП, если алгоритмы не были рассчитаны на

конкретную производственную ситуацию. Оперативно изменить или дополнить алгоритмическое и программное обеспечение не представляется возможным [1,3,4].

Процесс варьирования параметров (параметрической настройки) значительно более формализован и менее зависим от производственной ситуации, поэтому в последнее время появилось много систем, в которых автоматически (или автоматизировано) выполняется параметрическая настройка, а структура ТП формируется вручную, и информация о ней вводится в систему как исходные данные. Такие системы легко адаптируются к производственным условиям, требуют введения относительно небольшого объёма исходных данных и легко воспринимаются специалистами при их внедрении. Однако, эффективность решений в таких системах определяется квалификацией технолога, отсутствует возможность оптимизировать структуру объекта проектирования, особенно при финишной обработке ТОМ [4-6].

За последние 20 – 25 лет состояние проблемы автоматизации синтеза структур ТП изменилось мало. Проблема автоматизированного синтеза ***единичных*** и ***групповых ТП*** остаётся важнейшей и наиболее актуальной задачей САПР ТП [1-6].

В наиболее часто встречающихся оценках состояния автоматизированного синтеза ТП указывается, что при его реализации маршрутная и операционная технологии должны создаваться на основе общих закономерностей проектирования или эвристик, справедливых для ограниченного класса деталей и определённых видов и типов производств. Утверждается, что сформировать закономерности проектирования и критерии ТП, с помощью которых можно было бы разрабатывать весь процесс изготовления деталей на сегодняшний день не представляется возможным. Теория синтеза структур технологических объектов, несмотря на усилия многих исследователей, была разработана недостаточно [1-6,9-11].

Структура САПР ТП и состав её подсистем (прежде всего проектирующих) определяются реализуемой в ней методологией проектирования. Существуют две основные методологии проектирования ТП изготовления изделий машиностроения:

– проектирование на базе использования ТП-аналогов;

– синтез единичных ТП на основе конструктивно-технологических характеристик изготавливаемых изделий.

Процессами-аналогами называют типовые и групповые ТП (ГТП). Единичный ТП можно проектировать на основе процессов-аналогов. В этом случае его структура и содержание технологических детале-операций (ДО) в значительной мере определяются структурой процесса-аналога [1,3.4-6].

При использовании метода синтеза ключевым вопросом построения САПР ГТП является вопрос о том, как в данной системе осуществляется синтез структуры объектов проектирования: – рабочих ходов (проходов) с определением режимов резания, переходов ТП, технологических групповых детале-операций (установов) [9-11].

Совокупность процедур анализа, оценки результатов и модификации (изменения) параметров называют ***параметрическим синтезом***. Если параметрический синтез не принёс желаемых результатов, и качество полученного проектного решения не соответствует техническому заданию (ТЗ), то изменяют структуру объекта решения, вплоть до синтеза новой. Если не удаётся получить приемлемое проектное решение, то возможна корректировка ТЗ, так как показатели объекта проектирования, предписанные прежним ТЗ, невозможно обеспечить. Это возникает, если возможности САПР ГТП недостаточны для качественного проектирования [1-4,10,11,13].

В настоящее время САПР групповой технологии механической обработки действует на основе типовых технологических процессов-аналогов, что вполне

оправдано только при наличии достаточно представительных групп деталей, объединённых конструктивной и технологической общностью. Сейчас, однако, такой подход уже представляется рутинным, поскольку не позволяет разрабатывать оптимальные ТП, адаптированные к характеру конкретного производства с учётом его серийности и оснащённости новыми моделями инструмента, оснастки и оборудования.

При разработке технологии производства новых видов изделий при отсутствии типовых ТП, эффективным методом оптимального решения задачи является метод синтеза, т.е. интегрирования по определённым правилам ГТП более высоких уровней из их составляющих: переходов из проходов (рабочих ходов), установов и позиций из переходов, этапов из установов, маршрутов из этапов [4-6,9-11].

Для реализации информационного проблемно-ориентированного подхода разработана структура документов базовой групповой технологии (БГТ) в виде таблиц-матриц (ТМ), что позволяет формализовать процесс синтеза уровней ГТП: автоматизированного выбора позиционных (ПзИН) и групповых инструментальных наладок (ГИН), условий ведения проходов, переходов, позиций и установов [6-11,13-15].

Рабочие ТМ первичной подсистемы по горизонтали начинаются с характеристик технологических видов поверхностей: их геометрической формы, взаимного положения и сопряжения. Путём добавления соотношений параметров поверхностей и технологических признаков группового метода обработки получаем характеристику типов, определяющих номенклатуру поверхностей, формирование которых возможно данным методом. Дальнейшее дополнение ТМ информацией о диапазонах геометрических параметров и физических свойств, а также точности их выполнения на уровне отдельных проходов и их состава, т.е. переходов, даёт полную характеристику типоразмеров (ТР) рабочих поверхностей деталей в группе [6,10,11].

2.1. Первичная подсистема БГТ представлена на примере прецизионного точения и предусматривает по входным данным о виде и типе поверхностей вращения, их взаимном положении и сопряжении, размерах и требуемых качественных свойствах получение следующей выходной информации:

- тип и ТР унифицированного режущего инструмента (УРИ) (рис.1) [6-11];
- материал и геометрия активной части УРИ (табл. 2 [13]);
- модель РИ и параметры ПзИН для выбранного ТР станка (Блок-схема 1[10]);
- режимы проходов: глубина, подача, скорость резания, СОЖ (табл. 3 [6]);
- необходимое исходное состояние поверхности по каждому проходу [13];
- номенклатура и последовательность проходов, т.е. состав перехода;
- прогнозируемый ресурс ПзИН, инструментоёмкость, материалоёмкость и другие технико-экономические показатели каждого перехода [11-14].

2.2. Алгоритм синтезирования переходов по таблицам-матрицам состоит из следующих действий:

1. Определение номенклатуры проходов по каждой поверхности в их обратной последовательности, т. е. от конечного (финишного) прохода до начального с учётом технологической наследственности [10,13]. Таким образом устанавливается полная номенклатура проходов при выполнении перехода в групповом ТР установа, на детале-операционном эскизе которого указаны все обрабатываемые при этом поверхности.

2. Установление хронологически неразрывной последовательности проходов по поверхностям контуров обработки, которые обходит каждая модель УРИ; при этом состав (номенклатура и последовательность) проходов образует переход.

Переход – номенклатура и последовательность (состав) проходов, выполняемых одной моделью ПзИН при неизменной позиции (степенях свободы) заготовки относительно векторов УРИ в координатах оборудования.

2.3. Этапы выбора режимов оптимального резания (см. табл. 2 [6]***):***

1. Из группы пар материалов по марке ОМ определяем марку ИМ.

2. По ТР обрабатываемой поверхности определяем ТР резца, геометрические параметры в плане: φ, *R*, $\varphi_{1;}$ режущего клина (РК): γ, ρ, α, $\alpha_{1,}$ а также угол наклона РК-λ.

3. Исходя из требований, предъявляемых к конечным свойствам формируемых поверхностей, определяем требования к исходным поверхностям и ***i*** **-** проходов.

4. Несоответствие свойств исходных поверхностей табличным требованиям приводит к введению ещё одного, двух, и т. д. проходов, т. е. ($i = n - 1$) проходов.

5. Режимы прохода выбираются из строки режимов, соответствующей виду, типу и ТР обрабатываемой поверхности (ОП) с конкретной номенклатурой её свойств [12-15].

6. В зависимости от программы выпуска деталей режимы обработки могут быть выбраны, исходя из максимальной стойкости инструмента или максимальной производительности. Первые две строки в каждом диапазоне шероховатости кроме $R_a \leq 0{,}63$ мкм – режимы максимальной стойкости (скорость V_O). Вторые две строки – это режимы максимальной производительности (скорость $V_Э$). При изготовлении деталей малыми партиями рекомендуются режимы максимальной производительности [12-15].

В этом случае величина малой партии определяется как частное от деления максимально достижимой площади обработки, гарантированно обеспечиваемой экономической скоростью резания $V_Э$ и режимами максимальной производительности, на площадь лимитирующей поверхности изготовляемой детали [6,9-11].

7. Из выбранной строки режимов определяем ресурсостойкость резца или «удельная размерная стойкость» - дробь, в числителе которой площадь обработки в [дм^2] до переточки, соответствующая заданным значениям: погрешности формы, шероховатости поверхности, радиуса сопряжения цилиндрических и торцевых поверхностей, а в знаменателе размерный износ резца [мкм] в направлении к нормали к ОП. Максимальную стойкость и наилучшие перечисленные показатели качества ОП обеспечивает оптимальная скорость резания $V_O = V_Э$ при обработке ТОМ [12-15].

8. После определения площадей обработки по названным выше параметрам производится их сравнение и по лимитирующему параметру поверхности (для которого площадь обработки наименьшая) устанавливается окончательное значение достижимой площади обработки, которая в каждом конкретном случае и будет являться ресурсостойкостью данной ПзИН (табл.).

9. Каждому значению площади обработанной поверхности соответствует определённый радиальный размерный износ, который позволяет рассчитать величину и количество подналадок путём ввода коррекции инструмента, необходимой при формировании заданных свойств поверхности в автоматическом режиме.

3. Заключение

Метод синтеза может быть эффективно использован как при индивидуальной оптимизации обработки крупносерийных деталей, так и при групповой обработке деталей в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства [4-6,10,11].

Применение метода синтеза для решения задачи перебора технически возможных вариантов интегрируемых переходов, позиций и установов (детале-операций) на профессиональных ПК при правильном заполнении ТМ технологом средней квалификации даёт возможность получения оптимального для производства ГТП механической обработки токарных и корпусных деталей сложной формы [5,9-11].

Преимуществами предлагаемого подхода по сравнению с традиционными являются существенное повышение качества разработанной технологии и резкое сокращение сроков технологической подготовки производства [5,10,11].

Оптимизация синтеза ГИН для токарных универсальных и станков с ЧПУ позволяет минимизировать количество ТР УРИ в групповом производстве, добиваясь увеличения общего количества высокоточных деталей, обрабатываемых до смены УРИ после достижения максимально допустимого износа каждого из них [6-13].

Первичная подсистема обеспечивает выполнение правила кратчайшего пути и соблюдение принципа единства баз при индивидуальной и групповой обработке [6,11]. Подсистема синтезирования БГТ позволяет быстро и надёжно синтезировать ГИН, обеспечивает максимальную размерную стойкость всех ТР УРИ в ГИН и гарантирует наилучшее качество обработанных поверхностей при минимальных затратах на изготовление деталей, входящих в группу. Таким образом налаживается комплексное технологическое обеспечение автоматических линий, обрабатывающих центров, автоматов продольного точения, многоцелевых, универсальных и станков с ЧПУ, как при индивидуальной и групповой оптимизации механической обработки.

Список литературы: 1. Акулович Л. М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроения: учеб. пособие / Л. М. Акулович, В. М. Шелег. – Минск: Новое знание. – М: ИНФРА-М, 2012. – 488 с. – (Высшее образование). 2. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с. 3. Кондаков А. И. «САПР технологических процессов: учебник для студентов высших учебных заведений». – М.: «Академия»; 2007. – 272с. 4. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования/ И. П. Норенков. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009. 5. Ракунов Ю. П. Разработка системы многоуровневой базовой технологии // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – № 1, 2012. – С.40-46. 6. Ракунов Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – № 3, 2012. – С. 23-31. 7. Резец: Патент РФ № 2170160 / Калмыков В. И., Ракунов Ю. П., Хрульков В.А., Петровская Т. М., Золотова Н. А., Борисенко Н. Н. – Бюл. № 19, 2001. 8. Многократно перетачиваемый резец: Патент РФ № 2226453 / Ракунов Ю. П., Хрульков В. А., Золотова Н. А., Тихонов Н. А. – Бюл. № 10, 2004. 9. Ракунов Ю. П. Оптимизация синтеза инструментальных наладок для станков с ЧПУ // Конструктор-машиностроитель. – 2010. – № 3, 5. 10. Ракунов Ю. П. Подсистема синтеза многоуровневой базовой технологии // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – № 10, 2012. – С. 36-46. 11. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ // Справочник, Инженерный журнал, приложение. № 7, 2015. – С. 1-29. 2. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М., Машиностроение, 1976, - 278 с. 13. Ракунов Ю.П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – № 2, 2013. – С.36-48. 14. Ракунов Ю.П., Абрамов В.В. Сравнение методов оптимизации режимов резания при механической обработке деталей машин//Механизация строительства.- №11,2015.- С.22-26. 15. Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю. Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов // Журнал «Станкоинструмент». № 1,2, 2020.– С. 66-72.

МАГНИТОУПРУГИЕ ДАТЧИКИ УСИЛИЙ

Розоринов Г.Н. *(НТУУ "КПИ имени Игоря Сикорского", г. Киев, Украина)*
Тел./Факс:+38 (099) 0447802; E-mail: grozoryn@gmail.com

Abstract: *Magnetic force sensors have been developed, which are particularly effective for transforming large forces under difficult operating conditions.They can be used as sensors to control forces acting on various mechanisms in the field, pressures and torques in drill columns, measuring the mass of materials and components.Sensors provide the lineness and identity of transformation characteristics across the entire working range.The design of the magnetoelastic sensor in both the two-coil and the three-coil version is technological as possible in manufacturing and allows to provide increased accuracy in measuring forces and their derivatives.*

Keywords: *sensor, coil, force control, linearity.*

Введение

Максимальная точность, которая может быть достигнута при измерении усилий с помощью магнитоупругих датчиков, по существу, является вопросом о перспективности дальнейшего развития работ по широкому применению измерителей этого вида. Техническая и экономическая целесообразность применения магнитоупругих датчиков в различных отраслях промышленности в случаях, когда допустимы погрешности, превышающие 2–3%, в настоящее время ни у кого не вызывает сомнений. С помощью магнитоупругих датчиков оказываются выполнимыми самые различные задачи измерения усилий, причем обеспечиваются они при высокой надежности, компактности и безопасности устройств. По работоспособности, долговечности, устойчивости в работе устройства этого класса не имеют себе равных [1–3].

Задача достижения более высокой точности, порядка 1–0,5% и выше, имеет принципиальное значение, поскольку измерение усилий с погрешностями, лежащими в названных пределах, позволяет решить почти все существующие задачи технического и коммерческого взвешивания. В соответствии с ГОСТ 13018–67 взвешивание угля, руд, строительных материалов в процессе их перевозки железнодорожным транспортом должно производиться с точностью не хуже 1 %, а согласно ГОСТ 11762–66 – не хуже 0,5% и даже 0,1%.

Работы по повышению точности магнитоупругих измерителей усилий начаты совсем недавно и ведутся немногими исследователями. Тем не менее первые результаты исследований, проведенных в этом направлении, вполне обнадеживающие [4].

Температурная погрешность (среднеквадратическое значение) при колебаниях температуры датчика до 100° С не превышает 0,5%, а при сужении температурного диапазона – она соответственно уменьшается. Среднеквадратическое значение погрешности от магнитоупругого гистерезиса не более 0,2%.

Среднеквадратическая погрешность, возникающая вследствие нелинейности характеристики, во всем диапазоне измеряемых усилий не превышает 0,3%. В более узком диапазоне (80%) она не выходит за пределы 0,1%. Если принять, что погрешность, возникающая вследствие нестабильности источника питания, составляет 0,2%, общая среднеквадратическая погрешность не более 0,65%.

Данные достоинства делают возможным применение магнитоупругих датчиков в системе контроля сыпучих масс.

Целью работы является разработка конструкции магнитоупругого датчика, который максимально технологичен в изготовлении и имеет высокую точность.

Основная часть

Магнитоупругие датчики могут иметь самые различные конструктивные исполнения. Однако в любом случае датчик представляет собой магнитопровод или систему магнитопроводов, включающих в себя звенья, которые изменяют свои характеристики благодаря магнитоупругому эффекту [5]. В большинстве случаев магнитопроводы изготавливают без воздушных зазоров. Введение воздушного зазора в магнитную цепь равносильно включению большого постоянного магнитного сопротивления последовательно с переменным магнитным сопротивлением датчика, что, естественно, вызывает его резкое загрубление. Воздушные зазоры допускают лишь там, где это необходимо, например, когда неподвижные части магнитопривода взаимодействуют с движущимися или вращающимися деталями, которые являются активными звеньями магнитоупругого датчика, или из соображения технологичности их изготовления.

Магнитоупругие датчики в некоторых источниках называют ферромагнитными, или анизотропными.

Датчик представляет собой чувствительный элемент 1 в виде преобразователя усилия в электрический сигнал, обмотку 2 возбуждения, которая подключена к выходу генератора 3 переменного тока, измерительную обмотку 4, которая подключена ко входу усилителя 5 (рис. 1).

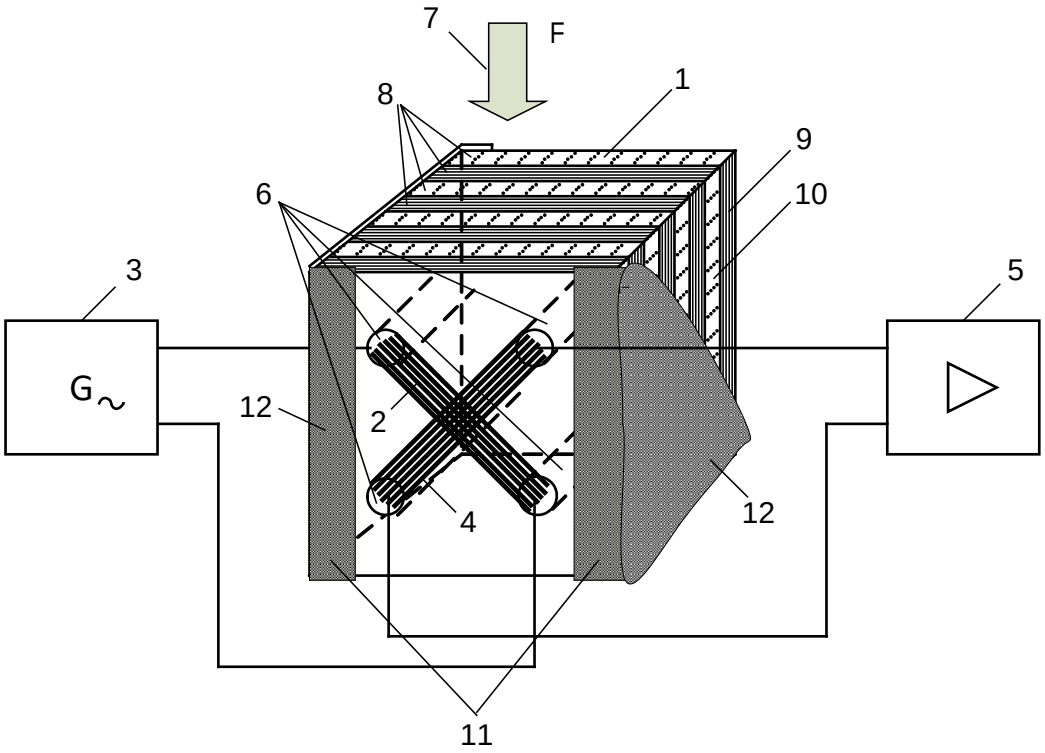


Рис. 1. Двухобмоточный магнитоупругий датчик

Измерительная обмотка 4 и обмотка 2 возбуждения помещены перпендикулярно одна к другой внутри четырех симметрично расположенных отверстий 6 в чувствительном элементе 1, а плоскости обмоток расположены под углом 45° к направлению 7 усилия. Чувствительный элемент 1 состоит из наборного пакета 8 пластин трансформаторной стали, сложенных таким образом, чтобы пластины 9, штампованные вдоль линии проката чередовались с пластинами 10, штампованными поперек линии проката. Это сделано для того, чтобы пакет в магнитном отношении был как можно более изотропным, то есть чтобы магнитная проницаемость пакета в направлениях, параллель-

ном и перпендикулярном сжатию была по возможности одинакова. Наборный пакет 8 помещен в обойму 11, которая состоит из двух П-образных скоб 12.

Датчик работает следующим образом. При отсутствии усилия 7 на чувствительный элемент 1 (отсутствии деформации) силовые линии магнитного поля, создаваемого обмоткой 2 возбуждения, благодаря изотропным свойствам (по магнитной проницаемости) ферромагнитного материала (трансформаторной стали) располагаются симметрично и не сцепляются с измерительной обмоткой 4 (рис. 2).

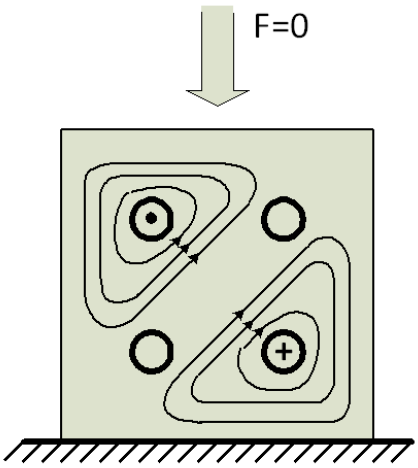


Рис. 2. Распределение магнитных потоков при отсутствии усилий

Поэтому, наводимая в обмотке 4 ЭДС равна нулю. После приложения усилия 7, вследствие изменения магнитной проницаемости ферромагнитного материала силовые линии магнитного поля вытягиваются в направлении большей магнитной проницаемости (рис. 3).

При этом силовые линии сцепляются с измерительной обмоткой 4 и индуктируют в ней ЭДС.

Использование наборного пакета 8 из пластин трансформаторной стали с количеством пластин, равном заданному значению с учетом толщины листовой стали для достижения размера, например, 90х90х90 мм, сложенных поочередно вдоль и поперек линии проката обеспечивает изотропный (по магнитной проницаемости), нечувствительный к температурным воздействиям элемент 1. Повышению чувствительности и надежности способствует и помещение пакета 8 в незамкнутую накоротко обойму 11, состоящую из двух П-образных скоб 12, расположенных таким образом, чтобы отсутствовали воздушные зазоры как между предварительно стянутыми пластинами 9, 10, так и между пластинами и обоймой 11. Генератор 3 формирует в обмотке 2 возбуждения переменный ток частотой, например, 400 Гц, для обеспечения диапазона прилагаемых усилий на элемент 1 от 1 т до 40 т, или, например, – частотой 2500 Гц для диапазона от 0 до 40 т. Это позволяет повысить чувствительность датчика и получить линейную характеристику преобразования во всем упомянутом диапазоне усилий (рис. 4).

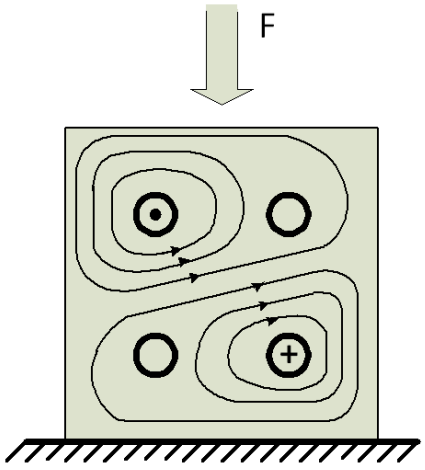


Рис. 3. Распределение магнитных потоков при приложении усилий

Часть потока, охватывающая измерительную обмотку 4, будет тем больше, чем сильнее снижается магнитная восприимчивость элемента 1, то есть, чем большее усилие 7 будет приложено к датчику.

При допущениях, что весь магнитный поток замыкается в наборном пакете 8, нагрузки по площади сечения пакета распределены равномерно, а потери в проводах обмоток, потери на гистерезис и вихревые токи пренебрежимо малы, амплитудное значение напряжения на концах разомкнутой измерительной обмотки 4 определяется выражением

$$U_{изм} = U_{возб} \frac{M}{L_{возб}},$$

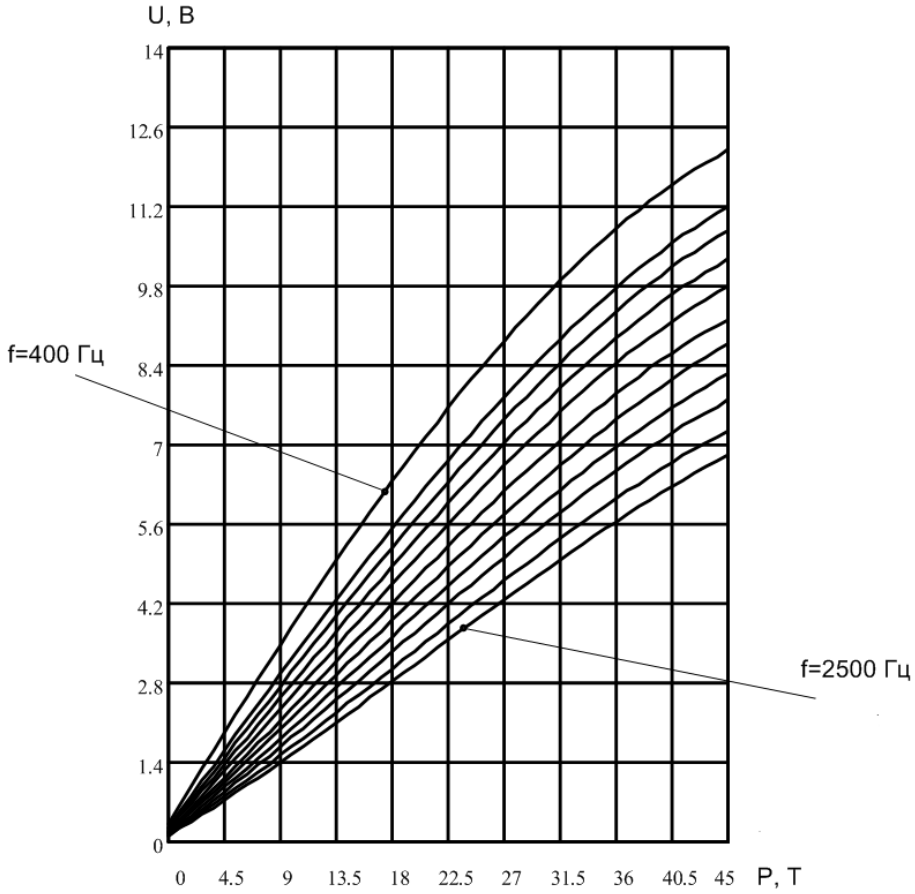


Рис. 4. Характеристики преобразования усилия в электрическое напряжение

где M – взаимоиндуктивность обмотки возбуждения и измерительной обмотки; $L_{возб}$ – индуктивность обмотки возбуждения.

Усилитель 5 усиливает напряжение, снимаемое с измерительной обмотки 4 и необходим при малых усилиях, прикладываемых к датчику. Кроме того, число витков измерительной обмотки, в силу физических свойств ферромагнитного материала датчика, не превышает десяти, что также требует применения усилителя.

Датчик должен обеспечивать максимальную стабильность характеристик, и их неизменность в течение времени при непосредственной близости от него больших ферромагнитных масс. Для уменьшения влияния на датчик соседних ферромагнитных масс ширина внешних частей магнитопровода, то есть участков между отверстиями и краями пластин необходимо делать несколько шире участков, лежащих между отверстиями. Это позволяет избежать потоков рассеяния, а следовательно, уменьшить влияние стальных конструкций, расположенных вблизи датчика.

Для повышения чувствительности датчика измеряемое усилие прилагают не ко всей его торцевой поверхности, а лишь к участку, находящемуся над отверстиями, что достигается с помощью специального выступа.

При оптимальных соотношениях конструктивных размеров датчика, напряженности магнитного поля и частоты тока питания с каждого витка выходной обмотки может быть получено напряжение порядка 0,1–0,5 мв/н.

Эффективность использования магнитоупругих датчиков увеличивается по мере роста измеряемых ими усилий. Датчики можно применять для измерения усилий от десятков до многих тысяч тонн. При этом датчики, предназначенные для измерения больших усилий, состоят из набора расположенных рядом элементов. Пластина датчика выполняется в виде полосы шириной 50–60 мм, длиной 500 мм и более. Вдоль полосы располагают группы отверстий. Из пластин набирается пакет толщиной, примерно равной длине пластины. Затем через отверстия укладываются первичные и вторичные обмотки датчика, соединяемые последовательно. Выходная мощность такого датчика

увеличивается при номинальных нагрузках до нескольких ватт, а напряжение на его выходной обмотке составляет несколько вольт.

Технологически реализация магнитоупругого датчика не является сложной, но требует выполнения ряда необходимых условий. Например, размеры чувствительного элемента 1 должны быть не менее 90×90×90 мм, чтобы площадь для распространения магнитного поля была достаточно большой; сверление отверстий под обмотки целесообразно выполнять на координатном станке или с использованием специальных шаблонов; следует исключить сварочные операции и глубокий отжиг магнитопровода, ввиду того, что они ухудшают магнитные свойства пластин, и приводят к снижению чувствительности.

Для расширения рабочего диапазона датчика, обеспечения линейности и идентичности характеристик преобразования во всем рабочем диапазоне магнитоупругий датчик изготавливают в трехобмоточном варианте (рис. 5). В этом случае дополнительная измерительная обмотка 6 подключается к дополнительному усилителю напряжения 7. Измерительные обмотки 4, 6 помещаются перпендикулярно одна другой. Плоскость обмотки 2 возбуждения расположена под углом 45° к направлению 9 усилия, а плоскости обмоток 4, 6 размещены соответственно перпендикулярно и параллельно к направлению 9 усилия. Выходы усилителей 5, 7 объединены сумматором 10. После приложения усилия, вследствие изменения магнитной проницаемости ферромагнитного материала, силовые линии магнитного поля вытягиваются в направлении большей магнитной проницаемости (рис. 6). При этом они сцепляются с измерительными обмотками 4, 6 и индуктируют в них ЭДС. Сумматор 10 расширяет функциональные возможности датчика, позволяя как повышать, так и понижать напряжение в заданном диапазоне, формируя линейную статическую характеристику преобразования.

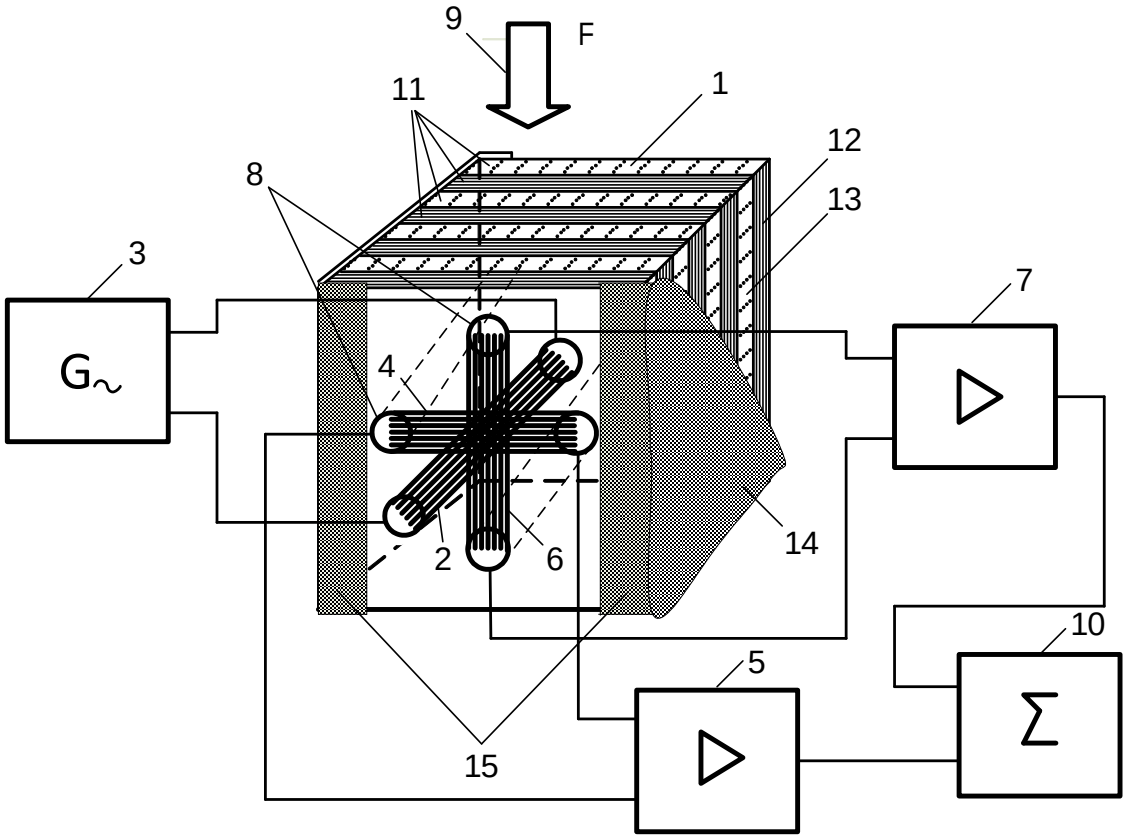


Рис. 5. Трехобмоточный магнитоупругий датчик

Выводы

Магнитоупругие датчики усилий особенно эффективны для преобразований больших сил ($10^5 \ldots 10^6$) Н широкого диапазона в сложных условиях эксплуатации. Они могут быть использован как датчики для контроля сил, действующих на различные механизмы в полевых условиях, давлений и крутящих моментов в буровых колонках, массы материалов и компонентов.

Датчики обеспечивают линейность и идентичность характеристик преобразования во всем рабочем диапазоне.

Конструкция магнитоупругого датчика как в двухобмоточном, так и в трехобмоточном варианте максимально технологична в изготовлении и позволяет обеспечить повышенную точность измерения сил и их производных.

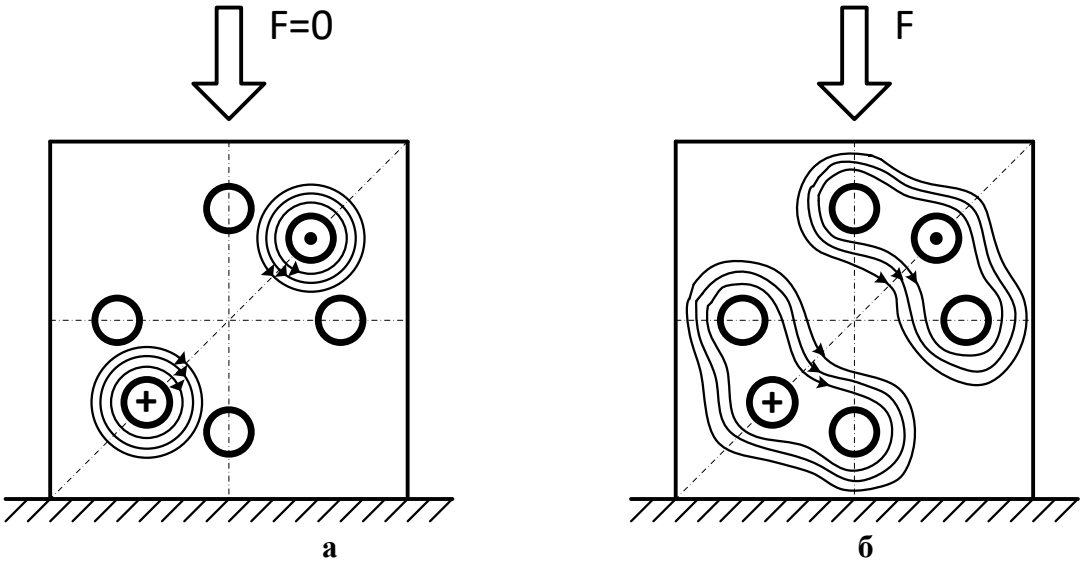


Рис. 6. Распределение магнитных потоков: а – при отсутствии усилий, б – при приложении усилий

Список литературы: 1. Дивин, А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Мозгова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2012. – Ч. 2. – 108 с. **2.** Волков Ю.В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. – 89 с. **3.** Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика / Л.Г. Эткин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 408 с. **4.** Ефремов А.К. Магнитоупругий генераторный преобразователь / Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана.– Электронный научно-технический журнал. Эл № ФС77 - 4 8211. Гос. регистрация №042 1200025, 06 июня 2014. **5.** Забродин В.П. Экспериментальные методы определения напряжений и деформаций: учебное пособие / В.П. Забродин, А.А. Серегин, М.В. Суханова, А.Б. Портаков. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2017. – 104 с.

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ И ПЛАЗМЕННО - ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ

Романчук И.А., Голубев В.С., Вегера И.И.
(Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)
E-mail: *gvs_fti@mail.ru*

Abstract: *In this work, studies of the microstructure, quality and a number of physical and mechanical characteristics of the formed layers, created on the working surfaces of samples from structural steels by plasma-powder and laser surfacing, including their combination, have been carried out. Laser surfacing was carried out using a gas CO2– laser "KOMETA-2". The main purpose of using the plasma-powder method in experiments was to study the process of plasma surfacing of powder materials on steel, including wedge-shaped or thin-walled, products using constant and constant-pulse plasma.*
Key words: *laser cladding, plasma-powder cladding, surface layer, microstructure, microhardness.*

Введение. Технология наплавки является весьма эффективным способом, как поверхностного упрочнения новых деталей, так и восстановления изношенных всевозможного функционального назначения. Эта технология позволяет в нужных местах на рабочих поверхностях формировать достаточно толстые покрытия с толщиной до ~ 10 мм. Для этого метода характерна металлургическая связь покрытия с основой, при этом может обеспечиваться высокая производительность обработки до 10 кг и более наплавляемого материала в час [1–3]. Применение в качестве энергетических источников наплавки лазера или плазмы с высокой (до 10^6 Вт/см^2) плотностью мощности потока дает возможность формировать наплавленные слои с небольшим коэффициентом перемешивания металла основы и материала покрытия, обеспечивать при этом незначительные остаточные деформации. В настоящее время в Физико-техническом институте НАН Беларуси научно-технические вопросы лазерного поверхностного модифицирования и наплавки изучены в достаточной степени, что позволило на этой основе разработать ряд технологических процессов упрочнения и восстановления быстроизнашивающихся деталей автомобильной и авиационной техники, с/х машин, оборудования энергетического машиностроения и др. [4].

Комбинированные технологии, при которых энергия различных источников вводится в зону обработки последовательно во времени [5], позволяют эффективно нивелировать недостатки отдельной монотехнологии и обусловлены снижением потерь времени за счёт исключения и сокращения количества промежуточных и вспомогательных операций. Так, применение отдельной технологии (монотехнологии – лазерной или плазменной) для упрочнения ряда деталей, например, с неоднородным поперечным сечением, таких как ножи кормо – и зерноуборочных с/х машин и др., не всегда может обеспечить приемлемое качество наплавленных слоёв и необходимые эксплуатационные параметры по отношению к себестоимости самого процесса обработки. Для упрочнения подобных деталей технологически возможно и, по-видимому, экономически целесообразно применять комбинированный лазерно-плазменный метод: острые режущие кромки обработать лазерным излучением, а оставшуюся часть – с помощью плазменного воздействия. При этом в зоне стыковки технологий наблюдается комплексная наплавка, например, лазерная наплавка накладывается на предварительно наплавленную плазменно-порошковым методом поверхность. Разработка комбинированных лазерно-плазменных процессов формирования упрочняющих покрытий предполагает учёт особенностей применения каждого из этих методов в отдельности [6-8].

Материалы и методы исследования. В данной работе проведены исследования микроструктуры, качества и ряда физико-механических характеристик (геометрические размеры, твёрдость, микротвёрдость и др.) сформированных слоев износостойкое покрытие/переходной слой/ основной металл, создаваемых на рабочих поверхностях образцов из конструкционных сталей типа 65Г, 40Х методами плазменно-порошковой и лазерной наплавки, в том числе при их комбинации. Лазерная наплавка (порошки ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-01, ПС-12НВК-01 и Т-Термо 650) выполнялась с использованием газового CO_2 – лазера «КОМЕТА - 2» при мощности излучения ~ 0,6 кВт. Технологические режимы лазерной наплавки выбирались в зависимости от энергетической плотности потока лазерного излучения, линейных скоростей сканирования лазерного луча, диаметра пятна фокусировки и шага между лазерными дорожками. В настоящее время в технологических комплексах для осуществления как лазерной так и плазменной наплавки перспективно использование многоструйной коаксиальной подачи присадочного порошкового материала в зону обработки. В этой связи для проведения экспериментов нами было изготовлено соответствующее сопло [7,9].

Основной целью использования в данной работе плазменно-порошкового метода являлось исследование процесса плазменной наплавки также высокопрочных самофлюсующихся порошковых материалов на стальные, в том числе клиновидные или тонкостенные, изделия с использованием постоянной и постоянно-импульсной плазмы. Для плазменной наплавки применялись те же порошки ПГ-10Н-01 и ПГ-12Н-01. Указанный режим работы плазмотрона позволяет уменьшить опасность проплавления тонкостенной поверхности, повысить качество наплавляемого слоя снизить термические поводки. Для решения поставленной задачи была проведена доработка конструкции непосредственно самого плазмотрона с катодом из вольфрама диаметром 4 мм, легированного лантаном. Используемый для реализации процесса наплавки сварочный плазмотрон повышенной надежности PLP 200 Aut стандартно укомплектован специальным соплом для подачи порошка с максимальной фракцией до 0,25мм и с необходимым расходом 4…35 г/мин. Расход транспортирующего газа при этом мог составлять 2…4 л/мин. Источник питания дежурной и основной дуги дает возможность формировать на выходе постоянное и постоянно-импульсное напряжение.

При необходимости перемещений наплавочной головки «челночного» типа была предусмотрена возможность с определённым шагом выполнять возвратно-поступательные движения перпендикулярно направлению наплавки. При этом могла задаваться амплитуда (*A*) колебаний головки. Для осуществления таких колебаний лазерной или плазменной головки в экспериментах использовался автоматизированный портал с ЧПУ, позволяющий в соответствии с компьютерными программами выполнять передвижение соответствующего источника нагрева по заданной траектории наплавки [4].

Результаты исследований и их обсуждение. Как при плазменной, так и лазерной наплавке порошковый питатель и сопловые устройства должны обеспечить стабильную подачу необходимого количества присадочного порошкового материала (ППМ) в сварочную ванну и равномерное его распределение по объёму наплавляемого покрытия. Размеры зоны ввода ППМ не должны превышать размеров зеркала сварочной ванны (зоны жидкого металла), т. к. в противном случае будут возникать большие непроизводительные потери порошка.

Промежуточные слои должны обеспечивать плавное изменение свойств (твёрдости, пластичности, коэффициента термического расширения и др.) между основным и наплавленным металлами. Основным критериальными факторами при этом являются микротвёрдость (H_μ), состав и структура наплавленного слоя и

основного металла, необходимость последующей термической обработки и др. Микроструктура выбранного в качестве буферного сплава на никелевой основе системы Ni-Cr-B-Si с твёрдостью, промежуточной между твёрдостью стальной основы и наплавленного композиционного покрытия, состоит из твёрдого раствора на основе никеля (γ – Ni), карбидов и боридов хрома и др. Структурная чувствительность к условиям термообработки и высокое сродство сплава к стальной подложке позволяет изменять свойства промежуточного слоя в нужном направлении. Сплавы на основе никеля показывают очень хорошую стойкость к абразивному износу, высокотемпературную и коррозионную стойкость.

В результате выполненных нами экспериментов подтвердилась правильность выбранных технических и конструкторских подходов и решений при модернизации плазмотрона для наплавки. С целью восстановления и упрочнения различных быстроизнашивающихся деталей из конструкционных материалов проведена подготовка комплекса всего оборудования для плазменно – порошковой наплавки [9]. Созданный комплект оборудования для поверхностной наплавки открывает возможность реализовать плазменную наплавку коррозионно – и износостойкого порошкового материала на тонкостенные и/или клиновидные детали типа дисков и ножей различной с/х техники, например, измельчающих ножей кормоуборочного комбайна.

В конечном итоге на основании проведенных экспериментов установлено, что хорошее качество наплавленных слоев наблюдалось для всех использованных самофлюсующихся порошков обоими способами. При оптимальных условиях микротвердость слоя наплавки для порошков ПГ-12Н-01, ПГ-10Н-01, ПС-12НВК-01 и Т-Термо 650 составляла соответственно ~ 550 $HV_{0,1}$, 830 $HV_{0,1}$, (700…860) $HV_{0,1}$, (900…1300) $HV_{0,1}$. Отмечено, что при глубокой зоне подплавления происходит интенсивное перемешивание наплавляемого материала с материалом основы, что сказывается на свойствах наплавленного слоя. При этом для порошков с добавками карбида вольфрама с уменьшением скорости сканирования луча возрастает как глубина оплавленного слоя, так и его микротвердость. Это говорит о том, что, несмотря на перемешивание материала порошка и основы в расплаве происходит растворение частиц карбида вольфрама, что в свою очередь ведет к дополнительному упрочнению. Причем из результатов микрорентгеноспектрального анализа следует, что весьма существенным фактором в этих случаях является газовая среда, в которой проводится лазерная наплавка [10]. Были также определены оптимальные скорости лазерной наплавки в режимах «челночного типа», при превышении которых ($v_н \geq 10$ мм/с) при установленных размахе ($2A = 6$ мм) колебаний, мощности (Wл ~ 600 Вт) лазерного излучения, расходе (Gп ~ 4 г/мин) используемого присадочного порошка на никелевой основе формировались наплавленные валики седлообразного типа с наибольшим проплавлением металла основы в месте поворота лазерной головки. Показано, что при такой лазерной наплавке только за один проход можно создавать покрытия с достаточно стабильными шириной (8…13 мм) и толщиной (до 1 мм), с приемлемой глубиной подплавления металла основы (~ 0,1…0,15 мм) и регламентированной для используемого порошкового материала твёрдостью.

В обоих случаях наплавка производилась при колебаниях источника нагрева челночного типа. Размах колебаний плазмотрона $2A = 25$ мм с шагом $\delta = 2$ мм, максимальной скоростью $v_н = 300$ мм/мин и, соответственно, для лазерной наплавки: $2A = 6$ мм, $\delta = 1$ мм, $v_н = 300$ мм/мин. Максимальная толщина покрытия составляла 1, 2 мм, в том числе плазменного (промежуточного) подслоя – ~ 0, 3 мм. Изучение особенностей использования процессов лазерного воздействия в сочетании с плазменной обработкой поверхности позволило выявить следующее. Поверхностная

твёрдость, измеренная прибором ТК-2М, составила 44…46 HRC при твёрдости основы ~ 30 HRC, а ультразвуковым твёрдомером МЕТ-У1А 49…54 HRC. Кроме упоминавшейся выше предполагаемой причины несоответствия результатов измерений (тонкое покрытие на относительно «мягкой» подложке) возможно также влияние пористости покрытий, их пространственной (локальной) неоднородности и других факторов. Поэтому в данных условиях, по-видимому, не может быть полного соответствия между измеренными значениями твёрдости тонкого приповерхностного слоя (МЕТ-У1А) и твёрдости композиции покрытие-основа (ТК-2М). Особенностью полученных распределений микротвёрдости является сильная неоднородность не только наплавленных слоёв, но и прилегающих областей основного металла в зоне термического влияния с достаточно малым пространственным масштабом, доходящим до 6 10^3 $HV_{0,1}$/мм,), и обусловленная не только погрешностями измерений. Средняя микротвёрдость в начале, середине и в конце лазерной наплавки по предварительно сформированному плазменно-порошковому подслою в пределах суммарной толщины покрытия, составляла, соответственно, 598 $HV_{0,1}$, 576 $HV_{0,1}$ и 606 $HV_{0,1}$. Наблюдаемая сильная неоднородность покрытий связана с наличием в наплавляемом композиционном порошковом сплаве компонентов с различной и, в том числе, достаточно высокой твёрдостью (карбиды, бориды хрома и т. п.), не полностью растворившихся или вновь образовавшихся в процессе наплавки новых твёрдых соединений, неравномерно распределённых в объёме покрытия. По этой причине возникают определённые трудности при интерпретации распределений микротвёрдости по толщине покрытий. В середине лазерной наплавки достаточно надёжно зафиксировано падение измеренной величины микротвёрдости в направлении границы покрытие-основа и менее заметное уменьшение в конце наплавки. В обоих случаях на границе, в основном металле, микротвёрдость падает до уровня ~ 270 $HV_{0,1}$. Основное влияние на характер полученных распределений оказывает, по-видимому, положение сечения измерения микротвёрдости относительно дорожек наплавки: в центре дорожки, между дорожками или в зоне их перекрытия.

Наличие относительно тонкого промежуточного плазменного подслоя (~ 0, 3 мм) не приводит к существенному изменению поверхностной твёрдости всей композиции покрытие - основной металл (48…50 HRC) по сравнению с твёрдостью лазерного слоя, имеющего примерно ту же толщину и наплавленного при той же скорости на «чистую», т. е. без подслоя, подложку (46…51 HRC). В исследованных шлифах регистрировалось незначительное количество пор (до 10 %) и несколько поперечных трещин. Трещины начинались на поверхности покрытия и достигали основы в том числе через промежуточный плазменный подслой. При выборе в качестве материала промежуточного слоя порошка ПГ-12Н-01 и основного (верхнего) слоя порошка ПГ-10Н-01 также формировался качественный переходной участок между ними. Это обстоятельство, незначительное количество дефектов в виде пор, тенденция к снижению трещинообразования при соответствующем подборе твердости промежуточного подслоя и относительно высокая твёрдость полученной композиции покрытие-основной металл показывают возможность формирования, по крайней мере, двухслойной структуры при использовании самофлюсующихся порошковых сплавов. На основании экспериментов в случае использования для верхнего наплавленного слоя порошков типа ПС-12НВК-01 или Т-Термо 650 с твердостями до 65 HRC следует рекомендовать в качестве промежуточных слоев использовать порошки с твердостью не выше, чем у порошков типа Т-Термо 20(24). При этом со снижением твердости промежуточного слоя может быть уменьшена и его толщина до уровня 50…100 мкм. С точки зрения трещинообразования такие рекомендации по выбору промежуточного и основного слоев, наплавленных с использованием лазерной и плазменно-порошковой

наплавок или их комбинации, могут касаться также деталей, подвергаемых в дальнейшем термической закалке. В конечном итоге при такой комплексной обработке может быть значительно повышена производительность процесса наплавки. В этих целях вполне может быть использован разработанный нами комплекс лазерно-плазменного оборудования, когда эти два процесса реализуются на едином технологическом столе портального типа [4].

Заключение. С использованием лазерной наплавки на основе никелевых самофлюсующихся порошков по предварительно сформированному плазменному подслою показана возможность получения двухслойной композиции необходимой твёрдости с качественной зоной сплавления. Наличие промежуточного плазменного подслоя (hп ~ 0, 3 мм) при лазерной наплавке не приводит к существенному изменению поверхностной твёрдости всей композиции покрытие – основной металл (48…50 HRC) по сравнению с твёрдостью только одного лазерного слоя той же толщины (46…51 HRC). При использовании в качестве материала промежуточного и основного слоя одного порошка (ПГ-10Н-01) формируется качественный переходной участок между ними с минимальным уровнем дефектов (пор, трещин..) в наплавленных слоях, не распространяющихся в основной металл. С повышением твердости основного наплавленного слоя рекомендовано в качестве материала для промежуточного подслоя выбирать самофлюсующиеся порошки на никелевой основе с твердостью 25 HRC и ниже.

Список литературы: 1. Вайнерман, А.Е. Плазменная наплавка металлов / А.Е. Вайнерман [и др.]. – Ленинград :Машиностроение, 1969. – 190 с. **2.** Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с. **3.** Рябцев, И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев. – Киев: Экотехнология, 2004. – 160 с. **4.** Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. – Минск : Белорусская наука, 2008. – 252 с. **5.** Технико-экономический анализ гибридной технологии наплавки лазерно-плазменным методом/ А.М.Чирков, Ю.А. Хрусталёв //Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей: материалы 8-ой Междунар. практ. конф. – С.-П., С.-П.ПУ, 2008. – С. 318–327. **6.** Бабей, Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю.И.Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысоев. – Киев: Наукова думка, 1995. – 256 с. **7.** Особенности формирования упрочняющих покрытий при лазерной порошковой наплавке / И.А.Романчук, В.С.Голубев, И.И.Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: в сбор. трудов Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, ФТИ НАН Беларуси, 2020. – кн.2, С. 43 – 52. **8.** Особенности формирования упрочняющих покрытий при плазменной порошковой наплавке / Романчук И.А., Голубев В.С., Вегера И.И. // Машиностроение и техносфера XXI века: в сб. трудов XXVI I Междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь, 2020. С.342 – 345. **9.** Плазменная наплавка износостойких порошковых материалов на рабочие поверхности стальных деталей / А.В.Алифанов [и др.]. // Вестник БарГУ, сер.Техн. науки. – 2018. – Вып.6. – С.39– 44. **10.** Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя / В.С.Голубев [и др.]. // Вестник БарГУ, сер.Техн. науки. – 2019. – Вып.7. – С.34– 42.

НЕКОТОРЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ УЧЕНЫХ ЛУГАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ

Рябичев В.Д., Витренко В.А. *(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*
Тел./Факс: + 38 (0642) 341826; E-mail:vitrenko.vl@gmail.com

Abstract: *The article presents major scientific developments of Lugansk V.Dahl National University. New modern technologies in the sphere of mechanical treatment, metallurgy, nano-technologies, science of materials, powder metallurgy have been presented. The role of science in economic development of the region has been stressed.*
Key words: *tools, foundry, nano-technology, crystals, powder materials, welding.*

Рис. 1. ГОУ ВО «Луганский Государственный университет имени Владимира Даля»

ГОУ ВО «Луганский Государственный университет имени Владимира Даля» – является ведущим учебным заведением Луганщины и имеет в своем составе уникальные научные центры республиканского и межгосударственного значения.

Научные интересы охватывают многие отрасли науки и техники: от медицины до современного материаловедения, от металлургии и тяжелого машиностроения до микроэлектроники и являются источником накопления знаний, получаемых студентами в университете.

В университете накоплен уникальный теоретический и практический опыт подготовки современного инженера. Основным императивом практической деятельности университета является создание условий для формирования свободного, творческого человека, ощущающего себя неотъемлемой частью целого Мира, человека фундаментально подготовленного, обладающего практическими навыками, стремящегося к их совершенствованию.

Новые материалы и технологии их получения определяют не только уровень развития общества, но, что главнее, уровень жизни человека. Получение новых свойств уже известных материалов, безотходность их производства при минимуме трудоемкости и энергозатратах создают принципиально новый подход к организации производства. При этом минимизируются финансовые затраты, что дает развитие малым и средним предприятиям в области высоких технологий.

Производство художественных отливок Уровень развития литейного производства можно определить по качеству получаемых изделий, что особенно заметно при изготовлении художественных отливок произведений искусства. Достижение высокого качества отливки гарантируется разработкой новых связующих материалов в формовочных смесях, которые в 7-10 раз повышают ее вяжущие свойства. Учитывая, что процесс производства отливок достаточно дорогой, для уменьшения себестоимости выпускаемых изделий при отработке технологии и формы отливок широко используется 3D-моделирование. Таким образом, удалось существенно снизить себестоимость выпускаемой продукции и уменьшить до 60% вредные выбросы и отходы производства.

Многозаходный гиперболоидный зубообрабатывающий инструмент. Режущий инструмент является важнейшим элементом техники различных областей машинострои-

тельной промышленности. На протяжении всей истории техники усовершенствование режущего элемента оказывали большое влияние на конструкцию машиностроения.

Рис. 2. Художественные отливки

Основной задачей инструментального производства предприятия является не столько собственное развитие и результативное функционирование, сколько поддержание и повышение условий эффективной жизнедеятельности основного предприятия, наиболее сложным и существенным является процесс приспосабливания к условиям самого предприятия. Одно из важнейших направлений регулирования деятельности подразделений инструментального производства машиностроительного предприятия связано с повышением эффективности его функционирования.

Инструмент с числом заходов зубьев от 2 х до 15 предназначен для нарезания зубьев цилиндрических прямозубых и косозубых колес. Производительность нарезания зубьев в 15 раз выше производительности нарезания зубьев при помощи червячных фрез. Основная инструментальная поверхность инструмента совпадает с его производящей поверхностью, что позволяет получить геометрические и кинематические заданные углы в процессе его производства. Передний угол у предлагаемого инструмента может быть от 0° до 35° в зависимости от материала обрабатываемого зубчатого колеса. Степень точности нарезаемых колес 5…7. Стойкость многозаходной фрезы в 10 раз выше стойкости стандартной червячной фрезы.

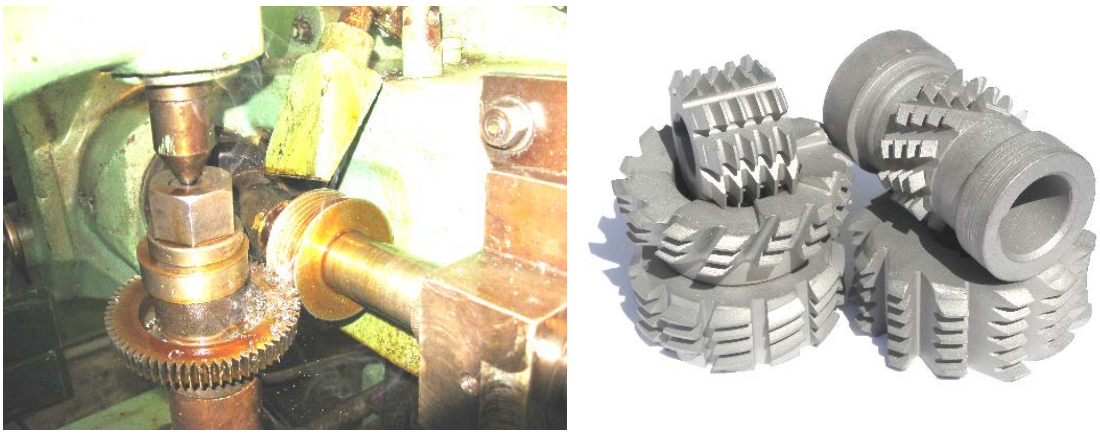


Рис. 3. Многозаходный гиперболоидный зубообрабатывающий инструмент

Дефектоскопы для контроля деталей подвижного состава железных дорог. Контроль осей колесных пар в условиях производства осуществляется роботизированным комплексом, построенным на базе электромагнитного дефектоскопа со специализированными датчиками для контроля поверхностей сложной геометрической формы (сту-

Рис. 4. Детали подвижного состава железных дорог

пенчатых и галтельных переходов). Контроль осуществляется бесконтактным способом с гарантированным зазором до 3±0,1мм. Размеры выявляемых дефектов 0,001х0,3х5мм и глубиной залегания 5-7 мм. Контроль производится в остаточном магнитном поле, что исключает необходимость последующего размагничивания оси после контроля.

Электроэнергетика и электротехника. Мировой опыт использования энергии ветра показывает, что экономически целесообразно использование данного вида энергии при средней скорости ветра 5 - 6 м/с и при годовой продолжительности ветра не менее 80 %.

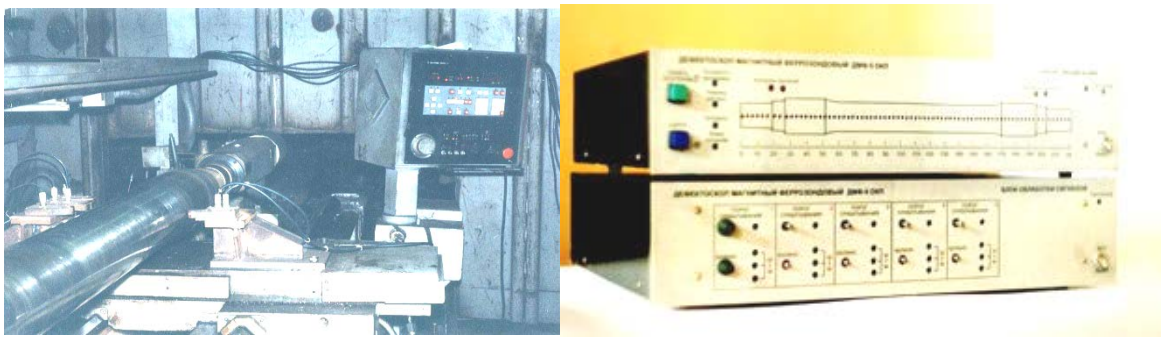


Рис. 5. Дефектоскопы для контроля деталей подвижного состава железных дорог

По многолетним статистическим данным безветренных дней в Луганском регионе около 44 в году, что составляет 12% годового параметра. На рисунках 6 и 7 показаны процентное распределение скорости ветра в течение года и диаграмма распределения скорости ветра по месяцам в регионе.

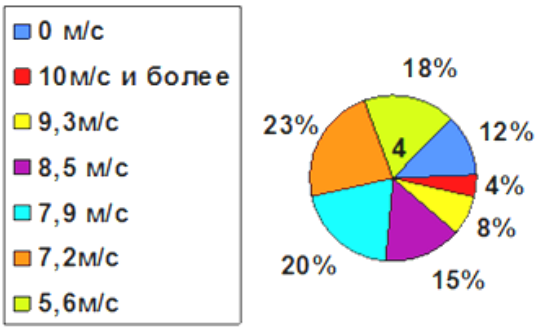


Рис. 6. Процентное распределение скорости ветра в течение года

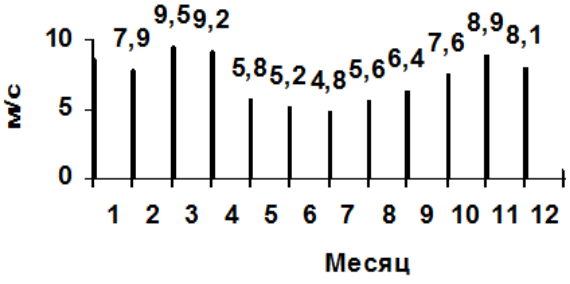


Рис. 7. Диаграмма распределения скорости ветра по месяцам

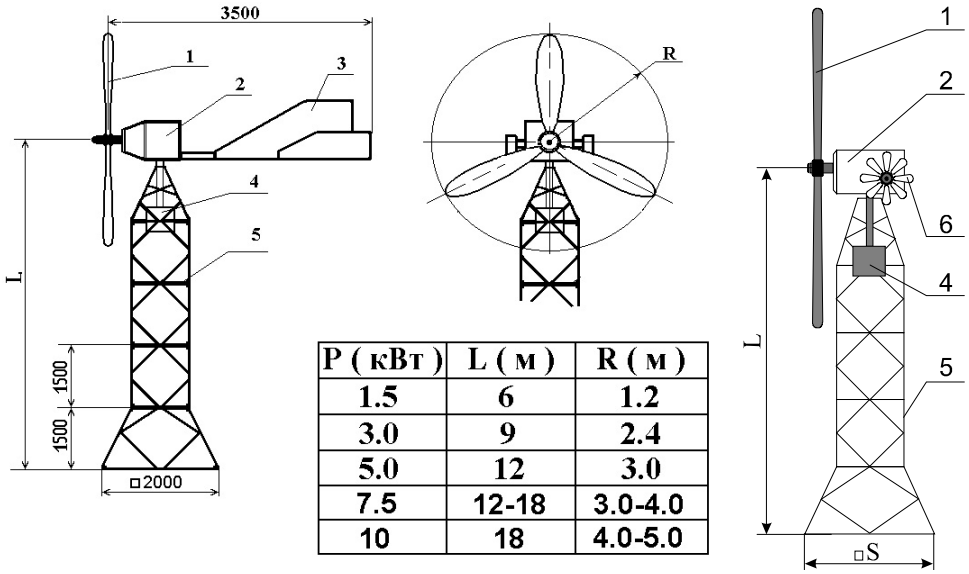
Как видно из статистических данных, Луганский регион соответствует всем показателям целесообразности использования энергии ветра, в том числе и с позиции экологической безопасности промышленного города. Сложившаяся сложная обстановка в энергоснабжении и экологии региона ставит вопрос о целесообразности разработок ветроэнергетических установок (ВЭУ), адаптированных к конкретным потребителям.

Потенциальными являются такие направления:

- разработка ВЭУ индивидуального подключения (городские коттеджи),

- разработка ВЭУ коллективного подключения (многоквартирные дома),
- разработка ВЭУ бесперебойного электроснабжения жизненно необходимых объектов (систем связи, сигнализации, систем аварийного управления и освещения и т.д.).

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) мощностью от 1500 до 10000 Вт предназначены для преобразования энергии ветра в электрическую энергию с переменным (50 Гц) и (или) постоянным напряжением 220±10В.



P (кВт)	L (м)	R (м)
1.5	6	1.2
3.0	9	2.4
5.0	12	3.0
7.5	12-18	3.0-4.0
10	18	4.0-5.0

Рис. 8. Ветроэнергетические установки (ВЭУ): 1 - Лопасти; 2 - Редуктор; 3 - Киль; 4 - Генератор; 5 - Мачта; 6 - Виндрозный механизм

ВЭУ состоит из ветрогенератора, одного или двух преобразователей напряжения генератора в соответствующее напряжение 220В и аккумуляторов. Ветрогенератор представляет собой мачту высотой от 6 до 18 м, на которой установлен 3-х лопастной пропеллер, вращение которого передается на вал генератора. Для ветрогенераторов мощностью 3000Вт и выше предусмотрен виндрозный механизм в качестве системы ориентации ветроколеса на ветер. Выходное напряжение генератора подается на аккумуляторы, являющиеся буфером, запасающим энергию. Такая схема построения установки, необходима для работы в районах со значительными изменениями скорости ветра в короткие промежутки времени. И только после такого буфера, сглаживающего сильные изменения напряжения генератора, можно использовать преобразователи, дающие постоянное или привычное переменное напряжение 220В. Постоянное напряжение выгодно использовать для питания электронагревательных приборов, поскольку их эффективность возрастает в этом случае на 30%, переменное напряжение используется для питания бытовых приборов и других рассчитанных на него устройств.

ВЭУ малой мощности могут служить для обеспечения бытовых условий людей (свет, тепло, бытовые электроприборы) и для деятельности небольших предприятий или подразделений крупных хозяйств в сельской местности, где может вообще отсутствовать централизованное электроснабжение.

ВЭУ может применяться при освещении, питании сигнализаций и охранных устройств, телефонных станций, станций кабельного и спутникового телевидения в селах и деревнях, для круглосуточного поддержания теплового и светового режима в теплице, для бесперебойного электроснабжения инкубаторов и птицеферм, молочных ферм, машинно-тракторных станций, мельниц.

Сверхтихоходный генератор для возобновляемых источников энергии. Для комплектации систем генерации электроэнергии от возобновляемых источников энер-

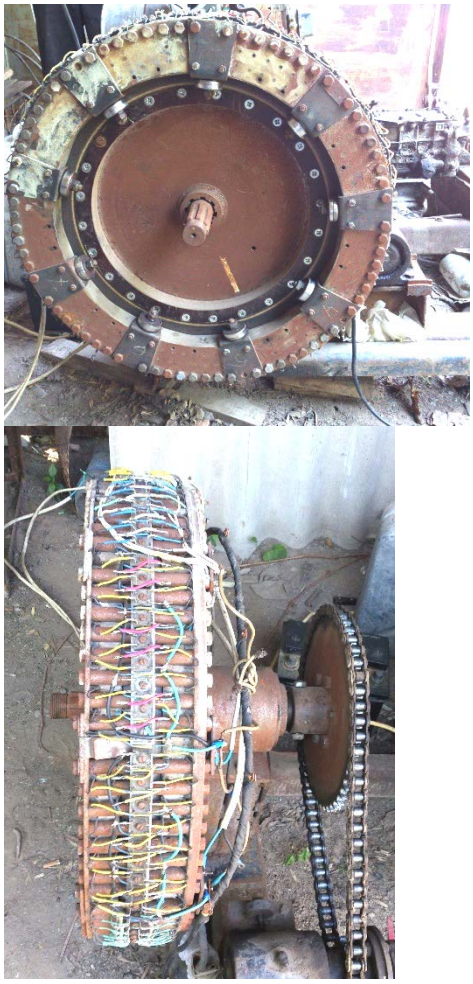


Рис. 9. Сверхтихоходный генератор

гии (ветроустановок, гидростанций и др.) разработан и проходит испытание сверхтихоходный многополосный генератор мощностью 10кВт.

Максимальная мощность достигается при 100 об/мин, при этом КПД составляет 86%. Генератор обладает низким моментом троганья, который обеспечивается электронной системой коммутации выходных обмоток генератора. Каждая последующая обмотка генератора подключается при увеличении нагрузки и частоты вращения генератора. В генераторе использованы постоянные редкоземельные магниты, что позволяет упростить конструкцию генератора и исключить его техническое обслуживание. Конструкция генератора соответствует лучшим мировым образцами и является конкурентоспособной на внешнем рынке.

Сверхзвуковая электродуговая металлизация. Технология и оборудование основаны на использовании: сверхзвукового потока горячих продуктов сгорания метана с воздухом, электрической дуги, которая продольно обдувается, и специальной порошковой проволоки. Напыленное покрытие укрепляет и обеспечивает: повышенную износостойкость и повышенную устойчивость против задира при перегрузке, металлическом контакте, отсутствии масла, значительную экономию из-за увеличения межремонтного периода изделия.

Установка для резки монокристаллов кремния на пластины. Особенностью установки является то, что алмазный отрезной круг режет монокристалл внутренней кромкой. Диаметр алмазного круга теперь не зависит от диаметра монокристалла, а определяется только исходя из необходимой жесткости инструмента. Таким образом, инструмент способен разрезать кристаллы неограниченного диаметра при относительно малых размерах отрезаемого круга.

Рис. 10. Сверхзвуковая электродуговая металлизация

Рис. 11. Установка для резки монокристаллов кремния

Список литературы: 1. Путь длиною в век Луганский Национальный Университет имени Владимира Даля. ГОУ ВПО ЛНР «ЛНУ им. В. Даля». 2020г., 476с.

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В РОТОРНОЙ ДИНАМИКЕ И ТРИБОТРОНИКЕ

Савин Л.А., Корнаев А.В., Поляков Р.Н. *(ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орёл)*
E-mail: savin@ostu.ru

Abstract: *Problems of dynamics of rotors with nonlinear supports are considered. The analysis of performance indicators of mechatronic bearing assemblies is carried out. The approaches to the application of machine learning methods in the study of biharmonic oscillations of rotors are considered. The amplitude-frequency characteristics, trajectories and sweeps of the rotor oscillations are presented.*

Роторные агрегаты служат основой двигательных и энергетических установок, приводных устройств, насосов, компрессоров, детандеров. Несмотря на наличие большого числа фундаментальных и прикладных исследований роторных систем, эта научно-техническая область продолжает оставаться приоритетной, что связано со сложностью гидромеханических и теплофизических процессов рабочих колесах, в подшипниковых, уплотнительных и демпферных узлах, а также с появлением новых принципов активного подвеса высокоскоростных роторов. Динамическая доводка роторных машин является длительной и трудоемкой процедурой, выполнение которой требует апробированных методик, современных программно-аппаратных средств и высокой квалификации персонала. В настоящее время во многих странах функционируют научные и инжиниринговые организации, специализирующиеся на исследовании проблем роторной динамики и различных видов опор. Основной акцент в решении задач автоматизированного и оптимального проектирования делается на использовании специализированных программных комплексов. На этапах проектирования проводится модальный и гармонический анализ, исследование переходных и нелинейных процессов, построение кривых подвижного равновесия, расчет коэффициентов жесткости и демпфирования. В роторных системах могут быть синхронные колебания с приводной частотой, резонансные вибрации на критических частотах; параметрические колебания, связанные с изменением инерционных свойств валов сборной конструкции и движением тел в подшипниках качения, а также самовозбуждающиеся колебания вследствие внутреннего демпфирования и несбалансированности сил трения в роторах и подшипниках жидкостного трения. Наиболее опасными и трудно прогнозируемыми являются нелинейные дробночастотные колебания вращающихся валов в смазочных слоях гибридных гидростатодинамических подшипников. В полной мере эта проблема имеет место в опорах жидкостного трения с активным управлением, которые изучается в рамках нового научного направления-трибомехатроники (трибоники), основанной на синергетическом объединении механики, силовой электроники, сенсорики, электромеханики, пневмогидроавтоматики, трибоники и информационных технологий [1-3].

Находят практическое применение в качестве опор роторов мехатронные подшипники качения с датчиками износа, температур, вибраций, угловой скорости вращения, а также активные магнитные подшипники (рис. 1). Опоры жидкостного трения с различными видами исполнительных механизмов переключения режимов работы, несмотря на потенциальные возможности радикального улучшения показателей устойчивости и энергоемкости, в настоящее время не получили широкого распространения. Исключением являются подшипниковые и уплотнительные узлы с встроенной функцией контроля эксплуатационных параметров. Повышение эффективности подшипников жидкостного трения с встроенными функциями

автоматизированной диагностики и активного управления во многом связано с совершенствованием алгоритмов, программных и технических средств контроля и регулирования параметров в режиме реального времени[4].

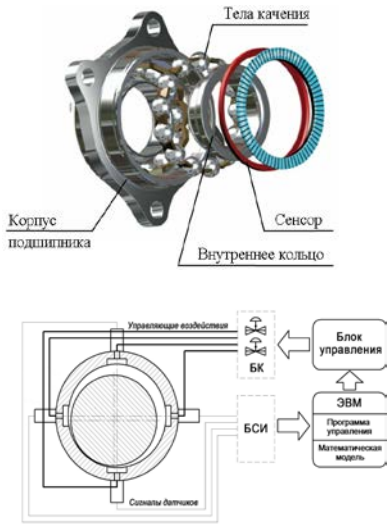


Рис. 1. Мехатронные опоры роторов

Основной целью данной работы является разработка и тестирование программных средств диагностики состояния роторно-опорной системы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Для исследования гидродинамических эффектов в смазочных слоях подшипников необходимо привлечение высокоточных средств измерения, распознавания и анализа значений измеряемых параметров. Математические основы решения задачи мониторинга в данной работе связаны с использованием искусственных нейронных сетей. Для диагностики состояния роторно-опорной системы посредством решения задачи классификации использовалась нейронная сеть прямого распространения с одним скрытым слоем размером N_{hid}, и выходным слоем размером N_{out} с 4 нейронами. Для активации вычислительного процесса в скрытом и в выходном слое использовалась сигмоидная функция . Входной слой нейронной сети в виде матрицы-столбца U формировался из данных измерений виброперемещений ротора согласно плану вычислительного эксперимента. На выходе из нейронной сети определялась вероятность каждого из четырех возможных положений. В качестве ответа ИНС выбиралось состояние с наибольшей вероятностью. Для анализа точности решения задачи классификации была проведена серия вычислительных экспериментов, данные для которых случайным образом выбирались из базы результатов физического эксперимента по измерению виброперемещений ротора. По плану вычислительного эксперимента варьировалось количество обучающих выборок Q, их размер N_{inp} и состав, а также количество нейронов в скрытом слое N_{hid}. Задача классификации решалась по типу обучения с учителем, т.е. для разработки программы-классификатора была использована обучающая выборка с разделенными на классы данными. В качестве переменной отклика выступала дискретная величина, принимающая два значения в зависимости от положения элементов. Аппроксимирующая функция $H_\theta(u) = (1+\exp(-z(u)))^{-1}$ позволила выявить принадлежность i^{zo} объекта к конкретному классу. После соответствующих преобразований с учетом вычислений весовых коэффициентов были получены матрицы значений факторов. В рассматриваемой задаче количество классов превышает два, поэтому

для классификации была использована нейронная сеть с входным слоем, содержащим $N_{inp}+1$ нейронов (N_{inp} - количество факторов), а в выходном слое сети количество нейронов равно количеству классов. Таким образом, на выходе получается матрица, столбцы которой соответствуют номеру класса, а значения в них соответствуют степени принадлежности этому классу. Неизвестные весовые коэффициенты для каждого слоя представлены в виде матриц $\boldsymbol{\theta}^{(l)} = \left(\theta_{pq}^{(l)}\right), l = 1,2$, где индекс p соответствует номеру нейрона текущего слоя l, а q - предыдущего $l-1$. Дальнейшая процедура вычисления весовых коэффициентов представляет собой задачу безусловной оптимизации функции ошибки. Процедура определения неизвестных весовых коэффициентов для большого количества факторов выполняется численно методом градиентного спуска[5].

Экспериментальные исследования проводились на роторно-опорной установке (рис. 2) со сменными подшипниками. В левой опоре ротора устанавливались подшипник качения и контактное уплотнение, в правой – мехатронный подшипник жидкостного трения (рис. 1). Смазка подшипника осуществлялась осевой подачей жидкости из гироаккумулятора. Привод ротора обычно осуществлялся от асинхронного двигателя с частотным преобразователем. Для измерения виброперемещений ротора в двух взаимно перпендикулярных направлениях использовались вихретоковые преобразователи, позволяющие определить перемещенгия в диапазоне расстояний 0.1 – 2.1 мм с погрешностью не более 5%. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой использовался модуль «NI 9205», совмещенный с процессорным устройством. Измерение расхода и давления подачи жидкости в подшипник использовались специальные датчики. С помощью разработанной программы измерение виброперемещений ротора и давления подачи жидкости производилось в режиме реального времени с частотой записи показаний первичных преобразователей 1000-8000 Гц.

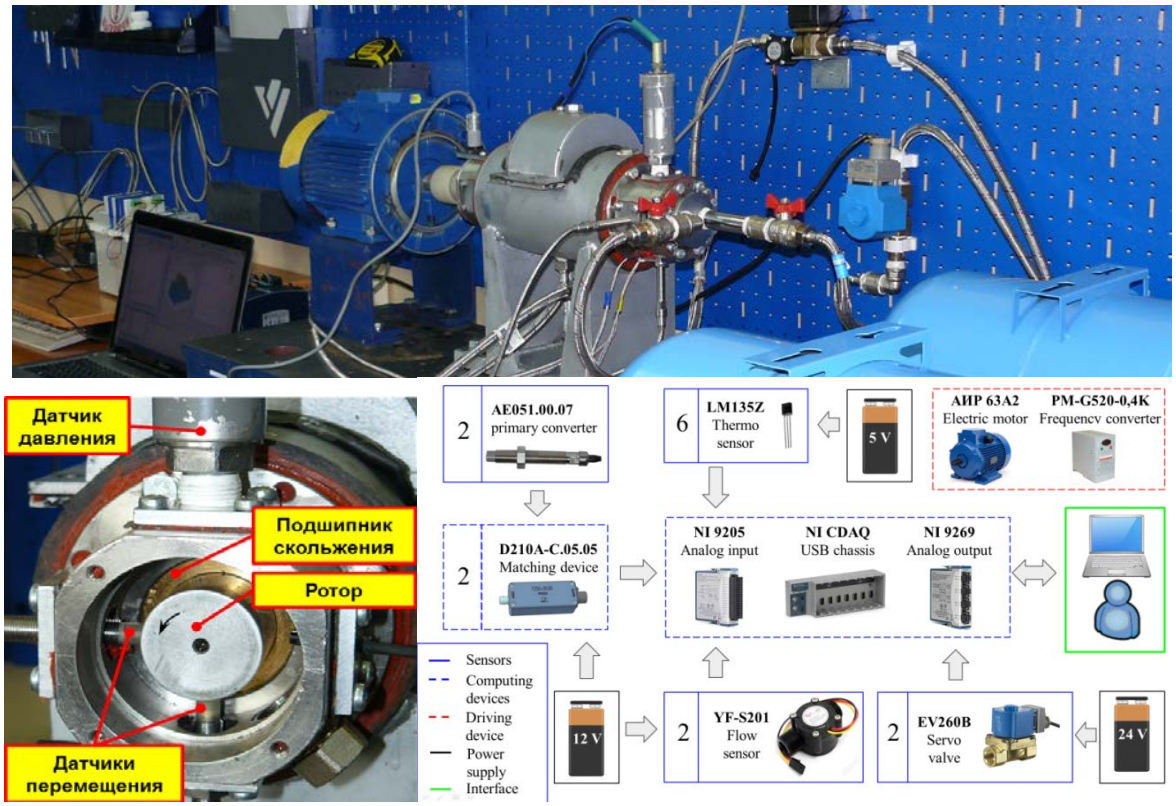


Рис. 2. Компоненты экспериментальной установки

На основе измеренных виброперемещений ротора в двух взаимно перпендикулярных направлениях были построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), траектории и развертки полигармонических колебаний (рис. 3), анализ которых позволил выявить закономерности влияния отдельных факторов.

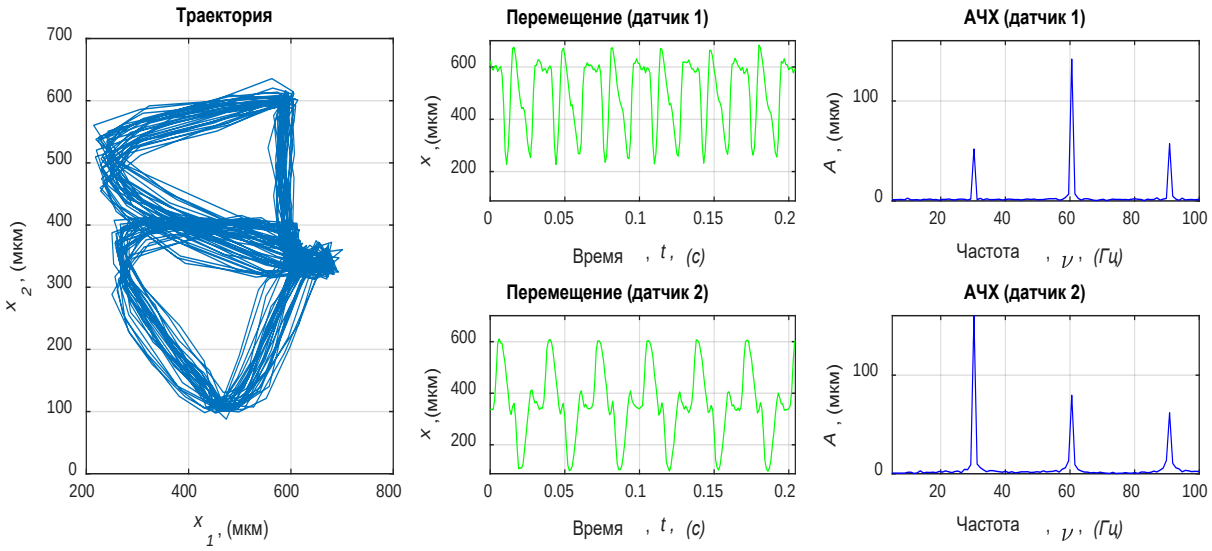


Рис. 3. АЧХ, траектории и развертки колебаний

Проведенные вычислительные эксперименты свидетельствуют о наибольшем влиянии на точность результатов количества датчиков, состава матрицы входного слоя и количество нейронов в скрытом слое. Влияния процедуры переобучения на точность не было выявлено В результате проведения серии вычислительных экспериментов была достигнута точность 95.8 % в решении задач классификации и диагностики. Таким образом, было установлено, что искусственные нейронные сети являются эффективным средством диагностики состояния и управления движением в роторных системах с подшипниками жидкостного трения.

Список литературы: 1. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с. **2.** Кельзон А.С., Циманский Ю.П., Яковлев В.И. Динамика роторов в упругих опорах. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. - 280с. **3.** Белоусов А.И. Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов. – Самара: Издательство СНЦ РАИ, 2002. – 335 с. **4.** Савин Л.А., Соломин О.В. Моделирование роторных систем с подшипниками жидкостного трения. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 334 с. **5.** Kornaev, A.V. Postroenie trajectories of the rotor with the use of a neural network program module / Kornaev, A.V., Kornaev N.V., Kornaeva E.P., Savin L.A. // Journal "Bulletin of BSTU". - 2017. - No. 3 (56). (in Russ.)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ «ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ»

Сазанов В.П., Шадрин В.К., Семёнова О.Ю., Декань А.А.
(Самарский университет, ДонНУЭТ, г. Самара, г. Донецк, Россия, ДНР)
Тел./Факс: +78462674526; E-mail: sopromat@ssau.ru

Abstract: *We consider the criteria of the estimation of surface strengthening influence on the endurance limit stress increment of the solid and hollow cylindrical specimens with cuts under the bend for the symmetrical cycle of loading. We check the possibility of "check test piece" method using for the forecasting the tested standard specimens endurance limit stress. The "check test piece" method allows to prevent the destruction of the standard specimens when the residual stresses are determined experimentally. In this case the endurance limit stress of the standard specimens can be calculated by the residual stresses of "check test piece" that is strengthened simultaneously with the standard specimens by the same technology.*

Key words*: residual stresses, surface plastic deformation, initial strains, endurance limit stress, symmetrical cycle of loading, cylindrical specimen, check test piece.*

Для прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений, а также выбора оптимальных режимов упрочнения требуется комплексно решить следующие задачи:

– экспериментальное определение распределений остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя (в лабораторных условиях);

– моделирование остаточного напряжённо-деформированного состояния в гладких деталях и деталях с концентраторами напряжений с применением современных CAE- систем;

– выбор критерия влияния с последующей разработкой методики прогнозирования предела выносливости за счёт упрочнения.

При определении остаточных напряжений в этом случае применения метода «образца-свидетеля» разрушению подвергается только «образец-свидетель». Такой образец, имеющий определённые размеры и форму, проходит весь технологический цикл упрочняющей обработки вместе со штатной деталью и получает одинаковые с ней первоначальные деформации.

Связь между приращением предела выносливости упрочнённых деталей и остаточными напряжениями наиболее точно отражает критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ [1-3]. Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости детали при изгибе $\Delta\sigma_{-1}$ с использованием критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ производится по следующей зависимости:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \left|\bar{\sigma}_{\text{ост}}\right|, \qquad (1)$$

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – феноменологический коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$; $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ – среднеинтегральные остаточные напряжения, определяемые на критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{\text{кр}}$, возникающей в опасном сечении упрочнённой детали при работе на пределе выносливости.

Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ зависит от степени концентрации напряжений и вычисляется, например, для случая изгиба по следующей формуле [1]:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0{,}612 - 0{,}081\,\alpha_\sigma, \qquad (2)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости определяется только размерами опасного поперечного сечения. Для цилиндрических образцов и деталей зависимость для определения $t_{кр}$ имеет вид [1-3]:

– для сплошного цилиндра $t_{кр} = 0.0216 D_1$; (3)

– для полого цилиндра $t_{кр} = 0.0216 D_1 \left[1 - 0.04 \left(d / D_1 \right)^2 - 0.54 \left(d / D_1 \right)^3 \right]$, (4)

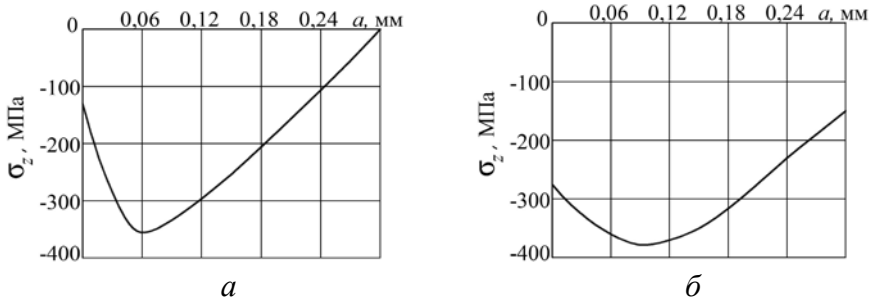
где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали, d – диаметр отверстия образца или детали.

Приведём результаты исследований по апробации расчётно-экспериментального метода с использованием «образцов-свидетелей» для материалов: сталь 20, сталь 45, сталь 12Х18Н10Т, алюминиевый сплав Д16Т. Из указанных материалов были изготовлены образцы в виде сплошных и полых цилиндров с надрезами полукруглого профиля с наружным диаметром D в гладкой части, диаметром отверстия d, диаметром наименьшего сечения надреза D_1, Гладкие образцы из стали 20 подвергались пневмодробеструйной обработке, а из сталей 45 и 12Х18Н10Т, сплава Д16Т – гидродробеструйной обработке. После упрочнения на образцы наносились концентраторы в виде полукруглого надреза радиусом R = 0,3 мм. В качестве «образцов-свидетелей» использовались втулки с наружным диаметром D = 51,5 мм и внутренним $d = 45$ мм из тех же материалов.

Расчётная часть исследований выполнялась с помощью метода конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. Первоначальные остаточные деформации по толщине упрочнённого поверхностного слоя образцов моделировались методом термоупругости [4,5] .

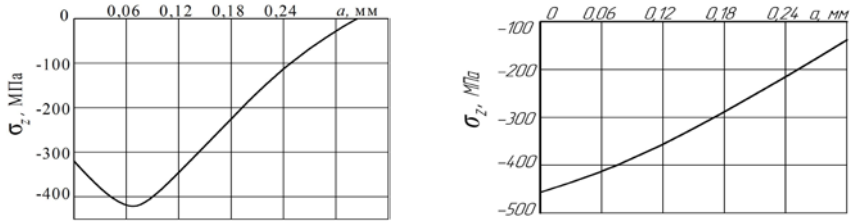
При определении первоначальных деформаций в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a упрочнённого поверхностного слоя втулки (рис. 1, 2), которое было получено методом колец и полосок [6].

Распределения осевых σ_z остаточных напряжений в опасных сечениях образцов с надрезами рассчитывались аналитическим методом [7] и численным методом с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [4, 5]. Результаты представлены на рис. 3-6.



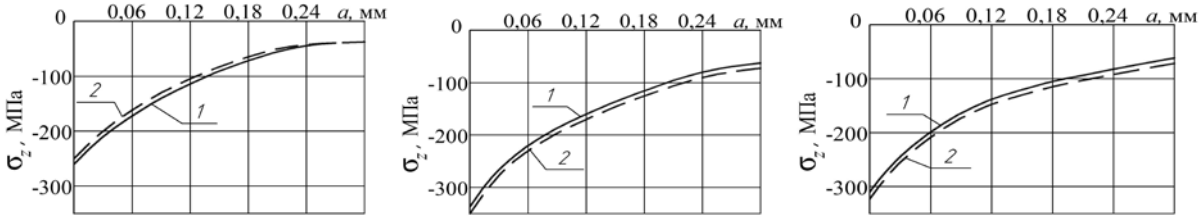
а *б*

Рис. 1. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в «образцах-свидетелях» (втулки с D = 51,5 мм, $d = 45$ мм) из стали 20 (*а*) и стали 45 (*б*) после пневмодробеструйной обработки (*а*) и после гидродробеструйной обработки (*б*)



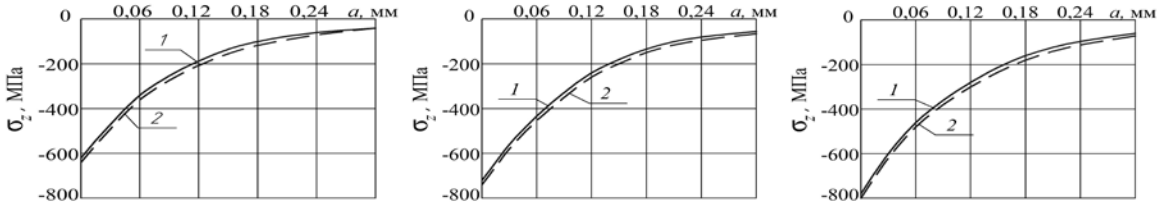
а *б*

Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в «образцах-свидетелях» (втулки с $D = 51.5$ мм, $d = 45$ мм) из стали 12Х18Н10Т (*а*) и алюминиевого сплава Д16Т (*б*) после гидродробеструйной обработки



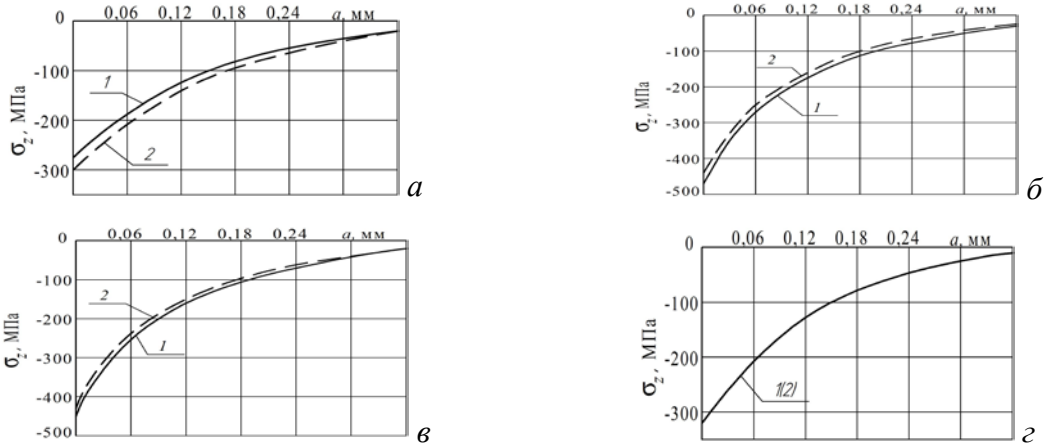
а *б* *в*

Рис. 3. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 20 с надрезом R = 0,3 мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: *а* – D = 10 мм, d = 0; *б* – D = 25 мм, d = 0; *в* – D = 25 мм, d = 15 мм



а *б* *в*

Рис. 4. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 45 с надрезом R = 0,3 мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: *а* – D = 15 мм, d = 5 мм; *б* – D = 25 мм, d = 15 мм; *в* – D = 50 мм, d = 40 мм



а *б* *в* *г*

Рис. 5. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 12Х18Н10Т с надрезом R = 0,3 мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: *а* – D = 10 мм, d = 0 мм; *б* – D = 15 мм, d = 0 мм; *в* – D = 15 мм, d = 5 мм; *г* – D = 15 мм, d = 10 мм

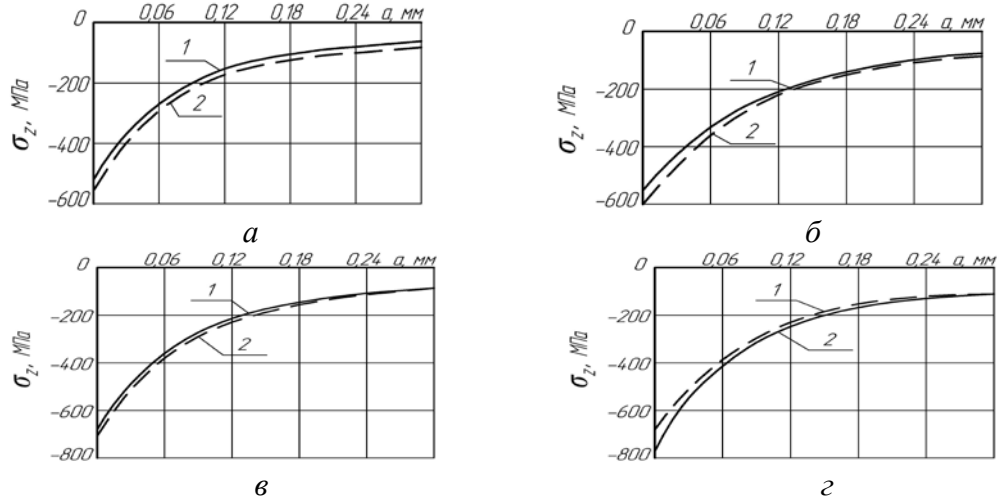


Рис. 6. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в деталях из сплава Д16Т с надрезом R = 0,3 мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: *а* – D = 10 мм, *б* – D = 15 мм, *в* – D = 25 мм, *г* – D = 40 мм

Результаты расчётов приращений пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ и приращений $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$ по результатам испытаний на усталость (при изгибе с вращением в случае симметричного цикла) представлены в табл. 1-4.

Таблица 1. Результаты расчётного и экспериментального определения предела выносливости образцов с надрезами из стали 20

D, мм	d, мм	D_1, мм	$t_{\text{кр}}$, мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$, МПа	Расхождение, %
10	0	9.4	0.203	–122	2.7	0.393	48.0	45.0	6
25	0	24.4	0.527	–89	2.9	0.377	33.6	30.0	11
25	15	24.4	0.453	–91	3.0	0.369	33.5	32.5	3

Таблица 2. Результаты расчётного и экспериментального определения предела выносливости образцов с надрезами из стали 45

D, мм	d, мм	D_1, мм	$t_{\text{кр}}$, мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$, МПа	Расхождение, %
15	5	14.4	0.303	–159	2.8	0.385	61.2	57.5	6
25	15	24.4	0.453	–131	3.0	0.369	48.3	45.0	7
50	40	49.4	0.733	–87	3.1	0.361	31.4	30.0	4

Таблица 3. Результаты расчётного и экспериментального определения предела выносливости образцов с надрезами из стали 12Х18Н10Т

D, мм	d, мм	D_1, мм	$t_{\text{кр}}$, мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$, МПа	Расхождение, %
10	0	9,4	0,203	-129	2,54	0,406	52,4	45	16
15	0	14,4	0,311	-117	2,70	0,393	46	42,5	8
15	5	14,4	0,303	-119	2,63	0,399	47,5	42,5	12
15	10	14,4	0,249	-115	2,29	0,427	49,1	42,5	15

Таблица 4. Результаты расчётного и экспериментального определения предела выносливости образцов с надрезами из алюминиевого сплава Д16Т

D, мм	D_1, мм	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	α_σ	$\overline{\psi_\sigma}$	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, МПа	Расхождение, %
10	9,4	0,203	-208	2,7	0,393	81,6	70	17
15	14,4	0,311	-166	2,8	0,385	63,8	57,5	11
25	24,4	0,527	-123	2,9	0,377	46,4	45	3
40	39,4	0,851	-78	3,1	0,361	28,2	30	6

Из представленных в табл. 1-4 данных видно, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений пределов выносливости не превышает 11 % для стали 20 и 7 % для стали 45, 16% для стали 12Х18Н10Т и 17% для алюминиевого сплава Д16Т.

Таким образом, используя результаты определения остаточных напряжений в «образцах-свидетелях», можно с приемлемой для многоцикловой усталости точностью прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей из различных конструкционных материалов в достаточно широком диапазоне изменения диаметров (10÷50 мм).

Список литературы: **1.** Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с. **2.** Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26. **3.** Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №12. – С. 37-40. **4.** Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т.19. – №2 (68). – С. 35-40. **5.** Сазанов, В.П. Моделирование остаточного напряжённого состояния деталей в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса MSC.NASTRAN\MSC.PATRAN / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, О.Ю. Семёнова, А.В. Иванова // Вестник СамГТУ. Серия «Техн. Науки». – 2012. – № 1(33). – С. 106-113. **6.** Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ. – 1971. – Вып. 53. – С. 32-42. **7.** Иванов, С.И. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях/ С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов конструкций. – Куйбышев: КуАИ. – 1973. – Вып. 60. – С. 160-170.

АПАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ

Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Зиатдинов Р.Р., Рябушкин Д.Г., Гумеров Д.Р.
(КНИТУ, г. Казань, Россия)
Тел: +79270370333; E-mail: vcvcvc12345678@gmail.com

Abstract: *The description of the method of production of activated carbon from wood processing waste is given. An energy- and resource-saving continuously operating unit for the production of activated carbon has been considered, which has several technological zones, which makes it possible to obtain high-quality activated carbon, ensure technological safety and achieve high energy efficiency.*

Key words: *activated carbon; pyrolysis; wood waste; convective drying; coal activation.*

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета разработана энерго- и ресурсосберегающая непрерывно действующая установка, предназначенная для производства активированного угля [1÷10]. В основу был заложен разработанный и запатентованный способ переработки древесных отходов в активированный уголь[11÷12]. Схема установки представлена на рисунке 1.

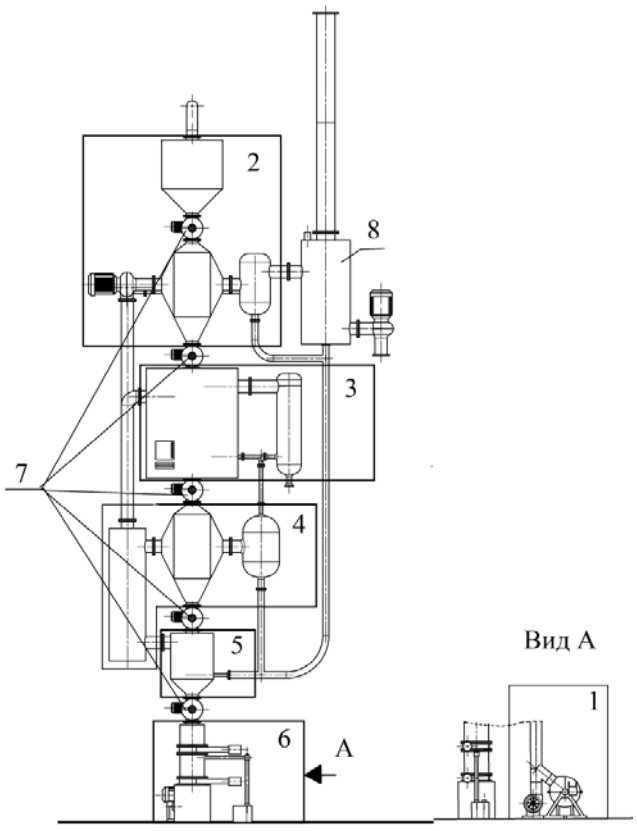


Рис. 1. Установка для производства активированного угля

Установка представляет собой вертикальную реторту. Принцип работы установки состоит в измельчении и сушки древесных отходов с их последующем термическим разложением в древесный уголь и парогазовую смесь. Уголь затем активируется и охлаждается, а неконденсируемая часть парогазовой смеси служит топливом для работы самой установки, отработанные топочные газы идут на создание перегретого пара, на процесс сушки, а затем проходят через адсорбер 8 и уходят в атмосферу.

Конструктивно установка состоит из зон: измельчения 1, сушки 2, пиролиза 3, активации 4, испарительного охлаждения 5 и вакуумного охлаждения 6. Стыковка между зонами реализована установкой шлюзовых питателей 7.

Древесные отходы перед сушкой необходимо измельчить. Для этих целей в установке реализована зона измельчения древесных отходов. Отходы измельчаются в дисковой рубительной машине 1. Воздуходувка 3 нагнетает давление в трубопроводе 2 для подъема частиц отходов к зоне сушки. Зона измельчения и сушки представлены на рисунке 2.

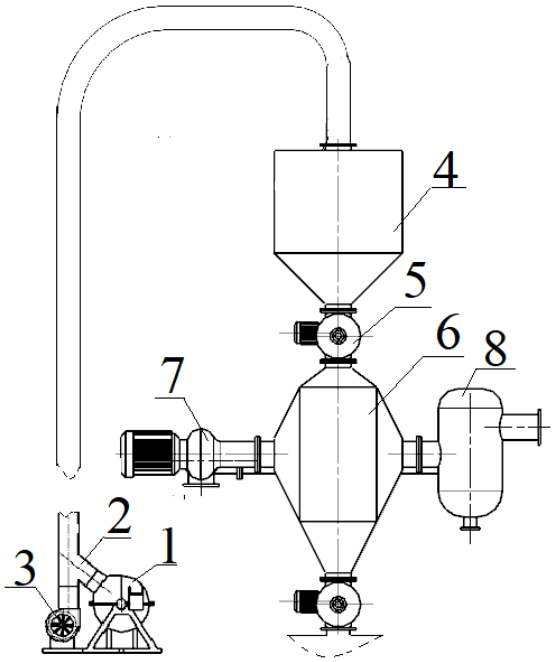


Рис. 2. Зоны измельчения и конвективной сушки измельченных древесных отходов

Из накопителя 4 древесные отходы непрерывно через питатель 5 подаются в камеру сушки 6.

Выполнена камера сушки по типу шахтного аппарата, т.е теплоноситель в виде топочного газа распространяется по камере через короба теплоносителя.

Для равномерного распространения теплоносителя скорость и давление топочного газа регулируются газодувкой 7. Отработанные топочные газы уходят в сепаратор 8.

Высушенные древесные отходы через питатель попадают в зону пиролиза, представленную на рисунке 3.

Узел пиролиза состоит из пиролизной камеры с патрубком отвода пиролизных газов 1, где без доступа кислорода происходит разложение отходов на уголь и пиролизные газы, которые после очистки в сепараторе 2 разделяются на дистиллят (жижку) и неконденсируемые газы. Жижка из сепаратора уходит в накопительную емкость, а газы являются топливом для пиролизной зоны. Газ подается в топку зоны пиролиза через коллектор подвода горючих газов 3. Топочные газы, образующиеся при сжигании, поднимаются по дымоходу 4, прогревая тем самым камеру пиролиза до 500°C. Поддержание температуры возможно благодаря теплоизоляционному корпусу 5. Из дымохода топочные газы выходят в рекуперативный теплообменник 6.

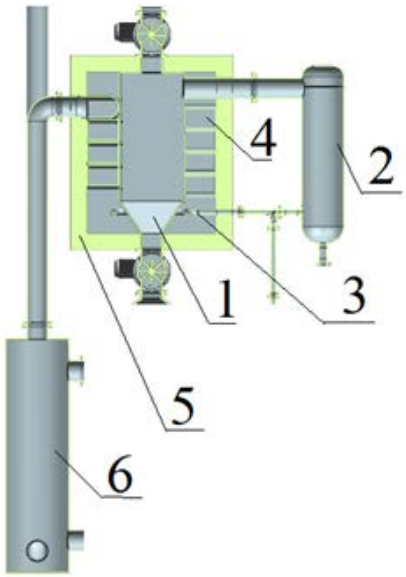


Рис. 3 Зона пиролиза древесных отходов

После пиролиза древесный уголь через питатель подается в зону активации угля. Конструкция камеры активации аналогична камере сушки, но вместо топочных газов из рекуперативного теплообменника подается перегретый пар с температурой 900°C. Из угля происходит выделение горючих газов, которые вместе с паром выводятся и камеры активации в сепаратор. После активации адсорбционные свойства угля значительно повышаются, но уголь имеет высокую температуру, его необходимо охладить.

Зоны испарительного и вакуумного охлаждения представлены на рисунке 4.

Нижний слой активированного угля охлаждается водой подаваемый из коллектора подвода воды 2. Вода образуется в результате сепарирования в зонах сушки, активации и в адсорбере при адсорбции. Верхний слой активированного угля охлаждается паром, образующимся в результате охлаждения нижнего слоя угля. Пар отводится из камеры охлаждения в рекуперативный теплообменник. Охлаждение угля проис-

ходит до температуры 90°С, при этом уголь становится влажным, поэтому дальнейшее охлаждение и сушка угля происходит в зоне вакуумного охлаждения активированного угля.

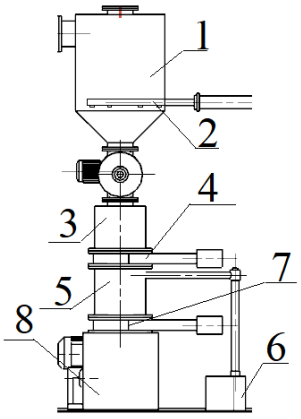


Рис. 4. Зоны испарительного и вакуумного охлаждения активированного угля

Через питатель активированный уголь подается в накопительную емкость 3. После заполнения емкости открывается вакуумный затвор 4, весь уголь сбрасывается в вакуумную камеру 5, затем вакуумный затвор 4 закрывается, а из вакуумной камеры удаляется весь воздух при помощи водокольцевого вакуумного насоса 6. При достижении остаточного давления 3-6 кПа открывается вакуумный затвор 7, и уголь сбрасывается в узел выгрузки 8. После вакуумного охлаждения уголь по своим свойствам и характеристикам соответствует ГОСТ.

Разработанная установка производства активированного угля из органических отходов позволяет получать активированный уголь высокого качества из отходов деревопереработки.

Список литературы: 1. Ю.Л. Юрьев, В.П. Орлов, С.А. Панюта, Т.В. Штеба// Проблемы аппаратурного оформления процессов переработки измельченной древисины в активные угли//Лесной журнал.-2000.-№5-6.- С. 52-57. **2.** Богданович Н.И. Адсорбенты из отходов лесопромышленных предприятий для решения экологических проблем (статья) / Изв. высш. уч. завед.. Лесной журнал, 1997, № 4, с.92-96. **3.** Место активных углей в экологии и экономике, новые техологии их производства/ Мухин В.М., Курилкин А.А., Воропаева Н.Л., Лексюкова К.В., Учанов П.В. Сорбционные и хроматографические процессы 2016, том 16, №3, 346-353. **4.** Р.Р.Зиатдинов, Т.О. Степанова, Д.Ф. Зиатдинова, Р.Г. Сафин, Д.А. Ахметова/ Конвективная сушка измельченной древесины перед термохимическим процессом переработки древесных материалов// Деревообрабатывающая промышленность 2019.-№1.- с.66-73. **5.** Р.Р. Зиатдинов, Р.Г. Сафин, Т.О. Степанова, Д.Ф. Зиатдинова, Д.А. Ахметова, Н.М. Терехин/ Непрерывно действующая установка переработки древесных отходов в активированный уголь//Деревообрабатывающая промышленность.- 2019 г.- №4.- С. 90-98. **6.** Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, Д.Ф. Зиатдинова, Т.О. Степанова/ Конвективная сушка дисперсных материалов Перед термохимическим процессом переработки// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2019. Т. 21. С. 29-37. **7.** Р.Г. Сафин, Т.О. Степанова, Р.Р. Зиатдинов, Д.Г. Рябушкин, В. И. Петров, В.Г. Сотников/ Конструктивный расчет пиролизной зоны установки производства активированного угля// Деревообрабатывающая промышленность.- 2020 г. -№3.- С.45-55. **8.** N.F. Timerbaev, R.G. Safin, I.Yu.Mazarov, T.O. Stepanova/ Thermochemical processing of organic waste IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 643.-2019. **9.** Safin, R.G., Prosvirnikov D.V., Stepanova T.O./ Processing of Renewable Wood Biomass into Thermally Modified Pellets with Increased Combustion Value//2020 Proceedings of the 5 th international Conference on Industrial Engineering: Lecture Notes in Mechanical Engineering 387. **10.** Патент РФ № 2694347, 11.07.2019 МПК C 10 B 53/00. Способ получения активированного угля / Р.Г. Сафин [и др.] **11.** Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиатдинов, В.Г. Сотников, Д.Г. Рябушкин, Д.Р. Гумеров/ Моделирование процесса измельчения и транспортирования органических отходов в установке производства активированного угля/Системы. Методы. Технологии. -2021.- №2. **12.** Р.Г. Сафин Технологические процессы и оборудование деревообрабатывающих производств: Учебник.- 4-е изд., испр. и перераб. – Санкт-Петербург: Лань,-2020.- 752 с.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ МОНИТОРИНГ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Сафиуллин Р.Н., Прутчиков И.О., Резниченко В.В., Марусин А.В.
(Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург, Россия)
Тел: +79111989566, e-mail: safravi@mail.ru

Abstract: *Current approaches to the construction of automatic monitoring and control systems for technical systems of buildings and structures usually imply a clear separation of functions for the control of individual technical systems, especially engineering systems and security systems. In autonomous buildings and structures that have no constant connection to external technical systems this approach does not always seem rational, since the resources of individual systems of monitoring and control of the parameters of buildings and structures when used in combination can provide greater effect in relation to achieving the overall goal of ensuring their safe life support. Automation of processes of monitoring the state of technical systems of autonomous buildings and structures allows to give them an active character with possibilities of emergency management and control. At the same time due to the combined use of elements of individual control systems, in particular optical-electronic means of detection and recognition of events (OES), there are opportunities to significantly improve the effectiveness of monitoring the safety of life support of autonomous objects. Thus, the development of integrated automated systems of active optoelectronic life support safety monitoring (LSMS) of autonomous buildings and structures is currently very relevant. These systems are new [1], so for their implementation require the priority study of feasibility study and rational construction.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большое разнообразие и различие по целому ряду признаков все автономные здания и сооружения для своего нормального функционирования оснащаются техническими системами (ТС), обязательной составляющей, которых являются системы жизнеобеспечения (СЖ) и системы безопасности (СБ).

Требования, особенности и характеристики СЖ и ТСБ в настоящее время нормируются [2]. Для крупных, особо важных и ответственных автономных объектов таких как аэродромы, электростанции и т.п. нормируется также создание специальных систем мониторинга состояния инженерных систем (СМИС) [3]. В них системы жизнеобеспечения представляются в виде программно-технического комплексов, предназначенных для задач бесперебойного (в пределах нормативных показателей) обеспечения функционирования оборудования (теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения, электроснабжения, газоснабжения и т.п.) потенциально опасных объектов, зданий и сооружений. Таким образом, по своему функциональному назначению СЖ близки к техническим системам безопасности (ТСБ), определенным согласно того - же источника, как программно-технические комплексы, предназначенные для решения задач предупреждения чрезвычайных ситуаций, взрыво - и пожаробезопасности, охраны и оповещения людей в чрезвычайных ситуациях.

В настоящее время общепринятым подходом при решении вопросов повышения эффективности функционирования технических систем автономных зданий и сооружений является совместное (комплексное, комбинированное либо интегрированное) их использование. Поэтому достаточно перспективным при построении СМБЖ представляется комбинированное применение элементов систем

жизнеобеспечения и безопасности. В целом оснащение автономных зданий и сооружений СМБЖ на базе комбинированного применения элементов СЖ и ТСБ следует признать перспективным в плане повышения эффективности и безопасности их функционирования.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Практические исследования вопросов повышения эффективности функционирования зданий и сооружений путем внедрения в них СМИС на базе комбинированного применения элементов СЖ и ТСБ представляются в настоящее время перспективными в силу следующего ряда обстоятельств:

- комбинированное применение СЖ и ТСБ не требует внедрения новых элементов и, вследствие этого, больших материальных затрат;
- варианты комбинированного применения СЖ и ТСБ позволяют получить общий суммарный эффект, как с точки зрения обеспечения безопасности, так и улучшения показателей СЖ;
- совместное использование СЖ и ТСБ позволяет комплексно улучшить основные эксплуатационные характеристики автономности, безопасности и управляемости зданий и сооружений различного назначения;
- реализация СЖ и ТСБ на одной базе современных информационных технологий, например в области обнаружения и распознавания событий, позволяет использовать ресурсы обеих систем для достижения общих целей по обеспечению эффективного и безопасного функционирования автономных зданий и сооружений.

В основу методологии обоснования, структурного построения, расчетов и оптимизации параметров СМБЖ автономных зданий и сооружений может быть положена общая концепция, включающая следующие основные положения:

1. Объектами мониторинга, контроля и управления посредством СМБЖ определяются бесперебойные подсистемы СЖ (БСЖ);
2. СМБЖ строятся в виде автономной подсистемы АСДУ с применением алгоритмов и средств удаленного интеллектуального управления;
3. Приоритетной задачей СМБЖ является обеспечение безопасной автономной работы зданий и сооружений.
4. Структурно СМБЖ формируется путем комбинированного применения элементов БСЖ и ТСБ, в первую очередь в части оптико-электронных средств обнаружения и распознавания событий (ОЭС).
5. Применяемые к установке в СМБЖ элементы БСЖ и ТСБ оснащаются средствами автоматизации, обеспечивающими необходимый уровень автономности зданий и сооружений.

Методологические основы и направления комплексных исследований, расчета и проектирования СМБЖ для автономных зданий и сооружений представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1 в качестве методической основы расчёта и проектирования СМБЖ, могут выступать методика анализа и технико-экономического моделирования объектов, оборудованных СМБЖ, методика оценки технико-экономической эффективности СМБЖ, методика расчёта динамических характеристик и оценки показателей качества энергоснабжения объектов, а также комплексная методика оценки эффективности комбинированного применения в СМБЖ ОЭС на базе многорастровых визуализирующих систем.

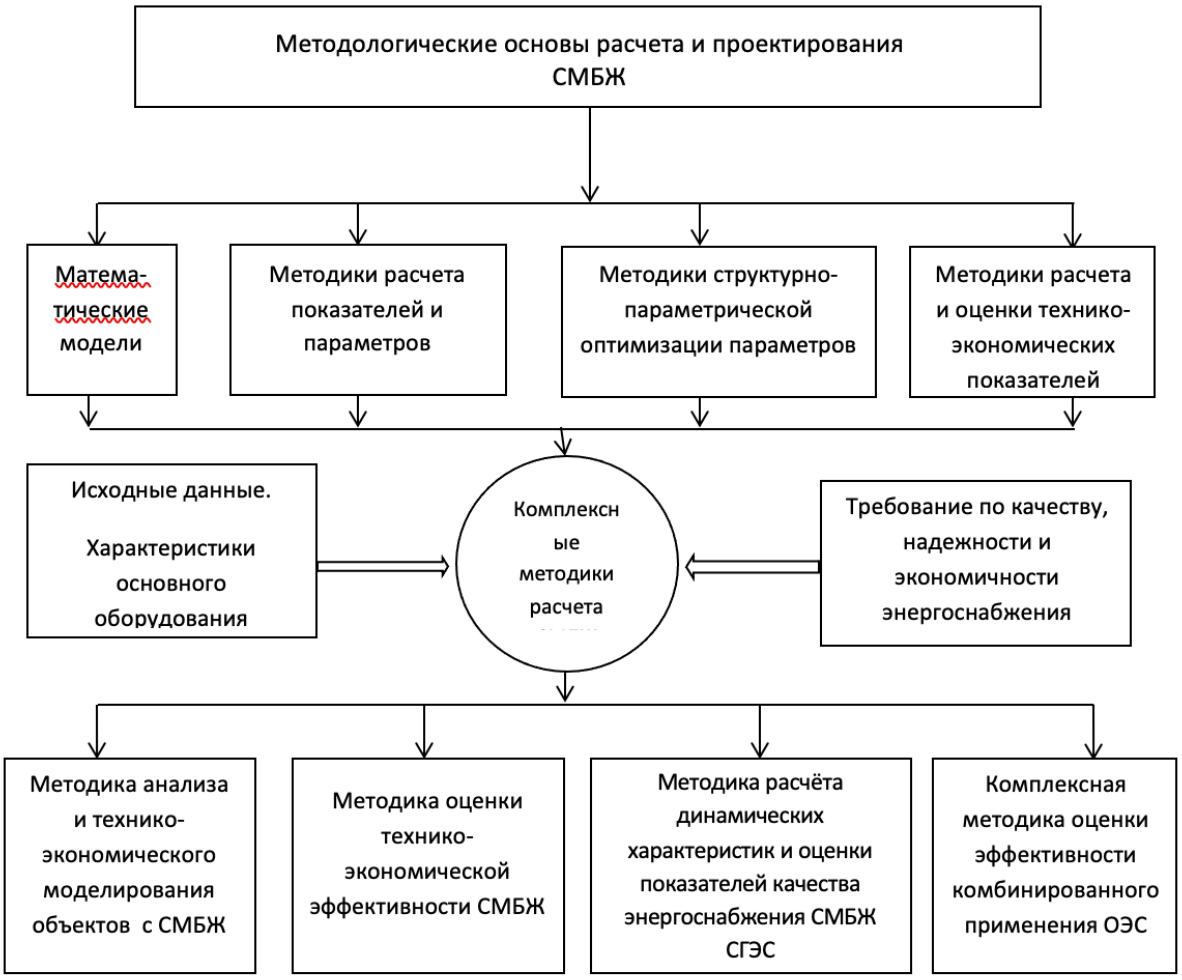


Рис. 1. Методологические основы расчета и проектирования СМБЖ

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В настоящее время при разработке ТСБ повсеместно применяется комплексный подход, предусматривающий обеспечение защищенности объектов по нескольким направлениям, таким как физическая, экономическая, научно-техническая, технологическая, экологическая, информационная, инженерно-техническая безопасность и т.д. Комплексные и интегрированные системы безопасности могут строиться путем комбинированного применения (объединения) различных систем обеспечения безопасности (СОБ), таких как системы аварийного освещения, автоматического противопожарного водоснабжения, автоматического водяного пожаротушения, пожарной сигнализации, охраны периметра, контроля и управления доступом, телевизионного наблюдения и т.д.

Согласно данным [2] комплексная (КСБ) и интегрированная (ИСБ) системы безопасности помимо «охранных» подсистем, таких как системы охранной и тревожной сигнализации, пожарной сигнализации, контроля и управления доступом, видеонаблюдения и контроля, досмотра и поиска, в связи с объектом защиты, информации и т.п., включает также системы инженерного обеспечения объекта (ИС): электроосвещение и электропитание, газоснабжение и водоснабжение, канализация, теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование и т.п. Анализ приведенных выше данных свидетельствует о фактическом наличии и возможности развития

комбинированного применения СЖ и ТСБ путем разработки и создания КСБ и ИСБ различного уровня интеграции. Однако данный подход может быть признан рациональным только в случае приоритетного решения вопросов безопасности по отношению к вопросам инженерного обеспечения.

Наряду с вариантами комбинированного применения СЖ и ТСБ на базе КСБ либо ИСБ могут быть рассмотрены также варианты создания подобных комбинированных систем на базе СЖ. Например, согласно [3], структурированные системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС) строят на базе программно-технических средств, осуществляющих мониторинг технологических процессов и процессов обеспечения функционирования оборудования непосредственно на объектах, зданиях и сооружениях и передачи информации об их состоянии по каналам связи в дежурно-диспетчерские службы (ДДС) для последующей обработки с целью оценки, предвидения и ликвидации последствий дестабилизирующих факторов. Объектами мониторинга, контроля, а в ряде случаев и управления, при этом являются следующие подсистемы жизнеобеспечения и безопасности: теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования, водоснабжения и канализации, электроснабжения, газоснабжения, комплекс пожарной безопасности объекта, системы охранной сигнализации и видеонаблюдения, системы обнаружения и оповещения об аномальном состоянии окружающей среды и т.п. Однако следует отметить, что СМИС, как правило, разрабатываются для потенциально опасных объектов, зданий и сооружений, к которым могут быть отнесены радиационно опасные объекты, гидротехнические сооружения, химически опасные объекты, крупные хранилища нефтепродуктов, электростанции мощностью свыше 600 МВт, предприятия по добыче и переработке твердых полезных ископаемых, технически сложные и уникальные объекты, круг которых ограничен. Таким образом, комбинированное применение СЖ и СБ в виде СМИС как это показано в [3], может быть показано только для потенциально опасных объектов, и для большинства автономных зданий и сооружений представляется функционально избыточным.

Практическая реализация СМБЖ для автономных зданий и сооружений может быть выполнена на различных уровнях, как это показано на рис.2. Согласно рис.2 СМБЖ для автономных зданий и сооружений(АО) могут быть разработаны на уровнях автономных источников электроэнергии(АИЭ), установок гарантированного электропитания (УГП), систем гарантированного энергоснабжения(СГЭС) а также бесперебойных подсистем жизнеобеспечения (БСЖ). Как показали выполненные исследования в настоящее время наиболее рациональным и перспективным представляется реализация СМБЖ на уровне СГЭС, поскольку позволяет обеспечить в полном объеме контроль и управление бесперебойным энергоснабжением объекта, а также мониторинг основных энергоэффективных процессов и режимов применения энергоисточников. Реализация СМБЖ на уровнях АИЭ и УГП целесообразна для практической отработки вопросов алгоритмической, программной и аппаратной реализации элементов СМБЖ. Практическое внедрение СМБЖ на уровне БСЖ зданий и сооружений можно отнести к разряду перспективных, требующих для своего внедрения проведения дополнительных исследований в направлении разработки средств и методов автоматизированного контроля и противоаварийного управления всех бесперебойных подсистем жизнеобеспечения.

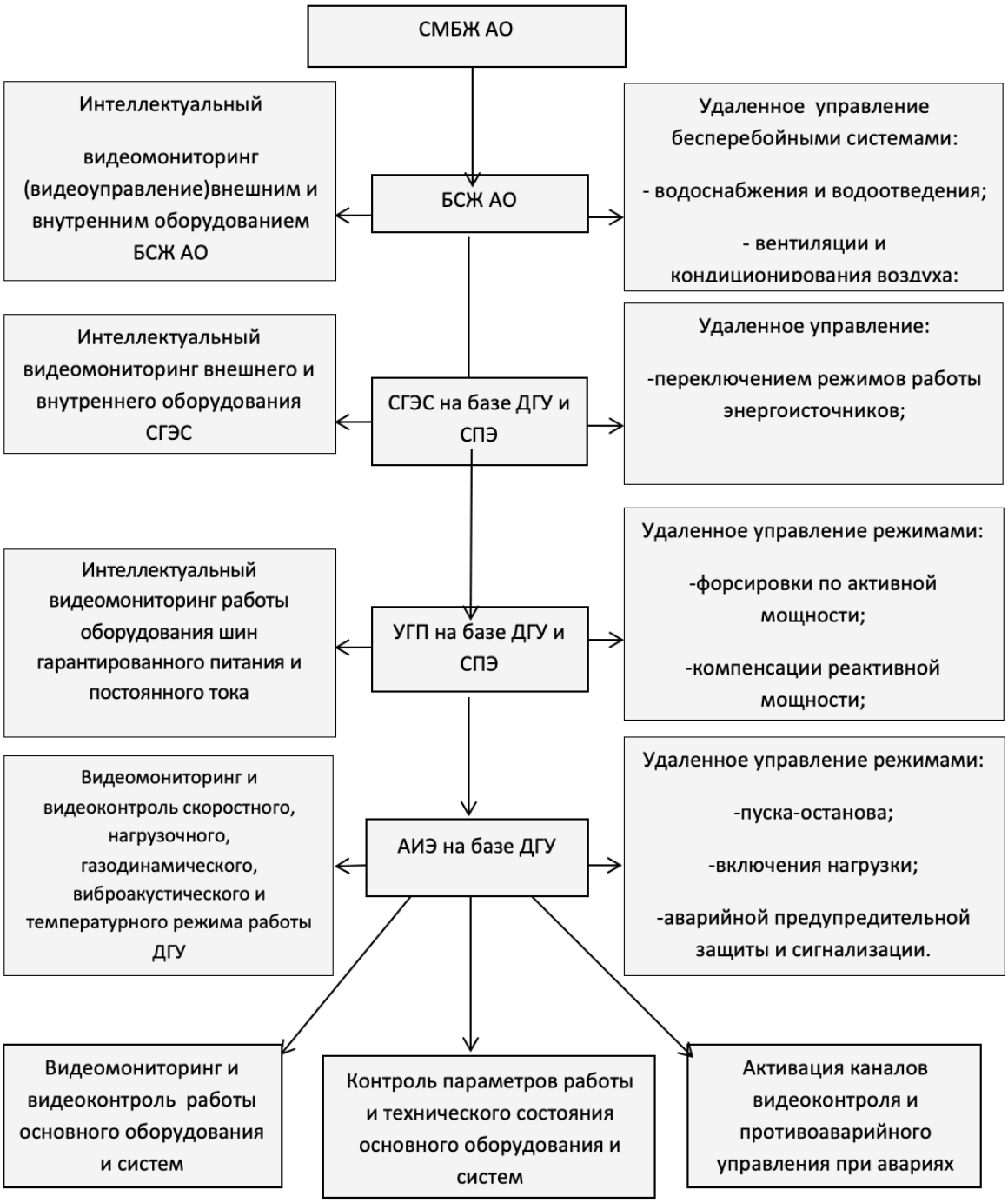


Рис. 2. Основные направления реализации СМБЖ автономных зданий и сооружений

Технико-экономическое обоснование перспективности внедрения СМБЖ в автономных зданиях и сооружениях требует проведения специальных расчетных и экспериментальных исследований, которые могут быть выполнены известными методами. Общепринятой и наиболее распространённой в настоящее время среди простых методов оценки эффективности является оценка по приведенным затратам. Оценку эффективности здесь проводят путём сравнения приведенных затрат $П_i$ определяемых для каждого *i*-го варианта согласно выражению:

$$П_i = C_i + E_H * K_i \quad ,$$

где K_i – капитальные вложения по i-му варианту;
C_i – текущие затраты (себестоимость) по тому же варианту;
E_H – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

При этом оптимальным считается вариант, имеющий минимальное значение показателя $П_i$. Приведенные затраты включают в себя капитальные вложения и текущие расходы. При этом в расчетах технико-экономической эффективности допускается количественное определение лишь той части приведенных затрат, которые претерпевают изменение в сравниваемых вариантах. То есть, расчет капитальных вложений и эксплуатационных расходов у потребителя может быть ограничен лишь теми составляющими, которые изменяются в сравниваемых вариантах.

Выбор из множества вариантов проектных или плановых решений оптимального по критерию минимума приведенных затрат возможен только в случае их полной сопоставимости, то есть тождества достигаемых при их посредстве результатов. Различные варианты технических решений не всегда гарантируют тождество результатов. Таким образом, возникает необходимость приведения вариантов к тождественному эффекту. Тождество технико-экономического эффекта при сравнении между собой различных вариантов СМБЖ обязательно должно учитывать показатели надежности и безопасности.

При комплексной оценке и разработке основ практического применения рассматриваемых согласно рис.3 топологий СМБЖ АО описанные выше экономические показатели и критерии могут быть рассмотрены совместно с показателями и результатами оценки научного, технического, производственного, экологического, социального и других эффектов, определёнными по известным методикам. Таким образом, оценку технико-экономической эффективности разработанных технических, технологических и инфраструктурных решений относительно реализации СМБЖ автономных объектов МО РФ можно выполнить на трех уровнях детализации характеристик и, соответственно, в три этапа.

На первом этапе могут быть рассмотрены с позиций обеспечения экономической эффективности разработанные новые и существующие системы удаленного мониторинга, контроля и управления жизнеобеспечением автономных объектов.

На втором этапе целесообразно оценить экономическую эффективность от внедрения разработанных СМБЖ на автономных зданиях и сооружениях.

Наконец на третьем этапе может быть выполнена комплексная оценка технико-экономической эффективности перспективных инфраструктурных проектов реализации систем жизнеобеспечения автономных зданий и сооружений, оборудованных СМБЖ, в том числе по совокупности показателей и критериев различных видов эффекта от их практического внедрения.

Выполненный анализ показал, что большинство методов оценки экономической эффективности применения новых технических решений в той или иной мере основаны на определении и сравнении приведенных затрат, а также аналогичных показателей, таких как срок окупаемости, коэффициент эффективности и т.п. Данный методологический подход может быть сохранён на первом и втором этапах оценки технико-экономической эффективности внедрения рассматриваемых и перспективных СМБЖ автономных зданий и сооружений.

Оснащение СГЭС СМБЖ очевидно требует дополнительных затрат, что приводит к удорожанию энергоснабжения объектов. Однако, с другой стороны, оборудование СГЭС СМБЖ позволяет значительно повысить надежность, безопасность и устойчивость энергоснабжения, существенно снизить эксплуатационные расходы, что в конечном итоге может привести к улучшению технико-экономических показателей

энергоснабжения. Комплексная оценка эффективности внедрения СМБЖ на АО МО РФ требует совместной оценки показателей технико-экономической эффективности, надежности и безопасности, и в целом составляет отдельный предмет исследований.

В качестве примера в таблице 1 приведены данные по расчету изменяемой части приведенных затрат для различных вариантов исполнения СМБЖ АО, оборудованных СГЭС с ДГУ и СПЭ мощностью 100 кВт для условий Крайнего Севера и Арктической зоны.

Таблица 1. Результаты расчетной оценки технико-экономической эффективности по внедрению СМБЖ СГЭС автономных объектов в районах Крайнего Севера и Арктической зоны РФ

№ п/п	Наименование и условное обозначение показателя	СГЭС с ДГУ 100 кВт			
		СГЭС без СМБЖ	СГЭС с СМБЖ на базе АСДУ	СГЭС с СМБЖ на базе ТСБ	СГЭС с СМБЖ на базе ТСБ и БСЖ
1	2	4	5	6	7
1	Каитальные вложения (изменяемая часть) $К^{*}I$, тыс.руб	4500	4950	4650	4850
2	Амортизационные отчисления, Sам тыс.руб	225	248	233	242
3	Годовые расходы на техническое обслуживания и ремонт, тыс.руб	115	125	115	1150
4	Годовые затраты на топливо и масло, тыс.руб	6930	6930	6930	5580
5	Годовые затраты на содержание обслуживающего персонала, тыс. руб	1000	1000	1000	0
6	Прочие расходы, тыс. руб	13	13	14	4
7	Текущие (эксплуатационные) расходы, тыс.руб	8270	8303	8278	7173
8	Приведенные затраты, $П^{*}_{i}$ тыс.руб	6568	7025	6720	7043
9	Относительное к $П_1^{*}$ значение приведенных затрат	**1**	**1.07**	**1.04**	**0,92**

Согласно данным таблицы 1 структура СМБЖ с комбинированным применением оптико-электронных средств (КОЭС) из состава ТСБ и БСЖ имеет наименьшее значение приведенных затрат, что связано с сокращением расходов на содержание обслуживающего персонала и возможностью перевода объекта на необитаемый режим работы. В целом по результатам выполненных расчетных исследований следует заключить, что оснащение СГЭС СМБЖ приводит к незначительному увеличению приведенных затрат на уровне 3-7% для удаленных районов и 5-12% для условий нормальной эксплуатации, что свидетельствует о допустимости и целесообразности оснащения систем жизнеобеспечения автономных объектов СМБЖ с КОЭС, особенно с учетом эффекта от их внедрения в области мониторинга, контроля и управления энергоснабжением, повышения его надежности и устойчивости. Подробные сведения и результаты расчетно-экспериментальных исследования СМБЖ для автономных объектов различного назначения приведены в работах [4].

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, оснащение автономных зданий и сооружений СМБЖ на базе комбинированного применения элементов БСЖ и ТСБ представляется в настоящее время одним из перспективных направлений повышения эффективности и безопасности их функционирования в различных условиях эксплуатации. Причем по топологии СМБЖ, включающей в качестве элементов бесперебойных подсистем жизнеобеспечения СГЭС с ДГУ и СПЭ, а в качестве элементов технических систем безопасности КОЭС выполнены аналитические, расчетные и экспериментальные исследования, подтверждающие высокую эффективность от их внедрения в автономных зданиях и сооружениях различного назначения.

Использование в СМБЖ эффективных информационных технологий супервизорного управления, оптимальной диспетчеризации, компьютерного зрения, искусственного интеллекта и т.п., реализованных в ходе расчетно-экспериментальных исследований, обеспечивают наиболее высокие, по сравнению с существующими аналогами, показатели технико-экономической эффективности, вплоть до возможности реализации замкнутых алгоритмов видеоуправления и функционирования объекта полностью в автоматическом режиме, без постоянного обслуживающего персонала. Таким образом предложенные и реализованные в СМБЖ новые подходы к мониторингу. контролю и противоаварийному управлению автономных зданий и сооружений позволяют вывести безопасность их жизнеобеспечения на новый уровень, соответствующий уровню, нормируемому в настоящее время для СМИС особо важных объектов гражданского и производственного назначения.

Список литературы: **1.** Прутчиков И.О. и др. Комплексная система мониторинга, контроля и управления техническими системами жизнеобеспечения и безопасности автономных объектов. Патент на изобретение RU 2719714 C1, 22.04.2020. Заявка № 2019114635 от 13.05.2019. **2.** ГОСТ Р 53704-2009. Системы безопасности комплексные и интегрированные. Общие технические требования. – Москва: Стандартинформ, 2010. **3.** ГОСТ 22.1.12-2005. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. - М: Стандартинформ, 2005. **4.** Поляков А.О. Интеллектуальные системы управления. Введение в прикладную теорию. - СПб.: Изд.-во. СПбГТУ, 1997. **5.** Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. - М: МГТУ им. Баумана, 2005.-200 с. **6.** Прутчиков И.О., и др. Система гарантированного энергоснабжения автономных объектов с использованием устройств частотного регулирования и преобразования энергии. // Морской вестник. №1(17). 2006. С. 57…59. **7.** Прутчиков И.О. и др. Способ работы силовой установки на электропотребителей и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RU 2259492 C1, 27.08.2005. Заявка № 2004100653/06 от 08.01.2004. **8.** Прутчиков И.О., Камлюк В.В., Каулин Е.Л., Михайлов В.И., Куртц И.Д. Моделирование и расчет параметров и режимов работы систем мониторинга, контроля и управления бесперебойным жизнеобеспечением автономных объектов на основе комбинированного применения оптико-электронных средств обнаружения и распознавания событий. Морской вестник. 2018. № 2 (66). С. 75-80. **9.** Прутчиков И.О., Камлюк В.В., Каулин Е.Л., Михайлов В.И., Федяев Л.С. Системы мониторинга, контроля и управления бесперебойным жизнеобеспечением автономных объектов на основе комбинированного применения оптико-электронных средств обнаружения и распознавания событий Морской вестник. 2017. № 3 (63). С. 102-105.

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ГОРНЫХ МАШИН В ДИАПАЗОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ С УЧЕТОМ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОТОРНОГО МАСЛА

Сафиуллин Р. Н., Хаотянь Тянь *(Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)*
тел:+7911 1989566, e-mail: safravi@mail.ru, tianhaotian1996@gmail.com

Abstract: *This article presents the results of the study of the problem of increasing the efficiency of energy conversion of the power unit of mining machines. Modern conditions for the use of power plants are characterized by a significant expansion of the range of requirements imposed on them, such as reliability, environmental friendliness, resource saving. A systematic approach is required to address the new requirements for the performance of mining machines. An increase in efficiency is proposed by reducing friction losses in the range of operating conditions of the internal combustion engine when using the oils given in the study. To reduce frictional losses, it is of great importance to reduce the viscosity of the oil while maintaining its quality, which should not cause an excessive decrease in the bearing capacity of the oil film. Oil quality control will allow to optimize the oil viscosity, reduce hydraulic losses at the inlet and outlet, and can contribute to a significant reduction in mechanical losses.*
Key words: *Engine oil, mining machines, quality simulation system, internal combustion engine, friction loss.*

Введение.

Качественные характеристики горных машин в значительной мере зависят от совокупности свойств силовой установки - агрегата, обеспечивающего объект энергией, необходимой для его перемещения. Современные условия использования силовых установок характеризуются значительным расширением спектра предъявляемых к ним требований. В числе этих требований помимо функциональных, связанных с энергообеспечением объектов, важное значение приобрели повышение их готовности и безотказности в различных условиях эксплуатации горных машин, а также жесткая необходимость тотального ресурсосбережения и решения задач, связанных с усложнением экологической ситуации [1]. Всё это обуславливает потребность перехода от частных усовершенствований силовых установок, к комплексному решению проблемы их эффективности как составных частей определенной системы.

Процесс энергопреобразования двигателя внутреннего сгорания играет центральную роль в формировании всей совокупности свойств силовой установки от её энергетических показателей до характеристик надежности и ресурсоемкости. Отсюда проблема повышения эффективности энергопреобразования, рассматриваемая на основе системного подхода, является важнейшим резервом улучшения качественных показателей горных машин. Вместе с тем, достаточно актуальным является вопрос снижения выбросов отработавших газов при функционировании силовых агрегатов горных машин в диапазоне эксплуатационных режимов. Таким образом, особый интерес на современном этапе развития имеют направления улучшения экологических и эффективных показателей дизелей горных машин при одновременном повышении качества эксплуатационных материалов применяемых в них.

Основная часть. Потери на трение в механизмах являются основным компонентом механических потерь и составляют 60…72% общей суммы $N_{м}$. При этом 70…72% мощности $N_{тр}$ затрачивается на преодоление трения поршня и поршневых

колец и 20…23% – на трение в подшипниках коленчатого вала. До 60…65% потерь на трение поршневой группы связано с преодолением трения поршневых колец. Удельный вес насосных потерь оценивается в (15…13%) $N_м$, а мощность, затрачиваемая на привод вспомогательных агрегатов: топливного жидкостного и масляного насосов, приборов электрооборудования, – в 12..17%.

При нормальной работе механизмов и систем поршневого двигателя в сопряжениях имеет место гидродинамический режим смазывания, при котором пары трения надежно разделены слоем смазочного материала толщиной 5…15 мкм. Только в момент реверсирования поршня, когда скорость его перемещения относительно цилиндра, изменяя знак, проходит через нулевое значение, возможно утончение масляной пленки между поршневыми кольцами и цилиндром до десятых долей *мкм*, что соответствует режиму граничного смазывания [2].

Трение между деталями в условиях гидродинамического режима обусловлено межмолекулярным взаимодействием в слое смазочного материала (моторного масла). Это взаимодействие, характерное для реальных (ньютоновских) жидкостей, определяется их вязкостью [3]. Для количественной характеристики вязкости используются: μ – динамический коэффициент вязкости, имеющий размерность Н·с/м^2; ν – кинематический коэффициент вязкости, причём

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{м}^2/\text{с}\ (\text{см}^2/\text{с}), \tag{1}$$

где ρ – плотность жидкости кг/м^3

В соответствии с реологическим уравнением Ньютона сила трения при гидродинамическом режиме смазывания равна

$$\rho_{тр} = \mu F \frac{W_0}{\delta_м}. \tag{2}$$

Из приведенной фундаментальной зависимости видно, что сила трения определяется вязкостью смазочного материала μ, площадью F контакта сопряженных деталей, относительной скоростью их перемещения W_0 и толщиной масляного слоя $\delta_м$, равной зазору в парах трения.

В результате проведенного исследования установлено, что значение зазора $\delta_м$ в свою очередь зависит от нагрузки на детали, скорости их взаимного перемещения и вязкости масла, что для поршневого кольца приближенно выражает формула

$$\delta_м = \frac{C_п \mu}{P}, \ \text{м} \tag{3}$$

где $C_п$ – скорость поршня, м/с;

P – составляющая силы, действующей на поршневое кольцо, перпендикулярная поверхности зеркала цилиндра, Н.

С учётом последнего выражения и ряда преобразований сила трения поршневого кольца равна

$$P_{пкj} = A_{пк} D h_{кj} (\mu n)^{0.5} p^{n_1}, \ \text{Н} \tag{4}$$

где $A_{пк}$ – постоянный коэффициент;

$Dh_{кj}$ – диаметр цилиндра и высота поршневого кольца, м;

n – частота вращения коленчатого вала, мин$^{-1}$;

p – средняя удельная нагрузка на поршневое кольцо, Н/м^2;

n_1 – показатель степени.

Для комплекта из *k* поршневых колец сила трения составит

$$P_{\text{пк}} = \sum_{j=1}^{k} \rho_{\text{пк}j}$$

Для приближённой оценки механических потерь могут быть использованы эмпирические формулы типа

$$P_{\text{м}} = A + BC_{\text{т}} \quad (4)$$

где *A, B* – постоянные коэффициенты;

$C_{\text{т}}$ – средняя скорость поршня, м/с.

Приведенные выражения дают возможность оценить факторы, обусловливающие потери на трение, как основной составляющей механических потерь. Потери на трение в механизмах определяются размерами их деталей, нагруженностью, скоростным режимом и вязкостью масла [4].

При снижении потерь на трение имеет большое значение уменьшение размеров контактных поверхностей и снижение вязкости масла при условии, что это не вызывает чрезмерного увеличения удельной нагрузки и снижения несущей способности масляной пленки [5].

Эти направления широко используются в современных двигателях [6]. Снижается высота поршневых колец, уменьшается их число, сокращаются как высота направляющей части поршня, так и диаметр и длина подшипников коленчатого вала. Наблюдается также тенденция к уменьшению вязкости моторного масла, которая при температуре 373К составляет 8 см2/с для бензиновых двигателей и 10 см2/с для дизелей.

Снижению потерь на трение способствует ограничение или даже уменьшение частоты вращения коленчатого вала, что также используется в современном двигателестроении [7]. Необходимо иметь в виду, что механические потери существенно зависят от соблюдения при изготовлении и сборке технических условий на шероховатость поверхностей пар трения, характера их сопряжения, отклонений в макрогеометрии и качества моторного масла горных машин.

Однако определение свойств потенциальных масел в процессе эксплуатации силовых установок горных машин представляет большие трудности. Существующие методы контроля качества моторных масел являются трудоёмкими и требуют оснащения лабораторий специальным оборудованием. Для обеспечения надёжности горных машин необходимо разрабатывать оперативные методы оценки качества масел непосредственно на двигателе, задачами которых являются определение обобщённого критерия качества для последующего воздействия на эксплуатируемый объект (АТС)через электронную систему управления (ЭСУ) с целью увеличения его ресурса и надёжности работы[8].

Метод оперативного контроля моторного масла горных машин заключается в автоматизации процесса оценки качества масел, в осуществлении коррекции работы силовых агрегатов на всех диапазонах эксплуатационных режимов в случае применения некачественного масла путём оптимизации ЭСУ при помощи обратной связи с системой контроля качества масел и защитить детали и узлы силового агрегата от преждевременного износа, непосредственно характеризующих эффективность энергопреобразования двигательной установки горных машин [9]. Оптимальное управление установленных показателей разработанной системой представляет собой чрезвычайно сложную техническую задачу. В рамках данной задачи была разработана имитационная система оценки качества масла транспортных средств (ПМ №194054 от 07.06.2019), которая расширит возможности способов исследования качества масла на

всех эксплуатационных режимах [11]. Все перечисленные компоненты данного технического решения представлены на рис. 1.

Разработанная система контроля качества моторного масла транспортных средств, содержит датчик частоты вращения коленчатого вала, датчик массового расхода топлива, датчик давления газов в цилиндре двигателя, датчик положения дроссельной заслонки, датчик детонации, датчик угловых отметок коленчатого вала, датчик концентрации кислорода, датчик массового расхода воздуха и газоанализатор вредных выбросов в продуктах сгорания, установленные на испытуемом двигателе, электронный блок управления испытуемым двигателем, аналого-цифровой преобразователь, персональный компьютер с монитором, модель электронного блока

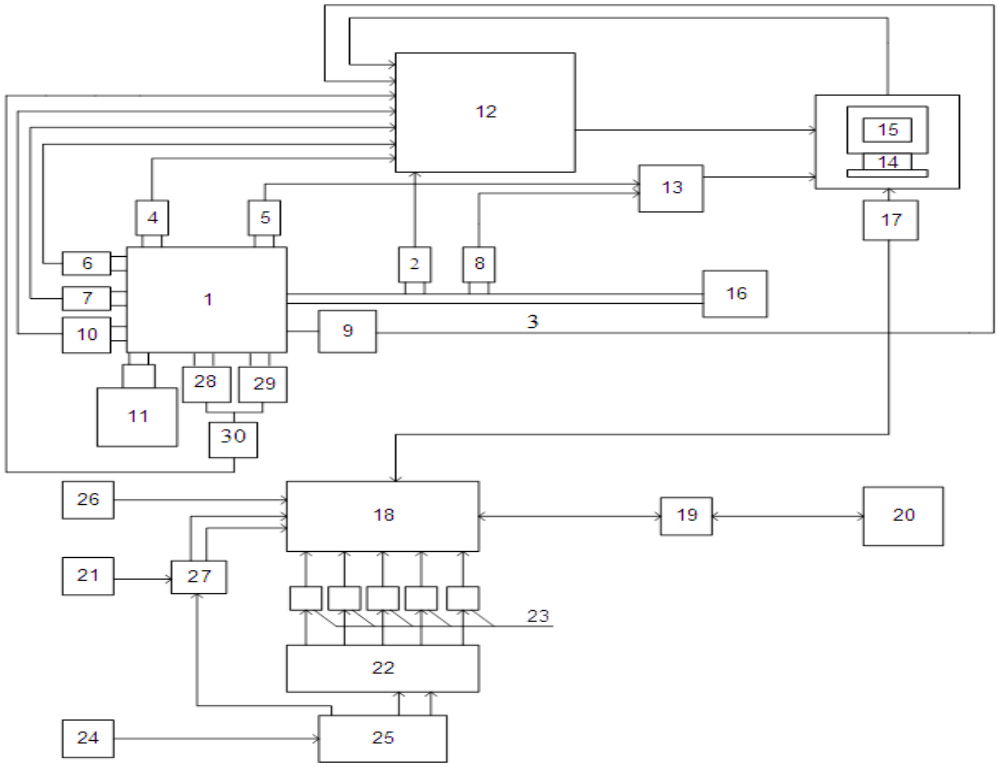


Рис.1. Общая схема имитационной системы контроля качества моторного масла горных машин, где:1 - испытуемый двигатель;2 - датчик частоты вращения коленчатого вала;3 – датчик распределительного вала;4 - датчик давления газа в цилиндре двигателя;5 - датчик положения дроссельной заслонки;6 - датчик детонации;7 - датчик угловых отметок коленчатого вала;8 - датчик концентрации кислорода;9 - датчик массового расхода воздуха;10 - газоанализатор вредных выбросов продуктов сгорания;11 - блок управления двигателем;12 - электронный блок управления;13 - аналого-цифровой преобразователь;14 - персональный компьютер с монитором;15 - нагружающее устройство;16 - блок управления;17 - электронный блок управления;18 - интерфейс связи;19 - имитатор ключа зажигания;20 - генератор-имитатор;21 - коммутатор;22 - блок задания режимов;23 - устройство управления работой;24 - устройство сопряжения блока управления двигателя и электронного блока управления;25 - устройство сопряжения электронного блока управления и устройства управления работой;26 - датчик контроля качества топлива;27 - датчик температуры топлива;28 - электронный блок оценки результатов датчиков топлива;29 - датчик температуры моторного масла;30 - датчик контроля качества моторного масла;31 - электронный блок оценки результатов

управления макетом двигателя, ее интерфейсом связи с персональным компьютером и монитором, имитатор ключа зажигания, генератор - имитатором сигналов вышеназванных датчиков, коммутатор указанных сигналов. Блок задания режимов дополнительно снабжен датчиком оценки качества моторного масла (емкостной измерительный элемент), датчиком температуры моторного масла и электронным блоком оценки результатов измерений данных датчиков.

Вывод. Таким образом, проведенные экспериментальные и теоретические исследования в этой области установили, что разрабатываемые технические решения позволили существенно сократить потери на трении с одновременным улучшением экономических, экологических параметров и надежности на всех эксплуатационных режимах силовых агрегатов. Следовательно, контроль качества масла позволит обеспечить оптимизацию вязкости масла, уменьшение гидравлических потерь на впуске и выпуске, могут способствовать существенному снижению механических потерь. Важной особенностью системы оценки качества масел транспортных средств является наличие в ней возможности осуществлять процесс оперативной оценки качества масел с целью оптимального управления силового агрегата при помощи обратной связи системы, и обеспечить тем самым повышение ресурса горных машин. [12].

Список литературы: 1. Сафиуллин Р.Н. Теоретические основы эффективности энергопреобразования в ДВС и методы ее повышения. Монография. СПбГАСУ, 2011. 2. Сафиуллин Р.Н., Морозов Е.В. ПМ 194054 от 07.06.2019 Имитационная система оценки качества моторного масла транспортных средств. 3. Сафиуллин Р.Н. Интеллектуальные бортовые транспортные системы на автомобильном транспорте: монография / Р.Н. Сафиуллин. - М.-Берлин: Директ-Медиа, 2017. – С.354. 4. Safiullin R.N., Afanasyev A.S., Rezchenko V.V. The Concept of Development of Monitoring Systems and Management of Intelligent Technical Complexes. Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 237, p. 322-330. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322 5. Системы автоматизации контроля движения на автомобильном транспорте. Монография. Под редакцией Р.Н. Сафиуллина. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. —. — ISBN 978-5-8114-3655-22019, соавторы: Резниченко В.В., Калюжный А.Ф.-34 п.л. 6. R.N. Safiullin A model for justification of the numer of traffic enforcement facilities in the region. \Kerimov M., Afanasyev A., Marusin A \ В сборнике: Transportation Research Procedia 2018. С. 493-499. 7. Evaluation of Functional Efficiency of Automated Traffic Enforcement Systems / Mukhtar Kerimov, Ravil Safiullin, Alexey Marusin, / Сборник: Transportation Research Procedia 2017. С. 288-294. 8. *Сафиуллин Р.Н., Морозов Е.В* Теоретические основы совершенствования технологии эксплуатации технических систем контроля движения автотранспортной техники различного уровня. Журнал Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2 (73). С. 153-160. 9. Di X., Liu H.X., Ban X.(J.). Second best toll pricing within the framework of bounded rationality // Transportation Research Part B. 2016. Vol. 83. P. 74-90. doi:10.1016/j.trb.2015.11.002. 10. Montgomery, F.O., Clark, S.D., May, A.D. Use of coordinated signal settings to reduce junction spillback // IEE Colloquium on Electronics in Managing the Demand for Road Capacity. – 1993. – № 205. – P. 1 – 10. Quinn, D.J. A review for queue management strategies // Traffic Engineering and Control. – 1992. – Vol. 33 – № 11. 11. Патент на ПМ №174174 РФ Автоматизированная система контроля данных о техническом состоянии двигателя внутреннего сгорания транспортного средства / Сафиуллин Р.Н. / Опубл. 05.10.2011. Бюл. №28. 12. Козлов, Л. Н., Урличич, Ю. М., Циклис, Б. Е. О концептуальных подходах формирования и развития интеллектуальных транспортных систем в России // Транспорт Российской Федерации. — 2009. — № 3–4 (22–23).

ЭВОЛЮЦИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В МАТЕРИАЛАХ С МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКИМ ЗАТУХАНИЕМ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Скворцов А.И. *(ВятГУ, г. Киров, Россия)*
Тел. +7 (8332) 74-24-91; E-mail: skvorcov@vyatsu.ru

Abstract: *The evolution of the domain structure of ferromagnetics in mechanical fluctuations is considered. The qualitative correspondence between the complex parameter of physical properties and the thickness of the boundaries of magnetic domains is shown.*
Keywords: *Ferromagnetic, domain structure, physical properties, thick boundaries of magnetic domains.*

Введение. В работах [1, 2] сравниваются две модели микромеханизма магнитомеханического затухания в ферромагнитных материалах, связанного с движением, эволюцией доменных границ: микротокового и деформационного. Предположено, что наиболее соответствующий реальному микромеханизму магнитомеханического затухания является микротоковый, учитывающий, в частности, толщину доменных границ.

Представляет интерес проанализировать изменение вида, параметров доменной структуры при механических колебаниях в зависимости от физических свойств ферромагнетика, характера механической нагрузки при измерении магнитомеханического затухания с позиции его микротокового механизма. Знание таких закономерностей важно при разработке сплавов с высокой демпфирующей способностью.

Результаты исследования и их анализ

Для принципиального понимания процессов изменения доменной структуры при механических колебаниях необходим анализ деформации при растяжении-сжатии в направлениях, параллельном и перпендикулярном по отношению к векторам намагниченности $\boldsymbol{M_s}$ основных доменов (рис. 1. *а–в*).

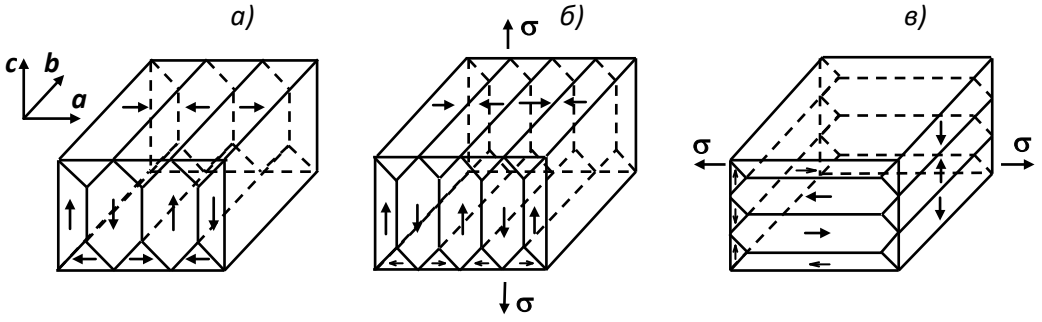


Рис. 1. Схемы изменения доменной структуры ферромагнитного параллелепипеда (*а* – исходное состояние) при его растяжении вдоль (*б*) и перпендикулярно (*в*) по отношению к направлениям векторов намагниченности основных доменов в исходном состоянии. ***a***, ***b***, ***c*** – осевые вектора кристаллической решетки

При растяжении вдоль направления векторов намагниченности основных доменов (рис. *б*) принципиальная картина доменной структуры не меняется, по крайней мере, до σ = 210–290 МПа [3, 4] независимо от того, какого типа кристаллографическая плоскость {100} или {110} совпадает с поверхностью образца. Растяжение сопровождается 1) смещением 180° доменных границ; 2) уменьшением объема тех замыкающих доменов, вектор намагниченности которых перпендикулярен направлению деформации, чему сопутствует возникновение магнитных полей рассеяния в тех местах границ зерен, где замыкающие домены, уменьшаясь в объеме, расходятся и «размыкают» тем самым основные домены; 3) ростом кинжаловидных доменов; 4) дроблением основных доме-

нов (при напряжениях, начиная с $\sigma \approx 50$ МПа [5]). Результат такого растяжения (в упрощенном виде) проиллюстрирован на рис. *б*. При снятии нагрузки ($\sigma_{max} \approx 120$ МПа) имеет место гистерезис доменной структуры [6].

При растяжении в направлениях, перпендикулярных векторам намагниченности основных доменов, (рис. *в*) доменная структура изменяется значительно сильнее. Последовательность ее изменения следующая. В большинстве случаев после небольшой подвижки доменных границ, роста замыкающих доменов с направлением векторов намагниченности, совпадающем с направлением деформации, наблюдается исчезновение на поверхности образца структуры А (на поверхности видны основные домены – рис. *а*, вид спереди) или В (на поверхности видны замыкающие домены – рис. *а*, вид сверху) в зависимости от того, какая структура наблюдалась на поверхности до ее исчезновения. После дальнейшего небольшого увеличения напряжений на поверхности появляется другой тип структуры – В вместо А или наоборот, т.е. происходит перестройка доменной структуры А–В. Результат перестройки доменной структуры типа А–В показан на рис. *в*. При дальнейшем увеличении нагрузки наблюдаются процессы, аналогичные уже рассмотренным процессам при растяжении вдоль направления векторов намагниченности основных доменов. Во второй четверти периода колебаний будет происходить обратный процесс изменения доменной структуры. При этом он может быть безгистерезисным (почти безгистерезисным), если амплитуда деформации невелика, или носить гистерезисный характер (доменная структура не возвращается в исходное состояние), если амплитуда колебаний достаточно большая (130–260 МПа). В третьей и четвертой четвертях периода колебаний образец будет в сжатом состоянии. При этом будут протекать процессы изменения доменной структуры, аналогичные рассмотренным, в другом комплексе кристаллографических плоскостей и осей легкого намагничивания. Следует отметить, что приведенные ранее величины напряжений относятся к кремнистому железу [3–6].

Перестройка доменной структуры типа А–В является наиболее динамичным механизмом. Для него характерны три типа изменений в доменной структуре, связанных с эволюцией доменных границ. 1. Превращение одного типа доменных границ в другой, например, путем расщепления 180° границы на две 90° границы или, наоборот, слияния двух 90° границ в одну 180° границу. 2. Аннигиляция 90° доменных границ. 3. Образование новых 180° доменных границ в результате отрыва замыкающих доменов от поверхности кристалла.

С позиции термодинамики поверхностей на изменение площади межфазной поверхности δS, в данном случае площади доменных границ, необходима энергия δW:

$$\delta W = \gamma \delta S, \qquad (1)$$

где γ – поверхностная энергия единицы площади доменной границы. Т.е. динамика механизма внутреннего трения магнитомеханической природы при механических колебаниях представляет собой движение доменных границ, эволюцию доменной структуры при ее перестройке, сопровождающуюся изменением площади доменных границ.

При анализе перестройки доменной структуры при механических колебаниях необходимо учитывать размерный фактор доменных границ, который имеется в формуле для параметра вязкого затухания, обусловленного микротоками

$$\beta_т = \mu_0^2 n M_s^2 (h+4\Delta)/\rho, \qquad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, величина n равна 1 и 2 соответственно для 90° и 180° доменных границ, M_s – намагниченность насыщения домена, h – поперечный размер образца, Δ – эффективная толщина доменной границы, ρ – удельное электросопротивление, [7].

При помощи уравнения (2) можно оценить эффективную толщину доменной границы:

$$\Delta = k_1 \beta_т \rho / M_s^2 - k_2, \qquad (3)$$

где $k_1 = 1/\mu_0^2 n$ – коэффициент, характеризующий доменную структуру, $k_2 = h/4$ – коэффициент, характеризующий зеренную структуру. Из уравнения (3) видно, что по численным

значениям характеристик $\beta_т$, ρ и M_s можно судить о эффективной толщине доменной границы. Если в уравнении (3) принять $\beta_т = \delta_m$, где δ_m – максимум логарифмического декремента на его экспериментальной амплитудной зависимости, то сравнение по данным таблицы параметра $\delta_m\rho/M_s^2$ с толщиной границ магнитных доменов Δ для ферромагнитных металлов показывает, что имеет место качественное соответствие значений этих характеристик. Основываясь на таком соответствии, можно предположить, что при одинаковых доменной (k_1) и зеренной (k_2) структурах можно корректно проводить сравнительную оценку толщины границ магнитных доменов и в ферромагнитных сплавах по результатам измерения магнитомеханического затухания при известных значениях удельного электросопротивления и намагниченности насыщения (индукции насыщения) сплава.

Таблица 1. Значения параметра $\delta_m\rho/M_s^2$ и толщины границ магнитных доменов Δ при комнатной температуре для ферромагнитных металлов

Параметры	Ni	Fe	Co
$\delta_m\rho/M_s^2$, усл. ед.	37	5,8	1,7
Δ, нм (по данным работы [6])	410–680	29–100	16

Выводы

1. Наиболее динамичным механизмом магнитомеханического затухания является перестройка доменной структуры при растяжении-сжатии в направлениях, перпендикулярных векторам намагниченности основных доменов. Ей характерны, по крайней мере, три типа изменений в доменной структуре, связанных с эволюцией доменных границ: превращение одного типа доменных границ в другой, аннигиляция 90° доменных границ, образование новых 180° доменных границ.

2. Показано, что между параметром, включающим в себя магнитомеханическое затухание, удельное электросопротивление, намагниченность насыщения, и толщиной границ магнитных доменов имеется для ферромагнитных металлов качественное соответствие. На основании этого соответствия предположено, что при сопоставимых доменной и зеренной структурах можно корректно проводить сравнительную оценку толщины границ магнитных доменов и в ферромагнитных сплавах по результатам измерения магнитомеханического затухания при известных значениях удельного электросопротивления и намагниченности насыщения (индукции насыщения) сплава.

Список литературы: 1. Скворцов А.И., Мельчаков М.А. Соотношение между магнитомеханическим затуханием и параметрами магнитных доменов в демпфирующих сплавах железа // Машиностроение и техносфера XXI века / Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 23–29 сентября 2019 г. Донецк: ДонНТУ, 2019. С. 394–395. **2.** Скворцов А.И., Мельчаков М.А. Демпфирующие сплавы железа для снижения вредных вибраций и шумов в машинах и механизмах // Главный механик. 2020. № 4. С. 26–29. **3.** Киренский Л.В., Дылгеров В.Д., Савченко М.К. Динамика доменной структуры в кристаллах кремнистого железа // Известия АН СССР. Серия физическая. 1957. Т. 21, № 8. С. 1168–1169. **4.** Шур Я.С., Зайкова В.А. О влиянии упругих напряжений на магнитную структуру кристаллов кремнистого железа // Физика металлов и металловедение. 1958. Т. 6, № 3. С. 545–555. **5**. Драгошанский Ю.Н., Зайкова В.А., Шур Я.С. О влиянии упругого растяжения на доменную структуру кристаллов кремнистого железа и кобальта // Физика металлов и металловедение. 1968. Т. 25, № 2. С. 289–297. **6.** Зайкова В.А., Шур Я.С. Изменение магнитной структуры кристаллов кремнистого железа под действием упругих напряжений // Известия АН СССР. Серия физическая. 1958. Т. 12, № 10. С. 1185–1189. **7.** О'Делл Т.Н. Ферромагнитодинамика. М.: Мир, 1983. 253 с.

УСОВЕРШЕСТВАВАНИЕ РЕМОНТА ВАЛА ПОВОРОТА ЭКСКАВАТОРОВ ЭКГ-5А И ЭКГ-10

Собиров Т.О., **Бобокулов А.Н.**, **Султонов А.Н.** *(Навоийский горно металлургический комбинат, Республика Узбекистан)*
Тел./Факс: +998 (93) 5217673; E-mail: T.Sobirov@ngmk.uz.

Abstract: *The article discusses the change in the design of the main swing shaft of the excavator EKG-5A and EKG-10, the change in design both for the revision of the used swing shaft and the removable gear of the swing shaft. Replacing the removable gear on the swing reducer without dismantling it saves time for repairs and reduces the cost of manufacturing the main swing shaft.*
Key words: *Main swing shaft, removable gear, swing reducer, axis of the main swing shaft.*

Открытый способ добычи неоспоримо лидирует сегодня как в мировой горной промышленности, так и в Узбекистане. Основным видом горно-выемочной техники на открытых горных работах в НГМК и АГМК стали электрические экскаваторы ЭКГ-5А, ЭКГ-10, ЭКГ-15М и ЭКГ-20К. На сегодняшний день в карьерах комбинатов эксплуатируются: ЭКГ-5А с вместимостью ковша 5 м³ – 21 единиц, ЭКГ-10 с вместимостью ковша 10 м³ – 27 единиц, ЭКГ-15М с вместимостью ковша 15 м³ – 11 единиц и ЭКГ-20К с вместимостью ковша 20 м³ – 9 единиц. Преимуществом электрических экскаваторов является простата в конструкции, возможность изготовления запасных частей на базе предприятиях Республики Узбекистан, надежность и долговечность электрических двигателей относительно в сравнения с двигателям внутреннего сгорания. Недостатками экскаваторов являются - это отсутствие мобильности при перегонах и зависимость от электроэнергии.

Конструкция электрических экскаваторов состоит из механизма подъема, механизма поворота, механизма напора и механизма хода. Приводом вышеуказанных механизмов является мощные электродвигатели с оборото-понижающими редукторами.

Редуктор поворота совместно с электродвигателем и тормозным механизмом представляет собой важную часть механизма, отвечающую за поворот экскаватора. Механизм поворота экскаватора предусмотрен для вращения поворотной части вокруг вертикальной оси и предназначен для эксплуатации в самых различных погодных условиях *(от минус 25 до плюс 40 ° градусов по Цельсию)*. Назначение редуктора поворота в данной цепи довольно простое и вполне обусловленное – изменять крутящий момент и частоты вращения. Сам редуктор поворота представляет собой корпус, отлитый из стали, с внутренними шестернями зацепления. Внутри корпуса редуктора расположен насос, который снабжает детали редуктора необходимой смазкой. На экскаваторах ЭКГ-5А и ЭКГ-10 имеются два поворотных редуктора с трёхступенчатой передачей и выходом главного вала поворота на венцовую шестерню. На рис. 1 представлены редуктора поворотов ЭКГ-5А (а) и ЭКГ-10 (б). В рисунке 1 номером 17 (ЭКГ-5А) и 13 (ЭКГ-10) показаны валы шестерни поворота экскаваторов.

В Республике Узбекистан главный вал поворота изготавливается с дорогостоящих поковок, импортированных с зарубежья.

В условиях комбината наработка главного вала поворота составляет для ЭКГ-5А около 7000 часов, а для ЭКГ-10 около 6000 часов. Таким образом, замена главных валов поворота на каждом экскаваторе происходит два раза в год. В основном изнашиваются зубья (m=30, z=12) главного вала поворота, остальная часть остается неповрежденной.

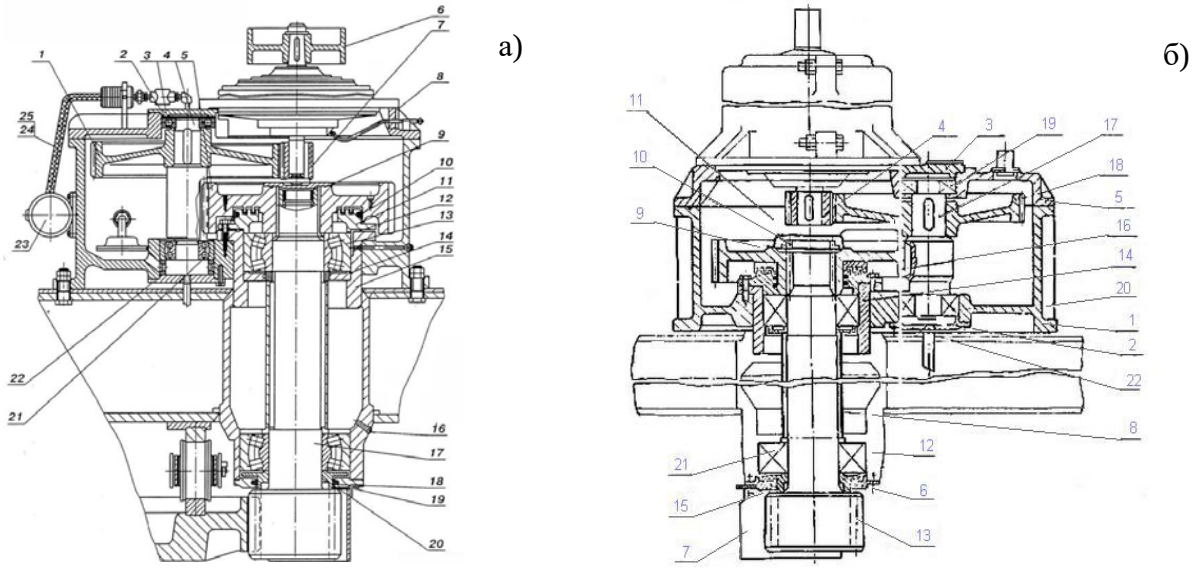


Рис. 1. Редуктора поворота экскаваторов ЭКГ-5А (а) и ЭКГ-10 (б)

Редуктор поворота ЭКГ-5А

1- Блок
2- Подшипник №3618
3- Крышка
4- Вал-шестерня
5- Колесо
6- Шкив
7- Шестерня
8- Прокладка
9- Кольцо 170-180-58-2-2
10- Лента СП-1500-18-16
11- Крышка лабиринтная
12- Кольцо Ф8
13- Подшипник №3636
14- Крышка
15- Стакан
16- Масленка
17- Вал-шестерня z=12 m=30
18- Манжета
19- Крышка
20- Стакан
21- Подшипник №318
22- Кольцо 200-215-85-2-2
23- Насос Г11-11А
24- Рукав 8х16,5-1,6 L=455
25- Рукав 8х16,5-1,6 L=955

Редуктор поворота ЭКГ-10

1- Корпус редуктора
2- Крышка
3- Крышка
4- Шестерня ведущая z=23 m=8
5- Крышка редуктора
6- Половина
7- Кожух
8- Труба распорная
9- Шпонка
10- Гайка М 160х4
11- Крышка
12- Крышка сквозная
13- Вал-шестерня
14- Стакан
15- Манжета
16- Колесо зубчатое z=70 m=12
17- Вал-шестерня z=12 m=14
18- Колесо зубчатое z=103 m=8
19- Роликоподшипник №3622
20- Роликоподшипник №3626
21- Роликоподшипник №3644
22- Роликоподшипник №3640
23- Кольцо 292*16

Для замены вала демонтируются все детали редуктора, и после этого снимается главный вал поворота. Также, после установки нового вала, устанавливаются все остальные детали и в последней очередь, монтируется электродвигатель с тормозным устройством.

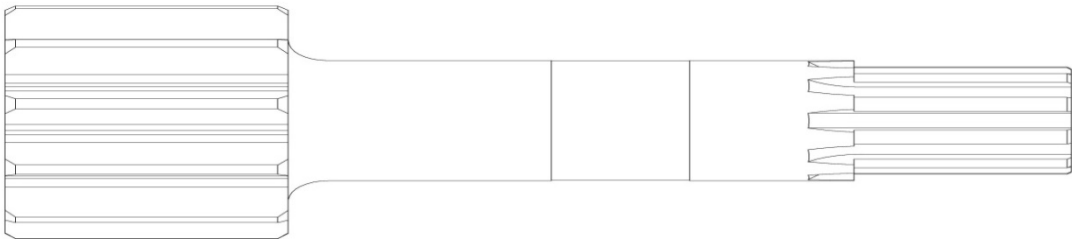


Рис. 2. Главный вал поворота ЭКГ-5А

В целях снижения времени на изготовления главного вала поворота и экономии затрат на приобретения дорогостоящих поковок, предлагаем внести следующие изменения в конструкции и технологии изготовления главного вала поворота:

Технологии изготовления предлагаемого главного вала поворота.

1. Срезаются изношенные зубья и место зубьев растачивается до диметра оси вала.
2. Нарезываются шлицы на месте зубьев. (Рис.3)

Рис. 3. Ось главного вала поворота.

3. Изготавливается шестерня m=30, z=12 с нарезанием шлицев внутри шестерни. (Рис.4.)

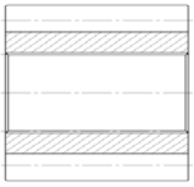


Рис. 4. Съемная шестерня m=30, z=12.

4. Съемную шестерню соединяют к оси вала и фланец крепит болтами М20. (Рис.5)

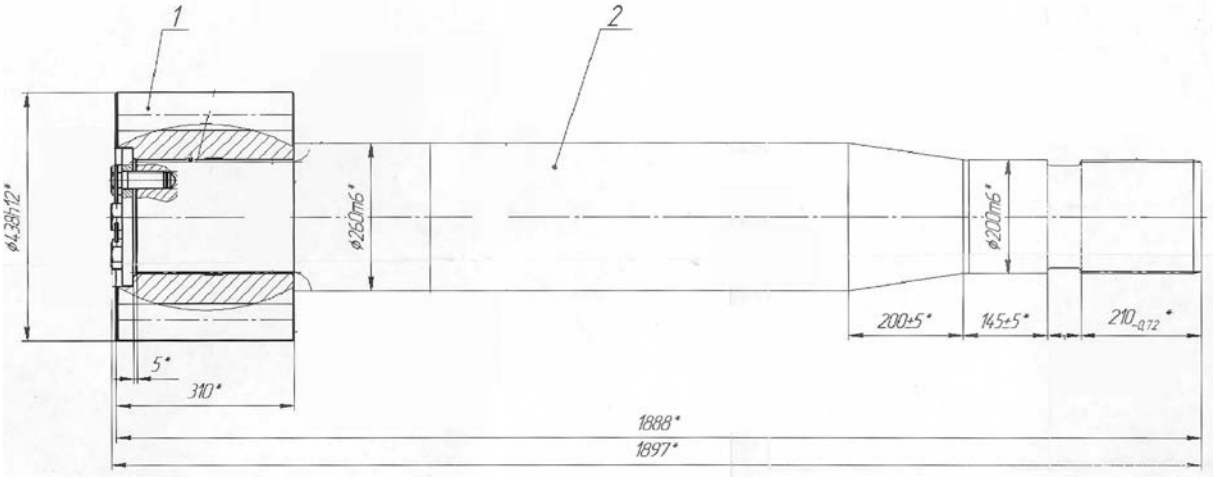


Рис. 5. Главный вал поворота в сборе с съемной шестерней

1- Ось главного вала поворота, 2- съемная шестерня.

2- Для замены главного вала поворота экскаваторов ЭКГ-5А и ЭКГ-10 на ремонт затрачивается время около 12 часов с бригадой слесарей в количестве 3-человек и с применением автокрана. Имея исходные данные по затраченному времени на ремонт, выполним расчеты и получим результаты простоя как одной единицы экскаватора, так и всего по НГМК парка экскаваторов ЭКГ-5А и ЭКГ-10:

$$T_з = t_в * n = 12 * 2 = 24 \text{ часа}, \quad (1)$$

где $T_з$– время на замену двух валов поворота на одной единицы экскаватора за год; $t_в$– время затраченное на замену валов на одном экскаваторе; n – количество замен валов в год.

Время на замену главных валов поворота экскаваторов ЭКГ-5А и ЭКГ-10 по комбинату:

$$T_{год} = N_{ЭКГ-5} + N_{ЭКГ-10} * T_з = (21 + 27) * 24 = 1152 \text{ часов}, \quad (2)$$

где $T_{год}$– время, затраченное на замену валов за год на все экскаваторы ЭКГ-5А, ЭКГ-10; $N_{ЭКГ-5}$ – количество экскаваторов типа ЭКГ-5А по комбинату; $N_{ЭКГ-10}$- количество экскаваторов типа ЭКГ-10 по комбинату.

Из расчета видно, что за год по всему комбинату затрачивается время в количестве 1 152 часов, т. е. 48 суток простоя, вовремя замены главных валов поворота.

После установки предлагаемого главного вала поворота в экскаваторы, меняется только изношенная съёмная шестерня. При замене съемной шестерни главного вала поворота затрачивается около 1 часа времени. Имея исходные данные по затраченному времени, выполним расчеты и получим результаты простоя как одной единицы экскаватора, так и всего по НГМК парка экскаваторов ЭКГ-5А и ЭКГ-10:

$$T_з = t_ш * n = 1 * 2 = 2 \text{ часов}$$

где $t_ш$ – время затраченное на замену съемной шестерни на одном экскаваторе;

Время на замену съемной шестерни экскаваторов ЭКГ-5А и ЭКГ-10 по комбинату:

$$T_{год} = (N_{ЭКГ-5} + N_{ЭКГ-10}) * T_з = (21 + 27) * 2 = 96 \text{ часов},$$

где $T_{год}$ - время, затраченное на замену съемной шестерни за год на все экскаваторы ЭКГ-5А, ЭКГ-10;

Из расчета видно, что за год по всему комбинату затрачивается время в количестве 96 часов, т. е. 2 сутки простоя для замены съемной шестерни.

Изходя из выше предложенного и по результатам расчетов при замене съемной шестерни по предложенному методу на экскаваторах ЭКГ-5А и ЭКГ-10 за год по комбинату время простоя уменьшается примерно на 1056 часов (1 152-96=1056), т.е. экскаваторы работают на 44 (1056/24=44) дня больше относительно замены главных валов поворота традиционным методом. Кроме того, при замене съемной шестерни экономится денежные средства на приобретения дорогостоящих поковок и снижаются трудозатраты обслуживаюшего персонала.

Список литературы: 1. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров. – М.: ММГ, 2011 г. **2.** Квагинидзе В.С., Козовой Г.И. Экскаваторы на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет-2017г. **3.** Дроздова Л. Г., Курбатова О. А. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт. Учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007 г. **4.** Научно-технический и производственный журнал Горный вестник Узбекистана. №80 – 2020 г. **5.** Горный информационно-аналитический бюллетень №6-1/2020 - 2020 г. **6.** Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин – Москва 2008 г. Изд-во «Высшая школа». **7.** Анурьев В.И. Справочник конструктора – машиностроителя. Изд.7-е в 3-х тт. –М. Машиностроение, 1992. **8.** Орлов П.И. Основы конструирования- М.: Машиностроение, т.1, т.2, 1988. **9.** ГОСТ 16532-70. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии.

УДК 621.9.011

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ С КОНИЧЕСКОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ИЗ ЛИСТОВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ПЕРЕУТОНЕНИЕМ

Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Емельянов В.В. *(ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». Москва, РФ)*
Тел. +7(499) 972-95-27; E-mail: sen@stankin.ru

Abstract: *The article provides a theoretical analysis of the mathematical formulation of the problem of rotational drawing of parts with a conical generatrix. A complete statement of the problem with boundary conditions is formulated and a method for the analytical solution of this problem is proposed. The general analysis of the proposed solution is carried out.*
Key words*: mathematical model, rotary drawing, bimetallic blanks.*

1. Введение

При локальном пластическом деформировании заготовки происходит перемещение локального очага деформации, сформированного давильным инструментом вдоль образующей заготовки. В общем случае объем локального очага деформации замкнут поверхностями: упруго деформируемых участков заготовки, участка, контактирующего с рабочим инструментом – роликом, и участка со свободной поверхностью. Сила деформирования зависит от граничных условий на замкнутых поверхностях, указанных выше, а также от механических характеристик материала и температурного градиента в очаге деформации. К особенностям локальных способов деформирования можно отнести следующие: жесткая недеформированная часть заготовки обеспечивает устойчивость технологического процесса путем предотвращения складкообразования и изгиба; недеформированная часть заготовки создает условия для увеличения в очаге деформации допустимой степени деформации за один переход, что расширяет технологические возможности процесса; в некоторых случаях недеформированная часть заготовки используется для передачи энергосиловых параметров от машины (осевые силы, крутящие и изгибающие моменты) в зону пластической деформации; с уменьшением площади контакта заготовки с инструментом значительно снижаются полные силы деформирования.

Дальнейшее развитие перспективных технологий, связанных с локальными методами обработки металлов давлением, в том числе ротационной вытяжки, должно быть направлено по пути совершенствования теоретической базы процессов, а также поиска новых технических решений [1, 2].

2. Расчетные схемы ротационной вытяжки биметалла

Построим обобщенную аналитическую модель процесса РВП стенки изделия, но имеющую свои ограничения, характерные для биметаллической системы, состоящей из материалов с сильно отличающимися механическими свойствами. В соответствии с новой расчетной схемой выполним исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) очага пластической деформации. В зоне 1 по аналогии с процессом продольной прокатки [3, 4] наблюдается схема объемного напряженно-деформированного состояния. Основную роль в этой зоне играют нормальные напряжения, а касательными можно пренебречь. Упомянутая зона будет исследована в двух взаимно ортогональных плоскостях. В зоне 2, расположенной на участке радиуса закругления деформирующего ролика, происходит непосредственный контакт деформирующего инструмента с листовой заготовкой, принимается схема плоской

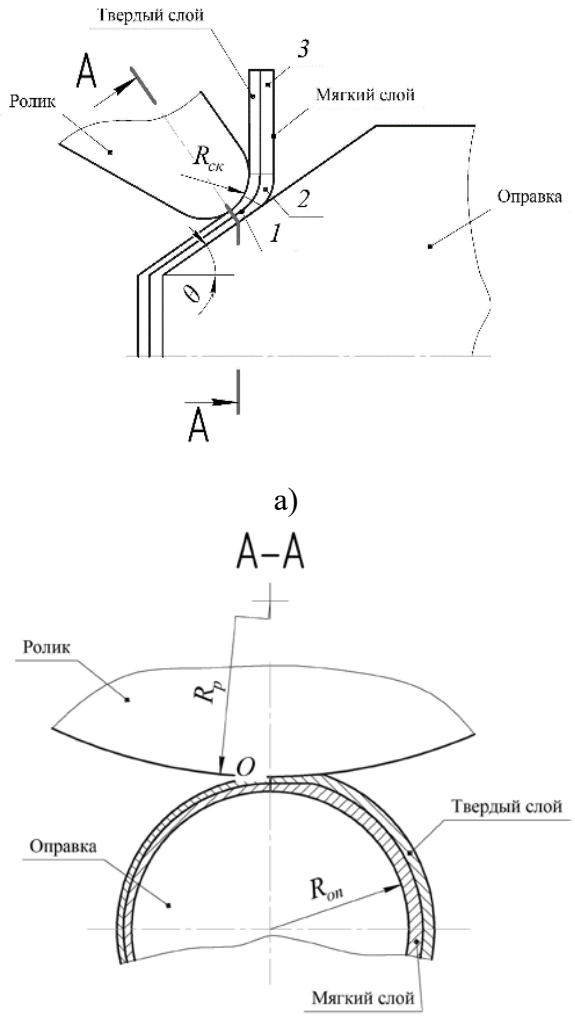


Рис.1. Схемы процесса РВП биметалла в продольной (а) и поперечной (б) плоскостях: 1, 2 и 3 – характерные зоны деформации

деформации. Кроме нормальных напряжений, в этой зоне действуют и касательные напряжения, соизмеримые с величиной нормальных напряжений, и не учет которых может привести к значительным ошибкам. Во фланцевой части полуфабриката выделим зону 3, где деформирующий ролик практически не контактирует с заготовкой, поэтому здесь не наблюдается активной фазы пластического течения металла. Зону 3 будем считать жесткой, где могут идти процессы потери устойчивости фланцевой частью полуфабриката при ротационной обработке, связанные с влиянием инерционных сил, эта часть полуфабриката не участвует в теоретическом анализе.

3.Напряженное состояние биметалла на радиусном участке деформирующего ролика

Принятая для исследования полей напряжений в зоне 2 расчетная схема процесса пластического деформирования листовой биметаллической заготовки, опирающейся на коническую оправку, представлена на рис.2 [5], здесь радиус деформирующего ролика обозначен – $R_р$; радиус скругления рабочего участка ролика – $R_{ск}$, а θ – половина угла конуса (см. рис.1). Биметаллическая листовая заготовка имеет твердый слой, параметры которого обозначены на схеме буквой – Т, а параметры мягкого слоя – буквой М.

Будем анализировать поля напряжений заготовки поэтапно, начиная с зоны фланцевой части заготовки, и далее в направлении вершины конической оправки.

Для удобства исследования выделенного в заготовке элементарного объема примем полярную систему координат (ρ, φ) с началом, совпадающим с центром радиуса скругления деформирующего ролика $R_{ск}$. В качестве границ выделенного элементарного объема для твердого и мягкого слоя будем рассматривать радиусы $R_{скТ}$, $R_{скМ}$, и соответствующие углам $\varphi = 0$ и $\varphi = \varphi_m$ лучи. Определим также границу между твердым и мягким слоями по радиусу – $R_{скН}$. В выделенном элементарном объеме действуют радиальные сжимающие напряжения σ_ρ, тангенциальные растягивающие напряжения σ_φ, а на поверхности контакта ролика с заготовкой – касательные напряжения $\tau_{\rho\varphi}$.

Дифференциальные уравнения равновесия в частных производных для плоской задачи в полярной системе координат имеют вид [6, 7]:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\sigma_\rho}{\partial\rho}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_{\rho\varphi}}{\partial\varphi}+\frac{\sigma_\rho-\sigma_\varphi}{\rho}=0;\\ \frac{\partial\sigma_\varphi}{\partial\varphi}+\rho\frac{\partial\tau_{\rho\varphi}}{\partial\rho}+2\tau_{\rho\varphi}=0\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

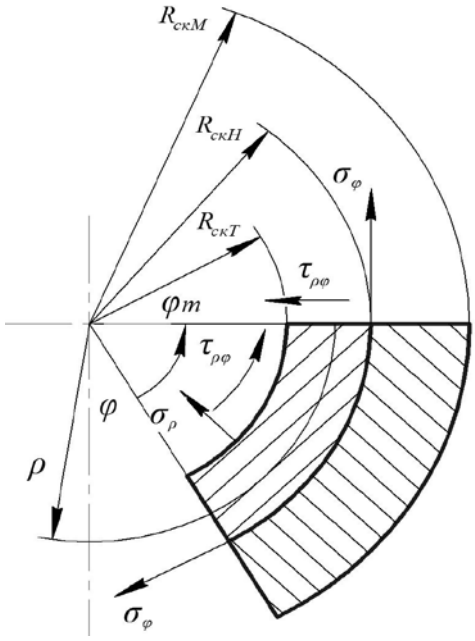


Рис. 2. Схема напряженного состояния участка биметаллической заготовки при РВП, расположенной на радиусе скругления деформирующего ролика

Энергетическое условие пластичности с учетом знаков напряжений примем в виде линеаризованного выражения Губера-Мизеса:

$$\sigma_\varphi-\sigma_\rho=2k_c. \quad (2)$$

Постоянную пластичности для биметалла k_c примем с учетом отношения толщин каждого слоя, входящего в композицию, к общей толщине биметалла [8]:

$$k_c=k_T\beta+k_M(1-\beta), \quad (3)$$

здесь $k_\text{Т}$ и $k_\text{М}$ – постоянные пластичности для твердого и мягкого слоя;

$\beta=\frac{R_{скМ}-R_{скН}}{R_{скМ}-R_{скТ}}$ – отношение толщины мягкого слоя к общей толщине биметалла (см. рис. 2).

В итоге имеем систему, составленную из трех уравнений, совместным решением которых, найдем три неизвестных напряжения σ_φ, σ_ρ, $\tau_{\rho\varphi}$. Для снятия статической неопределенности задачи, граничные условия для каждого слоя биметалла требуется также задать в напряжениях, их вид выбирается из физических соображений.

На контактной поверхности деформирующего ролика и твердого слоя, т.е. на радиусе $R_{скТ}$, действуют максимальные касательные напряжения, определяемые зависимостью, $\tau_{\rho\varphi}=-m_ck_c$, здесь m_c – фактор трения Прандтля – Зибеля для биметалла [5, 8]. На поверхности мягкого слоя, определяемой радиусом $R_{скМ}$, при отсутствии контакта с конической оправкой, примем $\tau_{\rho\varphi}=0$. При угле $\varphi=0$ на полярном луче касательные напряжения также обращаются в ноль $-\tau_{\rho\varphi}=0$, потому, что данный луч отделяет рассматриваемый участок от зоны обжатия, где напряжения по образующей являются главными. При угле $\varphi=\varphi_m$ полярный луч является границей сдвига слоев заготовки и, следовательно, касательные напряжения $\tau_{\rho\varphi}=-k_c$ здесь будут максимальными.

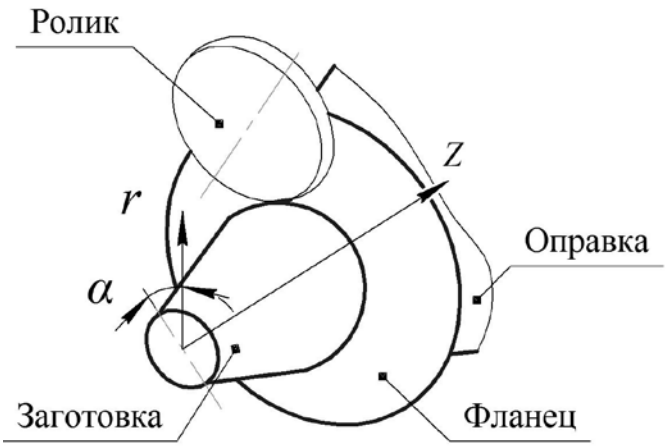
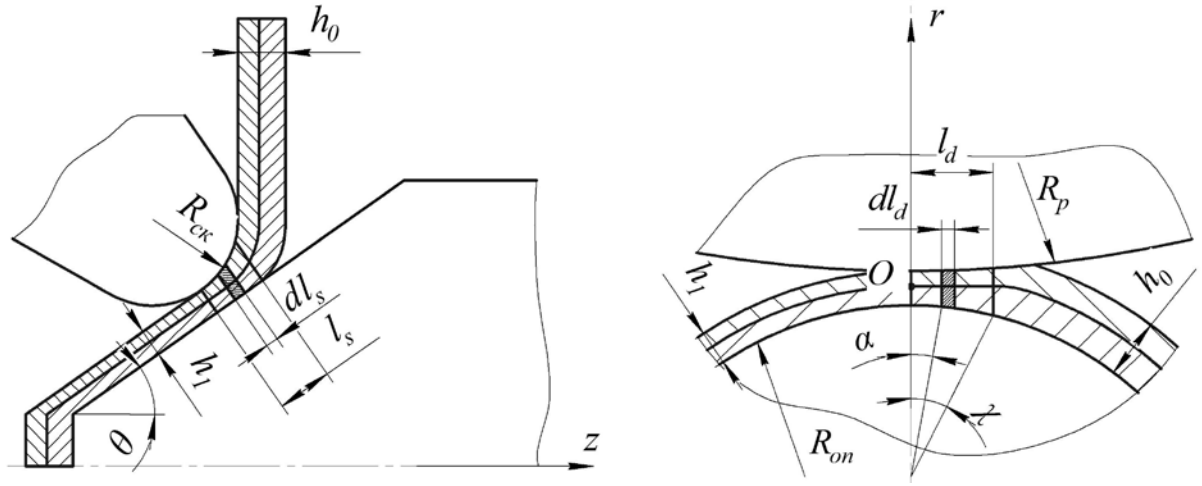


Рис. 3. Схема процесса РВП в цилиндрической системе координатдля зоны 1

4. Напряженное состояние биметаллической заготовки в зоне интенсивной пластической деформации

Для исследования напряженного состояния, рассмотрим зону 1 в цилиндрической системе координат z, α, ρ (рис. 3).

Выделим в локальном очаге деформации, в продольной и поперечной плоскостях, элементы dl_s и dl_d рис. 4 [8].



а) б)

Рис. 4. Схема очага локальной деформации в продольной (а) и поперечной (б) плоскостях

Составим схему к расчету контактных напряжений для элементов dl_s и dl_d рис.5. Считаем, что по углу α пластическое обжатие значительно превышает деформации по координате z за каждый оборот заготовки [9].

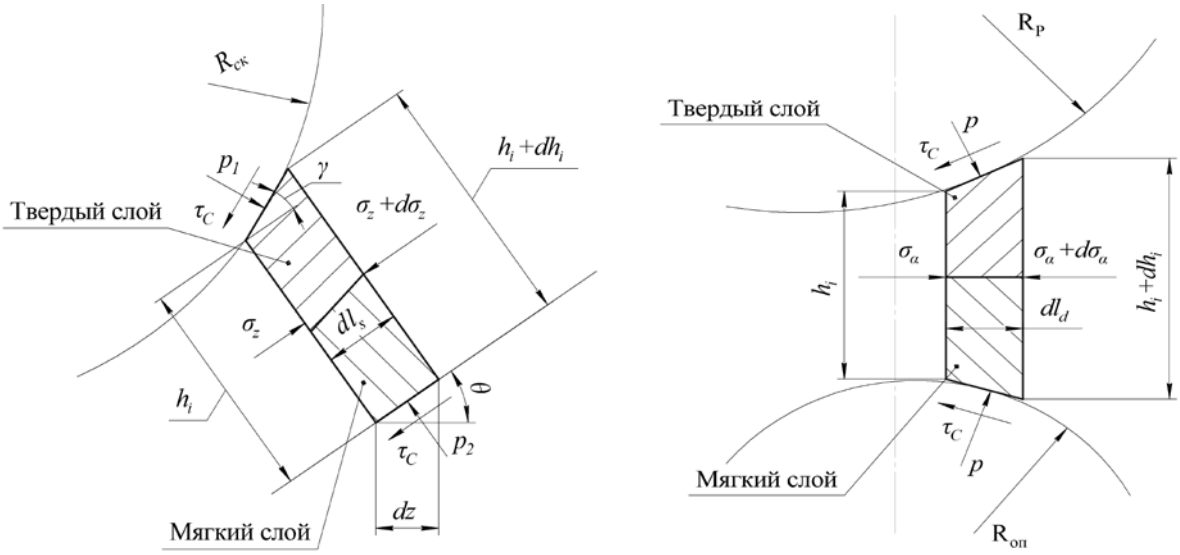
Найдем сумму горизонтальных проекций всех сил, действующих на элемент dl_s в продольной плоскости, рис.5. Примем, что $dl_s = \frac{dz}{\cos(\theta)}$, а τ_c – контактное касательные напряжения на давильном ролике и оправке определяется как $\tau_c = m_c k_c$, тогда сумма горизонтальных проекций всех сил примет вид [5, 8].

5. Анализ результатов аналитического исследования

Влияние геометрических параметров на изменение напряжений p на контактных поверхностях зон 1 и 2 представлено графиками на рисунках 6 и 7.

Анализ графиков (рис.7 а,б) показывает, что на пересечении кривых контактных напряжений, для зон прилипания и отставания, контактные напряжения p принимают максимальные значения на границе рассматриваемых зон. Наличие экстремума на графике контактного напряжения объясняет существование в очаге деформации, так называемой зоны прилипания.

Если анализировать зону прилипания, то в ней касательные напряжения отсутствуют, а приведённые графики, полученные по результатам расчета, близки по форме к построенным в соответствии с теорией продольной прокатки А.И. Целикова [3, 4] эпюрами напряжений, действующих по нормали к контактной поверхности, что позволяет сделать заключение о достоверности разработанных теоретических положений процесса РВП биметаллической заготовки, пригодных для анализа напряженного состояния в локальном очаге деформации.



а) б)

Рис. 5. Схема к расчету контактных напряжений в продольной (а) и поперечной (б) плоскостях

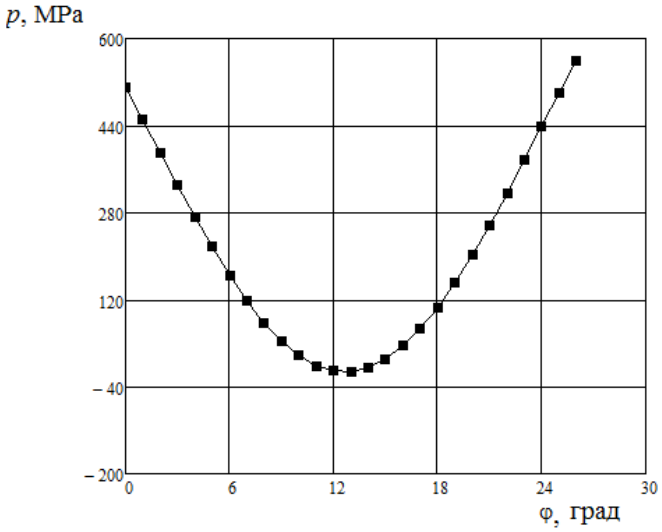
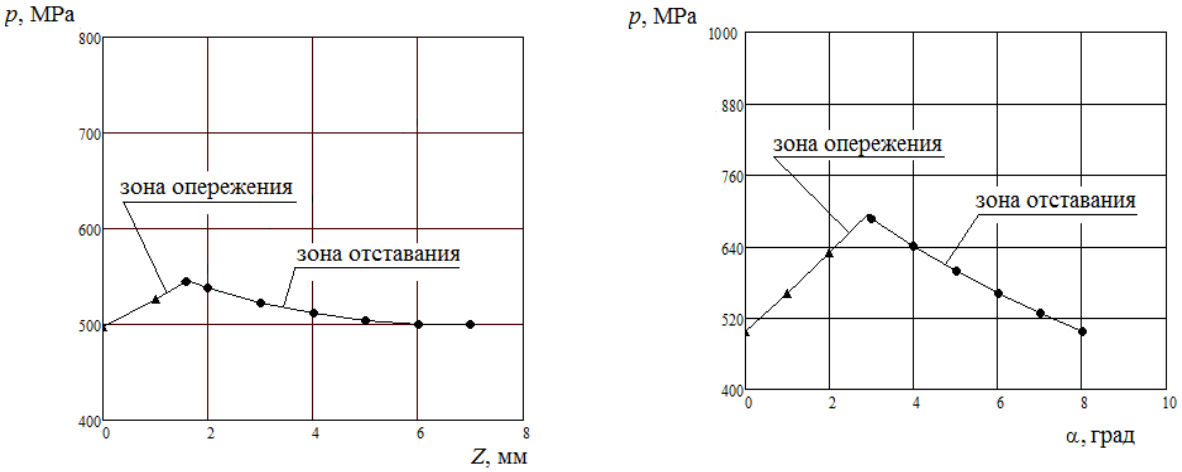


Рис. 6. Изменение контактных напряжений в зона 1 на радиусе скругления деформирующего ролика

5. Выводы

Разработанная математическая модель для оценки полей напряжений в зонах пластической деформации, возникающей в биметаллической заготовке в процессе РВП, отличается от известных возможностью учёта различия пластических свойств слоёв металла, входящих в композицию. Кроме того, модель позволяет определить в локальной зоне контакта, наряду с нормальными напряжениями, величину действующих в слоях заготовки касательных напряжений, что уточняет схему напряженного состояния. Модель устанавливает взаимосвязь напряженного состояния биметаллической заготовки с геометрическими параметрами детали и деформирующего инструмента в процессе ротационной вытяжки.



а) б)

Рис.7. Изменение контактных напряжений в плоскостях, соответствующий зоне 2 (радиус скругления): а - в продольной; б - в поперечной

Аналитическим решением краевой задачи механики деформируемого твердого тела для зон пластической деформацией получены выражения для нахождения контактных давлений и полей нормальных и касательных напряжений. Выведены уравнения для расчета контактных давлений, действующих в очаге интенсивного деформирования как в продольной, так и в поперечной плоскостях, отдельно для зоны опережения и зоны отставания.

Разработанная математическая модель процесса РВП биметаллической заготовки позволила получить достоверные результаты, касающиеся установления характера изменения нормального давления на контактных поверхностях локального очага интенсивного пластического деформирования в продольной и поперечной плоскостях, зависящего от геометрических параметров заготовки и инструмента.

Список литературы: 1. Капорович, В.Г. Состояние и перспективы развития локальных методов обработки металлов давлением / В.Г. Капорович // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - №7. - С.5-6. **2.** Матвейчук, В.А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография / В.А. Матвейчук, И.С. Алиев. - Краматорск: ДГМА, 2009. - 268 с. **3.** Целиков, А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.И. Гришков. - М.: Металлургия, 1970. - 370 с. **4.** Целиков, А.И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. - М.: Металлургия , 1980. - 320 с. **5.** Емельянов, В.В. Особенности напряженного состояния биметаллической заготовки в процессе ротационной вытяжки конических деталей с утонением стенки / В.В. Емельянов, Е.Н. Сосенушкин // Технология машиностроения. - 2018. - №7. - С.10-17. **6.** Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов - М.: Машиностроение, 1977. - 423 с. **7.** Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. - М.: Высшая школа, 1969. - 608 с. **8.** Емельянов, В.В. Анализ напряженно-деформированного состояния биметаллической заготовки в процессе ротационной вытяжки конических деталей с утонением стенки / В.В. Емельянов, Е.Н. Сосенушкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. - 2018. - №3. - С.10-18. **9.** Драбик, А.Н. Силовые режимы ротационной вытяжки конических деталей из анизотропных материалов / А.Н. Драбик, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев // Известия ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. - 2010. - Вып.1. - С.37-44.

PARTICULARITIES OF THE TECHNOLOGICAL DIMENSIONAL STRUCTURES WHEN PROCESSING ON MACHINING CENTERS

Toca A., Stroncea A., Rushica I., Nitulenco T.
(Technical University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova)

Abstract: *In the paper the analysis of the dimensional structure of different manufacturing process is made. There is shown that different schemes of designer sizes result in a different level of an optimality of a dimensional structure. At definition of number of the technological sizes as criterion of optimality it is necessary to allow both formation of the intermediate sizes and the effect of error's compensation. The detail subjected to machining, is characterized by constructive dimensional links which reflect, eventually, its functionality. The character of the constructive dimensional links is defined by the designer who takes into account the technological features of machine tools, but not to detriment of functionality. It is shown, that at machining the technological dimensional structures are optimum if they are similar to the design dimensional structure of a detail. The conditions of the locating and fastening, and also some technical requirements interfere achievements of similarity. In these cases the directed change of the design dimensional structure of a detail is recommended due to recalculation of the sizes. From this point of view creation of technological process represents a compromise of mutual rapprochement of the dimensional structures of a detail and of a technological system.*

Key words: *machining, technological dimensional structures, design dimensional structure, mutual rapprochement*

1. INTRODUCTION

Designing of technological process of a detail's manufacturing is very responsible stage of works. From quality of designing of technological processes, from their depth of study in many cases respects efficiency of the manufacture, size of initial costs, and also costs connected with elimination of mistakes depends. The dimensional analysis takes a special place during designing technology, concerning the stage of designing, and also the stage of technological designing [1–4].

Historically they developed so, that in the beginning technologies were developed in conditions of application of the universal equipment with technological opportunities connected with one method of processing. It gave an opportunity to use a principle of overlapping of bases to achieve the accuracy of the sizes during a set of operations.

The structures of technological processes for the manufacture of parts on machining centers, in particular the dimensional aspect, have their own characteristics and, therefore, differ significantly from technologies for conventional machine tools.

Identifying and taking into account these features is important to ensure the required accuracy of the part and the effective use of expensive machine tools.

The nature of these structural features of technological processes at the Machining Centers lies in the maximum centralization of processing due to sequentially performed operation elements using various cutting tools. The work pieces is usually processed from one or two installations, which means the fullest use of the principle of the unity of the bases. The multifunctional modern equipment also allows to form a complex of surfaces variously located from each using other various methods of processing. The problem of maintenance the accuracy of the sizes is solved using of a principle of unity of bases due to effect of errors compensation.

In the same time, the detail subjected to machining, is characterized by constructive dimensional links which reflect, eventually, its functionality. The nature of the constructive dimensional links is defined by the designer who takes into account the technological features of machine tools, but not in detriment of their functionality. Therefore, carrying out of the dimensional analysis on a joint of these two phases it is very important with the purpose of improvement of dimensional adaptability to manufacturing of made details.

One of most complicated problems during the elaboration of the manufacturing process is the synthesis of dimensional structure. It is necessary to execute not only dimensional analysis of a developed manufacturing process but also to achieve on this basis the optimum dimensional structure.

2. OPTIMALITY CRITERIA FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES

The detail subjected to machining, is characterized by constructive dimensional links which reflect, eventually, its functionality. The nature of the constructive dimensional links is defined by the designer who takes into account the technological features of machine tools, but not to detriment of their functionality. Therefore, carrying out the dimensional analysis between these two phases it is very important with the purpose to improve the dimensional adaptability to manufacturing of details made.

It is known that the manufacturing process is considered optimum, if in the structure of all technological dimensional chains the number of the technological sizes is minimal [1]. This condition is respected if for each constructive size corresponds, within the technological dimensional chain, the unique technological size (fig. 1), and in dimensional chains for machining allowances, each machining allowance is determined by two technological sizes or one technological size and one size on blank (fig. 2). The last has two technological sizes formed at the other phase of a manufacturing process. The minimum possible number of the

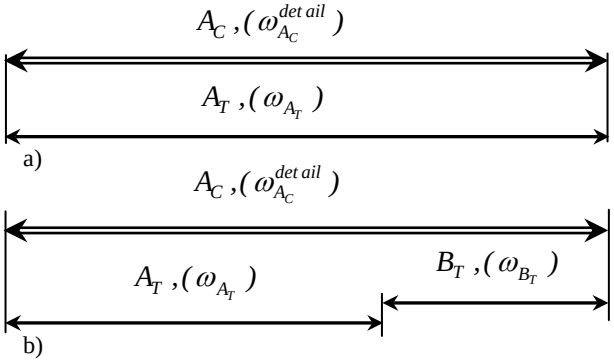


Fig. 1. The constructive size is submitted: a) only by the technological size, $\omega_{A_C}^{det\ ail} = \omega_{A_T}$; b) by the technological size and one (it is possible more) in already existing (historical) size, $\omega_{A_C}^{det\ ail} = \omega_{A_T} + \omega_{B_T}$

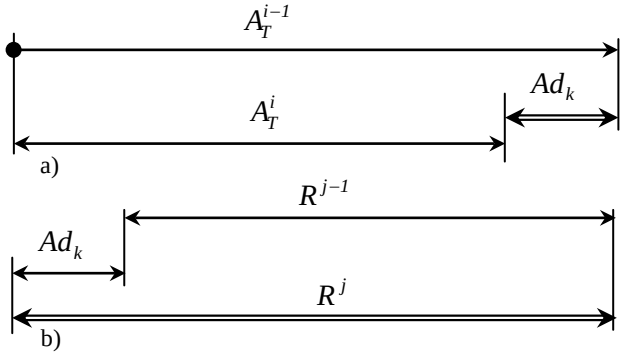


Fig. 2. Two opportunities of transformation of the technological sizes: a) it is direct and under the control over technological base, $\omega_{Ad_k} = \omega_{A_T^{i-1}} + \omega_{A_T^i}$; b) it is not direct, as consequence of direct formation of other size, $\omega_{R^j} = \omega_{R^{j-1}} + \omega_{Ad_k}$.

technological sizes $N_{T_{MIN}}$ is determined from the relation $N_{T_{MIN}} = N_C + 2 \cdot N_{Ad}$, where N_C - number of the constructive sizes, N_{Ad} - number of machining allowances. The optimum manufacturing

process becomes ideal, if each surface is processed only once, thus providing the final constructive size.

It is necessary to note, that the dimensional optimality is not entirely characterized by the number N_T, but it is necessary to take into account the growth (sometimes complicated) of the technological sizes' accuracy (a case of formation of the sizes as closing link of dimensional chains).

One of methods to create the optimum technological processes is the observance of a similarity principle of the technological and constructive dimensional links graphs [5].

Let's consider this approach an example of a graph of linear constructive dimensional links (fig. 3). This graph has two poles - two important constructive bases which should be used as technological bases. At the first installation, after machining a surface *1* with the use of a surface 6 as technological contact base (*TCB*), the surface *1* becomes adjusting technological base from which the sizes B_T and C_T are formed. During the second installation two technological adjusting bases (*TAB*) - surfaces *6* (*TAB1*) and *5* (*TAB2*) are used consistently.

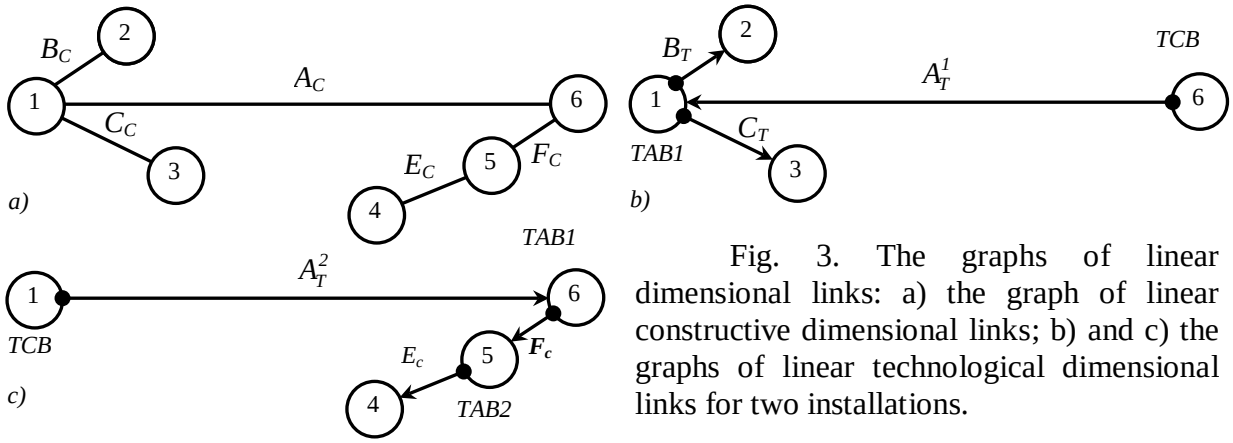


Fig. 3. The graphs of linear dimensional links: a) the graph of linear constructive dimensional links; b) and c) the graphs of linear technological dimensional links for two installations.

It is visible, that the structure of the graph of the technological linear dimensional links completely coincides with structure of the graph of constructive linear dimensional links. As a result of it, the accuracy of the constructive sizes is formed directly in conformity with the figure 1,a.

In the case, for example, of the constructive dimensional links shown on fig. 4,a by the first installation, the machining of surfaces is similar to the previous example (fig. 4,b). During the second installation, there is a problem of sequence of operation elements connected to the presence of bifurcation in unit *7* from which outcome two equivalents which mutually exclude each other's continuations (fig. 4,c).

The solution in this situation is the change of the constructive sizes on a line with a lower accuracy, replacing the size C_C by the size C_C^* according to the dimensional link $C_C = C_C^* - G_C$, in which the replaced size C_C is the closing (fig. 4,d,e). In this case, by the second installation the surface *7* is machined, and it becomes a technological adjusting base *TAB1* for machining the surfaces *3*, *5* and *6*, and the surface *6* becomes a technological adjusting base *BTR2* for machining the surface *4*.

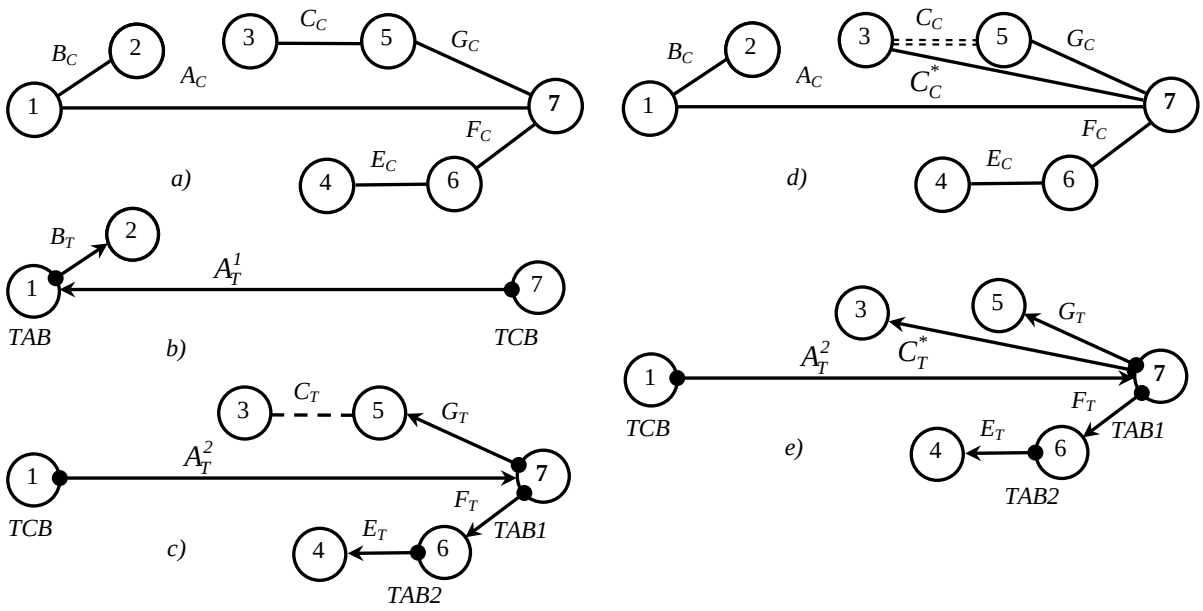


Fig. 4. The graphs of linear dimensional links with bifurcation in unit: a) of the linear constructive dimensional links; b) and c) of the linear technological dimensional links for the first installation and the second installation with bifurcation in the nod *7*; d) of the linear constructive dimensional links after recalculation of the sizes; e) of the linear technological dimensional links for the second installation without a bifurcation in the nod 7

In the processing of parts on machining centers, contact the technological base is an surface of the part (blank), coming in contact with a support surface of the device structure. The difference (on the lathe processing) is that as a baseline to make the link between the dimensional systems of machine tools and workpiece here serves the axis of revolving table.Thus, between the dimensional systems of machine tools and of workpiece is an intermediate element, a dimension $D_L^{det\,ail}$ formed in the structure of the device by the size D_L^{device} (fig. 5, b).

In the process (fig. 5), as initial technological adjusting bases (*TAB0*) serves the center of rotation of the revolving table *0*, at which is formed the technological size A_T in two stages by rotating table at 180°. The size A_T consists of two parts A_{T1} and A_{T2} (fig. 5, b). From the initial technological adjusting base *TAB0* is formed the technological size A_{T1} (is processed the surface *1*), surface *1* becomes technological adjusting bases *TAB1*, from with successively are formed the sizes B_T and C_T (are processed the surfaces *2* and *3*). After the 180° rotating table at the

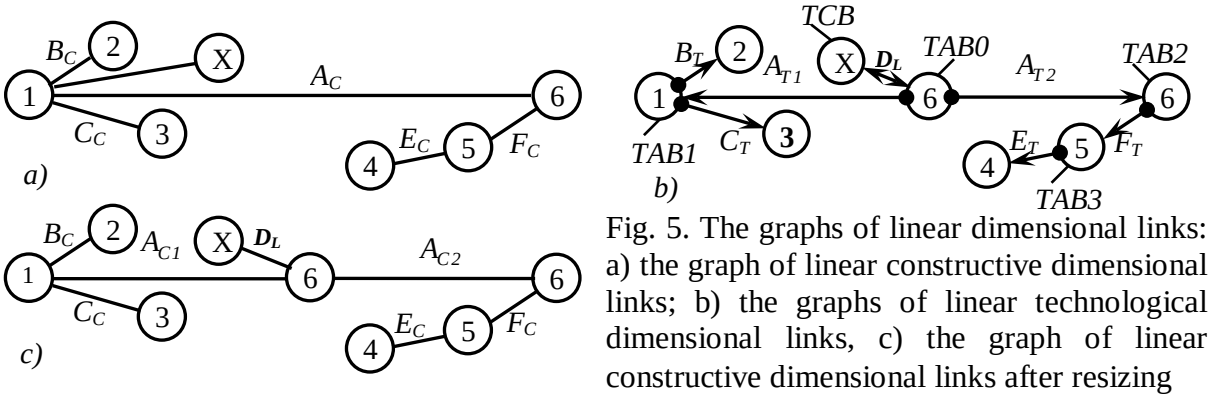


Fig. 5. The graphs of linear dimensional links: a) the graph of linear constructive dimensional links; b) the graphs of linear technological dimensional links, c) the graph of linear constructive dimensional links after resizing

initial technological adjusting bases *TAB0* is formed the technological size A_{T2} (is processed surface *6*); surface *6* becomes technological adjusting bases *TAB2*, from with is formed the size F_T (is processed the surface *5*); surface *5* becomes technological adjusting bases *TAB3*, from with is formed the size E_T (is processed the surface *4*). Of the related can be concluded that the processing of body parts type on machining centers need right from the start to be resized piece as shown in Fig. 5,c.

From fig. 5 we can conclude the need for resizing the piece supplementary for surface *X*, which initially is spotted on the surface *1* to be spotted from the axis *0*. One sees that the role of the surface *X* can be played by any surface, including *1* and *2*.

The constructive resizing of the part consists to replace a size with the another so that dimensional systems of the initial part and again to be equivalent (Fig. 6).

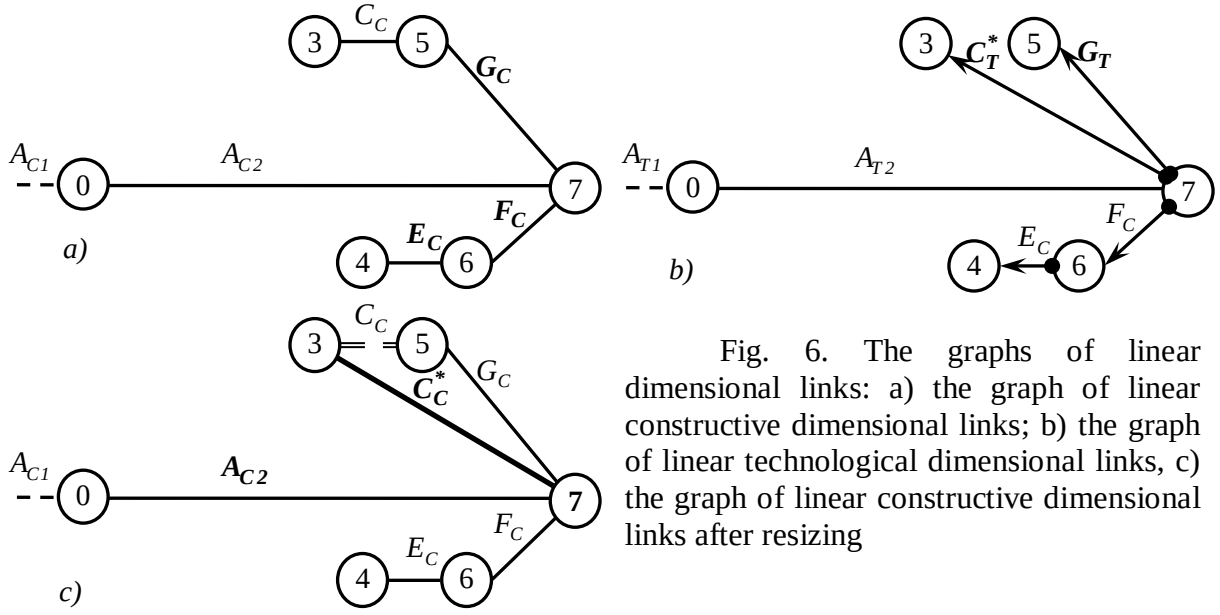


Fig. 6. The graphs of linear dimensional links: a) the graph of linear constructive dimensional links; b) the graph of linear technological dimensional links, c) the graph of linear constructive dimensional links after resizing

3. CONSTRUCTIVE RESIZING

Constructive resizing is made with utilisation the 'replacing' and 'connection' technological sizes at the same step of accuracy. It is known that the quality class of accuracy (tolerance) are characterized by the number of tolerance units *a* and IT6 step since the geometric progression with ratio $q = 1{,}6$ form. Unit of tolerance ***i*** (for the range of nominal sizes up to 500) is calculated from relationship $i = 0{,}45\sqrt[3]{N} + 0{,}001 \cdot N, \mu m$.

The tolerances of the sizes 'replaced', 'replacing' and 'connection' (fig. 7) will be respectively: $\omega_{C_C} = a_{C_C} \cdot i_{C_C}$, $\omega_{C_C^*} = a_{C_C^*} \cdot i_{C_C^*}$, $\omega_{G_C} = a_{G_C} \cdot i_{G_C}$. There $a_{G_C} = a_{C_C^*} = a^*$ reflects the equality of the step of accuracy for the sizes C_C^* and G_C. Units of tolerance values are different $i_{C_C^*} \neq i_{G_C}$ due to different nominals. Because $\omega_{C_C} = \omega_{C_C^*} + \omega_{G_C}$, we have $a_{C_C} \cdot i_{C_C} = a_{C_C^*} \cdot i_{C_C^*} + a_{G_C} \cdot i_{G_C} = a^* \cdot (i_{C_C^*} + i_{G_C})$.

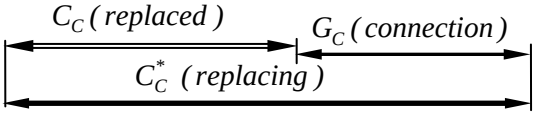


Fig.7. The dimensional chains for resizing

Then, the number of units of tolerance for 'replacing' and 'connection' sizes will be:

$$a^* = a_{C_C} \cdot \frac{i_{C_C}}{i_{C_C^*} + i_{G_C}}, \text{ and } \omega_{C_C^*} = a^* \cdot i_{C_C^*} \text{ and } \omega_{G_C} = a^* \cdot i_{G_C}.$$

When re-dimensioning by formation of the 'replacing' and 'connection' technological sizes at the same step of accuracy is necessary to take into account the effects of errors' compensation [6]. It is possible that by one branch the effects of errors compensation are more severe than in the other branch.

As a consequence, the dimensional chain for all derivative constructive sizes are powered up with only two links and a technological accuracy of the machine tool are transferred to a detail lost-free. As the surfaces are formed sequentially from each other, the phenomenon of compensation of errors operates. Then for fig. 4,e it is possible to write:

Constructive size			Technologic size		
	tolerance	limit deviations		tolerance	limit deviations
A_c	ω_{A_c}	ES_{A_C}, EI_{A_C}	A_t	$\omega_{A_t} \le \omega_{A_c} + 2\omega_{7-1}^{comp}$	$ES_{A_C} + \omega_{7-1}^{comp}$, $EI_{A_C} - \omega_{7-1}^{comp}$
G_c	ω_{G_c}	ES_{G_C}, EI_{G_C}	G_t	$\omega_{G_t} \le \omega_{G_c} + 2\omega_{5-7}^{comp}$	$ES_{G_C} + \omega_{5-7}^{comp}$, $EI_{G_C} - \omega_{5-7}^{comp}$
C_c^*	$\omega_{C_c^*}$	$ES_{C_c^*}$, $EI_{G_c^*}$	C_t^*	$\omega_{C_t^*} \le \omega_{C_c^*} + 2\omega_{3-7}^{comp}$	$ES_{C_c^*} + \omega_{3-7}^{comp}$, $EI_{C_c^*} - \omega_{3-7}^{comp}$
F_C	ω_{F_c}	ES_{F_C}, EI_{F_C}	F_t	$\omega_{F_t} \le \omega_{F_c} + 2\omega_{6-7}^{comp}$	$ES_{F_C} + \omega_{6-7}^{comp}$, $EI_{F_C} - \omega_{6-7}^{comp}$
E_C	ω_{E_c}	ES_{E_C}, EI_{E_C}	E_t	$\omega_{E_t} \le \omega_{E_c} + 2\omega_{4-6}^{comp}$	$ES_{E_C} + \omega_{4-6}^{comp}$, $EI_{E_C} - \omega_{4-6}^{comp}$

Conclusions

- for guaranteed assurance of dimensional accuracy it is necessary to adapt mutually the technological dimensional structures of operations with design dimensional structures of entities (blank, a detail in process, a detail) received after the previous operations including resizing of these entities;
- the effects of errors compensation permit to execute the sizes component links of dimensional chain (the technologic sizes) with a lower accuracy than that determined trough the method of maximum and minimum.

References. 1. Perminov A. V. The synthesis of dimensional structure of technological processes of machining with the help of a matrix of the dimensional chains. The News of High Schools. Mechanical engineering. Moscow, 2002, Nr 4, pp. 26-30. **2.** Morozov I. A., Saranchin A. V., Bezborodov N. A. Application of the modern means of calculation of the dimensional chains in manufacture of a small arms. The technics of mechanical engineering. Moscow, 2003, Nr. 6, pp. 14-17. **3.** Kuzmin V. V., Shurigin Iu. L. A choice of the optimum parameters of accuracy of the linear and angular sizes of details by criterion of the cost price of their manufacturing. Automation and modern technologies. Moscow, 1994, Nr. 5, pp. 16-22. **4.** Poleakov V. K. The analysis of the sizes of details with the help of graphs. News of High Scools. Mechanical engineering. Moscow, 1989, Nr 7, pp. 52-56. **5.** Toca A. About the mutual influence of design and technological dimensional structures at creation of the optimum technological processes to machining. Modern Technologies, Quality and Innovation, 2010, pp. 623-626. **6.** Toca A., Stingaci I., Rushica I. The effects of error's compensation in machining. Proceedings of Modern Technologies, Quality and Innovation – ModTech 2012, pp 953-956.

УДК 621.01.03.075

ТЕХНОЛОГИЯ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ

Тюрин А.Н. *(АО «Научно-исследовательский институт «Гидроприбор», Республика Казахстан)*
Тел/факс: 8 777 563 46 17, Email: sciencetech2919@gmail.com

Abstract: *This paper proposes a new approach to the study of the efficiency of technological processes. The example of the analysis shows that, using fairly universal and simple energy criteria, one can make a quick comparative analysis of various methods and even processing methods, choose the most effective one and improve the existing technology. This equips mechanical engineering technologists and scientists with powerful weapons in the search for reserves for increasing the efficiency of production processes.*
Key words: *abrasive blasting, superfinishing, one-time material volume, superfinishing ratio, effective superfinishing power.*

1. Введение

Известно [1,2 и др.], что качество таких точных изделий, как подшипники качения, во многом зависит от эффективности финишных операций технологического процесса их изготовления.

Формирование внутренней геометрии подшипников окончательно осуществляется как правило на операциях суперфиниширования рабочих поверхностей их деталей [3,4].

Анализ преимуществ и недостатков существующих способов суперфиниширования
достаточно полно изложен в работах [5-7], выполненных при участии авторов, в связи с чем в данной работе приводятся лишь некоторые выводы.

2. Определение энергетических показателей эффективности технологического процесса суперфиниширования.

Низкую эффективность традиционной технологии суперфиниширования можно показать на основе некоторых критериев. Как известно, работа резания режущим инструментом определяется по зависимости [8-9 и др.]:

$$A = P_z \cdot v \cdot t \,,$$

где P_z - тангенциальная сила, возникающая при обработке; v - скорость резания; t - время обработки.

Работа резания осуществляется непрерывно в течение длительного времени. Поэтому энергетическую значимость этого процесса удобнее выразить через мощность обработки:

$$W = P_z \cdot v \,.$$

С помощью критерия мощности в ряде случаев можно оптимизировать режимы резания. Однако этот критерий неудобен для сравнения эффективности резания различными методами обработки. В этом случае более подходит критерий - удельная мощность резания, т.е. затраты мощности на единицу удаленного объема материала заготовки:

$$W_z = \frac{P_z \cdot v}{V} \,.$$

В качестве показателя качества процесса резания следует использовать скорость

формирования единовременного объема материала, равную отношение полезной мощности резания к удельной внутренней энергии насыщения материала :

$$V_t = \frac{\mathrm{W}\varphi}{\mathrm{E}_0}. \quad (1)$$

Коэффициент потери мощности в процессе резания можно определить по формуле:

$$\varphi_z = \frac{P_z - P_n f_z}{P_z},$$

где P_n - нормальная сила прижима инструмента к заготовке; f_z - коэффициент трения скольжения режущего элемента по обрабатываемой поверхности [9].

Формула (1) вполне годится для обработки лезвийным инструментом. Но для обработки абразивным инструментом необходимо учесть, что процесс абразивной обработки является дискретным и поэтому понятие единовременной работы или мощности резания может относиться только к единичному абразивному зерну. Кроме того, рабочая поверхность абразивного инструмента имеет склонность к засаливанию, т.е. она в процессе снятия припуска забивается стружкой и шламом [10], отчего коэффициент потери энергии при абразивной обработке снижается, но это не учитывается формулой (1).

В работе [8] установлены зависимости, связывающие тангенциальную P_{zz} и нормальную P_{nz} силы резания абразивным зерном с глубиной резания:

$$\begin{aligned} P_{zz} &= 34\tau a^2(1+1{,}5 f_z(1+\xi)); \\ P_{nz} &= 51\tau a^2((1+\xi), \end{aligned} \quad (2)$$

где τ – напряжение сдвига; a - глубина резания; ξ - усадка стружки.

Удельная энергия насыщения материала:

$$E_0 = \frac{P_{zz} vt}{F_i l_i}, \quad (3)$$

где F_i - площадь поперечного сечения царапины, равная:

$$F_i = 2{,}5a^2, \quad (4)$$

l_i - длина царапины, равная $l_i = v \cdot t$.

Раскрывая значение тангенциальной силы резания (2) и подставляя в равенство (3) значения F_i (4) и l_i, получим:

$$E_0 = 13{,}6 \cdot \tau \cdot (1+1{,}5 f_z(1+\xi)). \quad (5)$$

На основании (2) коэффициент потери энергии при резании абразивными зерном:

$$\varphi_z = \frac{P_{zz} - P_{nz} \cdot f_z}{P_{zz}} = 1 - \frac{51 \cdot (1+\xi) \cdot f_z}{34(1+1{,}5 f_z(1+\xi))}. \quad (6)$$

Например, усадка стружки для стали ШХ-15 $\xi = 1{,}5$, а $f_z = 0{,}2$ [8]. Тогда по формуле (6) найдем:

$$\varphi_z = 1 - \frac{51 \cdot (1+1{,}5) \cdot 0{,}2}{34(1+1{,}5 \cdot 0{,}2 \cdot (1+1{,}5))} = 0{,}57 \cdot$$

Введем обозначения:

P_{zr} - тангенциальная сила резания абразивными зернами; P_{nr} - нормальная сила резания абразивными зернами; P_{zs} - тангенциальная сила трения связки об

обрабатываемую поверхность; P_{ns} - нормальная сила реакции связки.

Отношение тангенциальной силы резания абразивным зерном к нормальной составляет

$$K_z = \frac{P_{zz}}{P_{nz}} = \frac{34(1+1{,}5\cdot 0{,}2\cdot(1+1{,}5))}{51(1+1{,}5)} = 0{,}47\cdot$$

Коэффициент потери энергии при суперфинишировании в случае частичного засаливания инструмента:

$$\varphi = \frac{P_z - P_{zs} - P_{nr} f_z}{P_z}. \qquad (7)$$

Так как

$$P_z = P_{zs} + P_{zr},$$

то выражение (7) примет вид:

$$\varphi = \frac{P_{zr}}{P_z}\left(1 - \frac{P_{nr} f_z}{P_{zr}}\right).$$

Но так как

$$P_{zr} = P_{zz}\cdot z, \text{ а } P_{nr} = P_{nz}\cdot z,$$

где z - число режущих зерен, то

$$\varphi = \frac{P_n}{P_z}\frac{P_{nr}}{P_n}K_z\left(1 - \frac{f_z}{K_z}\right). \qquad (8)$$

Обозначим

$$f_t = \frac{P_z}{P_n} \qquad (9)$$

и назовем эту величину коэффициентом суперфинишировання. Преобразуем равенство (9):

$$f_t = \frac{P_{nr}}{P_n}\left(\frac{P_{zr}}{P_{nr}} + \frac{P_{zs}}{P_{nr}}\right) = \frac{P_{nr}}{P_n}\left(\frac{P_{zr}}{P_{nr}} + \frac{P_n - P_{nr}}{P_{nr}} f_s\right), \qquad (10)$$

где f_s - коэффициент трения связки об обрабатываемую поверхность.

При полном засаливании бруска, когда он перестает резать, коэффициент трения скольжения связки по обрабатываемой поверхности $f_s = P_{zs}/P_{ns} = 0{,}2$ и меньше.

Окончательно после преобразований найдем:

$$f_t = \frac{P_{nr}}{P_n}(K_z - f_s) + f_s\cdot \qquad (11)$$

Как видно из равенства (11), при отсутствии засаливания инструмента, т.е. когда внешняя нормальная нагрузка полностью уравновешивается нормальной силой резания инструмента: $P_{nr} = P_n$, коэффициент суперфинишировання равен коэффициенту абразивного резания $f_t = K_z$. При полном засаливании инструмента, когда внешнюю нагрузку полностью уравновешивает нормальная реакция стружки и шлама, а $P_{nr} = 0$, то коэффициент суперфинишировання равен коэффициенту трения стружки и шлама об обрабатываемую поверхность: $f_t = f_s$.

Подставляя выражение (11) в равенство (8), найдем коэффициент потери энергии:

$$\varphi = \frac{K_z}{(K_z - f_s) + f_s\dfrac{P_n}{P_{nr}}}\left(1 - \frac{f_z}{K_z}\right). \qquad (12)$$

На рис. 1 показано изменение коэффициента суперфиниширования, коэффициента потери энергии при суперфинишировании по мере засаливания инструмента и изменение соотношения между нормальной силой резания и нормальной силой прижима инструмента к обрабатываемой поверхности.

Как видно из рис. 1, с увеличением доли внешней нагрузки, приходящейся на абразивные зерна, значения коэффициентов f_t *и* φ возрастают. Следовательно, коэффициент суперфиниширования однозначно характеризует работоспособность инструмента.

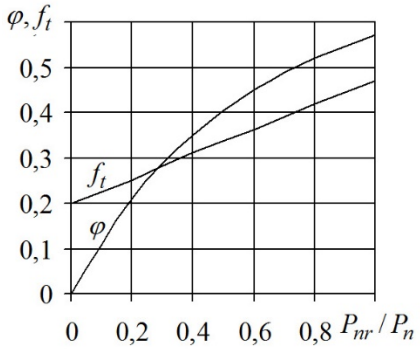


Рис. 1. Зависимость коэффициента суперфиниширования f_t и коэффициента потери полезной энергии φ от соотношения P_{nr} / P_n нормальной силы резания к силе прижима инструмента к обрабатываемой поверхности

Скорость формирования единовременного объема материала с учетом равенства (1) равна:

$$V_t = \frac{P_z v}{E_0} \varphi \cdot \qquad (13)$$

Из соотношения (9):

$$P_z = P_n \cdot f_t \,. \qquad (14)$$

Используя выражение (14), из равенства (4.13) получим:

$$V_t = \frac{P_n \cdot v}{E_0} \cdot f_t \cdot \varphi \cdot \qquad (15)$$

Раскрывая в равенстве (15) значение внутренней удельной энергии насыщения материала заготовки (5), определим:

$$V_t = 0{,}74 \frac{P_n \cdot v}{\tau \cdot \left(1 + 1{,}5 f_z \cdot (1 + \xi)\right)} \cdot f_t \cdot \varphi \cdot \qquad (16)$$

Так как величина V_t используется нами для оценки качества обработки, то, как видно из выражения (16), качество обработки будет тем выше, чем меньше скорость резания v, сила прижима бруска к заготовке P_n, коэффициент φ и выше прочность материала заготовки τ. Это вполне согласуется с практикой суперфинишной обработки, так как известно, что чем меньше оставляют абразивные зерна на поверхности заготовки риски и чем больше степень засаливания бруска, тем шероховатость поверхности получается ниже, а это – один из важнейших показателей качества обработки при суперфинишировании. Скорость заготовки v при суперфинишировании, с одной стороны, способствует увеличению съема металла, и, следовательно, качество поверхности должно уменьшаться. Но, с другой стороны, с увеличением скорости заготовки увеличивается степень засаливания инструмента, и это способствует снижению шероховатости обработанной поверхности.

Припуск при суперфинишировании настолько мал, что его даже не назначают на эту операцию при разработке технологических процессов. Однако это не значит, что он не определяет эффективность процесса суперфиниширования. Со снятием припуска удаляется дефектный слой на заготовке, возникший на предшествующей шлифовальной операции, исправляются погрешности геометрической формы заготовки, снимается исходный шероховатый слой. Поэтому при суперфинишировании желательно обеспечить надежное удаление дефектного слоя заготовки, а следовательно, необходимо предусматривать припуск на обработку.

К сожалению, при суперфинишировании с использованием традиционных способов, при которых абразивный инструмент в течение всего времени

суперфиниширования прижимается всей своей рабочей поверхностью к обрабатываемой поверхности заготовки, не обеспечивает возможности снятия с заготовки значительного припуска, так как инструмент быстро засаливается и перестает резать. Действительно, мощность резания при суперфинишировании:

$$W = P_z \cdot v = P_n \cdot v \cdot f_t . \quad (17)$$

Более точно производительность обработки при суперфинишировании характеризует эффективная мощность резания. Эффективную мощность резания определим умножением равенства (17) на коэффициент потери энергии (12):

$$W_\varphi = P_z \cdot v = P_n \cdot v \cdot f_t \cdot \varphi . \quad (18)$$

Сопоставим значения мощности и эффективной мощности при суперфинишировании с величиной снимаемого припуска. Из работы [10] следует, что объем пор рабочей поверхности абразивного инструмента равен:

$$V_p = N_z \cdot d_0 \cdot S_i , \quad (19)$$

где N_z - коэффициент, зависящий от структуры и твердости абразивного инструмента; d_0 - средний диаметр абразивных зерен; S_i - площадь рабочей поверхности инструмента.

С учетом равенства (4.16) снимаемый при обработке припуск за время t:

$$V_s = V_{tz} \cdot z \cdot t = 34\pi a^2 \left(1 + 1{,}5 f_t (1+\xi)\right) \frac{v}{E_0} \cdot z \cdot t_0 , \quad (20)$$

где t_0 - время непрерывного контакта рабочей поверхности бруска с заготовкой;

z - число "рабочих" зерен на рабочей поверхности заготовки, находящихся в контакте с обрабатываемой поверхностью.

Число зерен на поверхности инструмента:

$$z = \frac{P_{nr}}{P_{nz}} = \frac{P_n}{51 \cdot \tau \cdot a^2 (1+\xi)} \cdot \frac{P_{nr}}{P_n} . \quad (21)$$

Подставляя выражение (21) в равенство (20), получим:

$$V_s = \frac{0{,}67 \cdot \left(1 + 1{,}5 f_z (1+\xi)\right) P_n}{1+\xi} \frac{v}{E_0} \frac{P_{nr}}{P_n} \cdot t_0 . \quad (22)$$

Или, раскрывая в (22) значение E_0 (5), получим:

$$V_s = \frac{0{,}049}{1+\xi} \cdot \frac{v}{\tau} \cdot P_{nr} \cdot t_0 . \quad (23)$$

Отношение нормальной силы резания к силе прижима инструмента можно оценить соотношением:

$$\frac{P_{nr}}{P_n} = \frac{V_p - Vs}{V_p} .$$

Подставляя это выражение в равенства (19) и (23), найдем:

$$\frac{P_{nr}}{P_n} = 1 - \frac{0{,}67\left(1 + 1{,}5 f_z (1+\xi)\right) \cdot P_n \cdot v \cdot t}{N_z \cdot d_z \cdot S_i (1+\xi) E_0} \frac{P_{nr}}{P_n}$$

Из этого выражения

$$\frac{P_{nr}}{P_n} = \frac{N_z \cdot d_0 \cdot S_i (1+\xi) E_0}{N_z \cdot d_0 \cdot S_i (1+\xi) E_0 + 0{,}67\left(1 + 1{,}5 f_z (1+\xi)\right) \cdot P_n \cdot v \cdot t_0} . \quad (24)$$

Подставляя в равенство (24) выражение (5), найдем:

$$\frac{P_{nr}}{P_n} = \frac{N_z \cdot d_0 \cdot S_i(1+\xi)\tau}{N_z \cdot d_0 \cdot S_i(1+\xi)\tau + 0{,}049 \cdot P_n \cdot \nu \cdot t_0}. \quad (25)$$

На основании равенства (23) несложно найти линейный съем припуска за время в расчете на диаметр заготовки:

$$q(t) = \frac{V_s}{\pi \cdot d \cdot l_z}, \quad (26)$$

где d - диаметр заготовки; l_z - длина профиля заготовки.

3. Выводы. Как видно из выражений (23) и (26), объем снимаемого припуска при суперфинишировании не остается постоянным, а существенно изменяется во времени. С увеличением времени обработки съем металла снижается. Сложное влияние на производительность обработки оказывают сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности, зернистость инструмента, скорость резания и другие факторы. С одной стороны, с возрастанием значений этих факторов производительность возрастает, но, с другой стороны, по истечении некоторого времени снижается число режущих зерен, и производительность падает. По мере снижения скорости съема припуска уменьшается мощность суперфинишировання. Это подтверждает, что мощность обработки адекватно отражает производительность процесса. А так как этот показатель прост в вычислении, то он может заменить при анализе эффективности технологических процессов другие более сложные в определении параметры обработки. Особенно явно изменение в течение времени полезной мощности, которая может служить при определении сравнительной эффективности самых разнообразных процессов.

Список литературы: 1. Вениаминов К.Н., Василевский С.В. Влияние финишной операции на долговечность подшипников качения // Труды института. 1989. № 1. - М.: Специнформцентр ВНИППа. **2.** Кремень З.И. Влияние способа абразивной обработки на качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей. // Прогрессивная технология абразивной обработки и абразивный инструмент. - Л.: ЛДНТН, 1980. - С. 8-15. **3.**Черневский Л.В. Основные направления повышения качества и долговечности подшипников на основе совершенствования технологии шлифовально-доводочной обработки рабочих поверхностей деталей. // Труды ВНИПП. 1980. № 4 (106). - С. 7-17. **4.** Колтунов И.Б. и др. Прогрессивные процессы абразивной алмазной и эльборовой обработки в подшипниковом производстве. - М.: Машиностроение, 1976. - 30 с. **5.** Королев А.В., Чистяков А.М., Давиденко О.Ю. Новые прогрессивные технологии машиностроительного производства. Часть 3. Технология многобрускового формообразующего суперфинишировання с локализацией контакта инструмента и обрабатываемой поверхности. - Саратов: СГТУ, 1997. - 152 с. **6.** Тюрин А.Н., Королев А.В. Оценка качества брусковой обработки деталей энергетическими параметрами процесса.// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана серия « Машиностроение» №4(73) 2008г. - С. 65-72. **7.** Тюрин А.Н., Королев А.В., Королев А.А. Связь энергии резания с интенсивностью съема припуска при суперфинишировании абразивным инструментом.//«Вестник Машиностроения» №5 2009г. С.59-62. **8.** Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке. - Саратов: Сарат. гос. ун-т, 1989. - 160 с. **9.** Brandin H. Werkstoffabtrag, Honsteinverschleiß und Oberflächengüte beim Kurzhubhonen. / Schleifen, Honen, Zäppen und Polieren. Verfahr und Maschinen 50 Ausg., Essen, 1981, p. 376-385. **10.** Корьячев А.Н., Косов М.Г., Лысанов Л.Г. Контактное взаимодействие бруска с желобом кольца подшипника при суперфинишировании // Технология, организация и экономика машиностроительного производства. - 1981. - № 6. - С. 34-39.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ФРЕЗАМИ С РАЗЛИЧНЫМ ШАГОМ МЕЖДУ ЗУБЬЯМИ

Унянин А.Н., Журавлев А.С. *(УлГТУ, г. Ульяновск, Россия)*
Тел./Факс:+7 903 3205351; E-mail: a_un@mail.ru

Abstract: *Numerical simulation of the cutting parameters and the temperature field of the milling process with the periphery of end mills with different pitch between the teeth is performed. The regularity of changes in the geometric parameters of the cut, forces, capacities of heat sources and temperatures from the pitch of the teeth of the milling cutter is revealed. It is found that the temperature field changes more when the pitch is varied during processing with a constant feed rate.*
Keywords: *milling cutter, uneven pitch, force, temperature, workpiece.*

Одним из средств повышения эффективности обработки резанием является использование инструмента с неравномерным шагом между зубьями [1]. Увеличение производительности обработки лезвийным инструментом с неравномерным шагом, в частности, фрезами, связано со снижением амплитуды вибраций, возникающих в процессе фрезерования. Период времени между работой смежных зубьев не является постоянным, что позволяет существенно снизить амплитуду вынужденных колебаний.

Однако влияние шага зубьев фрез на тепловую напряженность процесса исследовано недостаточно полно, что не позволяет оценить температуры рабочих поверхностей зуба (передней и задней) и температуры в поверхностных слоях заготовки.

Для расчета температурного поля, возникающего в процессе фрезерования цилиндрическими фрезами и периферией концевых фрез, разработаны физические и математические модели, позволяющие учесть наличие трех источников тепловыделения [2]. Модели учитывают наложение тепловых импульсов от отдельных зубьев, зависимость теплофизических свойств контактирующих объектов (фрезы, заготовки и стружки) и механических свойств материала заготовки (напряжения текучести) от температуры, а также изменение параметров процесса в зависимости от положения зуба на поверхности контакта с заготовкой [2].

Уравнения теплопроводности решали численным методом, используя метод конечных элементов. Использовали методику численного расчета дискретных аналогов уравнений теплопроводности и оригинальные программы для персонального компьютера, позволяющие выполнить расчет параметров и температурного поля процесса фрезерования. Время разбито на конечные малые промежутки $\Delta\tau$. Температура, рассчитанная в зоне деформирования (в области стружкообразования) в какой-либо момент времени, использовалась программой для расчета напряжения текучести обрабатываемого материала в последующий момент времени.

Численное моделирование температурного поля выполнили при следующих исходных данных: диаметр фрезы 20 мм; материал зуба фрезы – твердый сплав RX 10; число зубьев – 3. Материал заготовки – алюминиевый сплав Д16, подвергнутый закалке и старению; скорость резания V = 7 м/с; подача на зуб фрезы S_z = 12,6 мм; глубина резания t = 1 мм. Варьировали шагом зубьев, который принимали равным 20,93 мм, а также 18 и 24 мм. Параметры процесса фрезерования фиксировали при работе 35-го зуба, когда поверхностные слои заготовки в достаточной степени прогреты при работе предшествующих зубьев.

В табл. 1 и 2 представлены результаты моделирования при варьировании шагом с неизменной подачей на зуб фрезы S_z. В этом случае в одинаковые моменты времени работы зуба глубина внедрения его в заготовку a_m является постоянной при различном шаге. Параметры процесса фиксировали в моменты времени $22{,}05\cdot10^{-5}$ … $22{,}25\cdot10^{-5}$ с,

когда глубина внедрения a_m равна приблизительно половине от максимальной, и в моменты $48{,}51 \cdot 10^{-5}$ … $48{,}95 \cdot 10^{-5}$ с, когда глубина внедрения близка к максимальной.

С увеличением шага увеличивается период времени между последовательно работающими зубьями фрезы. Следовательно, материал заготовки к моменту времени вступления в работу очередного зуба успевает остыть в большей степени, поэтому с увеличением S_z температура деформируемого слоя материала заготовки T_g снижается. С уменьшением T_g увеличиваются прочностные характеристики материала заготовки, силы трения F_1 и F_2 , сила резания P_z и мощности источников тепловыделения. Однако это увеличение несущественное, поскольку параметр T_g в малой степени зависит от шага зубьев (см. табл. 1).

Таблица 1. Зависимость геометрических параметров среза и сил резания от шага зубьев фрезы в различные моменты времени работы зуба; $S_z = 0{,}43$ мм/зуб

Шаг зубьев t_z, мм	Момент времени работы зуба фрезы τ, с	Глубина внедрения зуба в заготовку a_m, мкм	Температура деформируемого слоя заготовки T_g, К	Составляющая силы резания P_z, Н	Силы трения, Н	
					стружки о переднюю поверхность зуба F_1	задней поверхности зуба о заготовку F_2
18	$22{,}15 \cdot 10^{-5}$	0,0637	472	72,0	42,0	22,9
20,93	$22{,}05 \cdot 10^{-5}$	0,063	463	72,7	42,2	23,2
24	$22{,}25 \cdot 10^{-5}$	0,064	457,6	73,7	43,0	23,4
18	$48{,}73 \cdot 10^{-5}$	0,140	388,5	146,9	102,6	25,5
20,93	$48{,}51 \cdot 10^{-5}$	0,139	386	147,7	102,9	25,6
24	$48{,}95 \cdot 10^{-5}$	0,141	385,2	149,1	103,5	25,6

Таблица 2. Зависимость мощностей источников тепловыделения и температур от шага зубьев фрезы в различные моменты времени работы зуба; $S_z = 0{,}43$ мм/зуб

Шаг зубьев t_z, мм	Момент времени работы зуба фрезы τ, с	Мощности источников тепловыделения, Вт			Средняя температура, К на площадках контакта		Средняя температура на линии пересечения площадок T_E. К	Температура заготовки, К, на глубине 100 мкм
		в зоне контакта стружки с зубом W_1	в зоне контакта зуба с заготовкой W_2	в зоне деформирования W_g	стружки с зубом, T_1	зуба с заготовкой, T_2		
18	$22{,}15 \cdot 10^{-5}$	146,8	160,5	197,0	795	870	1213	461
20,93	$22{,}05 \cdot 10^{-5}$	147,9	162,5	198,3	791	866	1210	454
24	$22{,}25 \cdot 10^{-5}$	150,4	163,7	201,8	792	868	1216	449
18	$48{,}73 \cdot 10^{-5}$	359,1	178,5	498,0	865	931	1263	567
20,93	$48{,}51 \cdot 10^{-5}$	358,4	179,0	496,8	861	925	1255	562
24	$48{,}95 \cdot 10^{-5}$	362,2	179,2	502,4	861	927	1259	560

В результате незначительно снижается температура в поверхностных слоях заготовки и изменяются локальные температуры (см. табл. 2).

Следовательно, варьирование шагом при постоянной подаче на зуб фрезы не приводит к заметному изменению параметров процесса резания и температурного поля.

В табл. 3 и 4 приведены результаты моделирования при варьировании шагом с неизменной скоростью продольной подачи. В данном случае S_z будет различной для

фрез с различным шагом. Такая ситуация может возникнуть, в частности, при использовании фрез с неравномерным шагом между зубьями.

Таблица 3. Зависимость геометрических параметров среза и сил резания от шага зубьев фрезы в различные моменты времени работы зуба; V_S = 8,56 м/мин

Шаг зубьев t_z, мм	Момент времени работы зуба фрезы τ, с	Глубина внедрения зуба в заготовку a_m, мкм	Температура деформируемого слоя заготовки T_g, К	Составляющая силы резания P_z, Н	Силы трения, Н	
					стружки о переднюю поверхность зуба F_1	задней поверхности зуба о заготовку F_2
18	$22{,}98\cdot10^{-5}$	0,057	474	66,9	37,6	22,9
20,93	$22{,}05\cdot10^{-5}$	0,063	463	72,7	42,2	23,2
24	$19{,}98\cdot10^{-5}$	0,065	486	72,1	42,3	22,5
18	$49{,}79\cdot10^{-5}$	0,124	390	133,3	90,7	25,5
20,93	$48{,}51\cdot10^{-5}$	0,139	386	147,7	102,4	25,6
24	$46{,}69\cdot10^{-5}$	0,152	408	155,9	109,4	24,9

Таблица 4. Зависимость мощностей источников тепловыделения и температур от шага зубьев фрезы в различные моменты времени работы зуба; V_S = 8,56 м/мин

Шаг зубьев t_z, мм	Момент времени работы зуба фрезы τ, с	Мощности источников тепловыделения, Вт			Средняя температура, К на площадках контакта		Средняя температура на линии пересечения площадок T_E. К	Температура заготовки, К, на глубине 100 мкм
		в зоне контакта стружки с зубом W_1	в зоне контакта зуба с заготовкой W_2	в зоне деформирования W_g	стружки с зубом, T_1	зуба с заготовкой, T_2		
18	$22{,}98\cdot10^{-5}$	131,7	160,1	176,2	799	892	1224	466
20,93	$22{,}05\cdot10^{-5}$	147,9	162,5	198,3	791	866	1210	454
24	$19{,}98\cdot10^{-5}$	148,1	157,4	198,9	764	886	1372	471
18	$49{,}79\cdot10^{-5}$	317,6	178,2	437,4	849	936	1270	582
20,93	$48{,}51\cdot10^{-5}$	358,4	179,0	496,8	861	925	1255	562
24	$46{,}69\cdot10^{-5}$	382,9	174,4	533,9	853	986	1464	527

Увеличение глубины внедрения зуба в заготовку a_m должно привести к увеличению силы резания и сил трения. С увеличением времени τ увеличивается время действия источников тепловыделения, что приводит к увеличению контактных температур. С другой стороны, с увеличением шага увеличивается время между последовательно работающими зубьями, что приводит к увеличению времени остывания заготовки, уменьшению T_g и увеличению сил резания и трения и мощностей источников тепловыделения.

При изменении шага зубьев от 18 до 20,93 мм незначительное снижение температуры деформируемого слоя материала заготовки T_g и увеличение глубины внедрения a_m приводят к увеличению силы резания и трения и мощностей источников тепловыделения. В момент времени, близкий к моменту выхода зуба фрезы из контакта, параметры F_1, P_z, W_1 и W_g увеличились на 13, 11, 13 и 14% соответственно. Параметры F_2 и W_2 увеличились незначительно. В результате незначительно снизились температуры T_E и T_2 и температура в поверхностных слоях заготовки.

При выходе зуба из контакта с заготовкой деформируются слои материала заготовки, в меньшей степени прогретые в результате работы предшествующих зубьев.

Например, для фрезы с шагом 20,93 мм температура деформируемого слоя при τ = $48{,}51 \cdot 10^{-5}$ с на 16% ниже, чем в момент времени $22{,}05 \cdot 10^{-5}$ с. Поэтому причиной увеличения силы резания P_z примерно в 2 раза с увеличением τ является не только увеличение глубины внедрения зуба a_m, но и увеличение прочностных характеристик материала заготовки.

В результате с увеличением времени контакта зуба с заготовкой мощности источников W_1 и W_g увеличились более, чем в два раза. Средние контактные температуры T_1 и T_2 для фрезы с шагом 20,93 мм увеличились на 8 и 7% соответственно; температура заготовки на глубине 100 мкм увеличилась в большей степени – на 24%.

При увеличении шага до 24 мм температура деформируемого слоя материала заготовки T_g несколько увеличивается, поэтому снижаются прочностные характеристики обрабатываемого материала. В то же время увеличивается глубина внедрения зуба в заготовку. Влияние этих факторов приводит к тому, что в момент времени τ = $46{,}69 \cdot 10^{-5}$ с при обработке фрезой с шагом 24 мм в отличие от фрезы с шагом 20,93 мм сила P_z и мощности W_1 и W_g увеличились на 5, 7, и 7% соответственно. Поэтому увеличились локальные температуры T_E и T_2 – на 17 и 7% соответственно и незначительно снизилась температура T_1. На 6% снизилась температура в поверхностных слоях заготовки.

Наиболее значительное влияние изменение шага зубьев в пределах от 18 до 24 мм оказывает на локальные температуры T_E и T_2, которые повысились на 16 и 5%, а также температуру заготовки на глубине 100 мкм, которая снизилась на 10%.

Следовательно, варьирование шагом при постоянной скорости подачи фрезы приводит к более значительному изменению температурного поля, чем при обработке с постоянной подачей на зуб фрезы.

Выводы:

1. Выявлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования в зависимости от времени контакта зуба с заготовкой τ и шага зубьев фрезы t_z.

2. С увеличением времени контакта значительно увеличиваются глубина внедрения зуба в заготовку a_m , главная составляющая силы резания P_z и сила трения стружки о переднюю поверхность зуба F_1. Средние температуры на площадке контакта стружки с зубом T_1 и на площадке контакта зуба с заготовкой T_2 с увеличением времени τ увеличились на 8 и 7% соответственно; температура в поверхностных слоях заготовки увеличилась на 24%.

3. Варьирование шагом при постоянной скорости подачи фрезы приводит к более значительному изменению температурного поля, чем при обработке с постоянной подачей на зуб фрезы: при изменении шага зубьев от 18 до 24 мм локальные температуры T_E и T_2 увеличились на 16 и 5%, а температура заготовки на глубине 100 мкм снизилась на 10%.

Список литературы: 1. Khramov, A.V. Improving the performance of the processing of deep holes by improving the structure of the boring tool. «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering». *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 709 044068. Vol. 3. – 2019. **2**. Унянин, А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний / А.Н. Унянин // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 220 – 235.

УДК 62-187.4

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ПЛОСКИХ СТЫКАХ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСИЛИЯ ТРЕНИЯ В СПЕЦИАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ НА БАЗЕ ШАРИКОВИНТОВОЙ ПАРЫ

Федуков А.Г., Хандожко А.В.
(*ФГБОУ ВО «БГТУ», г. Брянск, Россия (4832) 58-82-89, fedukov.lvdu@gmail.com*)

Abstract: *On the example of a linear coordinate based on a ball screw pair, the authors consider the influence of contact deformations in flat joints on additional frictional forces arising in the nut.*
Key words: *accuracy, unified modules, ball-screw pair, linear guides, contact stiffness.*

В настоящее время сложилась тенденция, что при проектировании и изготовлении оборудования использовать унифицированные модули. В таком случае возрастает число стыков, большей частью плоских. Это создает сложности в обеспечении жесткости узлов, возникают вопросы по обеспечению точности, надежности.

Одним из самых часто используемых узлов в станкостроении является линейная координата на базе шариковинтовой пары (ШВП). Производители дают ряд методик по обеспечении точности, сборки координаты. Как правило, практически во всех рекомендациях использовать ШВП с радиальной нагрузкой нельзя. Чтобы обеспечить данный пункт необходимо, как можно точно изготовить все детали, но при этом все детали имеют свой допуск на изготовление. Следовательно, обеспечить точность очень сложно. На схеме, представленной, на рисунке 1 рассмотрим случай одного из возможных вариантов, при котором может возникнуть радиальная сила в ШВП.

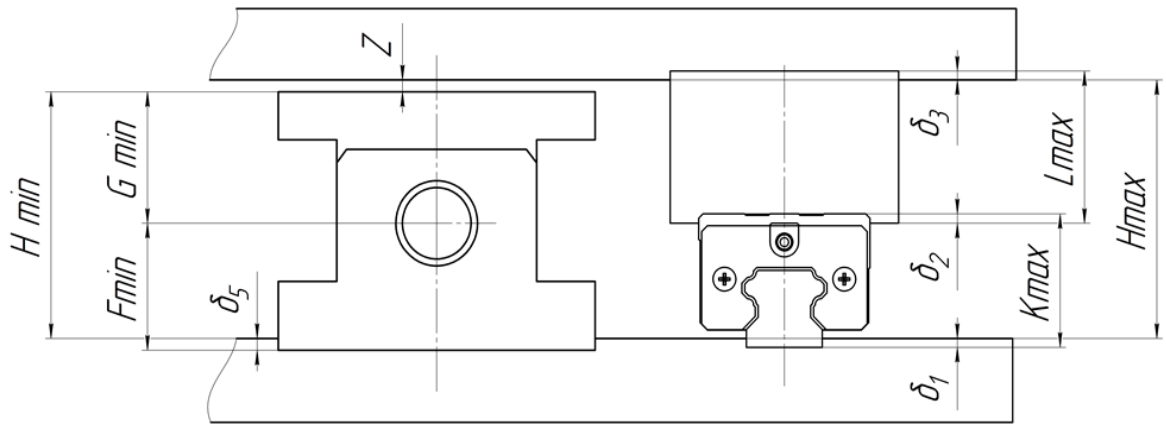


Рис. 1. Расчетная схема линейной координаты для определения максимального зазора

На схеме можно видеть, что размер H образуется с двух сторон, со стороны направляющих, и со стороны ШВП. При расчете, что с одной стороны все размеры имеют минимальные размеры по допускам, а с другой стороны максимальные то возникает зазор.

При этом следует не забывать, что при закреплении с зазором, также есть контактное сближение. Тогда общий зазор будет равняться:

$$Z_{общ} = Z + \delta_4 \quad (1)$$

В лаборатории БГТУ был создан стенд со следующими характеристиками размер F=48±0,02; G=35±0,02; L = 45±0,03; K = 38±0,01.

Для этого случая при расчет размерных цепей Z = 0,08 мм без учета контактных деформаций.

Контактные сближения для дальнейшего расчета находились по зависимостям (2) [1,2] и (3) [3], а также экспериментальным данным. Результаты величин зазора представлены в таблице 1.

$$\delta = C\sigma^{m} \quad (2)$$

где σ – среднее давление в стыке, кг/см^2; показатель степени m=0,5; значение коэффициента С меняется от 1,5 при черновом шабрении до 0,07 при притирке [4 – 7].

$$\frac{\delta}{Ra} = C_0 \varepsilon \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \quad (3)$$

где $Ra = (Ra1 + Ra2)/2$, $Ra1$, $Ra2$ – средние арифметические высоты микронеровностей контактирующих поверхностей деталей; $E = 2E1E2/(E1 + E2)$ – приведенный модуль упругости контактирующих поверхностей деталей; C_0 – коэффициент, учитывающий взаимное расположение микронеровностей; ε – коэффициент влияния масштаба, учитывающий влияние волнистости и отклонений формы (масштабный фактор).

Таблица 1. Величина зазора без контактного сближения, и с его учетом, рассчитанное разными методами

Величина зазора Z, мм			
Без контактного сближения	С учетом сближения рассчитанного по формуле (2)	С учетом сближения рассчитанного по формуле (3)	С учетом сближения измеренного в ходе эксперимента
0,080	0,083	0,085	0,088

По результатам можно говорить, что при решении такой задачи не учитывая контактного сближения, теряется точность на 10-13%. Разница достигает практически 0,01 мм. Существующие методы расчеты уменьшают эту погрешность до 5%. В некоторых случаях этого вполне достаточно, если к линейной координате нет очень высоких требований к точности.

Учитывая влияние контактного сближения в зазоре, величина радиальной силы также будет возрастать, что дает наиболее полную оценку нагрузки на винт. Производители в своих рекомендациях по использованию ШВП не рекомендуют их использовать с радиальными силами. Такое использование ведет к деформированию винта (рисунок 7). Для неточных передач есть смысл использовать гайку винта с ШВП с зазором, она позволяет убрать большую часть прогиба, при этом уменьшая радиальную силу.

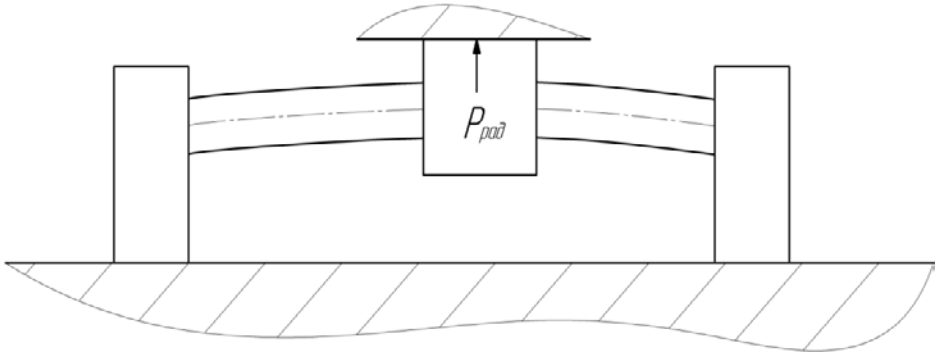


Рис. 2. Схема изгиба винта в линейной координате Рассмотрим по нашей схеме случай, когда в гайке нет зазора. Тогда винт будет прогибаться на самую большую величину изгиба по всей длине, которая равна ранее полученным зазорам. Из рисунка 2 по правилам сопротивления материалов, можно выразить следующую схему (рисунок 3). На балку с жесткой заделкой с одной стороны действует радиальная сила. Длина балки равна половине длины между двумя подшипниковыми опорами. В идеальном случае, когда между опорами нет разно высотности, нагрузка будет распределяться симметрично. Величина изгиба ω будет равна сумме зазора и податливости.

Рис. 3. Расчётная схема

Длина консоли в этой схеме будет равна, на каком расстоянии от подшипниковой опоры находится корпус гайки. Для определения силы воспользуемся известной формулой (4) [4].

$$\omega = \left(\frac{P \cdot l^3}{3EI} \right) \quad (4)$$

где: E – модуль упругости материала, Па; I – момент инерции вала, мм^4; l – длина консоли, мм; P – радиальная сила, кгс (Н).

Для расчётов были определены следующие длины консолей 30 мм, и 200 мм, при всей длине рабочей части винта 400 мм. Результаты расчётов представлены в таблице 4.

По результатам расчетов, можно увидеть, что погрешность при расчетах также сохранилась. Разница при расчетах также достигает 10%. Из полученных данных при небольшой консоли, т.е. когда гайка винта подходит к подшипниковой опоре, радиальная нагрузка резко возрастает. На графике, на рисунке 4, изображена схема нагрузки определенная по экспериментальным данным.

Таблица 2– Результаты расчетов радиальной силы

Метод расчета зазора	Величина изгиба винта, w	Длина консоли, мм	Усилие на винте, кгс (Н)
Без учета контактных деформаций	0,08	30	9146 (91460)
		200	31 (310)
Зазор с учетом контактных деформаций рассчитанных по формуле (1)	0,083	30	9489 (94890)
		200	32 (320)
Зазор с учетом контактных деформаций рассчитанных по формуле (2)	0,085	30	9717 (97170)
		200	33 (330)
Зазор с учетом контактных деформаций по результатам эксперимента	0,088	30	10060 (100600)
		200	34 (340)

Рис. 4. График осевой нагрузки винта

Из графика можно видеть, что винт имеет низкие значения радиальной силы на длине от 100 до 300 мм. При приближении гайки к подшипниковым опорам сила увеличивается, что ведет к деформации винта. На практике чаще всего, гайка заклинивается, двигатель не может провернуть винт. Для устранения обычно приходиться разбирать линейную координату.

Под действием радиальных сил возрастают силы трения в ШВП в направляющих. Из-за этого идет рост крутящего момента на электродвигателе. Величина силы трения изменяется в пределах рабочего хода, крутящий момент холостого хода тоже должен меняться. Это ухудшает точность позиционирования, плавность хода, динамические характеристики привода.

Помимо роста момента холостого хода, указанные погрешности влияют и на колебания винта, при страгивание гайки и её торможения.

Для устранения такой ситуации на практике используют метод подгонки, притирки, которые позволяют уменьшить зазор между корпусом гайки и столом. Это позволяет уменьшить радиальные нагрузки, что позволяет двигателю работать только с осевой нагрузкой.

При проектировании линейных координатных осей технологического оборудования в качестве одного из критериев качества возможно использование постоянство величины крутящего момента холостого хода. Он зависит от радиальной силы, на которую влияют контактные деформации. Они способны ухудшить работу линейной координаты, увеличив силы трения в направляющих и ШВП. В худшем случае они способны с деформировать винт.

Включение в расчеты контактного сближения, как правило, актуально для высокоточных линейных координат. При снижении требований к точности конструкции, данные поправки можно перекрыть допусками, и использованием менее точных модулей, а также путем увеличения мощности двигателя.

Список литературы: 1. Решетов Д.Н.. Детали и механизмы металлорежущих станков / Коллектив авторов под ред. д-ра т.н. Решетова Д.Н. - Москва. : «Машиностроение», 1972, т.1. стр. 664. **2.** Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г Суслов - Москва : Машиностроение, 1987. стр. 208. **3.** Иванов А.С. Метод расчета соединения с натягом в общем случае нагружения / А.С. Иванов, М.М. Ермолаев, С.К. Руднев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2015. № 1. С. 75-83. **4.** Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов/ Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев 2-е издание перераб. И доп. – Киев: Наук. Думка 1988. стр. 736.

ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

Хавлин Т.В., Михайлов А. Н., Михайлов Д.А.
(*ДАВД МВД ДНР, г. Донецк, ДНР; ДОННТУ, г. Донецк, ДНР*)
Тел.: +38 (071)3212394; E-mail: strana.sovetov.80@mail.ru

Abstract: *Operation of gas turbine engines, a process that occurs against the background of constant complication of both engine designs and related processes of design, manufacture, operation (maintenance, repair) and modernization of gas turbine engines. In this regard, the development of technological bases for improving the quality of the structure of gas turbine engines used in various fields of human activity, for example, as engines of wheeled and tracked vehicles, can be of great theoretical and practical importance.*
Key words: *gas turbine engines, wheeled and tracked vehicles, quality improvement, structure, efficiency*

Введение. Эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД), процесс, который происходит на фоне постоянного усложнения как конструкций двигателей, так и связанных процессов проектирования, изготовления, эксплуатации (обслуживания, ремонта) и модернизации ГТД. В связи с этим большое теоретическое и практическое значение может иметь разработка технологических основ повышения качества структуры ГТД, применяемых в различных сферах деятельности человека, например в качестве двигателей колесных и гусеничных машин.

Эксплуатационные характеристики, которыми обладает ГТД, устанавливаемый на машину, обеспечиваются ему в процессе проектирования при соблюдении важного условия, которое указывает на то, что эффективность эксплуатации машины во многом зависит от эффективности применяемого на ней ГТД. В свою очередь эффективность определяется из различных параметров: температурные показатели на входе в турбину и в турбине; преобразования показателей давления в компрессоре; показатели расхода топлива, экологичность и т.д. [1, 2]. Каждый такой параметр определяется при проектировании, как в отдельности, так и в комплексе, исходя из условий оптимальности.

Далее, рассмотрим структуру ГТД, состоящую из набора групп функциональных модулей, которая представлена на рис. 1.

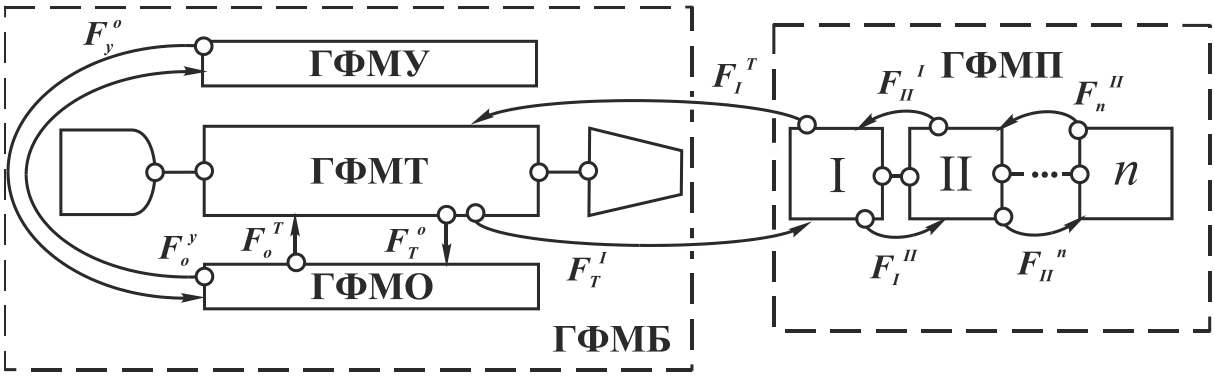


Рис. 1. Общая схема структуры ГТД в виде набора групп функциональных модулей

Рассматриваемую в данном случае структуру можно разделить на несколько групп: группа функциональных модулей управления – ГФМУ (агрегаты, узлы и детали системы запуска, системы защиты, системы противообледенения и т.д.); группа функциональных модулей базирования – ГФМБ (несущая конструкция, крепления

двигателя, соединение частей двигателя между собой и т.д.); группа функциональных модулей вспомогательного оборудования обеспечивающего работу двигателя – ГФМО (агрегаты, узлы и детали системы запуска, системы защиты, системы противообледенения, системы охлаждения и т.д. находящиеся на двигателе); группа функциональных модулей турбокомпрессора – ГФМТ (входные и выходные устройства, реверсивные устройства, компрессор, турбина, камера сгорания, свободная турбина с затрубным диффузором и т.д.), группа функциональных модулей передачи и потребления крутящего момента первого (редукторы) и второго (нагнетатели, электрогенераторы и т.д.) уровня – ГФМП. Каждый модуль или группа модулей находится на определенном уровне иерархии общей структуры ГТД и при исследовании должны рассматриваться и изучаться как в общем, так и на уровне отдельных частей, функциональных элементов, деталей, поверхностей, зон, точек и т.д., а также связей между ними (F_y^o, F_o^y, F_o^T, F_T^o, F_T^I, F_I^T, F_I^{II}, F_{II}^I, F_{II}^n, F_n^{II}). Данные связи (отношения) указывают на обмен и взаимодействие между объектами модулей посредством передачи (обмена) материальными, энергетическими и информационными сигналами (воздействиями), которые выводят каждый объектов группы функциональных модулей из равновесного состояния. Выход из равновесного состояния, по сути, приводит к реакции объекта внутренней (износ, расход и т.д.), реакции воздействия (управление, отключение, включение и т.д.) или в комплексе, происходящей непрерывно (прерывно, непостоянно, дискретно и т.д.) во времени. Количество модулей и наименование может изменяться в зависимости от типа и назначения ГТД.

Следующее, учитывая перечисленные выше параметры эффективности ГТД, можно сделать вывод, что основу этой эффективности определяют параметры именно группы функциональных модулей турбокомпрессора непосредственно участвующих в преобразовании энергии газа в механическую энергию. Поэтому в нашей работе в основном исследование, будет проводится в направлении повышения качества структуры ГТД двигателей колесных и гусеничных машин на уровне группы функциональных модулей турбокомпрессора. Полученная при исследовании методология позволит обеспечит повышение качества структуры ГТД (качество объектов структуры двигателя и связей между ними) ориентируясь на условия эксплуатации, тип двигателя, назначение ГТД и т.д. При этом одной из идей исследования будет являться возможность обеспечения равности эксплуатационных ресурсов или придание большой степени сходства эксплуатационных показателей основных элементов (деталей, функциональных частей и т.д.) групп функциональных модулей на основе функционально-ориентированного подхода [3] с изучением элементов структуры и связей между ними [4, 5].

Научный интерес данной тематики подтверждается результатами исследований и внедрений в области машиностроения, например, гибридных систем. В таких системах в качестве источника энергии, для обеспечения движения машины, используются аккумуляторные батареи и электродвигатель, а в качестве источника восполнения энергозатрат разнотопливные микротурбины. Созданные гибридные двигатели используются как в легковых автомобилях, так и в транспортных средствах муниципального значения [6, 7]. Кроме этого, использование ГТД с системой электрической трансмиссии запланировано, например, в боевых гусеничных машинах типа БМП. Такие разработки ведутся в АО «Конструкторское опытное бюро моторостроения» (Калуга) и на Курганском машиностроительном заводе, где планируется выпуск БМП «Рыцарь», сориентированной на эксплуатацию в условиях низких температур. Про данные факты свидетельствует информация, полученная из различных открытых источников [8].

Обобщив материал статьи, можно сделать вывод, что разработки проводимые в области создания новых, перспективных ГТД и сам процесс их эксплуатации в различной технике напрямую указывает на актуальность проводимого в нашей работе исследования, целью которого будет является разработка технологических основ повышения качества структуры ГТД, применяемых в качестве двигателей колесных и гусеничных машин. Для достижения данной цели необходимо, в общем решить комплекс основных задач, среди которых:

1. Провести аналитический обзор современного состояния вопроса повышения качества структуры ГТД применяемых в качестве двигателей колесных и гусеничных машин.

2. Разработать общую методологию технологии повышения качества структуры ГТД.

3. Выполнить синтез структурно-технологического обеспечения повышения качества структуры ГТД применяемых в качестве двигателей колесных и гусеничных машин.

4. Выполнить структурно-временной синтез параметров качества и применяемой технологии для структуры ГТД применяемых в качестве двигателей колесных и гусеничных машин.

5. Выполнить синтез конструкторско-технологического обеспечения повышения качества структуры ГТД применяемых в качестве двигателей колесных и гусеничных машин.

6. Разработать методики повышения качества некоторых групп модулей структуры ГТД. Провести экспериментальные исследования разработанной технологии. Осуществить внедрение результатов исследования в образовательный и производственный процессы.

Решение комплекса перечисленных задач станет основой для повышения качества структуры ГТД за счет придания функционального соответствия элементов и связей между элементами структуры ориентируясь на особенности условий эксплуатации, а также обеспечения равенства (сходства) ресурсных показателей.

Список литературы: 1. Нечаев, Ю.Н. Теория авиационных двигателей, ч.1. Учебник для ВУЗов ВВС / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров, В.Н. Котовский, А.Н. Полев // Под ред. Ю.Н. Нечаева. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2005 – 366 с.: илл. – 186. 2. Трянов, А.Е. Особенности конструкции узлов и систем авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. пособие / А.Е. Трянов.- Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 202 с. 3. Хавлин, Т.В. Синтез технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинного двигателя: специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хавлин Тарас Викторович; Донецкий национальный технический университет. - Донецк, 2020. - 228 с. - Библиогр.: с. 176-189. - Текст: непосредственный. 4. Биркгоф, Г. Теория структур. - М.: ИЛ, 1952. - 407 с. 5. Ивлев, Ю.В. Логика: Учебник. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. - 270 с. 6. https://www.drive.ru/news/56d6c4eeec05c47d3300075e.html. 7. https://manbw.ru/analitycs/ecobus_microturbine.html. 8. https://topwar.ru/118252-rycar-polyarnogo-obraza.html.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ СИМПОЗИУМ «ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ И СПЛОШНЫХ СРЕД» ИМ. А. Г. ГОРШКОВА

Хроматов В.Е., Комиссарова Т.Н., Бугаев Н.М. *(НИУ «МЭИ», МАИ(НИУ), г. Москва, Россия)*
E-mail: KhromatovVY@mpei.ru

Abstract: *The article deals with the history, organization, development and work of the International Symposium "Dynamic and technological problems of a mechanics of constructions and continuous mediums", organized by researchers and teachers of the Moscow Aviation Institute (National Research University).*
Key words: *power engineering industry, Moscow Aviation Institute , symposium, A. G. Gorshkov, Yaropolets.*

С 17 по 21 мая 2021 года прошел очередной XXVII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», организованного научными сотрудниками и преподавателями Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет). Несмотря на неюбилейные номер и год проведения симпозиума он стал юбилейным, поскольку в этом году исполнилось бы 80 лет со дня рождения его основателя – Анатолия Герасимовича Горшкова, выдающегося ученого-механика и педагога высшей школы, 95 лет академика РАН Владимира Васильевича .Болотина, также стоявшего у истоков становления и развития симпозиума, начиная с 1995 года, о чем ранее было изложено в статьях [1, 2], а также и материалах симпозиума 2021 года [3, 4]. 100 летие выдающегося ученого математика и механика, одного из основателей отечественной кибернетики Юрия Исааковича Неймарка широко отмечалось в Нижнем Новгороде, ННГУ им. Н.И. Лобачевского , НИИ Механики ННГУ и также нашло отражение в работах симпозиума [4, 5]. Кроме МАИ(НИУ) в состав организаторов симпозиума входят НИИ механики Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского, ООО санаторий «Вятичи». Научные доклады участников симпозиума (наших коллег из Армении, Белоруссии, Татарстана, Казани, Нижнего Новгорода, Саратова, Перми, ведущих московских НИИ и ВУЗов) являются обменом научным опытом, сопровождаются серьезной, но доброжелательной критикой и предложениями по направлению дальнейших научных исследований. Организатором и его бессменным руководителем с 1995 г. по 2006 год был А.Г. Горшков – профессор, доктор физико-математических наук, Заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники. Работа симпозиума традиционно проходит по трём секциям: «Динамика сплошных сред», «Динамика и прочность конструкций», «Технологические проблемы новых материалов и конструкций». География участников симпозиума охватывает практически все регионы РФ и стран ближнего зарубежья. Только в 1-ом томе материалов XXYI симпозиума было опубликовано уже более 120 докладов, в котором можно познакомиться с разнообразной тематикой научных исследований ведущих научных школ России и стран ближнего зарубежья.

Организация работы научной конференции (симпозиума), проходила в начале 90-х годов прошлого столетии во время распада и разрушения советской науки и высшей школы. Немало скептиков предупреждали А.Г. Горшкова о бессмысленности этой затеи, и заранее, ничего не делая, предрекали провал этого мероприятия. В середине февраля 1995 года, в непривычное для всех время начала учебного весеннего семестра, состоялось открытие симпозиума в необычном для многих месте: в селе Ярополец Волоколамского района Московской области в родовом имении семьи Натальи Николаевны Гончаровой, впоследствии жены А.С. Пушкина. Усадьба Гончаровых после разрушения во время ВОВ

1941-1945 гг. восстанавливалась студентами и сотрудниками МАИ и являлась базой отдыха МАИ. Там же, недалеко от усадьбы находится лётно-испытательная учебная база МАИ «Алферьево», где студенты МАИ проходят лётную подготовку.

Ярополец – интересное место, там сохранились памятники Екатерине Великой, Ярополецкая ГЭС, от которой засветилась лампочка Ильича; там ощущается покровительство Иосифо-Волоцкого монастыря и Святого Иосифа Волоцкого; создан мемориал героям-панфиловцам, защищавшим разъезд Дубосеково. Присущие А.Г.Горшкову черты – интеллигентность, широкая научная эрудиция, увлеченность литературой, живописью, историей Отечества, Православной культурой России нашли воплощение во всей его деятельности и на симпозиуме. Всем этим ему хотелось поделиться со своими коллегами – участниками симпозиума. Он часто повторял: «Здесь особый дух…», а мы его по-пушкински дополняли: «Здесь русский дух, здесь Русью пахнет». Этим А.Г. Горшков заразил и своих единомышленников и помощников из МАИ, которые стояли у истоков организации симпозиума и продолжают дело Анатолия Герасимовича: Д.В. Тарлаковский, Ф.Н. Шклярчук, Н.М. Бугаев и многие другие.

По итогам работы первого симпозиума в 1995 году были изданы «Тезисы докладов Всероссийского симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». В Программный комитет 1-го симпозиума входили: Горшков А.Г. (председатель), Тарлаковский Д.В. (зам. председателя), Зайцев В.Н. (ученый секретарь), Бойцов Б.В., Болотин В.В., Воробей В.В., Ворович И.И., Морозов Н.Ф., Светлицкий В.А., Шестериков С.А., Шклярчук Ф.Н. Было представлено 60 докладов, среди которых – пять работ сотрудников кафедры ДПМ МЭИ. На 2-й симпозиум, который состоялся в феврале 1996 года, было представлено 82 доклада и были выпущены «Тезисы докладов II Международного симпозиума…», то есть с 1996 года симпозиум принял статус Международного. Этот статус сохраняется по настоящее время. В 1997 году по итогам работы были опубликованы «Тезисы докладов III Международного симпозиума …», которые содержали 97 докладов со списками литературы в тезисах. В дальнейшем из года в год число участников росло, качество издаваемых материалов и их содержание становились всё выше и выше.

В 2000-х годах в состав Программного комитета были включены ведущие ученые из Германии, Нидерландов, Польши, КНР. Издаваемые труды стали именоваться «Материалы V Международного симпозиума…». В 1999 году симпозиум был приурочен к 200-летию со дня рождения А.С. Пушкина. На симпозиуме в 2004 году был представлен доклад «Научно-методическое наследие И.И. Трапезина (к 100-летию со дня его рождения), была проведена «Школа-семинар «Использование открытого образования в учебном процессе». В 2006 году симпозиум был посвящен 100-летию со дня рождения выдающегося ученого-механика члена-корреспондента АН СССР В. З. Власова, а в 2010 году – 100-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора А.С. Вольмира. Начиная с 2007 года после ухода из жизни А.Г. Горшкова (5.03.1941-29.04.2006) наш симпозиум стал симпозиумом имени А.Г. Горшкова. В 2016 году XXII Международный симпозиум был посвящен 75-летию его основателя Анатолия Герасимовича Горшкова.

Руководство симпозиумом осуществляется Программным комитетом, председателем которого является докт. физ.-мат. наук, академик РАЕН, профессор и зав. кафедрой Сопротивления материалов, динамики и прочности машин МАИ Тарлаковский Дмитрий Валентинович. Зам председателя – докт. физ.-мат. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ Шклярчук Федор Николаевич. Ученый секретарь – канд. физ.-мат. наук, член-корр. РАЕН, доцент кафедры СМДПМ МАИ Федотенков Григорий Валерьевич. В программный комитет входят выдающиеся ученые-механики академики РАН И.Г. Горячева, В.А. Бабешко, А.М. Матвеенко, Н.Ф. Морозов. Бессменными его членами являются представитель братской Белоруссии докт. физ.-мат. наук, профессор Э.И. Старовойтов, В.Н.

Паймушин - академик АН. республики Татарстан, Л.Н. Рабинский - докт. физ.-мат. наук, профессор, член-корр. РАЕН и другие известные российские и зарубежные специалисты.

Председателем организационного комитета симпозиума уже 26-й год подряд является Николай Михайлович Бугаев, который с 1980 года работает в МАИ заведующим лабораторией кафедры СМДПМ. В состав оргкомитета входят не только ветераны МАИ, но и молодые сотрудники, и аспиранты кафедры СМДПМ. Они выполняют огромную подготовительную и текущую работу во время проведения симпозиума. У многих из них научная деятельность начиналась еще в студенческие годы на кафедре СМДПМ и первые научные результаты были доложены на симпозиуме. Анатолий Оконечников закончил МАИ кафедру СМДПМ в 2012 году, учился в аспирантуре кафедры, в 2015 году защитил диссертацию – канд. физ.-мат. наук, в настоящее время работает на кафедре в должности доцента, активно участвует в подготовке и организации работы симпозиума. Яна Вахтерова, окончила МАИ в 2018 году, аспирант кафедры СМДПМ и по совместительству ассистент кафедры, также активно участвует в организации работы симпозиума.

Молодые ученые и студенты различных ВУЗов приезжают на симпозиум со своими докладами и встречают здесь внимательное отношение и доброжелательную критику со стороны именитых ученых. Немало кандидатских и докторских диссертаций прошли свою апробацию на симпозиуме им. А.Г. Горшкова, что в дальнейшем нашло своё отражение в авторефератах диссертационных работ, к которым относятся и молодые доктора наук В.А. Вестяк, А.В. Земсков – активные участники организации симпозиума.

Авторитет Московского авиационного института в научном мире сохраняется и укрепляется не только славой его выпускников, но и реальными научными достижениями организаторов симпозиума и его участников. С работой симпозиума связаны имена многих выдающихся учёных, основателей советской и российской школы механики деформируемого твердого тела: Н.А. Алфутов, А.И. Голованов, А. В. Коровайцев, В.А. Светлицкий, А.И. Станкевич, В.В. Парцевский, В.А. Постнов, И.Г. Терегулов, В.И. Шалашилин, Г.П. Фетисов и многие другие.

Распорядок работы симпозиума остается неизменным все годы его существования. Заседания проходят до обеда. После обеда – традиционные спортивные мероприятия – лыжи, футбол на снегу. Ежегодно проводятся экскурсии: раньше в краеведческий музей Яропольца и Иосифо-Волоцкий монастырь, теперь – в музей Е.Р. Дашковой. Вечером в Пушкинском зале усадьбы Гончаровых проводились литературные чтения, спектакли студенческого театра «Фауст» ДК МАИ, народного театра «На Валу» из Волоколамска. Именно после первого участия в работе симпозиума в усадьбе Гончаровых у доцента Брянского технического университета Галины Александровны Неклюдовой открылся талант художника-пейзажиста. В дальнейшем Г.А. Неклюдова неоднократно устраивала выставки своих картин для участников симпозиума в Яропольце.

В 2014 году проведение уже XX международного симпозиума им. А.Г. Горшкова по техническим причинам было перенесено в не менее интересное в историческом плане место г. Кремёнки Калужской области, рядом с известным наукоградом Протвино. В Кремёнках в средней школе №1 имени Е.Р. Дашковой создан музей, посвящённый первому Президенту Российской академии наук Санкт-Петербурга в лице княгини Екатерины Романовны Дашковой (1743-1810). Академия была учреждена указом императрицы Екатерины II 21 октября 1783 года. Е.Р. Дашкова последние годы жизни прожила в родовом имении села Троицкое, рядом с которым в XX веке был образован г. Кремёнки. Похоронена княгиня Е. Р. Дашкова в Храме Святой Живоначальной Троицы, построенном ею еще в 1765 году. На памятнике Е.Р. Дашковой, установленном также при участии руководства школы №1 на бульваре Дашковой в г. Кремёнки, высечены слова знаменитой Россиянки: *«Честь и чистая совесть – это лучшие основания для счастия. Помните, обращение к долгу делает людей нравственными. А превыше всего – долг Отечеству»*. 27 марта 2018 года – в год 275-летия со дня рождения Е.Р. Дашковой, в школе проводилось открытие Всероссийских Дашковских

чтений с посещением могилы Е.Р. Дашковой в селе Троицком, которые 28 марта были продолжены в Московском Доме Учёных. Участники симпозиума им. А.Г. Горшкова принимали участие в этих чтениях и традиционно посещают музей Е.Р. Дашковой, Храм в честь Святой Живоначальной Троицы и остатки усадьбы в селе Троицком.

В работе симпозиума принимают участие широко известные учёные-механики России, Белоруссии, Армении, Грузии, Кыргызстана, Татарстана, КНР, Вьетнама, Польши, Германии, Сирии. Руководители научных школ приезжают со своими учениками. В памяти молодых учёных остаются научные дискуссии в аудиториях и конференц-зале санатория «Вятичи» в г. Кремёнки, который активно развивается под руководством профессора МАИ доктора техн. наук В.А. Комкова.

Научные достижения Московского авиационного института, многочисленных российских и зарубежных ВУЗов и НИИ, представленные на симпозиуме им. А.Г. Горшкова, подтверждают, что научный и культурный потенциал общества был, есть и будет. Очерки об основателях научной школы кафедры ДПМ МЭИ и МАИ приведены в учебном пособии [7], тематика прошедшего уже 27 симпозиума служит ярким примером успешной работы симпозиума и российской научной школы. Преподаватели и научные сотрудники МЭИ и МАИ регулярно участвуют и в работе международной начно-технической конференции, «Машиностроение и техносфера XXI века» проводимого Донецким национальным техническим университетом также уже 27 лет, обзор работ которых представлен в [8].

Список литературы: 1. Хроматов В.Е., Бугаев Н.М. История развития симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» в Яропольце и Кременках. //Материалы XXV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Вятичи.18-22 марта 2019 г. Т.2. – М.: ООО «ТРП», 2019. С. 4-13. **2.** Хроматов В.Е. Он вчера не вернулся из боя. К 75 летию А.Г.Горшкова// Материалы XXII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Вятичи.15-19 февраля 2016 г. Т.1. – М.: ООО «ТРП», 2016. С. 8-12. **3**. Хроматов В.Е., Щугорев В.Н. Развитие методов статистической динамики и теории надежности в трудах В.В.Болотина. К 95 летию со дня рождения // Материалы XXVII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Вятичи.17-21 мая 2021 г. Т.1. – М.: ООО «ТРП», 2021. С. 4-8. **4.** Панкрашкина Н.Г., Хроматов В.Е. Развитие методов математического моделирования в трудах Ю.И.Неймарка. К 100 летию со дня рождения // Материалы XXVII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Вятичи.17-21 мая 2021 г. Т.1. – М.: ООО «ТРП», 2021. С. 179-186. ***5.*** Хроматов В.Е., Панкрашкина Н.Г. Вклад научного наследия Нижегородской школы механиков в становление и развитие специальности Динамика и прочность машин // Материалы XXV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Вятичи, 18-22 марта 2019 г. Т.1 М.: ООО «ТРП». 2019. С. 217-220. **6**. Тяпин А.Г. Воспоминания о выдающемся ученом – Болотине Владимире Васильевиче к дню его 95-летия // Газета НИУ МЭИ «Энергетик», 2021, № 2(3435). С. 8-11.**7.** Хроматов В.Е., Новикова О.В. Лекции по сопротивлению материалов структурно-логических схемах: учебное пособие – 2-е изд., испр. – М.: Издательский дом МЭИ, 2020. **8.** Хроматов В.Е., Комиссарова Т. Н., Панкрашкина Н.Г., Бугаев Н.М Исторические сведения о развитии фундаментальных наук и высшей школы при изложении технических дисциплин / Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Донецк, 2018. Т. 2. с. 209-213.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОГИХ ОРТОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК

Хроматов В.Е., Комиссарова Т.Н., Дуйшеналиев Т.Б. *(НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия)*
E-mail: KhromatovVY@mpei.ru

Abstract: *Vibrations of flat orthotropic shells are considered. Expressions for the asymptotic frequency density are derived. The influence of shell parameters on the eigenfrequency distribution is investigated. Graphs of the asymptotic and empirical densities of the oscillation frequencies of flat shells are constructed. The study of the effect of the shift modulus on the value of the frequency density showed that the frequency density increases slightly with a decrease , and, on the contrary, decreases with an increase. The change in the Poisson's ratio does not significantly affect the value of the frequency density.*
Key words: *orthotropic, flat shell, oscillations, frequency density, asymptotic frequency density, empirical frequency density.*

Задачи о распределении собственных частот упругих оболочек представляют интерес в связи с расчетом тонкостенных конструкций, колеблющихся в поле случайных сил с широким спектром. Плотность собственных частот тонких упругих изотропных оболочек исследована В.В. Болотиным на основе ранее им предложенного асимптотического метода для определения частот и форм колебаний упругих тел [1, 2]. Представляет интерес влияние магнитного поля на спектры собственных часто колебаний пластин и оболочек, чему были посвящены работы [3-5]. Влияние магнитного поля на спектры собственных частот колебаний ортотропных пластин были исследованы в работах [6, 7]. Остается не изученным вопрос о влиянии магнитного поля на распределение собственных частот колебаний ортотропных оболочек. Предварительно рассмотрим вопрос об исследовании плотности собственных частот колебаний пологих ортотропных оболочек.

1. Рассмотрим пологую прямоугольную в плане ортотропную оболочку, которая совершает свободные колебания. Введем на срединной поверхности оболочки криволинейные координаты x_1, x_2, совпадающие с линиями кривизны и главными осями упругости. Будем рассматривать такие формы колебаний, для которых тангенциальными силами инерции можно пренебречь и для форм колебаний ортотропной оболочки имеют место уравнения типа В.З. Власова[2].

$$\nabla_d^4 u - \nabla_\chi \varphi - \omega^2 u = 0;\ \nabla_b^4 \varphi + \nabla_\chi u = 0;\ \nabla_d^4 = d_{11}\frac{\partial^4}{\partial\xi_1^4} + 2d_{12}\frac{\partial^4}{\partial\xi_1^2\partial\xi_2^2} + d_{11}^{-1}\frac{\partial^4}{\partial\xi_2^4}; \qquad (1)$$

$$\nabla_b^4 = \frac{\partial^4}{\partial\xi_1^4} + 2b_{12}\frac{\partial^4}{\partial\xi_1^2\partial\xi_2^2} + b_{11}\frac{\partial^4}{\partial\xi_2^4};\ \nabla_\chi = \frac{\partial^2}{\partial\xi_1^2} + \chi\frac{\partial^2}{\partial\xi_2^2}$$

Здесь введены следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\xi_1 = k_0 x_1;\ \xi_2 = k_0 x_2;\ u = k_0 w;\ \varphi = k_0^3 B_{22} R_2 \psi;\ \chi = \frac{R_2}{R_1};\ \omega = \frac{\Omega}{\Omega_2};\ k_0^4 = \frac{1}{R_2^2 B_{22}(D_{11}D_{22})^{\frac{1}{2}}};$$

$$\Omega_2^2 = \frac{1}{\rho h R_2^2 B_{22}};\ d_{11}^2 = \frac{D_{11}}{D_{22}};\ b_{11} = \frac{B_{11}}{B_{22}};\ d_{12} = \frac{D_{12}}{(D_{11}D_{22})^{\frac{1}{2}}} = g d_{11}^{-1}(1 - \nu_2^2 d_{11}^2) + \nu_2 d_{11};$$

$$b_{12} = \frac{B_{12}}{B_{22}} = (g^{-1} - \nu_2);\ g = \frac{2G}{E_2}\ \left(d_{11}^2 = b_{11}^{-1} = \frac{E_1}{E_2}\right);$$

w, ψ - формы нормального прогиба и функции усилий в срединной поверхности оболочки, соответствующие собственной частоте Ω; ρh - плотность массы оболочки; R_1, R_2 - главные радиусы кривизны, которые в среднем полагаем постоянными; D_{jk} - элементы матрицы цилиндрических жесткостей; B_{jk} - элементы матрицы податливостей при безмоментной деформации; E_1, E_2, G, ν_2 - упругие постоянные материала оболочки; оси x_1, x_2 выбраны так, что $|\chi| < 1$.

Для частоты преимущественно изгибных форм колебаний оболочки справедлива асимптотическая формула:

$$\omega^2 = d_{11}\kappa_1^4 + 2d_{12}\kappa_1^2\kappa_2^2 + d_{11}^{-1}\kappa_2^4 + \frac{(\kappa_1^2 + \chi\kappa_2^2)^2}{\kappa_1^4 + 2b_{12}\kappa_1^2\kappa_2^2 + b_{11}\kappa_2^4} \qquad (2)$$

где κ_1, κ_2 –безразмерные волновые числа, определяемые соотношениями

$$\kappa_1 a_1 = m_1\pi + 0(1);\ \kappa_2 a_2 = m_2\pi + 0(1);\ (m_1, m_2 = 1, 2, \ldots). \qquad (3)$$

Формулы (1.2) и (1.3) справедливы вне области вырождения динамического краевого эффекта для ортотропных оболочек. Для замкнутых цилиндрических ортотропных оболочек с произвольными краевыми условиями на торцах, а также для цилиндрических панелей, опертых вдоль образующих, асимптотические соотношения (2), (3) справедливы при любых волновых числах κ_1, κ_2 и соотношениях между упругими постоянными ортотропного материала. Для замкнутых пологих оболочек вращения, опертых по торцам, пологих панелей с условиями шарнирного опирания по всем кромкам выражения (2), (3) являются точными.

2. Будем оценивать число собственных частот $N(\omega_*)$, меньших некоторого заданного значения частоты ω_*, как соотношение площади на плоскости волновых чисел κ_1, κ_2 области, внутри которой имеет место неравенство $\omega(\kappa_1, \kappa_2) < \omega_*$, к площади одной ячейки $\Delta\kappa_1\Delta\kappa_2$

$$N(\omega_*) \approx \frac{1}{\Delta\kappa_1\Delta\kappa_2} \iint\limits_{\Delta\kappa_1\Delta\kappa_2} d\kappa_1 d\kappa_2 \qquad (42.1)$$

Введем новые переменные

$r^2 = \kappa_1^2 d_{11}^{\frac{1}{2}} + \kappa_2^2 d_{11}^{\frac{1}{2}}$; $tg\theta = \dfrac{\kappa_2}{d_{11}^{-\frac{1}{2}}\kappa_1}$ и преобразуем формулы (1.2), (2.1) к следующему виду:

$$r^4(\theta) = \frac{1}{(1 - c^2\sin^2 2\theta)}\left[\omega^2 - \frac{\left(\cos^2\theta + \chi d_{11}\sin^2\theta\right)^2}{1 - a\sin^2 2\theta}\right]; \qquad (52.2)$$

$c_2 = \dfrac{1}{2}(1 - d_{12})$; $a = \dfrac{1}{2}(1 - b_{12}d_{11})$;

$$N(\omega_*) = \frac{1}{2\Delta\kappa_1\Delta\kappa_2} \int\limits_{\theta_1(\omega)}^{\theta_2(\omega)} r^2(\theta)d\theta; \qquad (62.3)$$

Затем, продифференцировав (6) по параметру ω, получим выражение для асимптотической плотности собственных частот

$$n(\omega)=\frac{\omega}{2\Delta\kappa_1\Delta\kappa_2}\int\limits_{\theta_1(\omega)}^{\theta_2(\omega)}\frac{d\theta}{\sqrt{(1-c^2\sin^2 2\theta)\left[\omega^2-\left(\cos^2\theta+\chi d_{11}\sin^2\theta\right)^2\cdot\left(1-a\sin^2 2\theta\right)^{-1}\right]}} \quad (72.4)$$

Пределы интегрирования $\theta_1(\omega)$, $\theta_2(\omega)$ определяются из условия неотрицательности подкоренного выражения в (7). Внеинтегральные члены при дифференцировании (6) по ω обращаются в нуль.

Асимптотическая плотность собственных частот колебаний ортотропной оболочки выражается через гиперэллиптический интеграл и не может быть сведена к табулированным функциям, как в изотропном случае. Представим границу интегрирования (5) на плоскости волновых чисел приближенным соотношением

$$r^2(\theta)\ \left[\frac{\omega^2}{1-\delta c^2}-\frac{\left(\cos^2\theta+\chi d_{11}\sin^2\theta\right)^2}{\left(1-\delta c^2\right)(1-\delta a)}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (82.5)$$

В этом случае удается проинтегрировать соотношение (7) и выразить его через полные эллиптические интегралы первого рода в форме Лежандра. Приближенная формула для асимптотической плотности собственных частот колебаний ортотропной оболочки после интегрирования имеет вид

$$\frac{n(\omega)}{n_2\Omega_2}=\begin{cases}0, & (0<\omega<\omega_1,\ \chi>0);\\ \dfrac{2}{\pi}\sqrt{\dfrac{\omega_2^2}{d_{11}\left(1-\delta c^2\right)(\omega_2-\chi d_{11})(\omega_2+1)}}K\left(\dfrac{1}{\kappa}\right), & (0<\omega<\omega_1,\ \chi<0);\\ \dfrac{2}{\pi}\sqrt{\dfrac{\omega_2}{2d_{11}\left(1-\delta c^2\right)(\omega_2-\chi d_{11})}}K(\kappa), & (\omega_1<\omega<1);\\ \dfrac{2}{\pi}\sqrt{\dfrac{\omega_2^2}{d_{11}\left(1-\delta c^2\right)(\omega_2-\chi d_{11})(\omega_2+1)}}K\left(\dfrac{1}{\kappa}\right), & (\omega>1);\end{cases} \quad (92.6)$$

где $\omega_1=\dfrac{|\chi|d_{11}}{\sqrt{1-\delta a}}$; $\omega_2=\omega\sqrt{1-\delta a}$; $\kappa^2=\dfrac{(\omega_2-\chi d_{11})(\omega_2+1)}{2\omega_2(1-\chi d_{11})}$; $n_2=\dfrac{a_1a_2}{4\pi}\sqrt{\dfrac{\rho h}{D_{22}}}$.

Постоянная δ подбирается из численного эксперимента в интервале (0,1) по условию наименьшего расхождения между асимптотически точным значениям $r^2(\theta)$ (5) и его приближенным представлением (8). Проведенные вычисления позволяют дать следующие рекомендации по значению δ:

$$\delta=\begin{cases}0 & (d_{11}=1);\\ \dfrac{1}{2} & (d_{11}>1);\\ \dfrac{3}{4} & (d_{11}<1).\end{cases}$$

3. Распределение собственных частот колебаний ортотропных оболочек положительной гауссовой кривизны $\chi>0$ начинается с $\omega=\omega_1$, которая приблизительно равна χd_{11} при малых $d_{11}<1$, т.е. при

$$\Omega=\Omega_1=\left(\frac{E_1}{\rho R_1^2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (10\ 3.1)$$

В случае $\omega=1$, т.е. при

$$\Omega=\Omega_2=\left(\frac{E_2}{\rho R_2^2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (11\ 3.2)$$

имеем асимптотическую точку сгущения собственных частот колебаний оболочки. В отличие от изотропных сферических оболочек распределение собственных частот ортотропных сферических оболочек ($\chi=1$) начинается не с $\omega=1$, а с $\omega=\omega_1$. При $\omega=1$ (частоте колебаний кольца, вырезанного из оболочки двумя сечениями, параллельными оси с большим модулем упругости) имеем асимптотическую точку сгущения собственных частот.

Нас рис.1 представлены результаты вычислений по формуле (9) асимптотической плотности собственных частот колебаний ортотропной сферической оболочки с параметрами материала $d_{11}^2=0.5$; $g=0.5$; $\nu_2=0.3$ (сплошная кривая) и эмпирической плотности, полученной на ЭВМ путем вычисления собственных частот по формулам (2), (3) и группировки из по интервалам $\Delta\omega=0.05$.

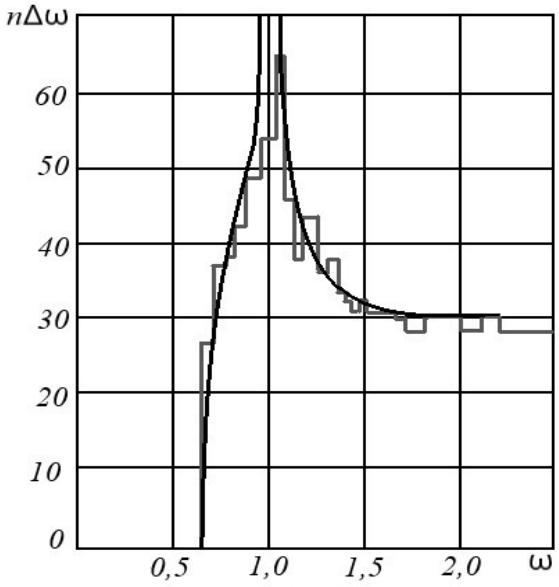


Рис. 1. Асимптотическая и эмпирическая плотности собственных частот колебаний ортотропной сферической оболочки с параметрами материала $d_{11}^2=0.5$; $g=0.5$; $\nu_2=0.3$

Распределение собственных частот колебаний оболочек нулевой $\chi=0$ и отрицательной $\chi<0$ гауссовой кривизны начинается с $\omega=0$. Асимптотическая плотность частот колебаний ортотропной цилиндрической оболочки имеет особенность при $\omega=1$ – асимптотическая точка сгущения собственных частот при частоте колебаний кольца, вырезанного из оболочки двумя нормальными сечениями. При увеличении модуля упругости в окружном направлении цилиндрической оболочки $d_{11}<1$ асимптотическая плотность частот возрастает по сравнению с изотропной оболочкой (штриховая линия на рис.2), а при увеличении модуля упругости в продольном направлении $d_{11}>1$ плотность частот понижается.

На рис.2 кривая 1 построена для параметров $d_{11}^2=0.25$; $g=0.4$;

$\nu_2 = 0.3$, кривая *2* – для $d_{11}^2 = 4.0$; $g = 0.5$; $\nu_\alpha = 0.2$. Эмпирическое распределение собственных частот по интервалам $\Delta\omega = 0.05$ строилось для оболочек с относительными размерами $\frac{h}{a_1} = 2 \cdot 10^{-3}$; $\frac{a_1}{R_2} = 2.0$; $\frac{a_1}{a_2} = \frac{2}{\pi}$.

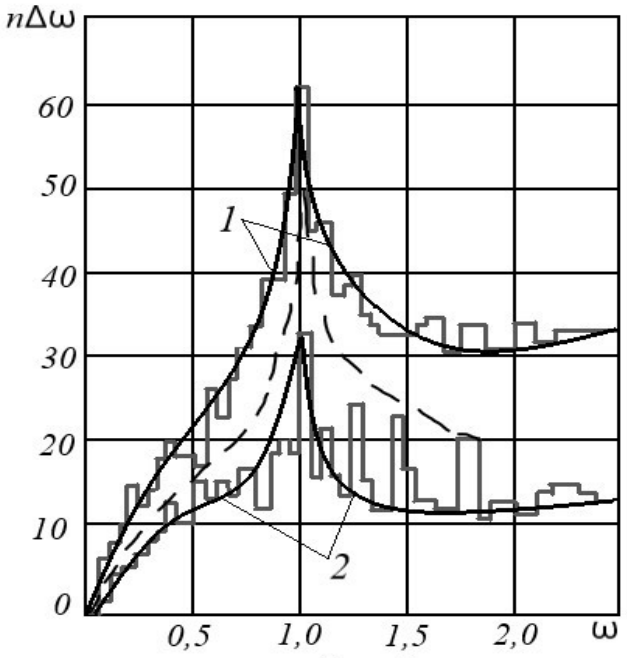


Рис. 2. Плотность собственных частот колебаний ортотропной сферической оболочки с параметрами: кривая *1*- $d_{11}^2 = 0.25$; $g = 0.4$; $\nu_2 = 0.3$, кривая *2* – для $d_{11}^2 = 4.0$; $g = 0.5$; $\nu_\alpha = 0.2$

Исследование влияния модуля сдвига G на величину плотности частот показало, что с уменьшением G плотность частот несколько возрастает, а с увеличением G, наоборот, падает. Изменение коэффициента Пуассона ν_2 на величину плотности частот существенно не влияет.

Асимптотическая плотность собственных частот колебаний ортотропных оболочек отрицательной гауссовой кривизны имеет особенности при $\omega = \omega_1$ и $\omega = 1$. В последней точке будет сгущение собственных частот. При $\omega = \omega_1$ оно наблюдается у ортотропных оболочек с параметрами $0.5 < |\chi d_{11}| < 1.0$.

На рис.3 приведены результаты вычислений асимптотической и эмпирической плотности собственных частот для оболочки параметрами $\chi = -0.5$; $d_{11}^2 = 2.0$; $g = 0.5$; $\nu_2 = 0.3$. Приближенная асимптотическая формула удовлетворительно описывает фактическое распределение собственных частот.

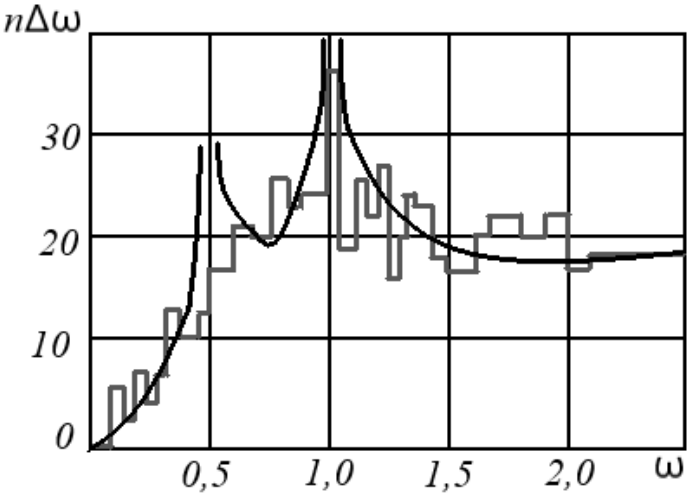


Рис. 3 - Асимптотическая и эмпирическая плотности собственных частот для оболочки параметрами $\chi = -0.5$; $d_{11}^2 = 2.0$; $g = 0.5$; $\nu_2 = 0.3$

Особенностям в асимптотических плотностях соответствуют максимумы в эмпирическом распределении. При $\omega > 2$ асимптотическая и эмпирические плотности совпадают с плотностью частот эквивалентной ортотропной пластины.

Возбуждение оболочек в областях нагрузок, содержащих диапазон сгущения собственных частот колебаний, приводит к увеличению нежелательных резонансных явлений в оболочках. При проектировании следует стремиться к тому, чтобы отдалить диапазон сгущения собственных частот от диапазона внешних воздействий. Если этого не удается сделать, или приходится иметь дело с широкополосными нагрузками, то следует принимать меры, приводящие к понижению плотности собственных частот оболочек. Например, у конструктивно ортотропных оболочек этого можно добиться увеличением жесткости в продольном направлении. Уменьшение тонкостенности системы также приведет к понижению плотности частот. Магнитное поле приводит к изменению спектра собственных частот колебаний пологих оболочек и смещению точек сгущения собственных частот в область более низких частот [4, 5]. Однако получение конечного выражения для плотности собственных частот колебаний ортотропных оболочек не представляется возможным из-за громоздкости выражения для частот колебаний . Здесь приходится обращаться к численному моделирования эмпирического распределения собственных частот и обобщению полученных формул для плотности частот колебаний ортотропных оболочек на случай колебаний в магнитном поле.

Список литературы: 1. Болотин В.В. О плотности частот собственных колебаний// Прикладная математика и механика.1963. Т. 27. Вып. **2.** С. 362-369. 2. Вибрации в технике. Справочник в 6-ти томах. Т.1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина.- М.: Машиностроение. 2-е изд.. 1999.**3.** Хроматов В.Е., Голубева Т.Н. О влиянии магнитных полей на колебания и устойчивость пластин из ферромагнитного материала// Вестник машиностроения . 2012. № 9. С.12-16.**4.** Корешкова Н.С., Хроматов В.Е. О влиянии поперечного магнитного поля на спектры частот колебаний пологих оболочек// Из. РАН. Механика твердого тела. 2009. № 4. С. 165-171. **5.** Хроматов В.Е., Голубева Т.Н. Колебания и устойчивость ферромагнитной цилиндрической оболочки в магнитном поле// Вестник Московского авиационного института. 2013. № 3. Т. 20. С. 212-219.**6.** Комиссарова Т.Н., Хроматов В.Е., Дуйшеналиев Т.Б., Каплун В.О. Применение асимптотического метода В.В. Болотина к исследованию спектров собственных колебаний ортотропных пластин в магнитном поле // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXYI международной научно-технической конференции. Севастополь, 23-29 сентября 2019 г. -.Донецк: ДонНТУ, 2019. С.209-213.**7.** Хроматов В.Е., Комиссарова Т.Н., Каплун В.О. О влиянии магнитных полей на спектры частот колебаний ортотропных пластин// Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды - 2020», 28 сентября – 2 октября 2020 г., Казань. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет; изд-во Академии наук РТ, 2020. С. 424-427.

ДЕТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ СОДЕРЖАНИЯ ГИДРОКСИЛА И ОКСИДА АЗОТА В РЕАКТИВНЫХ ВЫБРОСАХ ЖИДКОТОПЛИВНЫХ РАКЕТ

Цымбалов Д.С., Холодова С.Н., Яценко О.В. *(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)*
Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

Abstract: *Improved scientific estimation for rocket-produced ozone hole characteristics is performed. New approach is purposed at modern rocket carriers. Results our computer experiments show that ozone hole parameters are evaluated more rigorously.*

Гидроксильные радикалы и моноксид азота, содержащиеся в реактивных выбросах жидкотопливных ракет-носителей (РН), - главные искусственные разрушителями стратосферного озона. Ранние оценки параметров (масштаба и времени жизни) озоновых дыр [1-2] относились к основным ракетам прошлых десятилетий (табл. 1). В настоящее время для этих целей используется широкая и постоянно обновляющаяся номенклатура РН. Поскольку это обстоятельство актуализирует совершенствование оценок сравнительной экологичности космического транспорта, целью данного исследования ставилась сопоставить разрушающее озоносферу воздействие не только используемых в настоящее время, но также перспективных РН.

Таблица 1. Компоненты жидких ракетных топлив, используемых в современной ракетной технике (жирным шрифтом выделен перспективная РН для марсианских миссий)

Окислитель / Топливо	O_2	$N_2O_4 + HNO_3$
H_2	Saturn V, SLC, Ariane 5	
CH_4	**SpaceX**	
$C_{7.2}H_{13.3}$	Falcon 9, Союз	
N_2H_4		Ariane 5
$N_2H_2(CH_3)_2$		Протон, PSLV, Fregat

Расчет линейной плотности [OH](H) и [NO](H) в реактивном следе (H – высота) базируется на двух известных моделях. Первая предложена в работе [1] и приближенно описывает разгонную динамику РН, а вторая реализует наиболее эффективный метод определения равновесного состава продуктов сгорания, состоящий в минимизации термохимического потенциала [3]. Важным моментом в расчетах химических равновесий является удачный выбор «химического базиса» – учитываемых в модели веществ. Предварительный анализ термохимических показателей вероятных при горении в ЖРД веществ позволяет остановиться в первом приближении на следующем составе продуктов сгорания: CO – O – CO_2 – O_2 – **NO** – **OH** – H – H_2O – H_2 – N_2 – C_2H_2, среди которых вредные для озоносферы выделены жирным шрифтом.

В рамках этих моделей начальные параметры ракетной озоновой дыры описываются уравнениями:

$$v(H) \approx 0.025\cdot(H + 10000)\,, \tag{1}$$

$$r_{\text{ini}}(H, \dot{m}_1) \approx 0.1\sqrt{2.7 - 2.8\cdot10^{-5}H}\,\mathrm{e}^{H/16000}\sqrt{\dot{m}_1}\,, \tag{2}$$

$$\Delta c/c\,(H) \approx \Delta\rho/\rho(H) \approx 45.8\cdot10^6/[(9.8\cdot10^4 - H)\,(H + 10000)] \text{ – уплотнение,} \tag{3}$$

$$\Delta c_{i,H}/c\,(H) \approx 1.15\cdot10^9/[\mu_i\,(9.8\cdot10^4 - H)\,(H + 10000)] \text{ – химическое возмущение,} \tag{4}$$

$$\Delta T_H/T_H\,(H) \approx (9.8\cdot10^4 - H)/(H + 10000) \text{ – степень нагрева,} \tag{5}$$

$$G(P,T)=\sum_j \mathrm{e}^{c_j}[g_j(T)+RT\ln(\frac{\mathrm{e}^{c_j}}{\sum_j \mathrm{e}^{c_j}}\cdot P)]\to \min\,, \qquad (6)$$

$$g_j(T)=H_j(T_0)+C_{Pj}(T-T_0)-C_{Pj}\ln\frac{T}{T_0}-S_j(T-T_0)\ \ , \qquad (7)$$

$$n_j=\mathrm{e}^{c_j}\,,\qquad \sum_j n_j=\sum_j \mathrm{e}^{c_j}=n\ ,$$

$$j=\{\mathrm{CO, O, CO_2, O_2, NO, OH, H, H_2O, H_2, N_2, C_2H_2}\}\,, \qquad (8)$$

$$\alpha\,\boldsymbol{n}=\beta\ . \qquad (9)$$

В формулах (1)-(9) r_{ini} – начальный радиус следового облака и H - высота имеют размерность м; массовый расход горючего $\dot{m}_1$ – кг/с. $g_j(T)$ – термохимический потенциал j-го вещества, $H_j(T_0)$ – энтальпия его образования в стандартных условиях (298 К); C_{Pj} и S_j – молярные теплоемкость и энтропия; n_j – молярная концентрация; c_j – искусственная переменная, призванная исключить отрицательные концентрации; α – матрица содержания составляющих вещества элементов (углерода C, водорода H и азота N) в компонентах смеси; β – вектор количества химических элементов, из которых состоят рассматриваемые вещества. Использованные числовые параметры модели приведены в табл. 2.

Таблица 2. Термохимические параметры продуктов сгорания в ЖРД

N пп.	Элемент Химическая формула вещества	C	H	N	O
1	CO	1	0	0	1
2	O	0	0	0	1
3	CO_2	1	0	0	2
4	O_2	0	0	0	2
5	NO	0	0	1	1
6	OH	0	1	0	1
7	H	0	1	0	0
8	H_2O	0	2	0	1
9	H_2	0	2	0	0
10	N_2	0	0	2	0
11	C_2H_2	2	2	0	0

Система продуктов сгорания в рамках модели (1)-(9) исследовалась численно при температуре и давлении, характерных для горения в ЖРД (50 атм $\le P \le$ 175 атм, 2200 К $\le T \le$ 3000 К). Коэффициент избытка воздуха выбирался равным 1. При таких параметрах эта система позволяет оценивать содержание OH и NO в реактивном следе различных жидкотопливных ракет. Поскольку параметры рабочего процесса зависят от режима работы ЖРД и совершенства сжигания топливных пар нами выбирались условия, обеспечивающие наибольшие значения концентрации [OH] и [NO] с учетом вычислительной погрешности, типичной при использовании математических пакетов общего назначения (Excel, MathCAD, Maple и Mathematica) в задачах многомерной нелинейной оптимизации [4].

Для ЖРД, использующих кислород-водородную пару в стехиометрическом соотношении (на практике горючее используют в некотором избытке), результат расчетов можно выразить приближенной формулой:

$$\lg[OH] = -11.4 + 0{,}00559\,T - 7.5\cdot10^{-7}\,T^2 . \qquad (10)$$

Погрешность формул, аналогичных (10), если результат получать при помощи различных пакетов вычислительной математики, достигает ± 1/2, что позволяет говорить лишь о верхней и нижней границах в отношении [OH]. Соответственно максимальная ширина оценочного коридора превышает порядок величины.

Аналогичный расчет для метан-кислородной топливной пары показал, что гидроксила выбрасывается примерно вдвое больше по сравнению с кислород-водородными ЖРД. Близкой оказалась и озоновая экологичность керосин-кислородных РН. Однако в настоящее время продолжается интенсивное использование гептил-амильной топливной пары, сопровождающееся выбросом в озоносферу NO, который не учитывался в ранних моделях [2-3].

Чтобы оценить содержание NO в выхлопе гептил-амильных РН расчетную модель следует привязать к реакции

$$N_2C_2H_8 + 2\,N_2O_4 \rightarrow 3\,N_2 + 2\,CO_2 + 4\,H_2O \quad . \qquad (11)$$

и модифицировать так, чтобы атомы азота в составе выхлопных реактивных газов составляли ¼, кислорода и азота – по 1/3, а углерода – 1/12. Результат соответствующих вычислений показан на рис. 1

		[NO]					[OH]			
T, K	P, атм	50	100	150	Макс.	T, K	P, атм	50	100	150	Макс.
2200		0,000049	0,0015	0,0014	0,0025	2200		0,000099	0,00014	0,00014	0,00023
2600		0,00084	0,00051	0,001	Мин.	2600		0,000063	0,000077	0,00000097	Мин.
3000		0,0025	0,0012	0,00043	0,000049	3000		0,00023	0,00009	0,00018	9,7E-07

Рис. 1. Результаты сценарного моделирования состава продуктов сгорания в гептил-амильном ЖРД

Обобщают результаты проведенных авторами компьютерных экспериментов следующие выводы: 1) концентрация [OH] в реактивном выбросе ЖРД сильно зависит от температуры и слабо от давления, причем с ростом температуры в камере сгорания выход OH резко увеличивается; 2) горение углеводород-кислородных топлив сопровождается примерно вдвое большим выбросом (в относительных долях) OH в озоносферу по сравнению с его выбросом при горении водорода в кислороде; 3) запуск гептил-амильных ракет возмущает озоносферу оксидом азота примерно на порядок сильней, чем гидроксилом; 4) получаемые в настоящее время оценки параметров ракетных озоновых дыр носят граничный характер, о отношение верхнего и нижнего пределов превышает порядок величины и обусловлена несовершенством стандартных вычислительных алгоритмов.

Список литературы: 1. Фадин И.М., Полетаев Б.И., Сидоров В.Н. Экология комоса. С.-Пб.: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2005. 280 с. **2.** Яценко О.В., Ладоша Е.Н. Космическая экология: антропогенные воздействия на стратосферный озон при запусках жидкотопливных ракет-носителей (теоретические оценки, компьютерная имитация) // Инженерная экология. 2005. № 6. С. 27-45. **3.** Бакулин В.Н., Ладоша Е.Н., Месхи Б.Ч. и др. Научные основы защиты озонового слоя стратосферы в условиях освоения космического пространства при помощи ракет на химическом топливе. – Ростов н/Д.: Изд-во ДГТУ, 2009. – 188 с. **4.** Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Математическое программирование. Теория, алгоритмы, программы. – Самара: РИЦ «Гольфстрим», 2007. – 222 с.

ЗАВИСИМОСТЬ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОТ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ

Чернышев Е.А. *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
E-mail: chernyshev81@mail.ru

Abstract: *the paper considers a two-mass oscillatory system in turning. It is shown that with an increase in the cutting speed, the oscillations decrease to zero. That is, it is theoretically shown that the cutting speed affects the sustainability of the dynamic system in turning.*
Keywords: *oscillation, metal cutting, turning, amplitude, dissipation.*

Точение часто сопровождается колебаниями, которые существенно влияют на качество обработки. Вопрос анализа тангенциальных колебаний исследовался ранее как экспериментально [1, 2], так и теоретически. В классических работах [1, 2] результаты исследований имеют комплексный характер и получены для колебаний в различных направлениях, что обычно имеет место в действительности. В данной статье рассматривается упрощенная двухмассовая система с двумя степенями свободы. Тем не менее, такая модель позволяет теоретически обнаружить свойство затухания колебаний с увеличением скорости резания.

В основу разработанной математической модели положена известная эмпирическая зависимость силы резания от режимов обработки [3], дополненная учетом того явления, которое в классических работах [1, 2] называется «координатной связью», т.е. влиянием колебаний на фактические (мгновенные) значения режимов. В силу этого модель можно назвать эмпирико-аналитической. Предположим, что инструмент и заготовка могут совершать колебания только в тангенциальном направлении. Тогда схема двухмассовой системы при точении с двумя степенями свободы приведена на рис. 1.

Известно, что силу резания при точении можно рассчитать по следующей формуле

$$P_z = 10 C_p t^x s^y V^n K_p, \quad \text{Н},$$

где C_p, K_p, x, y, n - эмпирические постоянные, учитывающие условия обработки; t, s, V - номинальные глубина резания (мм), подача (мм/об) и скорость резания (м/мин) соответственно. В системе СИ эту зависимость можно заменить на $P_z = kV^n$, где $k = 10 C_p K_p t^x s^y 60^n$.

С учетом влияния скорости тангенциальных колебаний на мгновенную скорость резания получим

$$P_z = k\left(V - \dot{z}_1 + \dot{z}_2\right)^n,$$

где $\dot{z}_1, \dot{z}_2$ - скорости малых тангенциальных колебаний инструмента и заготовки соответственно. При этом следует учесть, что при $\dot{z}_1 + \dot{z}_2 > V$ имеет место выход инструмента и заготовки из процесса резания, и тогда.

$$P_z = \begin{cases} k\left(V - \dot{z}_1 + \dot{z}_2\right)^n, & z_1 + \dot{z}_2 < V, \\ 0, & \dot{z}_1 + \dot{z}_2 > V. \end{cases} \qquad (1)$$

Уравнения динамики тангенциальных колебаний запишем при условии линейного характера сопротивления и восстанавливающей силы:

$$\left.\begin{aligned} m_1\ddot{z}_1 + h_1\dot{z}_1 + C_1 z_1 &= P_z\left(\dot{z}_1, \dot{z}_2\right), \\ m_2\ddot{z}_2 + h_2\dot{z}_2 + C_2 z_2 &= -P_z\left(\dot{z}_1, \dot{z}_2\right), \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где m, h, C - приведенные массы, коэффициенты вязкого трения и жесткости соответственно, а индексы, как и выше, относятся: 1 – к инструменту, 2 – к заготовке. Правая часть выражается уравнением (1).

Полученная довольно простая математическая модель имеет свойство автономности - правая часть не зависит явно от времени, а изменяется только благодаря малым колебаниям. Поэтому известную эмпирическую формулу расчета силы резания можно рассматривать как частный случай (1) при отсутствии колебаний.

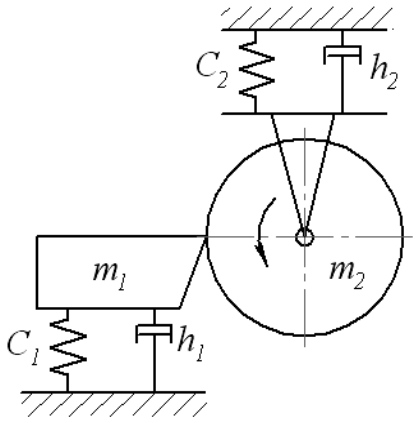


Рис. 1. Схема двухмассовой системы резания с двумя степенями свободы

На основании модели (2) был проведен анализ при нулевых начальных условиях и следующих числовых значениях параметров: $m_1 = m_2 = 1$ кг, $C_1 = 10^7$ Н/м, $C_2 = 5 \cdot 10^6$ Н/м. Значения коэффициентов вязкого трения h_1, h_2 для простоты полагались одинаковыми, как и коэффициенты затухания, равные половине отношения последних к приведенной массе. Что касается коэффициента k в формуле (1), то его значение 10^3 в расчетах принято постоянным, что соответствует для наружного продольного точения конструкционной стали режимам: $t = 1$ мм, $s = 0,2$ мм/об.

При исследовании рассматривалась центрированная либрация

$$z(t) = z_1(t) - z_2(t) - \frac{1}{T}\int_0^T \left(z_1(t) - z_2(t)\right) dt$$

на промежутке времени T, представляющая относительные колебания инструмента и заготовки с нулевым среднеинтегральным значением, т.е. без увода колебаний, который в первом приближении можно определить как отношение среднеинтегральной силы к коэффициенту жесткости. Для количественного анализа колебательного процесса использовалась средняя амплитуда (далее - амплитуда), которая вычисляется как арифметическое среднее всех положительных максимумов и всех отрицательных минимумов центрированной либрации.

Была получена зависимость амплитуд колебаний от номинальной скорости резания при различном затухании (рис. 2). По превышении некоторого порогового значения скорости резания колебания практически исчезают. Причем чем больше затухание, тем меньше эта скорость.

Таким образом, скорость резания оказывает прямое влияние на устойчивость динамической системы резания: при малых значениях скорости ее увеличение приводит к «раскачке» системы, но по превышении некоторого порогового значения – к затуханию колебаний. Из этого свойства напрашивается тот вывод, что при назначении режимов

скорость резания нужно принимать больше ее порогового значения. Затухание колебаний с ростом скорости резания известно экспериментально, поэтому в этом отношении модель (2) качественно согласуется с опытными данными.

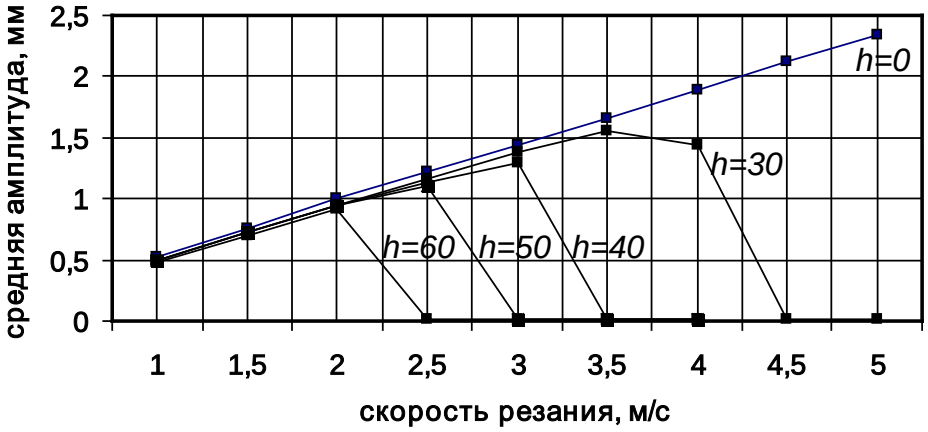


Рис. 2. Зависимость амплитуд относительных колебаний заготовки и инструмента от номинальной скорости резания при различном коэффициенте вязкого трения *h,* Нс/м

Для идеальной консервативной системы порогового значения скорости резания не выявлено. То есть в этом случае с увеличением скорости будут увеличиваться и амплитуды. Правда, может оказаться, что при больших значениях скорости резания показатель степени в (1) будет иным. Вероятно, отчасти это справедливо вообще для скорости резания как переменной в формуле силы резания. К сожалению, в справочной и научной литературе данных об этом нет: скорость резания в формуле силы учитывается через постоянный показатель степени.

Главный вывод состоит в том, что даже при неизменной зависимости (1) сама «координатная связь», или влияние колебаний на мгновенные значения режимов, обусловливает при каком-то значении скорости резания «запуск» процесса затухания колебаний. Физический механизм этого можно объяснить с помощью теории устойчивости движения А.М. Ляпунова [4]. В данном случае очевидным свойством динамической системы (2) является нелинейность затухания. Хотя в левой части диссипация выражается линейными членами, в правой части она содержится в выражении силы. Это может быть причиной существенного увеличения диссипации по превышении некоторого значения скорости резания, что и приводит к затуханию колебаний.

Список литературы: 1. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков / Кедров С.С. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с. **2.** Орликов М.Л. Динамика станков / Орликов М.Л. – К.: Вища шк., 1989. – 320 с. **3.** Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – Т.2. **4.** Чернышев Е.А. Анализ динамической устойчивости системы резания с помощью теории устойчивости Ляпунова // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ. - 2009. – Вип. 37. - С. 271 – 276.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗАБОЯ ПРОХОДЧЕСКИМ КОМБАЙНОМ С ОСЕВОЙ КОРОНКОЙ

Шабаев О.Е., Довгань А.Ю. *(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», г. Донецк)*
Тел: (071) 346-16-70, (071) 320-56-13; *E-mail*: oeshabaev@yandex.ru, agm_osu@mail.ru

Abstract: *On the basis of the proposed calculation scheme, a mathematical model has been developed that makes it possible to determine the position of the roadheader crown both in the coordinate system of the miner and in the coordinate system of the mine, regardless of the displacement of the roadheader or rotation relative to the local coordinate system axes in the working contour of any shape and determine the corresponding angles of lifting and turning of the boom to maintain the direction of the mine and limit overbreak along the contour.*
Key words*: road header, mathematical model, Euler angles, crown coordinates*

Введение

Низкая эффективность использования мощности проходческой техники обусловлена нерациональными режимами ручного управления. Необходимым условием повышения технического уровня этих машин является адаптивная оптимизация их рабочих процессов, реализуемая системой управления. При этом наряду с оптимизацией режимов разрушения забоя исполнительным органом решаются задачи получения забоя заданного сечения и оптимизация схемы обработки забоя, которая формируется последовательностью режимов разрушения, длиной резов в каждом режиме и шагом фрезерования. Также необходимо обеспечить минимальный перебор породы по контуру выработки и определение рациональной траектории движения исполнительного органа для разрушения забоя со слоистой структурой пород разной крепости.

Алгоритмы, закладываемые в интеллектуальную систему управления комбайном, должны разрабатываться на основе глубокого изучения его рабочих процессов на этапе проектирования. Это позволяет в процессе эксплуатации исключить влияние квалификации оператора на эффективность работы комбайна. В работе [1] приводятся результаты исследований, которые показывают негативное влияние смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки на эффективность его функционирования, обусловленные человеческим фактором.

Характерной особенностью работы существующих проходческих комбайнов является невозможность точного воспроизведения заданного профиля выработки и, как следствие, значительные переборы породы. Объем рабочих операций по проведению подготовительных выработок в значительной мере определяется поверхностью забоя, формируемой при работе исполнительного органа, точностью контура выработки. Поэтому одним из основных требований для проходческих комбайнов нового технического уровня является требование к точности профиля выработки и качеству ее поверхности.

В современных исследованиях в области определения местоположения проходческого комбайна в выработке основным направлением является определения положения машины, определение направления и траектории ее движения. Для этого предлагаются алгоритмы позиционирования [2], использование лазерных излучателей и меток [3]. В [4], [5] предлагаются системы лазеров в выработке, лазерных камер и маркеров с алгоритмом для определения смещения. Однако, представленные методы определения положения машины в пространстве выработки не учитывают положение коронки, формирование контура по заданной форме и введение дополнительных ограничивающих уставок по углам подъема и поворота стрелы ИО.

Согласно данным [6], перебор по контуру выработки даже при автоматизированном управлении составляет до 20% от сечения выработки вчерне. Переборы делают практически невозможной механизацию возведения крепи, приводят к непроизводительным расходам электроэнергии и ресурса комбайна, снижают срок службы выработки и увеличивают затраты на ее поддержание, а также требуют дополнительных затрат на забутовку при креплении выработки. При обеспечении высокой точности образуемого контура выработки снижается объем разрушаемой исполнительным органом породы, что позволяет снизить время и затраты энергии на прохождение 1 км выработки, повысить ее устойчивость, а также исключить или значительно снизить объемы работ, выполняемые с использованием физического труда.

Существенное влияние на величину переборов породы и на точность воспроизведения заданного контура выработки оказывают:

- форма режущего органа (коронки);
- глубина зарубки и шаг фрезерования, которые определяют размеры неровностей на боковых стенках выработки, соответствующих форме коронки;
- смещение проходческого комбайна в процессе передвижки относительно средней линии выработки, изменение положения и углов наклона по осям вследствие утраты устойчивости, которые не позволяют сохранять заданный угол наклона выработки и ее направление;
- моменты времени подачи команд управления перемещениями исполнительного органа при обработке забоя, которые должны определяться с учетом возможной частичной потери устойчивости комбайна, ограниченной видимости в рабочей зоне и инерционности системы «оператор-машина».

Влияние первого фактора может быть минимизировано на этапе проектирования комбайна выбором рациональной формы коронки и параметров исполнительного органа. Влияние остальных факторов может быть снижено на основе повышения качества реализации сложных и точных движений исполнительного органа. Смещения корпуса комбайна за счет частичной потери устойчивости в процессе работы могут быть учтены системой интеллекта на основе показаний датчиков положения, интегрированных в корпусные элементы комбайна. Инерционность подсистемы «исполнительный орган» проходческого комбайна обусловлена запаздыванием в отработке управляющих сигналов и может быть компенсирована интеллектуальной системой управления комбайна [7], [8], позволяющей предсказывать момент подхода коронки к проектному контуру выработки и останавливать ее подачу с некоторым опережением ΔT.

Целью работы является определения координат коронки ИО проходческого комбайна в забое в системе координат выработки, определения необходимых углов доворота ИО при смещении относительно продольной оси выработки или повороте машины во время работы относительно вертикальной оси, введения ограничивающих уставок по желаемой форме забоя, ограничению переборов и формирования корректирующих воздействий для сохранения формы и направления проводимой выработки.

Основное содержание и результаты работы

Проходческие комбайны избирательного действия разрушают забой горизонтальными слоями как при их оснащении осевыми, так и аксиальными резцовыми коронками. При этом основной удельный вес в цикле обработки забоя имеют режимы бокового реза, значительно меньший – режимы вертикальной и фронтальной зарубки. Основной режим управления проходческой машиной оператором – дистанционный в зоне видимости. Поэтому необходимо учитывать человеческий фактор при построении системы управления проходческим комбайном для сохранения направления проведения выработки, формирования заданной формы, уменьшения переборов и компенсации

возможного смещения или поворота машины в процессе работы, вызванное динамическим характером нагрузки на исполнительном органе.

Для реализации поставленной цели предложена схема расчета на примере проходческого комбайна избирательного действия с осевой коронкой КСП-35, представленная на рис. 1.

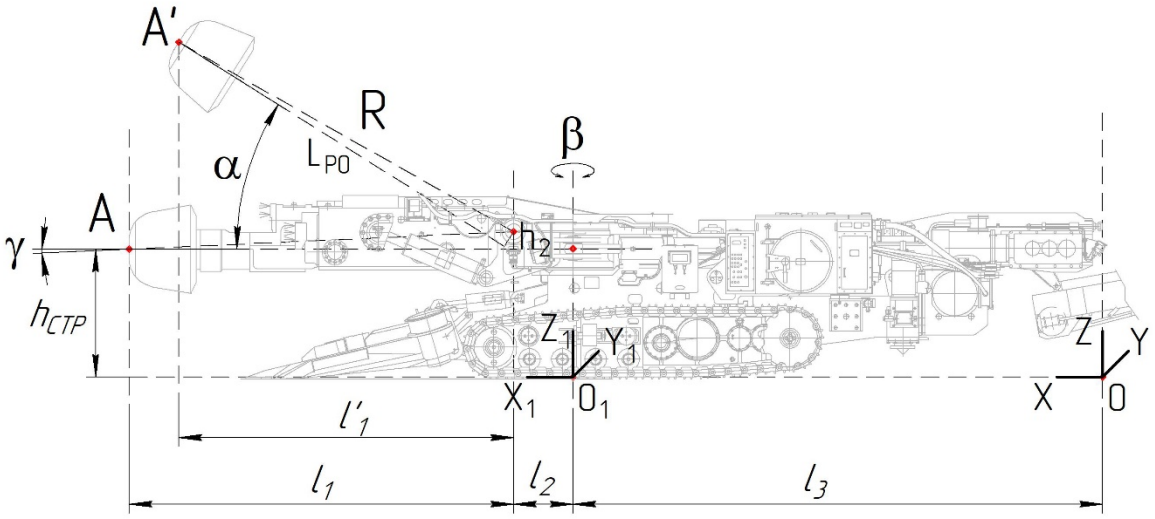


Рис. 1. Схема расчета координат коронки ИО проходческого комбайна

Для расчетной схемы рис. 1 введены следующие системы координат: OXYZ – неподвижная система координат, связанная с выработкой, ось OX совпадает с продольной осью выработки; $O_1X_1Y_1Z_1$ – локальная подвижная система координат, связанная с проходческим комбайном, ось O_1Z_1 совпадает с осью поворотной турели, ось O_1X_1 совпадает с продольной осью комбайна. На рис. 1 приняты следующие обозначения: A – вершина коронки ИО проходческого комбайна; l_1, l_2, – проекции расстояний между шарнирами поворота, подъема и вершиной коронки на продольную ось O_1X_1; l_3 – проекция расстояния между системами координат на продольную ось выработки OX; R – радиус подъема коронки исполнительного органа в вертикальной продольной плоскости; L_{PO} – конструктивная длина стрелы ИО комбайна; h_2 – расстояние по нормали между осью коронки ИО и осью подъема стрелы; α - угол подъема стрелы; β – угол поворота стрелы; γ – конструктивный угол между осью вращения коронки и радиусом подъема стрелы относительно шарнира.

Предложенная расчетная схема позволяет определить положение коронки исполнительного органа проходческого комбайна в любой момент времени в системе координат выработки с учетом подъема и поворота стрелы, смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки и изменения углов наклона по осям $X_1Y_1Z_1$.

Для определения координат точки A в пространстве локальной и глобальной систем координат, формирования ограничивающего контура выработки и определения ограничивающих углов поворота стрелы ИО при обработке забоя разработана математическая модель.

Положение корпуса проходческого комбайна в пространстве выработки описывается шестью параметрами – тремя координатами поступательного движения по осям и тремя углами поворота Эйлера относительно осей X_1, Y_1, Z_1 локальной системы координат (рысканье, тангаж, крен). Искомым является определение местоположения

точки А в локальной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ комбайна и перевод полученных значений в систему координат выработки OXYZ.

Для определения проекций на ось O_1X_1 и координат точки А при помощи конструктивных параметров комбайна используются следующие зависимости:

$$R = \sqrt{h_2^2 + L_{\text{РО}}^2}, \tag{1}$$

$$\gamma = arc\cos\left(\frac{L_{\text{РО}}^2 + R^2 - h_2^2}{2 \cdot L_{\text{РО}} \cdot R}\right).$$

Координаты точки А (A_{x1}; A_{y1}; A_{z1}) в локальной системе координат определяются из зависимостей:

$$\begin{cases} A_{x1} = R \cdot \cos(\alpha - \gamma) \cdot \cos\beta + L_{\text{ш}} \cdot \cos\beta \\ A_{y1} = (L_{\text{ш}} + R \cdot \cos(\alpha - \gamma)) \cdot \sin\beta \\ A_{z1} = R \cdot \sin(\alpha - \gamma) + h_2 + h_{\text{РО}} \end{cases} \tag{2}$$

где $L_{\text{ш}}$ – конструктивное расстояние по нормали между шарнирами вертикального и горизонтального поворота стрелы проходческого комбайна;

$h_{\text{РО}}$ – расстояние между почвой и осью коронки ИО при $\alpha = 0$.

Положение локальной системы координат с привязкой к оси поворотной турели, указанное на рис. 1, принято произвольно. Локальная система координат может быть привязана к расположению датчика углов поворота по трем осям (инклинометра) в объеме корпуса проходческого комбайна, для чего в систему уравнений (2) вносятся соответствующие поправки по осям.

Локальная система координат с началом в точке O_1 имеет следующие параметры, описывающие ее положение в пространстве выработки:

$$O_1(O_{1_X}, O_{1_Y}, O_{1_Z}, \varphi, \theta, \psi) \tag{3}$$

где O_{1_X}, O_{1_Y}, O_{1_Z} – координаты точки начала по осям локальной подвижной системы координат в системе координат выработки;

φ, θ, ψ – углы прецессии, нутации и собственного вращения соответственно.

Для определения координат точки А в неподвижной системе координат выработки необходимо ввести матрицу направляющих косинусов, определяющих комбинацию последовательных поворотов вокруг осей вращающейся системы координат. До и после поворота координаты точки в подвижной системе координат неизменны. Выходом является одномерная матрица координат коронки исполнительного органа проходческого комбайна в неподвижной системе координат выработки:

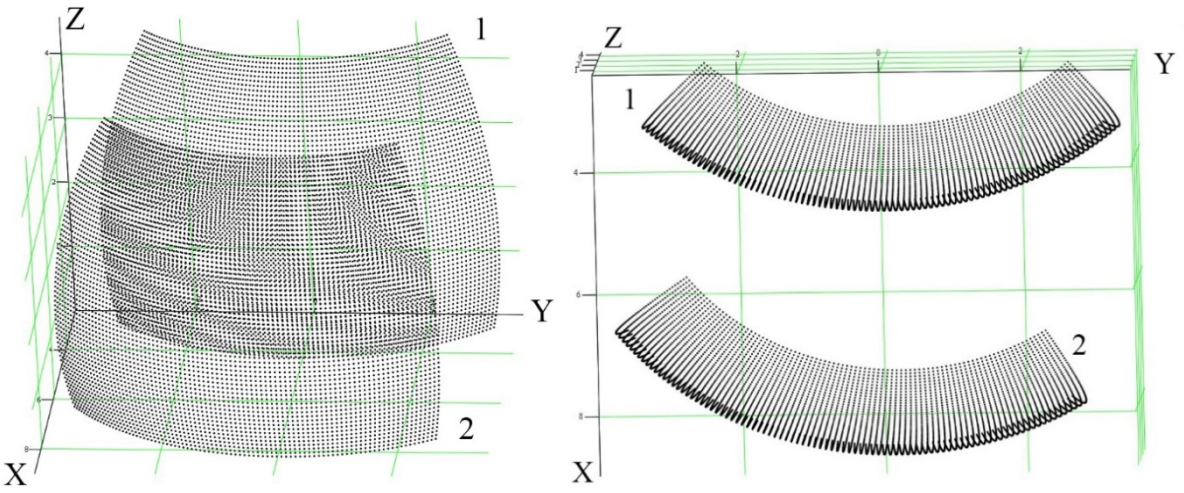
$$A(X, Y, Z) = R \cdot \begin{bmatrix} A_{x1} \\ A_{y1} \\ A_{z1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{1_X} \\ O_{1_Y} \\ O_{1_Z} \end{bmatrix} \tag{4}$$

где $R = R_Z(\varphi) \cdot R_X(\theta) \cdot R_Z(\psi)$ – матрица направляющих косинусов.

С помощью представленных зависимостей (1), (2), (4) в системе MathCAD проведены вычисления координат коронки ИО проходческого комбайна в локальной и глобальной системе координат с учетом смещения и углов его поворота по трем осям в пространстве выработки. Результаты вычислений координат коронки ИО проходческого комбайна представлены на рис. 2а (аксонометрия) и 2б (вид сверху). Полученные данные позволяют определить граничные значения обрабатываемого забоя и возможность работы комбайна, не приводящей к нарушению формы забоя и изменению направления выработки при смещении или повороте в горизонтальной плоскости относительно продольной оси выработки.

При разрушении забоя коронка исполнительного органа описывает в пространстве локальной системы координат сложную фигуру вращения с двумя изменяющимися параметрами – угол подъема и угол поворота стрелы ИО,

ограниченными конструктивно на уровне ~70° и ±45° соответственно. Принятый в качестве примера проходческий комбайн согласно паспортным данным способен обработать с одной установки забой площадью до 28 м^2 без учета телескопичности ИО. Таким образом, при его использовании во время прохождения выработки 20 м^2 остается конструктивный запас по углам поворота и подъема, позволяющий компенсировать смещение машины и/или поворот относительно вертикальной оси.



а) б)

Рис. 2. Результаты вычислений координат коронки ИО проходческого комбайна

На рис. 2 представлены результаты последовательного циклического пересчета координат движения коронки исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 при изменении углов поворота и подъема стрелы с шагом в один градус. Дополнительно введено смещение при передвижке 100 мм (координата O_{1Y}) влево относительно продольной оси выработки по ходу движения комбайна и поворот относительно оси Z на угол 10° (угол прецессии φ) по часовой стрелке. При этом расстояние по оси выработки между неподвижной системой координат выработки и локальной системой координат комбайна составляет 4 м (координата O_{1X}). Цифрой 1 на обоих графиках обозначена область значений координат точки $A(X_1, Y_1, Z_1)$ в локальной подвижной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$. При смещении и поворотах комбайна относительно собственных осей координаты коронки в локальной системе координат неизменны. Цифрой 2 обозначена область значений координат точки A(X, Y, Z) в неподвижной системе координат выработки OXYZ.

Как видно из рис. 2, при повороте проходческого комбайна в горизонтальной плоскости во время частичной потери устойчивости изменяется границы обрабатываемого забоя проходческим комбайном. При достаточном конструктивном запасе после восстановления устойчивости необходимо ввести корректирующий угол доворота стрелы для сохранения контура и выбранного направления выработки и установить координаты границ выработки для минимизации переборов. Сходная задача решается при наличии смещения проходческого комбайна после передвижки относительно продольной оси выработки.

Оптимизация перебора породы во время разрушения забоя предполагает задание требуемого контура выработки в виде массива координат коронки ИО, при которых образуются участки контура выработки при каждом подходе исполнительного органа к контуру выработки. При этом плоскость задания ограничивающих координат контура выработки перпендикулярна продольной оси выработки. Ограничивающий контур

выработки может иметь любую заданную форму, для примера взята арочная форма, как наиболее сложная в исполнении.

Контур выработки арочного сечения задается функцией $y_{кв}(z)$, представленной на рис. 3.

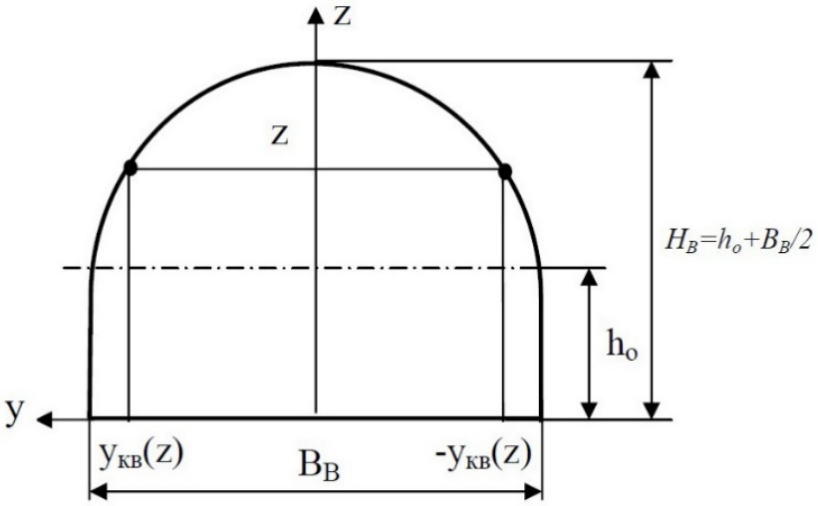


Рис. 3. Задание функции контура выработки арочной формы

Контур выработки для арочной крепи задается зависимостями:

$$y_{\text{КВ}}(z) = \begin{cases} \frac{B_{\text{В}}}{2} \text{ при } z \le h_0 \\ \sqrt{\left(\frac{B_{\text{В}}}{2}\right)^2 - (z-h_0)^2} \text{ при } z > h_0 \end{cases} \quad (5)$$

где B_B – ширина выработки; h_0 – высота вертикальной стенки выработки;

При формировании ограничивающих координат по профилю выработки решается обратная задача преобразования координат неподвижной системы OXYZ в координаты локальной подвижной системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$. Ограничивающие координаты выработки задаются значениями координат A_Y, вычисленными по (5) и A_Z – соответствующей высоты. Координата X является вспомогательной и соответствует смещению плоскости проекции координат относительно плоскости YOZ. Смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки после перемещения задается координатой O_{1Y}. Координаты коронки $A(X_1, Y_1, Z_1)$ в локальной системе координат вычисляются в два приема следующим образом:

$$(X_1, Y_1, Z_1) = R^{-1} \cdot \left[\begin{bmatrix} \text{X} \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} O_{1_{\text{X}}} \\ O_{1_Y} \\ O_{1_Z} \end{bmatrix} \right] \quad (6)$$

где R^{-1} – обратная матрица направляющих косинусов

Координата X_1 после вычисления по (6) не используется. Полученные значения координат $Y_1 = A_{Y1}$ и $Z_1 = A_{Z1}$ коронки ИО позволяют выразить из системы (2) и определить значения ограничивающих углов α и β поворота стрелы в радианах и вычислить из первого уравнения системы (2) соответствующие координаты A_{X1} коронки:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{A_{Z1} - h_2 - h_{\text{PO}}}{R}\right) + \gamma \quad (7)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{A_{y1}}{(L_{\text{ш}} + R \cdot \cos(\alpha - \gamma))}\right)$$

На рис. 4 представлены результаты вычисления на основе (5), (6), (7) координат ограничивающего контура выработки (область значений 3) и соответствующих ему координат коронки ИО (область значений 4), обеспечивающих точность обработки проходческого забоя независимо от углов поворота проходческого комбайна в процессе работы или от смещения вбок от продольной оси выработки.

Как видно из рис. 4, при смещении или повороте проходческого комбайна относительно одной из осей ориентации в пространстве выработки изменяются граничные значения обрабатываемого забоя. При повороте комбайна относительно оси O_1Z_1 или при смещении в горизонтальной плоскости XOZ достаточно введения корректирующего угла доворота стрелы в соответствующем направлении в горизонтальной плоскости, ограниченного значением β, вычисленного по (7). При изменении угла наклона по двум осям необходимо введение корректирующих углов, как подъема α, так и поворота β для сохранения контура выработки.

Разработанная в соответствии с предложенной расчетной схемой математическая модель позволяет определить координаты коронки ИО по трем углам поворота Эйлера локальной системы координат. При использовании углов последовательного поворота по осям X_1, Y_1, Z_1 вычисления производятся аналогично с использованием соответствующей матрицы направляющих косинусов. Координаты точки O_1 локальной системы координат в системе координат выработки OXYZ определяются системой позиционирования комбайна в выработке.

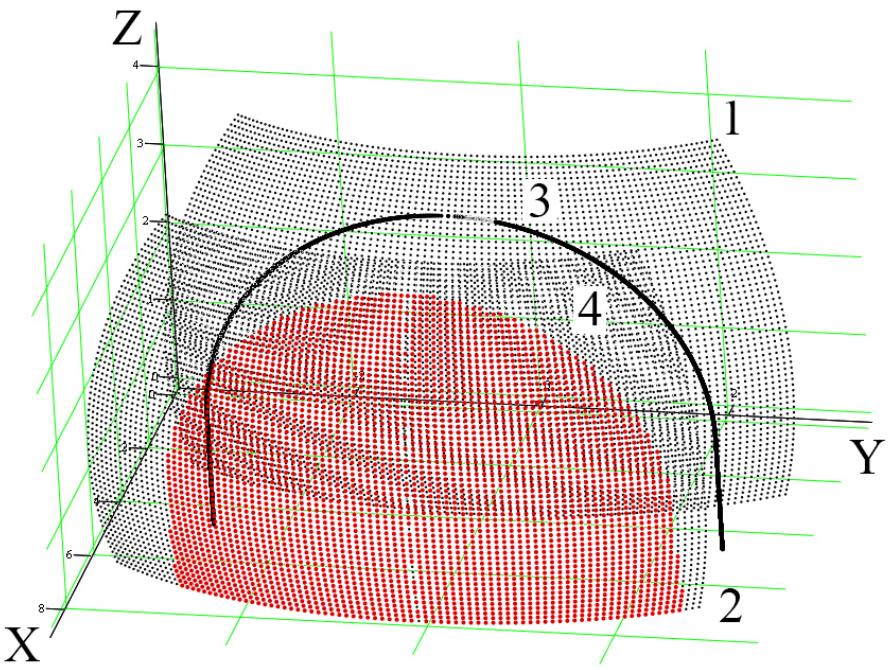


Рис. 4 Формирование ограничивающего контура выработки при вычислении координат коронки ИО

Процесс остановки исполнительного органа после подачи сигнала в систему его управления сопровождается дополнительными перемещениями исполнительного органа, обусловленными инерционными свойствами системы его подачи. Для проходческого комбайна величина этих перемещений может составлять 20-55 мм в зависимости от контактной прочности разрушаемой породы (100-1000 МПа), с увеличением которой величина перебора породы уменьшается.

Величина перебора зависит от инерционности управляющей системы, инерционности самого комбайна и его исполнительного органа, а также от физико-

механических свойств горного массива. Учет запаздывания в отработке управляющих сигналов может быть произведен на основе оснащения проходческого комбайна мехатронной системой подачи исполнительного органа с интеллектуальным модулем воспроизведения контура выработки, позволяющим предсказывать момент подхода коронки к проектному контуру выработки и останавливать ее подачу с некоторым опережением этого момента.

Заключение

1. На основе предложенной схемы расчета координат коронки ИО проходческого комбайна разработана математическая модель, позволяющая определить координаты исполнительного органа проходческого комбайна в локальной системе координат и в системе координат выработки для использования системой позиционирования проходческого комбайна.

2. Задание ограничивающего контура выработки, позволяет сохранять выбранное направление и форму обрабатываемого забоя, уменьшить переборы породы независимо от ошибок позиционирования проходческого комбайна в выработке, обусловленных ручным способом управления, и от изменения углов наклона корпуса по осям в процессе разрушения забоя.

3. Реализация предложенного способа коррекции координат коронки исполнительного органа возможна при разработке интеллектуальной системы позиционирования проходческого комбайна, позволяющей участь инерционность отработки управляющих воздействий гидравлическими исполнительными элементами в зависимости от крепости разрушаемых пород.

Список литературы: **1.** Шабаев, О.Е. Влияние позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в проходческом забое на эффективность его функционирования / О.Е. Шабаев, А.Ю. Довгань // Вестник ДонНТУ. – 2020. – №3(21). – С.35-42. **2.** Ultra-wideband pose detection method based on TDOA positioning model for boom-type roadheader / S. Fu [et al.] // AEU Int. J. Electron. Commun. – 2019. – Vol.99. – P. 70-80. **3.** Гуммель А.А. Система позиционирования проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / А.А. Гуммель, А.В. Батюков, А.С. Косарев, М.А. Земляной// Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов XLI международной научно-технической конференции. Новочеркасск, 15–17 октября 2019 года. С. 350-355. **4.** Visual measurement system for roadheaders pose detection in mines / Y. Du [et al.] // Optical Engineering. – 2016. – Iss.10.Vol.55. 104107. **5.** Research on position and orientation measurement method for roadheader based on vision / J.Yang [et al.] // INS. In Proceedings of the 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems, International Society for Optics and Photonics, Beijing, China, 12 January 2018. – P. 1062105. **6.** Киклевич Ю. Н. Шахтная робототехника. – К.: Техніка, 1987. – 159 с. **7.** Шабаев О.Е. Оценка влияния интеллектуальной системы "управление–подача" исполнительного органа проходческого комбайна на точность воспроизведения заданного профиля выработки / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Е.Ю. Степаненко // IX Szkola Geomechaniki 2009 / Miedzynarodowa Konferencja Czesc II: zagraniczna: Materialy Naukowe/ –Gliwice–Ustron, 2009. – С. 273–284. **8.** Мехатронная система подачи исполнительного органа проходческого комбайна с интеллектуальным модулем воспроизведения контура выработки / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко, Е.Ю. Степаненко // Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: зб. наук. праць. – Донецьк: ВАТ "НДІГМ імені М.М. Федорова", 2008–2009. – Вип. 102–103. – С. 404–414.

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В СКВАЖИНАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Шажко Я.В., Василенко Н.И., Ожегова Л.Д., Вишняк Ю.Ю.
(ГУ «ИФГП», г. Донецк, ДНР)
Тел./Факс: +38 (062) 3115285; E-mail: syarilo@mail.ru

Abstract: *Analysis of disadvantages of laboratory methods for determining the strength of rocks methods. Description of the device for their determination in underground conditions ahead of the face of a moving clearing or sinking area to detect geological disturbances with a small amplitude by changing the physical and mechanical characteristics of the surrounding array.*
Key words: *strength, geological disturbances, rock.*

Существует множество методов мониторинга изменения прочностных и деформационных свойств горных пород в окрестности подземных горных выработок [1-4]. В зависимости от условий проведения из них выделяют:

- методы контроля, осуществляемые в подземных условиях: путем нагружения специальными устройствами части окружающего массива, вдавливания инденторов в забой и стенки скважин, ультразвукового прозвучивания и др.;

- лабораторные методы, суть которых заключается в переносе свойств исследуемых образцов горных пород на весь массив в целом.

При проведении лабораторных исследований основной проблемой, решаемой при интерпретации полученных данных, является установление меры соответствия результатов исследования параметрам горной породы в условиях ее естественного залегания. Основная погрешность возникает из-за не (или частичного) учета масштабного эффекта, несоответствия пространственной ориентации прикладываемой нагрузки при лабораторных испытаниях реальному положению напластования слоев горной породы в массиве, влияния температуры, водо- и газонасыщенности, а также несовершенства лабораторных методов исследования, приводящих к нарушению естественного силового нагружения, что влечет за собой искажение процессов деформирования и разрушения горных пород [5].

Реальный массив горных пород, как правило, имеет сложное строение, включая в себя слои обладающие различной прочностью, и зачастую осложнен геологическими нарушениями. Даже если размеры исследуемого в лабораторных условиях образца достигают или превосходят размеры элементарного объёма горной породы, определяемого по её минеральному составу, исследуемый образец может содержать различные дефекты более крупных размеров, что искажает результаты проводимого мониторинга. Поэтому образец горной породы, взятый из породного массива и исследуемый в лаборатории, не может дать абсолютно достоверную информацию об изменении прочностных и деформационных свойств пород, слагающих горный массив. Влияние размеров образца на его физико-механические свойства является сутью масштабного эффекта.

В своей диссертационной работе, посвященной исследованию влияния масштабного эффекта на прочность углей в условиях различных напряженных состояний, С.Е. Чирков сопоставляя данные, полученные по результатам испытаний угля при сжатии в условиях естественного залегания с прочностью его образцов, показывает, что прочность в целиках в 2-4 раза меньше прочности образцов горных пород [6].

Так, исследование М.И. Койфманом одноосного сжатия весьма малых образцов мелкозернистых горных пород (типа песчаников) показало, что увеличение их линейных размеров от 0,5 до 7 см приводило к значительному росту их прочности (в некоторых случаях до 20-30 раз) [1].

Анализ экспериментов, проводимых различными исследователями, показывает противоречивое влияние масштабного эффекта на прочность горных пород. М.И. Койфман, используя результаты собственных опытов и работы других ученых, выдвинул оригинальную гипотезу, суть которой сводится к объяснению экспериментальных данных наличием двух масштабных эффектов: объемного и поверхностного [1]. Объемный масштабный эффект зависит от наличия дефектов в объеме образца и потому его проявление вызывает уменьшение прочности горных пород с увеличением их объема. Поверхностный масштабный эффект зависит от наличия нарушений поверхностного слоя образцов, вызванных их изготовлением и обработкой. С уменьшением размеров образца отношение поврежденной поверхности к единице объема возрастает, что приводит к более крупному повреждению поверхностного слоя на одну и ту же глубину у малых образцов, чем у больших. Таким образом поверхностный масштабный эффект приводит к снижению прочности образцов с уменьшением их размеров.

Наличие сложного, противоречивого влияния масштабного эффекта на физико-механические свойства горных пород, наглядно демонстрирует объективную невозможность прямого переноса свойств образцов горных пород, полученных по результатам лабораторного контроля, на весь массив в целом. В связи с этим, проведение натурного мониторинга является единственным направлением получения достоверной информации об изменении прочностных и деформационных свойств углепородного массива, удовлетворяющей потребностям горной практики.

Следует отметить, что для достижения компенсации влияния масштабного эффекта при проведении лабораторного контроля обычно осуществляют увеличение размеров образцов горной породы, но не более размеров, определяемых техническими характеристиками силовых установок, используемых в экспериментах. При этом максимально возможные размеры образцов (объемом обычно не более 0,1 $м^3$) даже для относительно однородных массивов не превосходят их элементарного объема, что не позволяет объективно оценить изменение прочностных и деформационных свойств слагающих массив горных пород по результатам лабораторного мониторинга [5].

В современных условиях работы в угольных шахтах необходима интенсификации процессов мониторинга обстановки впереди забоя движущейся лавы (особенно это актуально при прямом ходе) или проходческого участка, поскольку неизвестно наличие мелкоамплитудных геологических нарушений. Как известно из монографии Алексеева А.Д. [7], в таких зонах наблюдается понижения прочности горных пород. В ГУ «ИФГП» разработано устройство для прогнозирования прочности в скважинах малого диаметра (рис. 1). Данная конструкция рассчитывается для скважин диаметром 42 мм, т.к. данный диаметр наиболее распространен в угольных шахтах и имеет наибольшую безопасность на пластах с высокой степенью выбросоопасности.

Сквашенный прочностномер состоит из ручного гидравлического насоса 1, измерительного блока с манометром, дефектометром и датчиком давления 2, гибкого трубопровода 3, измерительной головки 4 с выдвижными инденторами 5. Принцип

работы устройства: измерительная головка досылается на необходимую глубину в скважины диаметром 42 мм и ручным насосом нагнетается давление в рабочую камеру измерителя, где производится выдвижение инденторов, в две стороны от оси скважины, с фиксированием давления и глубины их проникновения в горный массив.

В результате обработки полученных данных получаем прочность горной породы в массиве по глубине погружения прочностномера. При понижении прочности более чем на 30 % от среднего по выработке забоя приближается к разрывному геологическому нарушению.

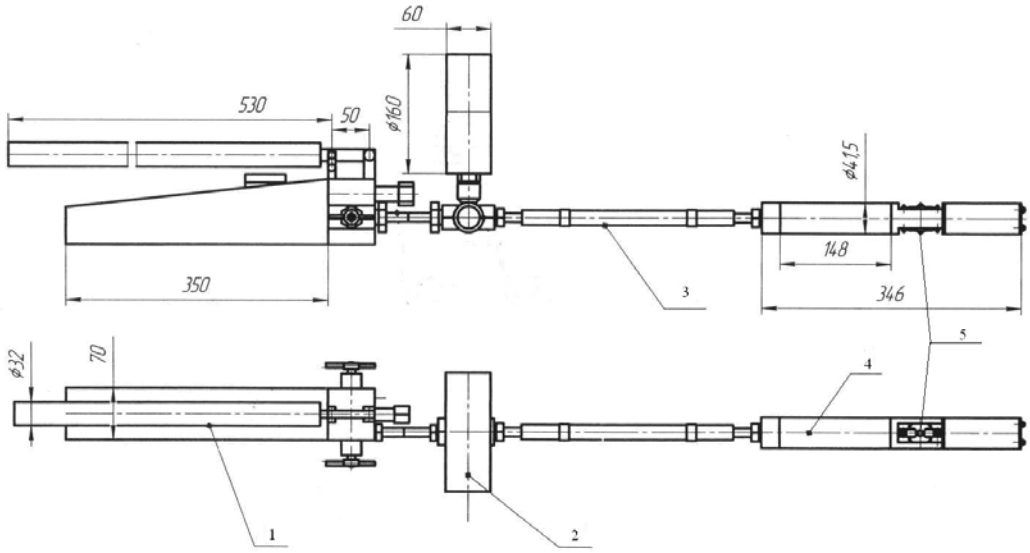


Рис. 1. Сквашенный прочностномер на параллельных инденторах

Список литературы: 1. Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения [Текст] / А.И. Берон [и др.]; под ред. А.И. Берона. - М.: Недра, 1984. - 276 с. **2.** Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая [и др.]; под ред. М.М. Протодьяконова. - М.: Недра, 1969. - 392 с. **3.** Ямщиков В.С. Ультразвуковые и звуковые методы исследования горных пород [Текст]: учеб. пособие / В.С. Ямщиков; под науч. ред. В.В. Ржевского. - М.: Московский институт радиоэлектроники и горной электромеханики, 1964. - 72 с. **4.** Барон Л.И. Определение свойств горных пород [Текст] / Л.И. Барон, Б.М. Логунцов, Е.З. Позин. - М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1962. - 332 с. **5.** Баклашов И.В. Геомеханика [Текст]. В 2 т. Т. 1. / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, А.Н. Шашенко, В.Н. Борисов. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. - 208 с. **6.** Чирков С.Е. Исследование влияния масштабного эффекта на прочность углей в условиях различных напряженных состояний [Текст] // автореф. дис. канд. техн. наук. / Чирков Сергей Евгеньевич. - М., 1965. **7.** Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов // К. – Наукова думка. – 2010., 422с.

ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМА СБРОСА ПРОРЫВНОЙ МЕМБРАНЫ

Шайдурова Г.И., Ознобишин А.Б., Рогожникова Е.Н. *(ПАО НПО «Искра» г. Пермь)*
Тел. +7 (342) 262 73 59; E-mail: rogoznikova@59.ru

Abstract: *The article presents the results of tests before the destruction of rectangular samples of aluminum alloy AD1. A method for determining the true value of the ultimate tensile strength is proposed. The strength calculation of the membrane has been carried out. As a result of numerical calculation and tests carried out, the decision was made: to bore the diameter of the groove for each critical section; the thickness of the groove is taken depending on the characteristics of the material.*
Key words: *physical and mechanical properties, tensile diagrams, conditional ultimate strength, true ultimate strength.*

Прорывная мембрана, используемая в двигателе мягкой посадки, предназначена для герметизации внутренней полости корпуса двигателя и сбрасывается непосредственно на начальном этапе работы двигателя при внутреннем давлении от 1,96 МПа до 3,92 МПа. Мембрана представляет выпуклую пластину из алюминиевого сплава толщиной 1мм, имеющая кольцевую проточку (рис.1). Необходимо: разработать методику пересчета физико-механических характеристик (ФМХ) материала, полученных при испытании образцов для использования в численном расчете; провести прочностной расчет мембраны; определить сходимость численного решения с данными экспериментальной отработки мембраны.

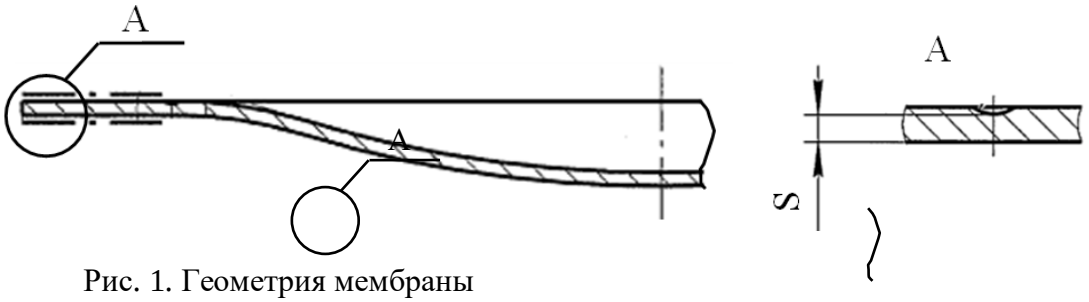


Рис. 1. Геометрия мембраны

В обеспечение проектирования геометрии прорывной мембраны были проведены испытания прямоугольных образцов из алюминиевого сплава АД1.М ГОСТ 21631-76 и получена зависимость условного напряжения от деформации. ФМХ алюминиевого сплава приведены в таблице 1.

Таблица 1. ФМХ алюминиевого сплава

Материал	Предел прочности, $\sigma_в$, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
АД1.М	81,51	$7 \cdot 10^4$	0,3

Сопротивляемость металла разрушению при растяжении – показатель прочности – определяют по результатам испытаний образцов на разрывной машине. Найденную на диаграмме растяжения максимальную величину растягивающей силы делят на начальную величину площади поперечного сечения образца. Полученная величина напряжения является условным пределом прочности, т.к. вследствие пластической деформации максимальной силе растяжения соответствует меньшая площадь сечения. [1]

Поскольку алюминий обладает высокой пластичностью, следовательно имеет большие деформации, поэтому для расчета требуется истинная диаграмма деформирования, выражающая зависимость истинного напряжения $\bar{\sigma}$ от логарифмической деформации $\bar{\varepsilon}$. Для вычисления используется следующие формулы [2, 3]:

$$\bar{\sigma} = \sigma(1+\varepsilon); \quad \bar{\varepsilon} = \ln(1+\varepsilon).$$

Для сравнения на рисунке 2 представлены зависимость условного напряжения от деформации, полученные на испытаниях (У - штриховая линия), и рассчитанные значения зависимости истинного напряжения от логарифмической деформации (И – сплошная линия).

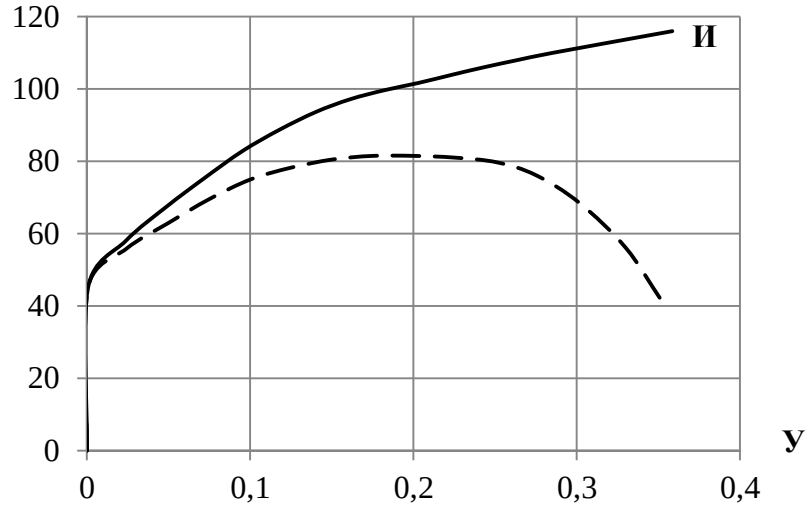


Рис. 2. Диаграммы деформирования материала АД1.М

Расчет давления срабатывания мембраны проведен методом конечных элементов в осесимметричной постановке [4]. В соответствии с техническими требованиями разрушение мембраны должно быть от 1,96 до 3,92 МПа. Расчетная модель приведена на рисунке 3.

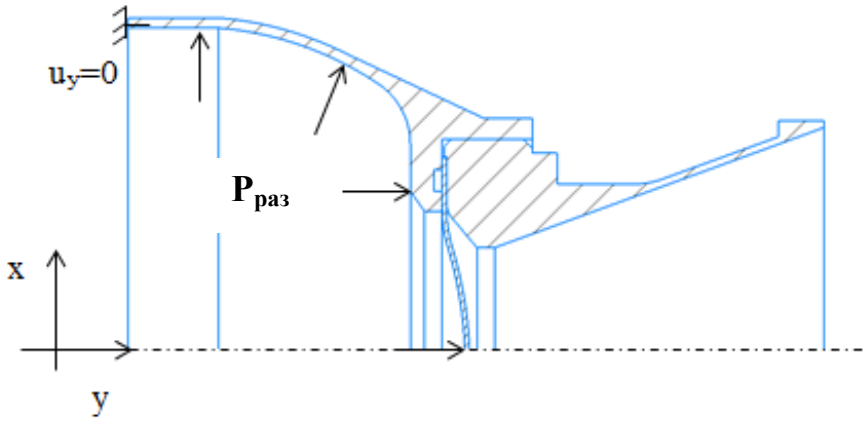


Рис. 3. Расчетная модель мембраны

Эпюра распределения интенсивности напряжений приведена на рисунке 4.
В таблице 2 приведены напряжения по толщине мембраны в зоне проточки.

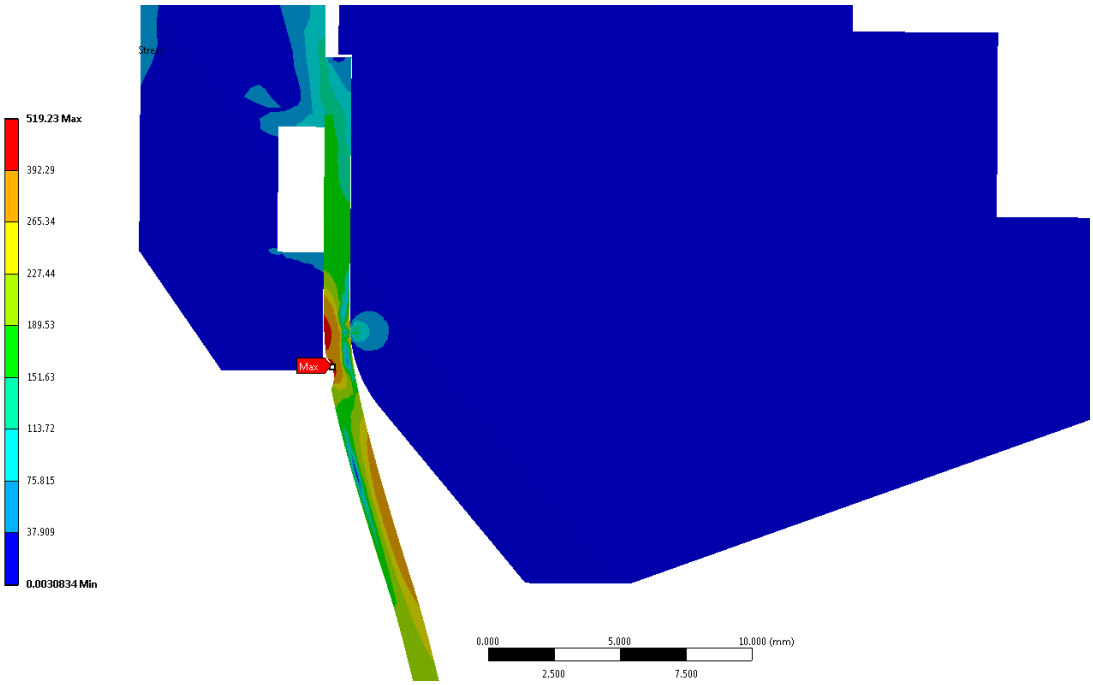


Рис. 4. Интенсивность напряжений с диаметром критики 52 мм

Согласно данным, приведенным в таблице 2, предполагаемое разрушение мембраны наступает при достижении предела прочности материала АД1.М $\sigma_в$= 116 МПа. Этому значению соответствует диапазон расчетных давлений от 2,6 до 3,2 МПа. Указанный диапазон находится в заданных чертежом на мембрану границах от 1,96 до 3,92 МПа.

Таблица 2. Распределение напряжений в зависимости от давления

Внутреннее давление, $P_{заг}$, МПа	Интенсивность напряжений для ∅52, $\sigma_{инт}$, МПа
0,08	16,00
0,29	60,06
1,29	101,75
1,94	111,33
2,60	112,52
3,24	137,07
3,52	149,23
3,83	162,17
3,88	164,51
4,08	172,72
4,75	201,32

Для исследования сходимости численного расчета были проведены испытания мембраны из алюминия АД1.М. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты испытаний

№ мембраны	$ø_{кр}$	$P_{раз}$, МПа	S проточки, мм
№ 21109	ø66	2,9	0,66
№ 21110	ø52	3,1	0,58

Результаты испытаний принципиально подтвердили сходимость расчетных и экспериментальных данных по разрушению.

В результате численного расчета и проведенных испытаний выявилось: необходимость выполнения диаметра проточки для каждого критического сечения, а толщину проточки принимать в зависимости от характеристик материала (таб. 4).

Таблица 4. Высотный размер проточки

$\sigma_{в\ ср}$		S_1, мм диаметр критики ø52 ÷ ø59 (диаметр проточки ø54 ÷ ø61)	S_2, мм диаметр критики ø60 ÷ ø66 (диаметр проточки ø62 ÷ ø68)
МПа	кгс/мм^2		
от 58,8 до 68,6	от 6,0 до 7,0	0,67	0,76
от 68,6 до 78,4	от 7,0 до 8,0	0,58	0,66
от 78,4 до 88,2	от 8,0 до 9,0	0,52	0,58
от 88,2 до 98,0	от 9,0 до 10,0	0,46	0,52
от 98,0 до 107,8	от 10,0 до 11,0	0,42	0,47

Заключение

1. Разработана методика пересчета физико-механических характеристик (ФМХ) материала, полученных при испытании образцов для использования в численном расчете.
2. Представлен прочностной расчет мембраны.
3. В результате численного расчета и экспериментальных испытаний предложена технология выполнения диаметра проточки для каждого критического сечения, при этом толщина проточки принимается в зависимости от ФМХ материала.

Список литературы: 1. Зорин Ю.А. Определение истинной величины предела прочности при растяжении конструкционной стали / Ю.А. Зорин // НИЦ Вестник науки, 2020. **2.** Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.- 560 с. **3.** Катаев Ю.П. .Построение диаграмм истинных напряжений при пластическом деформировании металлов / Ю.П. Катаев // Изв. вузов. Авиационная техника. - 2012. - №4. **4.** Скворцов Ю.В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твердого тела [Электронный ресурс] : интерактивное мультимедийное пособие / Ю.В. Скворцов, С.В. Глушков; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (Нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (9,1 Мб). - Самара, 2011.

ФУЛЛЕРЕНСОДЕРЖАЩИЕ ПЛЕНКИ И ПОКРЫТИЯ

Шпилевский Э.М., Филатов С.А. ***(****ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г.Минск, Беларусь****)***
Тел./Факс +375(029)6357732, +375(017)3268490; +375(17)2922513;
E-mail: eshpilevske@rambler.ru, fil@itmo.by

Abstract: *The structure, electrical, thermoelectric, tensoelectric and tribological properties of metal films containing fullerenes in different concentrations have been investigated. It is shown that such films can be used as coatings for parts of friction units, movable electrical contacts, as well as active elements of sensor electronics devices.*
Key words: *fullerenes, metals, films, structure, electrical, thermoelectric, tensoelectric and tribological properties, coatings, sensors*

Введение

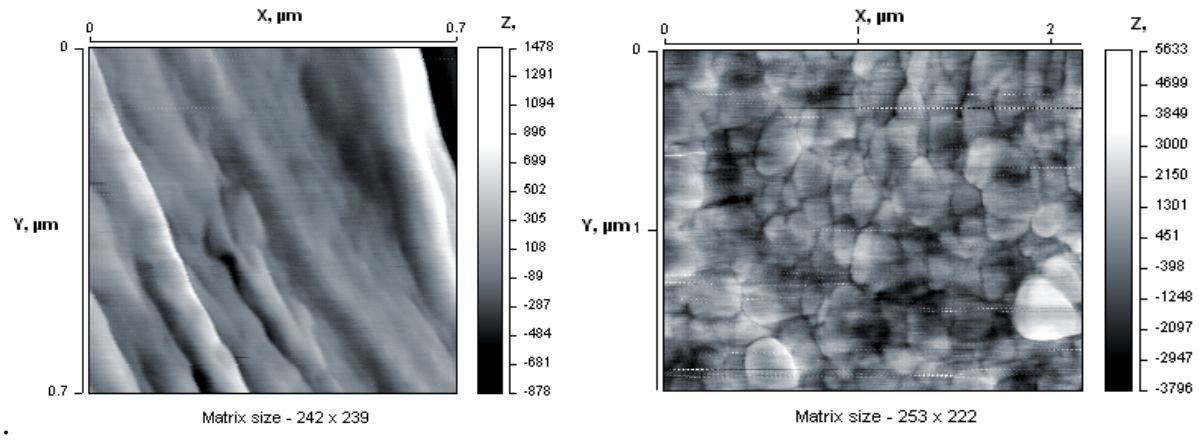
Фуллерены в принципиально новые молекулы позволяют создавать новые материалы как результат химических реакций, твёрдых и жидких растворов, образования композитов. Молекула C_{60} обладает наиболее высокой среди фуллеренов симметрией и наибольшей стабильностью. Диаметр молекулы — 7,11 Å. Молекулы фуллеренов являются сильными окислителями, так как обладают высокой электроотрицательностью и способны присоединять к себе до шести свободных электронов [1].

Показано, что фуллеренсодержащие материалы обладают рядом уникальных свойств: низкими значениями коэффициентов трения и высокой износостойкостью [1,2]; повышенной коррозионной стойкостью и высокой прочностью [2,3]; повышенными упругими свойствами и нелинейными оптическими характеристиками. Выявлены нелинейные оптические эффекты в фуллеренсодержащих материалах (генерация третей гармоники, ограничение интенсивности выходящего излучения) [3,4].

В настоящей работе исследованы структура, электрические, термоэлектрические, тензоэлектрические и трибологические свойства металлических пленок, содержащих фуллерены в разных концентрациях систем Cu-C_{60}, Al-C_{60}, Sn-C_{60}, Ti-C_{60} с целью выявления возможных применений. Пленки получали в вакууме методом испарения и конденсации. В качестве испарителей для металлов использовались молибденовые «лодочки», для C_{60} — танталовые. Получение пленок с различным содержанием фуллеренов обеспечивалось различными плотностями атомно-кластерных потоков компонентов, что в свою очередь достигалось регулированием температуры испарителей и изменением их расположения относительно подложки. Реальная концентрация фуллеренов в металлфуллереновых пленках определялась методом рентгеновского микроанализа по интенсивности характеристического рентгеновского излучения K_α-линий атомов тметалла и углерода в пленках заданной толщины. В качестве исходного материала использовались металлы высокой чистоты (Ме1-0) и фуллеритовый порошок C_{60} чистоты 99,9 % производства КБТМ-ОМО (г. Минск) Выявлены нелинейные оптические эффекты в (генерация третей гармоники, ограничение интенсивности выходящего излучения) [5,6].

1. Важнейшие свойства фуллеренсодержащих пленок

Наноструктурированность. Введение фуллеренов в материалы даже в небольших долях (до 1,0 масс. %) существенно изменяет структуру, обеспечивая малый (до десятков нанометров) размер зерен. Для примера на рис. 1. представлены виды поверхностей пленок чистого алюминия и композитной Al-C_{60}.



а б

Рис. 1. АСМ-изображение поверхностей алюминия: а - чистый алюминий, б – Al+1%C_{60}

Плёнки Me-C_{60}, полученные вакуумным осаждением представляют мелкодисперсные структуры. Размер зерна может измеяться от 30 до 120 нм в зависимости от соотношения металлической и фуллереновой компонентов [7].

При введении фуллеренов в металлы в зависимости от долевого состава компонентов существенно изменяют их физические и физико-химические свойства. Например, коэффициент трения и износ изменяются в разы, а электрическое сопротивление может изменяться в пределах многих порядков. На рис 2 приведены зависимости удельного электрического сопротивления плёнок ρ от долевого соотношения $x=n_{Me}/n_{C60}$.

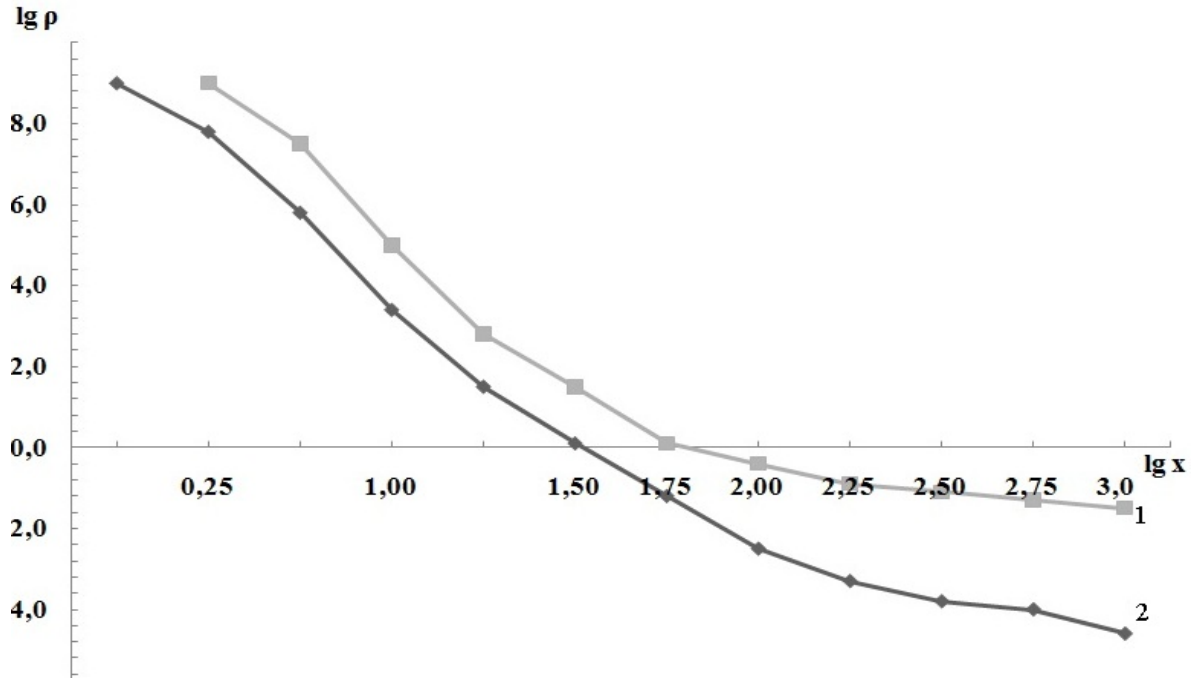


Рис. 2. Зависимость удельного электрического сопротивления плёнок ρ от долевого соотношения $x=n_{Me}/n_{C60}$ для различных систем: 1 - Ti-C_{60}, 2 - Cu-C_{60}

В таблицах 1 - 3 приведены некоторые характеристики покрытий металл-фуллереновых пленок.

Таблица 1. Характеристики покрытий, полученных совместной конденсацией металлов и фуллеренов

Система	Нанотвёрдость, ГПа	Коэфф. сухого трения	Модуль Юнга, ГПа
C_{60}	1,02	0,21	62,2
Cu-C_{60}	1,29	0,18	86,2
Al-C_{60}	1,94	0,16	95,8
Ti-C_{60}	3,96	0,16	105,8

Таблица 2. Диаметр зерна (d), поверхностное электросопротивление ($R_{\square}=\rho/\delta$) и коэффициент тензочувствительности (γ) металл-фуллереновых плёнок

Система	Масс. Доля C_{60}, %	d, нм	$R_{\square}$, Ом/□	γ
Cu- C_{60}	3,0 6,0	40 10	6,60 112	6,9 10,2
Al-C_{60}	3,0 6,0	40 30	29,2 421	6,3 8,2
Sn-C_{60}	3,0 6,0	20 20	39,4 319	7,5 9,4
Ti-C_{60}	6,0 12,0	20 10	52,0 418	6,6 9,6

Таблица 3. Зависимость ТДС (α) и термоэлектрической эффективности (Z) пленок систем Ti-C_{60} и Cu-C_{60} разного долевого состава и толщины (Δср)

Материал, n_{Me}/n_{C60}	$\alpha\cdot10^6$, В·К$^{-1}$·	$Z\cdot10^3$, К$^{-1}$	$\alpha\cdot10^6$, В· К$^{-1}$	$Z\cdot10^3$, К$^{-1}$
	Δср= 95 нм		Δср=300 нм	
Ti	8,2	2,72	5,5	1,22
6	25	25,3	18,2	13,4
60	20	16,2	16,3	12,7
200	18	13,1	13,2	8,36
500	16	10,3	10,1	4,95
Cu	5,2	1,09	3,7	0,55
6	25	25,3	19,0	14,6
60	16	10,3	9,1	3,35
270	10	4,05	7,6	2,34

1. Фуллеренсодержащие покрытия

Испытания металл-фуллереновых покрытий указывают на широкие возможности их использования в машиностроении, авиастроении, в других областях хозяйственной деятельности, где возникают экстремальные условия эксплуатации приборов и механизмов.

Покрытия для деталей нагруженных узлов трения. Металлфуллереновые пленки имеют низкий коэффициент трения, нелинейно зависящий от концентрации и достаточно высокую адгезионную прочность. Коэффициенты трения покрытий (при скорости скольжения 0,12 $мс^{-1}$ и нагрузке на остриё равной 5,0 10^6 $Нм^{-2}$) на стеклянной подложке составили 0,16-0,17, на титановой подложке – 0,11-0,12, а адгезионная прочность покрытий титан-фуллерен на этих подложках равна 0,62 ГПа и 0,84 ГПа, соответственно. Предел прочности покрытий составляет 8,9 ГПА, а модуль Юнга – 91 ГПа [2,7].

Покрытия для подвижных электрических контактов. Анализ результатов, приведенных в таблице 2 показывает, что низкие значения коэффициентов трения для металлфуллереновых слоев объясняются возможной сменой механизма трения. Фуллерены вследствие замкнутости всех σ-связей могут проявлять свойства молекулярного подшипника. Таким образом, несмотря на используемую при трибологических испытаниях схему «остриё – покрытие», предполагающую проявление механизма «трение-скольжения», наличие молекул фуллерена обеспечивает действие механизма «трение – качение».

Удачное сочетание достаточно высокой электрической проводимости и низкого коэффициента трения.

Например, плёнки систем Cu-C_{60}, Al-C_{60} обладают достаточно высокой электрической проводимостью и низким коэффициентом трения. Они пригодны для применения в качестве покрытий для подвижных электрических контактов.

Тензорезистивные датчики. Используя тензоэлектрический эффект могут быть построены тензодатчики на металлфуллереновых пленках. Металлфуллереновые пленки имеют высокий коэффициент тензочувствительности, в то время как самое высокое значение для металлов - для платины $\gamma = 1{,}6$.

Покрытия для эндопротезов. Высокие прочностные характеристики, низкий коэффициент трения, высокую биологическую совместимость, низкую адгезию клеток крови сочетают плёнки Ti-C_{60}. Покрытия на основе этих структур можно рекомендовать для эндопротезов, в том числе, для протезов подвижных суставов (коленных, локтевых и др.).

Пленки Ti-C60, обладая низкими коэффициентом трения и электрическим сопротивлением, высокой высокими химической устойчивостью и биологической совместимостью, изготовленные покрытия перспективны для биомедицинских применений, например для подвижных эндопротезов [8].

Металлфуллереновые покрытия обладают важными механическими, трибологическими, коррозионными свойствами, сочетая в одном материале трудносовместимые свойства (например, малую плотность с высокой прочностью, высокую адгезию и низкий коэффициент трения, высокую прочность и высокую пластичность). Сочетание названных свойств позволяет сделать вывод о перспективности применения металфуллереновых покрытий в экстремальных условиях (биомедицине, кораблестроении, авиационной и космической технике)

Термоэлектрические датчики. Термоэлектрические свойства металл-фуллереновых пленочных структур подробно изучены в работе [9]. Как следует из таблицы 3, значения термоэлектрической эффективности на порядок превышают значения термоэлектрической эффективности, полученных на полупроводниковых структурах (например, на пленках SiGe и BiTe разной степени легирования [10] и других полупроводниковых структур [11]).

Заключение

Проведенные исследования показали, что двумерные системы на основе фуллеренов и металлов обладают уникальными технологически управляемыми свойствами. Они могут найти самое широкое применение в качестве электротехнических материалов, поскольку а) электрические свойства двумерных систем на основе фуллеренов и металлов управляемо могут изменяться в широких пределах (от 10^{-4} до 10^{9} Ом·м); б) обладают высокими значениями прочности и твердости; в) имеют низкий коэффициент трения; г) получение структур на основе фуллеренов и металлов вписывается в технологию изготовления интегральных схем.

Установлено, фуллереносодержащие металлические пленки могут быть использованы как покрытия деталей узлов трения, подвижных электрических контактов, а также как активные элементы устройств сенсорной электроники.

Список литературы: **1.** Витязь П. А., Свидунович Н. А., Куис Д. В. Наноматериаловедение: учеб. Пособие. Минск: Высш. шк., 2015. – 511 с. **2.** Shpilevsky E. M., Zhdanok S. A., Schur D. V. Containing carbon nanoparticles materials in hydrogen energy. Hydrogen Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems – II. Dordrecht: Springer Science, 2011. - P. 23–39. **3.** Шпилевский Э.М. Структура и физические свойства металл-фуллереновых тонких пленок. //Вакуумная наука и технология, 2014. Т.23, №1.- С. 73-77. **4.** Shpilevsky E.M., Penyazkov O.G., Filatov S.A., Shilagardi G., Tuvshintur P., Timur-Bator D., Ulam-Orgikh D. Modification of materials by carbon nanoparticles//Solid State Phenomena Shweizarland, 2018.Vol. 271. - P.70-75. **5.** Дрозд А.С., Матюшков В.Е., Стельмах В.Ф., Шпилевский Э.М. Дуговая установка для производства фуллеренсодержащего продукта // Фуллерены и фуллеренсодержащие материалы: Сб. науч. Тр.. – Минск: «Технопринт», 2001. – С.143 – 149. **6.** Адашкевич С. В., Ивашкевич О. А., Стельмах В. Ф., Шпилевский Э. М., Шункевич Т. М., Солдатов А. Г. Установка для экстракции фуллеренов // Фуллерены и фуллереноподобные структуры в конденсированных средах.— Минск: УП “Технопринт”, 2002.— С. 171—172. **7.** Nanostructures metal–fullerene films and coatings: production and some properties. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2018. Vol. 91, No. 6, Pp. 1543-1549. **8**. E.M. Shpilevsky, M.E. Shpilevsky, A.G. Soldatov, L.A. Matveeeva. Titanium-fullerene coating for bio-medical applicaton. Abs. 1st Russian - Hellenic Symposium “Biomaterials and bionanomaterials: resent advances and safety - toxicology issues”, May 3-9, 2010, Heraklion, Greece, p. 35. **9.** Vityaz P.A., Shpilevsky E.M. Fullerenes in matrices of different substances. Journal of engineering Physics and Thermophysics, 2012.Vol. 85, № 4.- P. 780-787. **10.** Шпилевский Э. М., Филатов С.А.,Замковец А.Д., Шилагарди Г., Улам-Оргих Д., Мунцецег С. Термоэлектрические свойства металлфуллереновых пленок.//Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. Сб. науч. статей. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. 2021.- С. 317-324. **11.** Атакулов Ш.Б., Отаженов С.М., Расулов Р.Т., Розиохунова Н., Илхомхужаева Х. Термоэлектрическая эффективность пленок теллурида свинца при легировании элементами V группы // ФИП, 2009, т.7, № 1-2. - С. 119-122. **12.** BoukaiAkram I., Dunimovich Yu., Tahir-Kheli J. et al. Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials//Nature. 2008. 451. - P. 168-171.

ОБРАЗОВАНИЕ КРАТЕРОВ ПРИ УДАРЕ СФЕРЫ ПО СЛОИСТОМУ ПОЛУПРОСТРАНСТВУ

Щугорев В.Н., Савельев М.М., Горбачев П.А., Гольцев А.А., Радин В.П. (*НИУ МЭИ, г. Москва, Россия*)
E-mail: Shchugorev.VN@gmail.com

Abstract. *The use of structural elements made of fiberglass contributes to the solution of many qualitatively new problems arising in the design of super-powerful electrical machines. The most successful are design solutions that maximize the properties of fiberglass as electrical insulating and, at the same time, structural materials. The correct choice and rational use of various types of fiberglass, which have significant anisotropy of mechanical and electrical insulating properties, is an important task in the optimal design and manufacture of parts from them.*

Keywords: *impact, impact crater, energy, composite target, indenter.*

Создание надёжных, прочных и дешёвых изделий из композиционных материалов, которые способны выполнять свои функции в различных режимах работы, является насущной задачей улучшения качества производства. Сегодня, всё больше предприятий начинают активно использовать композиты в своих продуктах. Основными преимуществами данных материалов перед металлами являются их дешевизна, малая масса и более низкий уровень шума при динамическом воздействии. Перед использованием на действующей детали, любой материал должен пройти ряд тестов на подтверждение заявленных производителем характеристик. Поэтому, проведение экспериментального исследования в области механики контактного взаимодействия и разрушения композиционных материалов, а также сопоставление полученных результатов с аналитическим и численным решением, является актуальной задачей в наше время.

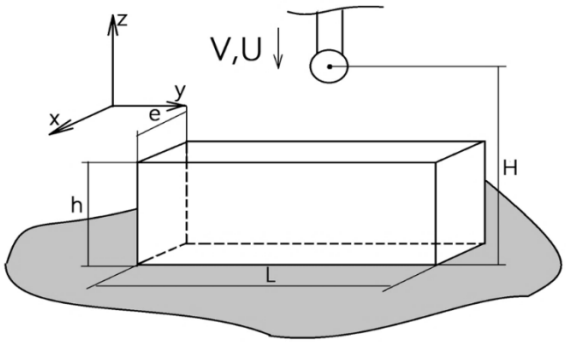


Рис. 1. Параметры мишени

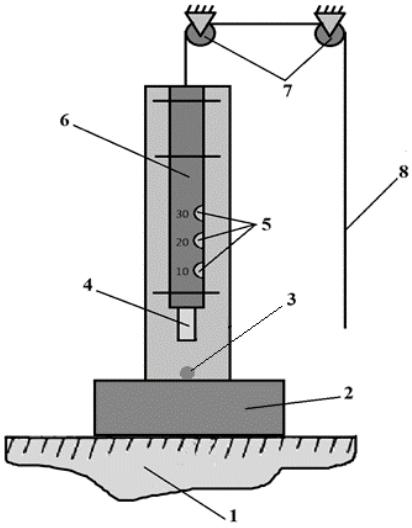


Рис. 2. Схема испытательной установки

В поставленном эксперименте наблюдается поведение полупространства из стеклопластика, по которому проходит низкоскоростной удар индентором сферической формы. Ось Oy совпадает по направлению с осью образца и расположением слоёв, ось Oz нормальна к расположению слоёв бруса. Саму мишень будем считать полубесконечной, геометрические размеры которой на порядок выше диаметров

инденторов. Нагружение проводится падающим ударником, который, к моменту соударения, имеет потенциальную энергию деформации U=mgh и скорость V. Брус установлен на большой стальной плите. Ширина мишени – e, высота – h, длина – L. Ударник падает с высоты H.Исследуются: несущая способность слоя, по которому прошёл удар, а именно пятно контакта; поведение и влияние ударных волн в матрице; поведение материала под пятном контакта. Также, для грамотного моделирования объекта исследования, решается контактная задача теории упругости о смятии абсолютно-жёстким шаром анизотропного тела. Построена экспериментальная диаграмма показывающая момент появления отслоений и ударных кратеров в зависимости от радиуса и энергии индентора. Сам удар регистрируется с использованием скоростной камеры.

Схема испытательной установки изображена на рис. 2. Композитный образец (2) покоится на жёстко закреплённой стальной плите. Ударник (4) находится в трубе (6) с размеченными смотровыми окнами (5), благодаря которой, удар происходит строго ортогонально поверхности мишени по стальному индентору (3). С помощью троса (8), пропущенного через блоки (7), ударник поднимается на высоту H.

Основным этапом исследования образования ударных кратеров является определение форм разрушения под действием трёхосных напряжений, вызванных низкоскоростным ударом, внутренними ударными волнами и поверхностными давлениями. Это реализуется благодаря выбору подходящих критериев разрушения для оценки напряжённого состояния в каждой точке композитной мишени. Так как в настоящее время нет динамических критериев разрушения композитных образцов, подтверждённых опытными исследованиями, считается допустимым обратиться к статическим критериям. Так как испытуемый образец считаем ортотропным, критерий разрушения берём тот, который основан на теории энергии формоизменения и расширен для трёхмерных тел с общей ортотропией. Условие разрушения в последнем случае имеет вид $\sigma_e > 1$ при

$$\begin{aligned}\sigma_e = &\frac{\sigma_{11}^2}{F_{11}^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{F_{22}^2} + \frac{\sigma_{33}^2}{F_{33}^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{F_{12}^2} + \frac{\sigma_{13}^2}{F_{13}^2} + \frac{\sigma_{23}^2}{F_{23}^2} - \\ &- \frac{\sigma_{11}}{F_{11}}\frac{\sigma_{22}}{F_{22}}\left[\frac{(1+2\nu_{21}-\nu_{23})E_1 + (1+2\nu_{12}-\nu_{13})E_2}{\sqrt{(2+\nu_{12}+\nu_{13})(2+\nu_{21}-\nu_{23})E_1E_2}}\right] - \\ &- \frac{\sigma_{11}}{F_{11}}\frac{\sigma_{33}}{F_{33}}\left[\frac{(1+2\nu_{31}-\nu_{32})E_1 + (1+2\nu_{13}-\nu_{12})E_3}{\sqrt{(2+\nu_{13}+\nu_{12})(2+\nu_{31}-\nu_{32})E_1E_3}}\right] - \\ &- \frac{\sigma_{22}}{F_{22}}\frac{\sigma_{22}}{F_{22}}\left[\frac{(1+2\nu_{23}-\nu_{21})E_1 + (1+2\nu_{32}-\nu_{31})E_2}{\sqrt{(2+\nu_{21}+\nu_{23})(2+\nu_{31}-\nu_{32})E_2E_3}}\right]\end{aligned} \quad (1)$$

где, σ_e – некоторое эквивалентное напряжение, величины σ_{ij} – вызванные ударом нормальные и касательные напряжения, F_{ij} – допустимые прочностные параметры материала, соответствующие трем ортогональным направлениям, и параметры E_i и ν_{ij} – модули Юнга и коэффициенты Пуассона, связанные с направлениями 1, 2 и 3. Для учета различия между прочностными свойствами при одноосной деформации в любом заданном направлении используется допускаемая величина прочности на сжатие, если σ отрицательно, и допускаемая величина прочности на растяжение, если σ положительно. Считаем, что ударные кратеры появляются при превышении допускаемых напряжений.

Сравнение расчетных (линейная теория) и экспериментальных данных представлено на рис.3. Расхождение результатов обусловлено ростом нелинейности при увеличении энергии индентора.

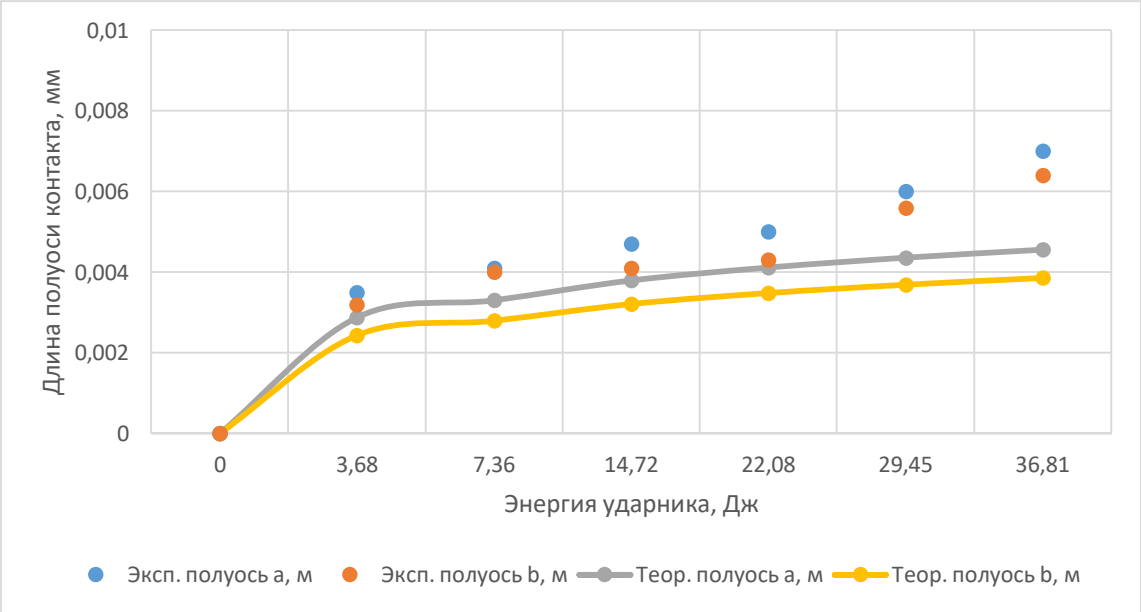


Рис. 3. Зависимость полуосей пятна контакта от энергии индентора

Современная философия конструирования различных продуктов, будь то детали, или массивные конструкции и сооружения, предполагает, что установленный элемент изначально имеет в себе микротрещины. Задача специалистов, компетентных в области осмотра и проверки продукта – своевременно обнаружить дефект до того, как он достигнет своих критических параметров, чтобы не произошла катастрофа.Полученные результаты помогут лучше изучить поведение композиционных материалов при низкоскоростном ударе, который в свою очередь, является одной из основной причин роста микротрещин и разрушения конструкций. Результаты данного эксперимента, в частности полученные границы образования ударных кратеров при различных радиусах индентора, сравниваются с аналитическим решением, произведённым в КЭ-пакете ANSYS.

Список литературы: **1.** Савельев М.М., Сапунова Л.С., Щугорев В.Н.Исследование образования ударных кратеров при взаимодействии сферического индентора и анизотропного полупространства // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Р 154 Двадцать седьмая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (11–12 марта 2021 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2021. — 1248 с. **2.** Болотин В.В. Механика разрушения композитов // Композиционные материалы, справочное издание/В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. М. Машиностроение, 1990. - С. 158 - 188. **3.** Сапунова Л.С., Житков А.А., Щугорев В.Н. Поведение слоистой балки при низкоскоростном ударе в зависимости от скорости и массы ударника// РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать шестая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12–13 марта 2020 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО “Центр полиграфических услуг “Радуга“, 2020. — 1156 с.; с. 991. **4.** Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грещук Л.Б., Кур-ран Д.Р.Динамика удара: Пер. с англ./Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др.-М.: Мир, 1985.-296 с.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДЕКРЕМЕНТОВ КОЛЕБАНИЙ БАЛКИ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ И ВАКУУМЕ

Щугорев В.Н., Сапунова Л.С., Егоров А.В., Ефимов А.Е., Щугорев А.В. *(НИУ МЭИ, г. Москва, Россия)*
E-mail: Shchugorev.VN@gmail.com

Abstract: *The aim of the work was to compare the attenuation decrement of the sample for water and air, with the possibility of evaluating the contribution of the external, internal and structural components.Based on the results of the work, it is possible to further use composite materials in the construction of various underwater and surface structures, as well as use the material in a specific field of technical work.*
Keywords*: composite beam, decrement, vibrations, damping characteristics, amplitude, frequency, composite materials, dissipation, energy, natural frequency.*

В настоящее время композиционные материалы все чаще применяются в энергомашиностроении из-за их высоких механических свойств. Исходя из результатов работы можно в дальнейшем применять композитные материалы при конструирования различных подводных и надводных сооружений. За счет слоистой структуры [1] композитных материалов, достигаются хорошие прочностные характеристики и стойкость к воздействию окружающей среды. В настоящее время немаловажным являются сейсмические расчеты подводных сооружений, в этом случае необходимо знать, как ведут себя различные элементы конструкции, к примеру, балочные элементы конструкции, в водной среде.

Были проведены несколько типов экспериментов. Образцы длиной 5 см вдоль утка и вдоль основы, покрытые смолой и образец состоящий из нескольких слоев длиной 20 см.

Рис. 1. Схема установки

Установка состояла из тисков (жесткая заделка) – 1 (Рис. 1), 2 – испытуемый образец, 3 – шкала. В качестве фиксации использовалось современное видеооборудованиеGoPro [2], с помощью которого можно записать колебания балки со скоростью 250 кадров в секунду, что позволяет определить амплитуду колебаний. Эксперименты были проведены в разных средах: в вакууме, воздухе, воде, соленой воде, растительном масле, солярке. Балка подвергалась «жесткому» нагружению прогибом на незакрепленном краю. На Рис. 2 представлены положения образца за время полупериода.

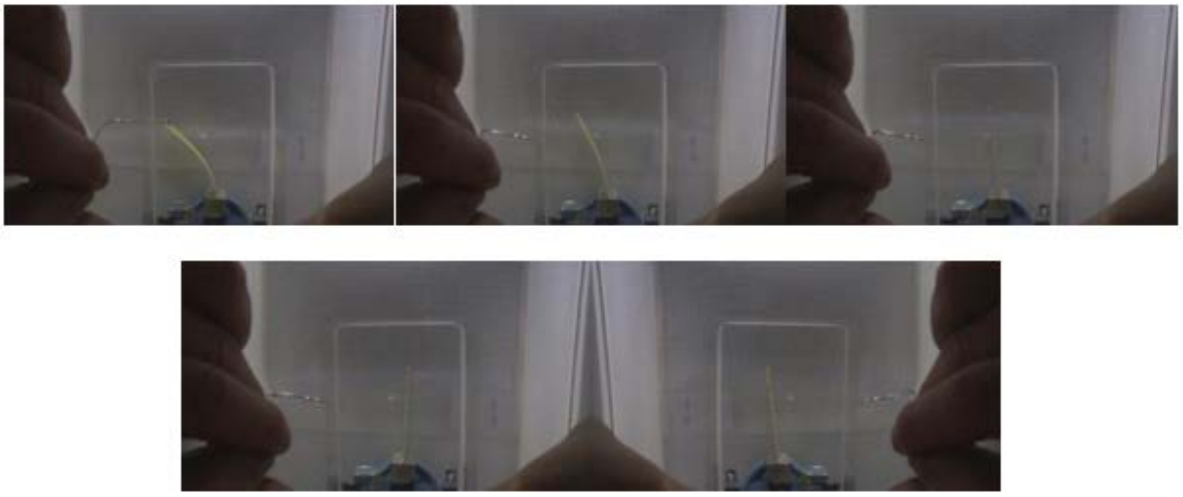


Рис. 2. Положения образца

После обработки видео материалов в программе CorelVideoStudioX9, были получены декременты затуханий колебаний балок в разных средах (Рис. 3).

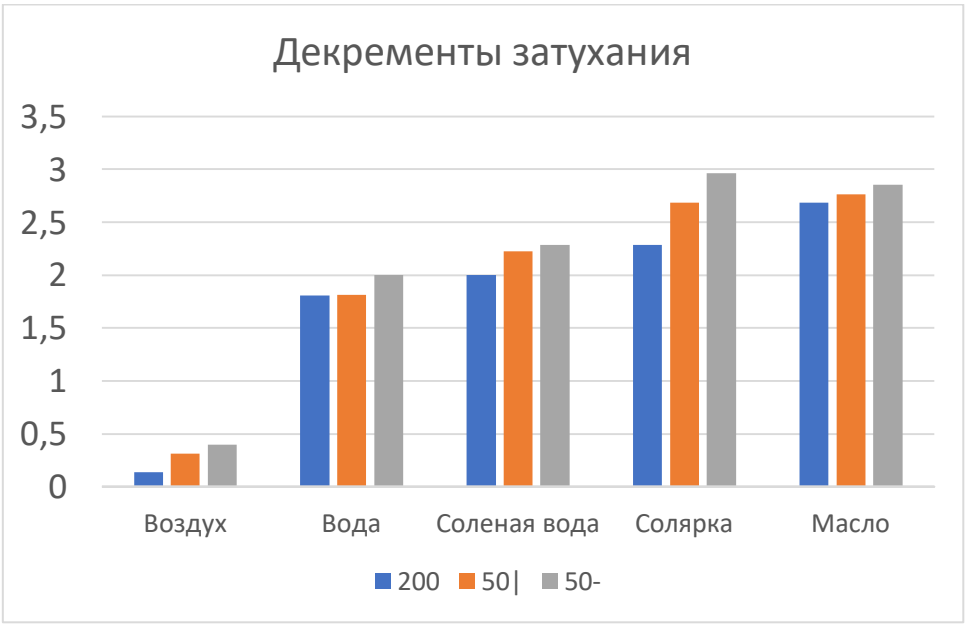


Рис. 3. Диаграмма декрементов затухания в различных средах для разных образцов

При сравнении вычисленных декрементов колебаний в разных средах можно заметить, что всолярке и масле декременты больше.И солярка, и подсолнечное масло являются близкимипо консистенции, они примерноблизкие по вязкости и соответственно декремент затухания близкий (Рис. 3).

Декременты затухания, обусловленные внутренним, внешним и конструкционным трением.В данном случае было получено, что внутреннее и конструкционное трение значительно меньше внешнего трения, поэтому декременты затухания, отражают внешнее трение в данной конструкции. Таблица 1 подтверждает это, время колебаний в вакууме увеличилось в два раза.

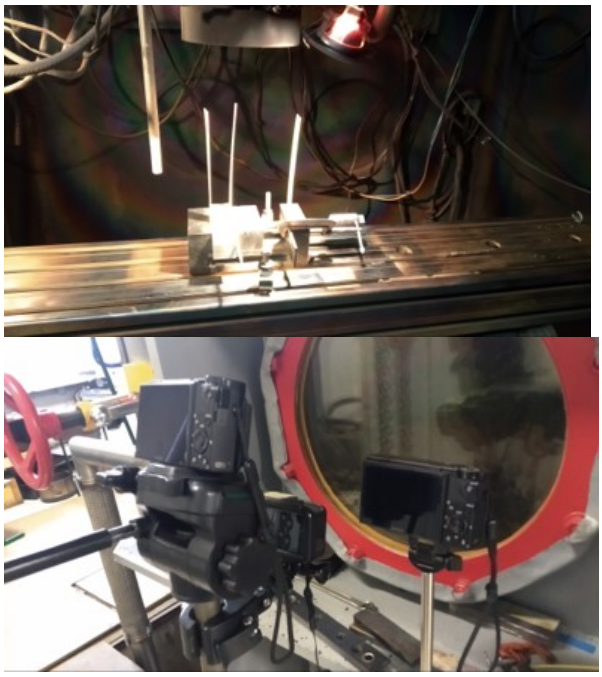


Рис. 4. Эксперимент в вакууме

Данные эксперименты позволяют проводить расчеты типовых элементов конструкции каким является балка в разных средах, это является очень актуальным сегодня, при строительстве северного потока, колебания в соленой воде труб, в нефтегазовой промышленности – ректификационные колонны (физический способ разделения смеси компонентов, например смесь делится на газ, бензин, и др. вещества), везде есть балочные элементы ну и в пищевой промышленности, подсолнечное масло широко применяется в быту оно выпускается в огромных объемах и везде присутствуют балочные элементы которые являются как крепежными элементами внутри баков и чанов с этим маслом.

Таблица 1. Сравнение времени затухания в воздухе и в вакууме

Образец \ Давление	10^{-1} мм. рт. ст.	760 мм. рт. ст.
Длина композита вдоль утка	11 сек	6 сек
Длина композита вдоль основы	21 сек	10 сек
Деревянный образец	5 сек	2 сек

Балочные элементы используются везде, это может быть крылом которое колеблется, если это безвоздушное пространство – космические корабли, даже если взять просто бак, в котором будем откачивать воздух, чтобы его спроектировать там тоже много всевозможных балочных элементов внутри этого бака, они тоже требуют расчета.

Список литературы: 1. Болотин В.В. Механика разрушения композитов // Композиционные материалы, справочное издание/В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. М. Машиностроение, 1990. - С. 158 - 188. **2.** Мурзаханов Г. Х., Щугорев В. Н., Щугорев А.В., Цой В.Е. Использование скоростных Action видеокамер для оценки частот собственных колебаний композитной балки. Тр. 32-й сессии Российского акустического общества. – 2019. **3.** Гольцев А.А., Егоров А.В., Щугорев В.Н. Экспериментальный анализ композитной балки с использованием высокоскоростной видео и аудио фиксации в водной среде // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Р 154 Двадцать седьмая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (11–12 марта 2021 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2021. — 1248 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Аверченков В.И., Надуваев В.В.
СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН В СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА…… **6**

Азимова Н.Н., Ашихмин Д.В., Милев И.Ю., Фомич М.В.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМА, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ РАБОТЕ ЛЕСОПИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА…… **11**

Азимова Н.Н., Купцова И.С., Милев И.Ю., Фомич М.В.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫНИЕ И ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ АБРАЗИВНО-МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЫЛИ В ЦИКЛОНЕ С ОБРАТНЫМ КОНУСОМ……... **15**

Акинцева А.В.
ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ…… **20**

Акопян Н. Х.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА…… **24**

Акопян Н. Х.
ПОЛУЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О РЕЛЬЕФЕ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ МОЩНОСТИ ЭНЕРГИИ…… **30**

Анастасьев А.В., Пичко Н.С., Недашковский А.П.
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГТД……... **37**

Андреев Д.Р., Апанасевич И.В., Меркурьев И.В., Зуев Ю.Ю.
РАЗРАБОТКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ТРОСОВ……. **42**

Аноприенко А.Я.
БУДУЩЕЕ ТЕХНОСФЕРЫ: БЛИЖНИЕ И ДАЛЬНИЕ РУБЕЖИ И ПРОГНОЗЫ.. **46**

Ашихмин Д.В., Купцова И.С., Милев И.Ю., Русляков Д.В., Цымбалов Д.С.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЫЛИ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ…… **56**

Базров Б.М.
ВЛИЯНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРОИЗВОДСТВО ДЕТАЛЕЙ... **59**

Бахадиров Г.А., Цой Г.Н., Набиев А.М.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА…… **62**

Болотина И.О., Седнев Д.А., Жвырбля В.Ю., Филиппов Г.А., Долматов Д.О., Портенко В.А.
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ…… **68**

Борзов Д.Б., Чернышев А.А.
АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К РАЗМЕЩЕНИЮ ЗАДАЧ В МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ…… **72**

Бохонский А.И.
КОНСТРУИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ……. **75**

Братан С.М., Харченко А.О., Рощупкин С.И., Часовитина А.С.
ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ КРОМОК ПО ГЛУБИНЕ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ШЛИФОВАНИИ…… **78**

Бутенко В.И.
ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОЦЕССАХ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН…… **81**

Бутенко В.И., Шаповалов Р.Г.
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРОЧНЯЮЩЕГО РОЛИКА С ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ…… **86**

Буялич Г. Д., Бяков М. А., Гвоздкова Т. Н., Буялич К. Г.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ РАБОЧЕГО ЦИЛИНДРА ГИДРОСТОЙКИ И ЕГО ПЕРЕКОСОВ СО ШТОКОМ.. **90**

Великородный С.Д., Семенов А.Н.
ПЕРСПЕКТИВЫ И ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ…… **95**

Веремейчик А.И.
ТЕМПЕРАТУРНЫЙ И СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕЙ…… **99**

Веремейчик А.И., Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Сосновский А.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ…… **104**

Витренко В.А., Ефимов А.А., Михайлова А.Д., Черных В.В.
ВЫБОР ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГИПЕРБОЛОИДНОГО ИНСТРУМЕНТА…… **108**

Герасимов А. В., Кирпичников А. П., Фам Минь Туен
АЛГОРИТМ И ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ВЧ-ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА……. **111**

Герике Б. Л, **Клишин В. И., Копытин Д. В.**
МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПЛЕКСОВ ГЛУБОКОЙ РАЗРАБОТКИ УГЛЯ…….. **115**

Герике Б. Л., **Тациенко В. П.**, **Копытин Д. В.**
ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОПОРНЫХ МАСОК ДЛЯ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ КОМПЛЕКСОВ ГЛУБОКОЙ РАЗРАБОТКИ ПЛАСТОВ SHM……... **120**

Горобец И. А., Голубов Н. В., Рудой Е. Р.
СПЕЦИАЛЬНОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ГРАНИТА…….. **124**

Григорьева Н.С., Шабайкович В.А.
ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВО КАК ЛУЧШАЯ ФОРМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ, КОНКУРЕНТНОЙ И ДЕШЕВОЙ ПРОДУКЦИИ……. **128**

Гусаров С.В., **Хорт Н.А.**, **Подболотов К.Б.**,
РАЗРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛЛАСТОНИТА ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЛИТЬЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ…… **130**

Гусев В.В., **Молчанов А.Д.**, **Моисеев Д.А.**
ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ…….. **134**

Гусев Е.Л.
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЙ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ (МКТ)…….. **139**

Гусейнова Е. Л.
ПРОФИЛАКТИКА ПРИХВАТОВ ХВОСТОВИКОВ ПРИ БУРЕНИИ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИН…… **145**

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Косякова И.М., Болдуева А.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ……... **150**

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И., Артюкевич А.В.
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ВАЛИКОВ ИЗ БРОНЗЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ……. **155**

Добровольский Г.И., Инютин Н.В., Сидоренко Д.М., Борисов А.Е., Белов Р.В.
СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСОВ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ ТЕРМОВАКУУМНЫХ РЕЖИМОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ……. **159**

Дуйшеналиев Т.Б., Журавлев О.В., Хохлов В.А., Хроматов В.Е.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ……. **162**

Егоров Н.Т.
ЗАКАЛКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВ ИЗ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ…… **167**

Егоров П.В., **Чупраков М.В., Сухоруков Ю.Г.**, **Эрнандес А.Д., Шарапова Н.Е., Жукова В.С.**
ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ ДЕАЭРАТОРА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВОГО КОТЛА ЦЕХА ПРОИЗВОДСТВА КАРБАМИДА…… **171**

Ермеков Д.К., Поветкин В.В., Нурмуханова А.З., Букаева А.З.
ИСПЫТАНИЕ ПОРОШКОВОГО СПЛАВА ПГ-Ж40 С БОРИДОМ ХРОМА CrB_2 НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ И АДГЕЗИЮ…….. **175**

Ермеков Д.К., Поветкин В.В., Нурмуханова А.З., Букаева А.З.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗОПЛАМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВКЛЮЧЕНИЕМ БОРИДА ХРОМА CrB_2..... **182**

Ефименко С. В., **Черноруцкий И. Г.**, **Сметанкин А. И.**
ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ…….. **190**

Зайдес С.А., Хо Минь Куан
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЕКТОРИАЛЬНОГО РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ……. **195**

Звягинцева А.В.
КОРРЕЛЯЦИЯ ПОЛЕЙ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ И ВОДОРОДНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ…….. **204**

Звягинцева А.В.
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ…… **208**

Зуев Е.А., Воробьёв А.К.
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОПЕРЕЧИН МОЩНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССОВ **212**

Игнаткина Е.Л., Аликина А.Д., Македонский А.А.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК В СЦЕПКАХ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ШАХТНЫХ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ. **217**

Игнаткина Е.Л., Пашанина А.Д., Шмелев Д.А.
КЛАССИФИКАЦИЯ ШАХТНЫХ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ.. **220**

Иодис В.А., Безруков В.А., Сарайкина И.П.
ПЕРЕДВИЖНЫЕ АЗОТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДОБАВОК ИЗ СТВОРОК МИДИИ ТИХООКЕАНСКОЙ…… **223**

Каракозов А.А., Рязанов А.Н., Парфенюк С.Н., Паршков А.В.
РАЗРАБОТКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРНОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПРИХВАТОВ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН В ОСЛОЖННЁНЫХ УСЛОВИЯХ…….. **226**

Клишин В. И., Тайлаков О. В., Опрук Г. Ю., Соколов С. В., Телегуз А. С., Нестерова О. А.
КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ГОРНОГО МАССИВА НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ……. **238**

Козырев Д.Л.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕМПФЕРОВ СУХОГО ТРЕНИЯ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ…… **245**

Кондуров Е.П., Кругликов П.А., Сухоруков Ю.Г., Сухорукова Е.А., Хоменок Л.А.
О ПУТЯХ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ: «ЗЕЛЕНЫЙ КВАДРАТ» ИЛИ РАЗНОСТОРОННИЙ МНОГОУГОЛЬНИК…… **249**

Костенко А.В., Рахимов Ю.Г., Кириченко В.В., Кан В.А.
СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНОГО РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ……. **257**

Кошелев М.А., Борзов Д.Б.
ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ИХ АРХИТЕКТУРЫ…….. **259**

Кудрявцев В. Н., Парамонова В. А.
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТЕВОГО ГРАФИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ……... **264**

Ладоша Е.Н., Холодова С.Н., Цымбалов Д.С.
ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО ВЫХЛОПА В РАМКАХ МОДЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ И НЕРАВНОВЕСНОЙ КИНЕТИКИ…….. **269**

Лапаева И.В., Белокриницкая О.В., Горобец И.А.
МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ…….. **273**

Липаев А.А.
ТЕХНОСФЕРА И МАШИНОСТРОЕНИЕ: ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

ОТХОДАМИ…… **278**

Лихачёва Т.Е., Дьяков А.А., Белашова И.С., Петрова Л.Г.
ТЕПЛОВОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ ПОРШНЯ ГАЗОДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ….. **282**

Лумпиева Т.П., Волков А.Ф.
КАК ОЦЕНИТЬ КАЧЕСТВО РАБОТЫ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ ВУЗА?..... **289**

Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А., Горбунов А.С., Песин М. В.
ФИНИШНАЯ ЗУБООБРАБОТКА ШЕСТЕРЕН КОМБИНИРОВАННЫМИ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМИ КРУГАМИ…….. **293**

Малашенко Т.И., Малашенко В.В.
НЕУПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ……. **297**

Малькова С.А., Рожков А.В.
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНАСТКИ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ РДТТ……. **301**

Маньшин М.В., Степанова Е.А.
ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ…….. **304**

Мартюшова А.А.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ РЕЗЦОВ АЛМАЗНЫХ ДОЛОТ. **305**

Мещеряков В.Н., Пикалов В.В.
ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ…….. **310**

Мирошниченко С.В.
ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТОДОМ РЕВЕРСИВНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ……. **313**

Михайлов А.Н., Котляров Б.С., Котляров В.Б., Полякова Л.П.
ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ЗУБЬЕВ КПП ПРИ ИХ МОДИФИКАЦИИ И ФОРМООБРАЗОВАНИИ……... **318**

Михайлов А.Н., Матвиенко С.А, Лукичев А.В., Стрельник Ю.Н., Литвинов М.И.
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ И ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОЛЕЗНОСТИ (КАЧЕСТВА)…… **323**

Михайлов Д. А., Филиппова О. В., Михайлов А. Н., Шейко Е. А.
ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА МНОГОСВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТИНУУМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ…….. **328**

Михайлов Д.Л., Ермишкин В.А., Минина Н.А., Кулагин С.П., Томенко А.К.
РОЛЬ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ В СОПРОТИВЛЕНИИ КОРРОЗИИ СПЛАВА Cr28Mo9Ni…….. **335**

Мороз О.К.
МОТИВАЦИЯ И ЕЕ ПРОБЛЕМЫ В СОВРЕМЕННОЙ ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ…….. **340**

Морозов А. Л.
КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ТОКА СТАТОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ……. **345**

Набокин В.Н., Степанова Е.А.
МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ……... **354**

Надуваев В.В., Фролов Е.Н.
ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ **355**

Нгуен Ван Ань, Москалев Л. Н., Поникаров С. И.
ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕСТЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ШТУЦЕРА МАЛОГО ДИАМЕТРА С ОБЕЧАЙКОЙ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА…….. **360**

Невмержицкая Г.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПОДШИПНИКА БУКСОВЫХ УЗЛОВ С АДАПТЕРАМИ……... **364**

Непомилуев В.В.
ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОДБОРА ДЕТАЛЕЙ ПРИ СБОРКЕ…… **369**

Овсянникова С. Н.
ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ СФЕРЫ…… **374**

Озеров К.М., Семенов А.Н.
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СООСНОСТИ МНОГООПОРНЫХ ВАЛОВ ГТД…….. **378**

Павлов В.Ф., Вакулюк В.С., Сазанов В.П., Петрова Ю.Н., Катанаева Ю.А.
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН…… **381**

Павлова Т.В., Хохлунов С.М., Авраменко А.А.
ПРОБЛЕМЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ВРАЧЕЙ В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19…… **385**

Павлыш В.Н., Дегонский А.И.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ…….. **387**

Павлыш В.Н., Зайцева М.Н.
МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ БАЗ ДАННЫХ СЛОВАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМАХ……. **391**

Павлыш В.Н., Лазебная Л.А.
АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ **395**

Павлыш В.Н., Перинская Е.В.
РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ……. **400**

Panteleenko F. I., Okovity V. A., **Devoino O. G.**, **Volodko A. S., Sidorov V. A.**, **Okovity V. V., Astashinsky V. M.**
FORMATION OF MULTI-LAYER COMPOSITE PLASMA OXIDE COATINGS….. **404**

Panteleenko F. I., Okovity V. A., **Devoino O. G.**, **Volodko A. S., Sidorov V. A.**, **Okovity V. V., Astashinsky V. M.**
DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR PREDICTING THE PROPERTIES OF FORMED PLASMA COATINGS……. **410**

Пантюхина Е.В., Прейс В.В.
ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ДИСКОВЫХ БУНКЕРНЫХ ЗАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ.. **414**

Петров П.А., Нгуен Х. Т., Бурлаков И.А.
ОСАДКА С КРУЧЕНИЕМ КАК МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЗАГОТОВОК…… **419**

Петряева И.А., Грубка Р.М., Трубников Д.К.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ……... **424**

Поветкин В.В., Букаева А.З., Нурмуханова А.З., Бектибай Б.Ж.
ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ДОБЫЧИ И ОБРАБОТКИ БЛОЧНОГО КАМНЯ ИЗ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД……. **428**

Пожидаева Л.А., Смирнов В.М., Царенко С.Н.
РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В БАЛКАХ С НЕРАВНОМЕРНЫМ НАГРЕВОМ ПО СЕЧЕНИЮ…… **434**

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.
РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ…… **438**

Попиль С.В., Цой В.Э.
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ… **444**

Папулова Г. Н., **Квасников М. Ю.**
ТИПЫ СОРБЦИОННЫХ КРИВЫХ КФ-СМОЛ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ…….. **449**

Prikhodchenko Y.I., Kapatsina N.N.
ADOLESCENCE AS A PERIOD OF INTELLECTUAL MATURITY…….. **454**

Радин В.П., Чирков В.П., Щугорев В.Н., Сапунова Л.С., Щугорев А.В.
УЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ СДВИГА И ИНЕРЦИИ ПОВОРОТА СЕЧЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ СВОБОДНОГО СТЕРЖНЯ……. **457**

Радченко М.В., Радченко Т.Б.
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ, УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ В ВАКУУМЕ……. **462**

Рак А.Н.
ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СУДОВЫХ ВАЛОГЕНЕРАТОРОВ…… **472**

Ракунов Ю. П., **Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.**
РАЗВИТИЕ ПОДСИСТЕМ: ПЕРВИЧНОЙ И СИНТЕЗИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЗОВОЙ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ…… **478**

Розоринов Г.Н.
МАГНИТОУПРУГИЕ ДАТЧИКИ УСИЛИЙ…… **483**

Романчук И.А., Голубев В.С., Вегера И.И.
ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ И ПЛАЗМЕННО - ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ **489**

Рябичев В.Д., Витренко В.А.
НЕКОТОРЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ УЧЕНЫХ ЛУГАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ…….. **494**

Савин Л.А., Корнаев А.В., Поляков Р.Н.
МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В РОТОРНОЙ ДИНАМИКЕ И ТРИБОТРОНИКЕ……. **499**

Сазанов В.П., Шадрин В.К., Семёнова О.Ю., Декань А.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ «ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ»…….. **503**

Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Зиатдинов Р.Р., Рябушкин Д.Г., Гумеров Д.Р.
АПАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ…….. **508**

Сафиуллин Р.Н., Прутчиков И.О., Резниченко В.В., Марусин А.В.
АВТОМАТИЧЕСКИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ МОНИТОРИНГ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ…… **511**

Сафиуллин Р. Н., Хаотянь Тянь
АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ГОРНЫХ МАШИН В ДИАПАЗОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ С УЧЕТОМ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОТОРНОГО МАСЛА…….. **519**

Скворцов А.И.
ЭВОЛЮЦИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В МАТЕРИАЛАХ С МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКИМ ЗАТУХАНИЕМ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ……. **524**

Собиров Т.О., Бобокулов А.Н., Султонов А.Н.
УСОВЕРШЕСТВАВАНИЕ РЕМОНТА ВАЛА ПОВОРОТА ЭКСКАВАТОРОВ ЭКГ-5А И ЭКГ-10…… **527**

Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Емельянов В.В.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ С КОНИЧЕСКОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ИЗ ЛИСТОВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ПЕРЕУТОНЕНИЕМ……. **531**

Toca A., Stroncea A., Rushica I., Nitulenco T.
PARTICULARITIES OF THE TECHNOLOGICAL DIMENSIONAL STRUCTURES WHEN PROCESSING ON MACHINING CENTERS…… **537**

Тюрин А.Н.
ТЕХНОЛОГИЯ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ **543**

Унянин А.Н., Журавлев А.С.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ФРЕЗАМИ С РАЗЛИЧНЫМ ШАГОМ МЕЖДУ ЗУБЬЯМИ…….. **549**

Федуков А.Г., Хандожко А.В.
ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ПЛОСКИХ СТЫКАХ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСИЛИЯ ТРЕНИЯ В СПЕЦИАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ НА БАЗЕ ШАРИКОВИНТОВОЙ ПАРЫ…… **553**

Хавлин Т.В., Михайлов А. Н., Михайлов Д.А.
ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН……... **557**

Хроматов В.Е., Комиссарова Т.Н., Бугаев Н.М.
МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ СИМПОЗИУМ «ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ И СПЛОШНЫХ СРЕД» ИМ. А. Г. ГОРШКОВА……. **560**

Хроматов В.Е., Комиссарова Т.Н., Дуйшеналиев Т.Б.
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОГИХ ОРТОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК……... **564**

Цымбалов Д.С., Холодова С.Н., Яценко О.В.
ДЕТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ СОДЕРЖАНИЯ ГИДРОКСИЛА И ОКСИДА АЗОТА В РЕАКТИВНЫХ ВЫБРОСАХ ЖИДКОТОПЛИВНЫХ РАКЕТ…… **570**

Чернышев Е.А.
ЗАВИСИМОСТЬ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОТ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ…… **573**

Шабаев О.Е., Довгань А.Ю.
ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗАБОЯ ПРОХОДЧЕСКИМ КОМБАЙНОМ С ОСЕВОЙ КОРОНКОЙ……... **576**

Шажко Я.В., Василенко Н.И., Ожегова Л.Д., Вишняк Ю.Ю.
ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В СКВАЖИНАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА…… **584**

Шайдурова Г.И., Ознобишин А.Б., Рогожникова Е.Н.
ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМА СБРОСА ПРОРЫВНОЙ МЕМБРАНЫ……... **587**

Шпилевский Э.М., Филатов С.А.
ФУЛЛЕРЕНСОДЕРЖАЩИЕ ПЛЕНКИ И ПОКРЫТИЯ…….. **591**

Щугорев В.Н., Савельев М.М., Горбачев П.А., Гольцев А.А., Радин В.П.
ОБРАЗОВАНИЕ КРАТЕРОВ ПРИ УДАРЕ СФЕРЫ ПО СЛОИСТОМУ ПОЛУПРОСТРАНСТВУ……. **596**

Щугорев В.Н., Сапунова Л.С., Егоров А.В., Ефимов А.Е., Щугорев А.В.
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДЕКРЕМЕНТОВ КОЛЕБАНИЙ БАЛКИ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ И ВАКУУМЕ…… **599**

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Astashinsky V. M. 404, 410
Devoino O. G. 404, 410
Kapatsina N.N. 454
Nitulenco T. 537
Panteleenko F. I. 404, 410
Prikhodchenko Y.I. 454
Rushica I. 537
Sidorov V. A. 404, 410
Stroncea A. 537
Тоса А. 537
Volodko A. S. 404, 410
Абрамов В. В. 478
Аверченков В.И. 6
Авраменко А.А. 385
Азимова Н.Н. 11, 15
Акинцева А.В. 20
Акопян Н. Х. 24, 30
Аликина А.Д. 217
Анастасьев А.В. 37
Андреев Д.Р. 42
Аноприенко А.Я. 46
Апанасевич И.В. 42
Артюкевич А.В. 155
Ашихмин Д.В. 11, 56
Базров Б.М. 59
Бахадиров Г.А. 62
Безруков В.А. 223
Бектибай Б.Ж. 428
Белашова И.С. 282
Белов Р.В. 159
Белокриницкая О.В. 273
Бобокулов А.Н. 527
Болдуева А.А. 150
Болотина И.О. 68
Борзов Д.Б. 72, 259
Борисов А.Е. 159
Бохонский А.И. 75
Братан С.М. 78
Бугаев Н.М. 560
Букаева А.З. 175, 182, 428,
Бурлаков И.А. 419
Бутенко В.И. 81, 86
Буялич Г. Д. 90
Буялич К. Г. 90
Бяков М. А. 90
Вакулюк В.С. 381
Василенко Н.И. 584
Вегера И.И. 489
Великородный С.Д. 95
Веремейчик А.И. 99, 104
Витренко В.А. 108, 494
Вишняк Ю.Ю. 584
Волков А.Ф. 289
Воробьёв А.К. 212
Ворожцова Н.А. 293
Гвоздкова Т. Н. 90
Герасимов А. В. 111
Герике Б. Л. 115, 120
Голубев В.С. 489
Голубов Н. В. 124
Гольцев А.А. 596
Горбачев П.А. 596
Горбунов А.С. 293
Горобец И. А. 124, 273
Григорьева Н.С. 128
Грубка Р.М. 424
Гумеров Д.Р. 508
Гусаров С.В. 130
Гусев В.В. 134
Гусев Е.Л. 139
Гусейнова Е. Л. 145
Девойно О.Г. 150, 155
Дегонский А.И. 387
Декань А.А. 503
Добровольский Г.И. 159
Довгань А.Ю. 576
Долматов Д.О. 68
Дубяго М.Н. 438
Дуйшеналиев Т.Б. 162, 564
Дьяков А.А. 282
Егоров А.В. 599
Егоров Н.Т. 167
Егоров П.В. 171
Емельянов В.В. 531
Ермеков Д.К. 175, 182
Ермишкин В.А. 335
Ефименко С. В. 190
Ефимов А.А. 108
Ефимов А.Е. 599
Жвырбля В.Ю. 68
Жукова В.С. 171
Журавлев А.С. 549
Журавлев О.В. 162
Зайдес С.А. 195
Зайцева М.Н. 391
Звягинцева А.В. 204, 208
Зиатдинов Р.Р. 508
Зуев Е.А. 212
Зуев Ю.Ю. 42
Игнаткина Е.Л. 217, 220
Инютин Н.В. 159
Иодис В.А. 223
Кан В.А. 257
Каракозов А.А. 226
Кардаполова М.А. 150, 155
Катанаева Ю.А. 381
Квасников М. Ю. 449
Кириченко В.В. 257
Кирпичников А. П. 111
Клишин В. И. 115, 238
Козырев Д.Л. 245
Комиссарова Т.Н. 560, 564
Кондуров Е.П. 249
Копытин Д. В. 115,120

Корнаев А.В. 499
Костенко А.В. 257
Косякова И.М. 150
Котляров Б.С. 318
Котляров В.Б. 318
Кошелев М.А. 259
Кругликов П.А. 249
Кудрявцев В. Н. 264
Кулагин С.П. 335
Купцова И.С. 15, 56
Ладоша Е.Н. 269
Лазебная Л.А. 395
Лапаева И.В. 273
Липаев А.А. 278
Литвинов М.И. 323
Лихачёва Т.Е. 282
Лукичев А.В. 323
Лумпиева Т.П. 289
Луцко Н.И. 155
Макаров В.Ф. 293
Македонский А.А. 217
Малашенко В.В. 297
Малашенко Т.И. 297
Малькова С.А. 301
Маньшин М.В. 304
Мартюшова А.А. 305
Марусин А.В. 511
Матвиенко С.А. 323
Меркурьев И.В. 42
Мещеряков В.Н.
Милев И.Ю. 11, 56, 15
Минина Н.А. 335
Мирошниченко С.В. 313
Михайлов А. Н. 328, 557, 318, 323
Михайлов Д. А. 328, 557
Михайлов Д.Л. 335
Михайлова А.Д. 108
Моисеев Д.А. 134
Молчанов А.Д. 134
Мороз О.К. 340
Морозов А. Л. 345
Москалев Л. Н. 360
Набиев А.М. 62
Набокин В.Н. 354
Надуваев В.В. 6
Надуваев В.В. 355
Нгуен Ван Ань 360
Нгуен Х. Т. 419
Невмержицкая Г.В. 364
Недашковский А.П. 37
Непомилуев В.В. 369
Нестерова О. А. 238
Нурмуханова А.З. 175, 182, 428
Okovity V. A. 404, 410
Okovity V. V. 404, 410
Овсянникова С. Н. 374
Ожегова Л.Д. 584
Озеров К.М. 378
Ознобишин А.Б. 587
Опрук Г. Ю. 238
Павлов В.Ф. 381
Павлова Т.В. 385
Павлыш В.Н. 387, 391, 395, 400
Пантюхина Е.В. 414
Папулова Г. Н. 449
Парамонова В. А. 264
Парфенюк С.Н. 226
Паршков А.В. 226
Пашанина А.Д. 220
Перинская Е.В. 400
Песин М. В. 293
Петров П.А. 419
Петрова Л.Г. 282
Петрова Ю.Н. 381
Петряева И.А. 424
Пикалов В.В. 310
Пилецкая Л.И. 155
Пичко Н.С. 37
Поветкин В.В. 175, 182, 428
Подболотов К.Б. 130
Пожидаева Л.А. 434
Полуянович Н.К. 438
Поляков Р.Н. 499
Полякова Л.П. 318
Поникаров С. И. 360
Попиль С.В. 444
Портенко В.А. 68
Прейс В.В. 414
Прутчиков И.О. 511
Радин В.П. 457, 596
Радченко М.В. 462
Радченко Т.Б. 462
Рак А.Н. 472
Ракунов А. Ю. 478
Ракунов Ю. П. 478
Рахимов Ю.Г. 257
Резниченко В.В. 511
Рогожникова Е.Н. 587
Рожков А.В. 301
Розоринов Г.Н. 483
Романчук И.А. 489
Рощупкин С.И. 78
Рудой Е. Р. 124
Русляков Д.В. 56
Рябичев В.Д. 494
Рябушкин Д.Г. 508
Рязанов А.Н. 226
Савельев М.М. 596
Савин Л.А. 499
Сазанов В.П. 381, 503
Сазонов М.И. 104
Сапунова Л.С. 457
Сапунова Л.С. 599
Сарайкина И.П. 223
Сафин Р.Г. 508
Сафиуллин Р. Н. 519, 511
Седнев Д.А. 68
Семенов А.Н. 95, 378
Семёнова О.Ю. 503
Сидоренко Д.М. 159
Скворцов А.И. 524
Сметанкин А. И. 190
Смирнов В.М. 434
Собиров Т.О. 527

Соколов С. В. 238
Сосенушкин Е.Н. 531
Сосновский А.А. 104
Сотников В.Г. 508
Степанова Е.А. 304, 354
Стрельник Ю.Н. 323
Султонов А.Н. 527
Сухоруков Ю.Г. 171, 249
Сухорукова Е.А. 249
Тайлаков О. В. 238
Тациенко В. П. 120
Телегуз А. С. 238
Томенко А.К. 335
Трубников Д.К. 424
Тюрин А.Н. 543
Унянин А.Н. 549
Фам Минь Туен 111
Федуков А.Г. 553
Филатов С.А. 591
Филиппов Г.А. 68
Филиппова О. В. 328
Фомич М.В. 11, 15
Фролов Е.Н. 355
Хавлин Т.В. 557
Хандожко А.В. 553
Хаотянь Тянь 519
Харченко А.О. 78
Хвисевич В.М. 104
Хо Минь Куан 195
Холодова С.Н. 269, 570
Хоменок Л.А. 249
Хорт Н.А. 130
Хохлов В.А. 162
Хохлунов С.М. 385
Хроматов В.Е. 162, 560, 564
Царенко С.Н. 434
Цой В.Э. 444
Цой Г.Н. 62
Цымбалов Д.С. 56, 269, 570
Часовитина А.С. 78
Черноруцкий И. Г. 190
Черных В.В. 108
Чернышев А.А. 72
Чернышев Е.А. 573
Чирков В.П. 457
Чупраков М.В. 171
Шабаев О.Е. 576
Шабайкович В.А. 128
Шадрин В.К. 503
Шажко Я.В. 584
Шайдурова Г.И. 587
Шаповалов Р.Г. 86
Шарапова Н.Е. 171
Шейко Е. А. 328
Шмелев Д.А. 220
Шпилевский Э.М. 591
Щугорев А.В. 457, 599
Щугорев В.Н. 457, 596, 599
Эрнандес А.Д. 171
Яновская Е.А. 531
Яценко О.В. 570

XXVIII международная
научно-техническая конференция

«МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА»

Сборник трудов

ISSN 2079-2670

Главный редактор
д-р техн. наук, проф. А.Н. Михайлов
E-mail: *tm@fimm.donntu.org*
Технический редактор И. А. Петряева

Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес издателя: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУВПО «ДОННТУ», тел. +38 (062) 337-17-33, 335-75-62
Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел.+ 38 (071) 306-08-79, +38 (062) 301-08-05. E-mail: tm@fimm.donntu.org. Сайт: http://konf-sev.donntu.org

Подписано к печати 30.06.2021 г.
Формат 60x84$^{1/16}$. Бумага Maestro.
Гарнитура «Times New Roman». Печать лазерная.
Усл. печ. л. 17,59. Уч.-изд. л. 19,35. Тираж 100 экз.

Отпечатано в рекламно-издательском отделе учредителя
РИО «Донецкая политехника»
Адрес: г. Донецк, ул. Артема, 58
Тел.: +38 (062) 301-09-67