XXVI МНТК МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции

2019 ДОНЕЦК

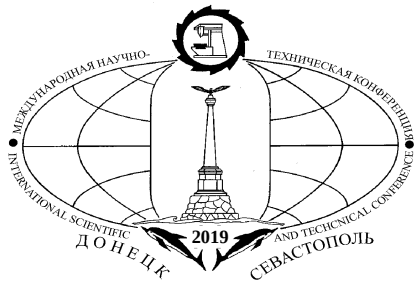
Министерство образования и науки ДНР
Министерство промышленности и торговли ДНР
Международный союз машиностроителей
Ассоциация технологов-машиностроителей России
Абхазский государственный университет
Брянский государственный технический университет
Воронежский государственный технический университет
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 филиал 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»

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

Сборник трудов

XXVI
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

23 - 29 сентября 2019 г. в городе Севастополе



Донецк-2019

ББК К5я54
УДК 621.01(06)

Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – 507 с.

ISSN 2079-2670

В сборник включены материалы XXVI 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 - 2019»

Посвящается 50-летию кафедры «Технология машиностроения» ДонНТУ

Рекомендован к изданию Ученым Советом ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет (протокол № 4 от 24 мая 2019 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, 2019 г.
© ДонНТУ, 2019 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 ДонГТУ, к.э.н., доц. **Зинченко А.М.** (ЛНР)**;** 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.;** профессор СевГУ, д.т.н. **Бохонский А.И.;** зав. кафедрой СевГУ, д.т.н., проф. **Братан С.М.;** директор ИГДГ ДонНТУ, д.т.н., проф. **Булгаков Ю.Ф.;** ген. директор АО «ФОЗ» **Буряк В.Ю.;** профессор ИТА ЮФУ, д.т.н. **Бутенко В.И.;** профессор Силезского технического университета, д.т.н. **Бухач А.;** 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.;** 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.;** гл. н. сотр. Центрального института авиационного моторостроения, д.т.н., проф. **Дорофеев В.Л.;** зав. кафедрой ДонНУЭТ, д.т.н., проф. **Заплетников И.Н.;** вед. научн. сотр. ИМЕТ РАН, д. ф-м. н. **Ермишкин В.А.;** профессор Сирийского ТУ, д.т.н. **Избер Дж.**; 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.;** профессор Туркменского политехнического института, д.т.н. **Курбанов Х.К.;** 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. **Муску Г.;** поректор ДонНТУ, профессор **Навка И.П.;** нач. отдела машиностроения Министерства промышленности и торговли ДНР **Наконечный А.А.;** зам директора ДФ ОАО «Авиатех» **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.**; профессор Ясского технического университета, д.т.н. **Параскив Д.**; зав. кафедрой БГТУ, д.т.н., проф. **Петрешин Д.И.;** директор ФУГТУ в г. Усинске, к.п.н., доц. **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.;** профессор 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.;** зам. директора Департамента металлургии и тяжелого машиностроения Минпромторга России **Тарасов А.Н.;** 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.;** 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.;** 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 – ст. преподаватель кафедры ТМ ДонНТУ **Голубов Н.В.**

Технический секретарь - доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Петряева И.А.**

Члены: доктор Багдадского ТУ, к.т.н., доцент **Аль-Судани Т.Т.;** доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Байков А.В.;** 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.;** начальник ОВС ДонНТУ, к.т.н., доц. **Джура С.Г.;** зам. директора ОАО НИИ «Изотерм», к.т.н. **Добровольский Г.И.;** доцент ЮФУ, к.т.н. **Дуров Д.С.;** доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Ивченко Т.Г.;** директор колледжа ДААТ **Калинин А.В.;** доцент кафедры БГТУ, к.т.н. **Карпушкин В.А.;** доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Коваленко В.И;** нач. факультета АГЗ МЧС ДНР, соискатель кафедры ТМ ДонНТУ **Колодяжный А.А.;** зав. кафедрой КамчатГТУ, к.т.н., доц. **Костенко А.В.;** 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.;** аспирант кафедры ТМ ДонНТУ **Михайлов В.А.;** ст. преп. кафедры МД АГЗ МЧС ДНР, к.т.н. **Михайлов Д.А.;** инженер кафедры ТМ ДонНТУ **Мищук П.А.;** соискатель кафедры ТМ ДонНТУ **Пичко А.П.;** доцент кафедры ТУМ **Рушика И.Д.;** ст. преподаватель ДААТ **Стрельник Ю.Н.;** ассистент ДонГТУ **Таровик А.Б.;** доцент кафедры ТМ, к.т.н. ДонНТУ **Чернышев Е.А.;** зав. кафедры ВиОП ДАВД МВД ДНР, соискатель кафедры ТМ ДонНТУ **Хавлин Т.В.;** доцент кафедры ЛА ТТИ ЮФУ, к.т.н. **Шаповалов Р.Г.;** доцент АГЗ МЧС ДНР, к.т.н. **Шейко Е.А.;** доцент СевГУ, к.т.н. **Шрон Л.Б.**

Уважаемые дамы и господа, дорогие друзья и коллеги!

Особенности научно-технического прогресса в условиях кризиса и глобализации мировых отношений 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 инженерного образования и интеграции в Европейскую систему университетского образования. 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, 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 XX 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.**

ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛИРУЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н.
(БГТУ, г. Брянск, Российская Федерация)
Тел.Факс: (4832) 58-82-20; e-mail: aver@tu-bryansk.ru

Abstract: *Various types of production systems with an assessment of efficiency of their functioning are considered*
Key words: *production process, technological process, operation, transition, working stroke*

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) или частиц (консолидация порошка), а также путем образования из жидкой фазы (литье, полимеризация) с точки зрения моделирования. Обрабатывающие ПС преобразуют предметы из состояния заготовок в состояние деталей требуемого качества, в нужном количестве и разнообразии, с заданными или минимальными затратами регламентированных ресурсов. Ресурсы могут быть финансовыми, временными, материальными, трудовыми, энергетическими, информационными.

На рис. 1. представлены различные виды ПС. Интерес представляет функциональная эффективность ПС, прежде всего гибкость и производительность. Качество изготовления при моделировании также необходимо учитывать, в виде процента брака, т.е. дополнительных работ по исправлению или восстановлению бракованных деталей.

Рис. 1. Виды эффективности обрабатывающих ПС

На рис. 2. представлены основные функциональные характеристики обрабатывающих ПС.

Изделиями машиностроения являются детали, сборочные единицы и комплексы.

В реальном производстве прослеживается следующая иерархия действий: производственный процесс; технологический процесс; операция: переход, рабочий ход.

Непосредственное изменение состояния предметов производства, т.е. преобразование материалов и заготовок в детали происходит в ходе технологического процесса (ТП).

ТП отличаются большим разнообразием однако их производственно-временная структура состоит из одних и тех же элементов.

Совокупность всех выпускаемых деталей образует плановую программу выпуска которая по степени определенности к качеству календарного периода может быть:

- точная (имеются рабочие чертежи и ТП для всех деталей);

Рис. 1.2. Функциональные характеристики ПС

- приведенная (не полностью обеспечена чертежами, расчет ведется по выделенным деталям-представителям в группе);

- условная (ТП еще не разработаны или неизвестны, расчет ведется по условным деталям-аналогам).

Укрупнено структуру ПС можно представить тремя группами элементов: объекты воздействия (ОВ), средства воздействия (СВ) и производственный персонал (ПП).

Под воздействием понимается любое действие, направленное на изменение состояния объекта. Изменения могут касаться формы, размеров, состава, физико-механических свойств, структуры, пространственного положения и ориентации, информационной определенности и пр.

Главными ОВ и ПС являются, естественно, заготовки, детали и полуфабрикаты.

Основными элементами ОВ будем считать – (инструменты, приспособления, схваты), т.е. компоненты СВ которые сами в свою очередь подвергаются воздействию (транспортируются, хранятся, устанавливаются, налаживаются). Остальные ОВ можно считать вспомогательными (отходы, СОЖ и пр.). Для большинства задач моделирования ПС достаточно рассматривать только главные ОВ. Если главные ОВ делят с основными и вспомогательными ОВ общие ресурсы, скажем транспорт, то его можно учесть укрупнено, например, путем условного увеличения требуемого времени пользования этими ресурсами или вводом дополнительных простоев в очереди к ним. Иногда, например, для оценки влияния инструментального обеспечения, прибегают к отдельным моделям для основных и дополнительных объектов воздействия.

Подытоживая все вышесказанное, можно отметить, что общий облик ПС и ее модели в наибольшей мере определяется степенью разнообразия и определенности номенклатуры обрабатываемых деталей, способом группирования и видом специализации основного технологического оборудования, а также типом транспортно-накопительной системы.

Чтобы перекрыть действующие в ПС основные аспекты и факторы, в ее комплексной модели необходимо иметь, как минимум, четыре частные модели со следующими условными названиями и функциями:

❖ «Ресурсы» – отражение баланса между плановыми работами ПС и имеющимися для их выполнения техническими средствами, определение загрузки и номинальных простоев оборудования;

❖ «Потоки» отражение транспортных маршрутов и логистики функционирования ПС, определение простоев оборудования и продвижений деталей, связанных с очередями, неретмичностью и десинхронизацией;

❖ «Состояния» – отражение внутренней логики управления рабочей позицией (РП) и влияния на РП внешних связей, определение структуры простоев РП;

❖ «Персонал» – отражение работы производственного персонала (ПП), определение его загрузки и связанных с ним простоев.

В ПС налицо все признаки, позволяющие отнести их к категории «сложные системы». Для моделирования ПС необходимо привлекать методологию системного анализа.

ПС, как объекты моделирования, отличаются чрезвычайным разнообразием назначений, технических средств, организационных и управленческих решений. Двух одинаковых ПС не существует.

На показатели функционирования могут влиять более десятка аспектов, около полусотни факторов и более сотни типов числовых параметров. Влияние проявляется на различных уровнях с перекрещиванием между ними. Влияние горизонтальных связей преобладает над влиянием вертикальных.

Чтобы перекрыть действующие в ПС основные аспекты и факторы в ее комплексной модели необходимо иметь как минимум 4 частные модели со следующими функциями:

- ❖ отражение баланса между плановыми работами ПС и имеющимися для их выполнениями техническими средствами, определение загрузки оборудования;
- ❖ отражение транспортных маршрутов и логистики функционирования ПС, определение простоев оборудования и пролеживания деталей, связанных с очередями и неритмичностью;
- ❖ отражение внутренней логики управления РП и влияния на РП внешних связей, определение структуры простоев РП;
- ❖ отражение работы ПП, определение его загрузки и связанных с ним простоев.

Структуры моделей функционирования различных систем можно представить следующим выражением:

$$Y(t)=F(X, Z, A, E, U, t),$$

где Y – вектор выходных характеристик, например, выработка, производительность, загрузка и пр.; X – вектор входных воздействий (контролируемых, но неуправляемых), например, поступление заказов; Z – вектор собственных внутренних воздействий (контролируемых, управляемых, неуправляемых), например, возникновение отказов; A – вектор внутренних параметров (контролируемых и выбираемых, но в рамках одного просчета или прогона уже неизменных), например, фиксированное количество станков, транспортных средств, спутников и пр.; E – вектор возмущающих воздействий внешней среды (неуправляемых, часто и неконтролируемых), например, колебания качества заготовок, вызывающие доли брака; U – вектор управляющих воздействий (контролируемых и управляемых), например, выбор по динамическим приоритетам при диспетчировании; t – время; F – иногда называется законом функционирования системы.

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.

При разработке модели ПС первостепенное значение имеет не выбор метода и математического аппарата, а так же тщательная проработка постановочной части.

Разработка 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, моделирование объективно необходимо, что обусловлено их сложностью, высокой стоимостью, уникальностью и недоступностью для натурального эксперимента. Основным методом моделирования сложных систем является математическое: аналитическое, имитационное и статистическое. [1]

Список литературы: 1. Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н. Моделирование производственных систем. Тез. док. Меж. конф. Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки. – Ростов на Дону: ДГТУ, 2019. – с 191-194.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЯДЕР РЕЛАКСАЦИИ В УРАВНЕНИИ БОЛЬЦМАНА ПРИ ОПИСАНИИ ДЕФЕКТОВ МОДУЛЯ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ПИКАМ ПОТЕРЬ НА СПЕКТРАХ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Акимова А.А., Горшков А.А., Ломовской В.А. *(г. Москва, МИРЭА - Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова)*

Email: akimova@mirea.ru, ag60341@gmail.com, lomovskoy49@gmail.com

Abstract: *The analysis of experimental spectrum of internal friction* $tg\delta - f(T)$ *shows that monocrystalline metallic materials possess the simplest spectrum. For those materials, dissipation of the part energy of external power impact exists in a form of internal friction background. The background increases slightly and monotonously at homologous temperatures* $\theta < 0{,}2 \div 0{,}4$ *and at the rate of* $\theta > 0.4$ *it increases exponentially. Taking into consideration the fact that monocrystalline systems may contain defects in the form of disturbance and the concentration of punctual defects connect with implantation atoms in minimal: one can suppose aggregate subsystem, possessiny flat defects. Different analytical functions, which are often used in describing inelastic phenomenon, were researched as relaxation cores for describing inelastic reaction of such subsystem in the area of increasing relaxation background of dissipative loss.*

Keywords: *internal friction, inelasticity, relaxation, core relaxation.*

Исследование диссипативных явлений по анализу спектров внутреннего трения в различных по химической природе материалах показывает, что на температурной зависимости $tg\delta - f(T)$ может наблюдаться как монотонно возрастающий фон диссипативных потерь (при повышении температуры), так и пики потерь, накладывающиеся на возрастающий фон [1-3]. Анализ приведенных экспериментальных спектров внутреннего трения $tg\delta - f(T)$ показывает, что наиболее «простым» спектром обладают монокристаллические металлические материалы, для которых диссипация части энергии внешнего силового воздействия представляется в виде фона внутреннего трения. Фон слабо и монотонно возрастает при гомологических температурах $\theta < 0,2 \div 0,4$ и экспоненциально возрастает при $\theta > 0,4$ [1] [4]. Учитывая, что в монокристаллических системах могут присутствовать дефекты в виде дислокаций, а концентрация точечных дефектов, связанных с атомами внедрения минимальна, можно допустить, что данная монокристаллическая система состоит из одной агрегатной подсистемы, имеющей линейные дефекты. В этом случае в интервале температур $\theta < 0,2 \div 0,4$ возможно проявление двух механизмов внутреннего трения: - гистерезисного (при низких частотах внешнего деформирующего воздействия) и резонансного (при высоких частотах внешнего деформирующего воздействия).

Экспериментальная часть

Описание релаксационного поведения структурно-кинетической подсистемы в рамках феноменологического подхода вязкоупругой реакции может быть проведено по двум направлениям:

1 – по температурно-частотной зависимости возрастающей ветви фона внутреннего трения, исходя из возможности уменьшения релаксирующего модуля сдвига до нуля;

2 – описание возрастающей ветви диссипативных потерь с помощью такой функции релаксации (или ядра релаксации) [5-7].

Основным моментом в анализе вязкоупругой реакции исследуемой системы на внешнее деформирующее воздействие является вопрос о выборе функции или ядра релаксации в описании температурных зависимостей компонентов комплексного модуля упругости.

[1] Под гомологической температурой понимается отношение текущей температуры Т к температуре кристаллизации $T_{кр}$: $\theta = T/T_{кр}$

Результаты и их обсуждение.

Для аналитического представления функции релаксации $\varphi(t)$, как напряжения, так и модуля упругости (сдвига) используются различные математические выражения. Это может быть функция Кольрауша, функция Работнова, функция Ржаницына, функция Больцмана-Слонимского, функция Гавриньяка-Негами и т.д. В общем случае, математическая зависимость между напряжением $\sigma(t)$ и деформацией $\varepsilon(t)$ для вязкоупругих систем в тензорном виде представляет мгновенное значение тензора напряжений от истории компонент тензора деформаций и имеет вид:

$$\sigma_{ij}(t) = \overset{\infty}{\underset{\Theta=0}{\Psi}}\left[\varepsilon_{kl}(t-\Theta), \varepsilon_{kl}(t)\right], \tag{1}$$

где $\overset{\infty}{\underset{\Theta=0}{\Psi_{ij}}}[\ldots]$ - линейный тензорозначный функционал, преобразующий каждую историю изменения деформации $\varepsilon_{ij}(t)$ при $-\infty \le t \le \infty$ в соответствующую историю изменения напряжения.

Данная формула «наследственного» уравнения показывает, что напряжение $\sigma_{ij}(t)$ не зависит от каких либо сдвигов по шкале времени, т.е. это соотношение инвариантно по отношению к периоду Θ во времени. И может быть представлена в виде:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t \varphi_{ijkl}(t-\Theta)\frac{d\varepsilon_{kl}(\Theta)}{d\Theta}d\Theta \tag{2}$$

Функция $\varphi_{ijkl}(t-\Theta)$ должна удовлетворять следующим условиям:

$$\lim_{\Theta\to 0}\varphi(t-\Theta) = \lim_{t\to 0^+}\varphi(t) = +\infty\text{; интеграл } \int_0^t \varphi(\Theta)\,d\Theta \text{ должен сходиться} \tag{3}$$

В этом случае, функция $\varphi(t)$ является слабосингулярной, где стремление $t \to 0^+$ рассматривается с моментов времени $t_i \ge t$, т.е. с положительной области времен.

Представляет интерес определить те функции или ядра релаксации, которые отвечают условиям слабой сингулярности и могут быть использованы для описания фона диссипативных потерь на спектре внутреннего трения.

Для определения этих функций необходимо ввести ещё четыре асимптотических условия, которые должны удовлетворять функциям (ядрам) релаксации:

$$\lim_{t=0}\varphi(t) = 1;\ \lim_{t\to 0}\varphi(t) = \lim_{p\to\infty} p\bar{\varphi}(p);\ \lim_{t=0}\varphi(t) = 0 \equiv const;\ \lim_{t\to\infty}\varphi(t) = \lim_{p\to 0} p\bar{\varphi}(p) \tag{4}$$

I. Ядро Максвелла. Данное ядро имеет вид:

$$\varphi(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)\right], \text{ где } \quad t > 0. \tag{5}$$

Преобразование Лапласа для этой функции релаксации будет иметь вид:

$$\bar{\varphi}(p) = \Lambda\left[\varphi(t)\right] = \frac{1}{p+\left(\frac{1}{\tau}\right)} = \frac{\tau}{p\tau+1} \tag{6}$$

Разложение ядра (5) в ряд Маклорена имеет вид:

$$\varphi(t) = e^{-\left(t/\tau\right)} = 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{1}{2!}\left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - \frac{1}{3!}\left(\frac{t}{\tau}\right)^3 + \ldots + (-1)^n\frac{1}{n!}\left(\frac{t}{\tau}\right)^n + \ldots = \sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n!}\left(\frac{t}{\tau}\right)^n,$$

где $-\infty < {t}/{\tau} < \infty$. Преобразование Лапласа для этого разложения:

$$\bar{\varphi}(p) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \cdot \frac{1}{\tau^n} \Lambda\left[t^n\right] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \cdot \frac{1}{\tau^n} \cdot \frac{n!}{p^{n+1}} = \\ = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \tau}{(p\tau)^{n+1}} = \tau \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(p\tau)^{n+1}} = \tau\left[(p\tau)^{-1} - (p\tau)^{-2} + (p\tau)^{-3} - \ldots\right] \quad (7)$$

Из этого следует, что ряд (7) сходится к преобразованию (6) при условии, что $|p\tau|^{-1} < 1$ или при $|p| > \frac{1}{\tau}$. Это означает, что ряд (7) сходится к (6) вне круга радиуса $\frac{1}{\tau}$ на комплексной плоскости p. Функцию $\bar{\varphi}(p)$ в (6) можно заменить рядом двумя способами. Если разложить эту функцию по степеням $(p\tau)$, то:

$$\bar{\varphi}(p) = \frac{\tau}{p\tau + 1} = \tau \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (p\tau)^n = \tau\left[1 - p\tau + (p\tau)^2 - \ldots\right] \quad (8)$$

Этот ряд сходится при $|p\tau| < 1$ или при $p < {1}/{\tau}$, т.е. внутри круга радиуса ${1}/{\tau}$. Вне этого круга ряд (8) расходится и поэтому не представляет функцию $\bar{\varphi}(p)$.

Ряд (8) не удовлетворяет необходимому условию существования изображения по Лапласу: - его члены не стремятся к нулю при $p \to \infty$. Данный ряд не годится при больших значениях $|p|$ и его можно использовать только внутри ограниченного круга. Таким образом, ряд (8) описывает асимптотическое поведение изображения $\bar{\varphi}(p)$ при малом значении p. Для обращения ряд (8) не годится, т.к. члены его не являются изображениями каких-либо оригиналов.

Необходимо разложить изображение $\bar{\varphi}(p)$ в такой ряд, чтобы его члены также были изображениями. Тогда и возможно будет произвести обращение. Для функции $\bar{\varphi}(p)$ в виде (6) такое разложение имеет степенной ряд:

$$\frac{1}{1 + (p\tau)^{-1}} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (p\tau)^{-n} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(p\tau)^n}.$$

В этом случае изображение $\bar{\varphi}(p)$ принимает следующий вид:

$$\bar{\varphi}(p) = \frac{1}{p} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(p\tau)^n} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{p^{n+1}\tau^n} = \tau \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(p\tau)^{n+1}} = \tau\left(\frac{1}{p\tau} - \frac{1}{(p\tau)^2} + \frac{1}{(p\tau)^3} - \ldots + \frac{(-1)^n}{(p\tau)^{n+1}} + \ldots\right). \quad (9)$$

Рассмотрим обращение ряда (9). Все члены этого ряда имеют особую точку $p = 0$. В уравнении обращения Лапласа $f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma - i\infty}^{\sigma + i\infty} F(p) e^{pt} dp$ интегрирование производится по любой вертикальной прямой, лежащей в полуплоскости аналитического изображения $F(p)$, т.е. справа от всех особых точек. По свойствам степенных рядов, ряд (9) можно почленно интегрировать по любой прямой справа от круга. Поэтому обращение ряда (9) может быть представлено в виде:

$$\Lambda^{-1}\left[\bar{\varphi}(p)\right] = \tau \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\tau^{n+1}} \Lambda^{-1}\left[\frac{1}{p^{n+1}}\right] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^n \quad (10)$$

Полученный ряд (10) сходится при любых значениях $\left(t/\tau\right)$, т.е. его интервал сходимости представляет собой всю числовую ось. Его суммой является экспонента $e^{-(t/\tau)}$. В этом случае:

$$\Lambda^{-1}\left[\bar{\varphi}(p)\right]=\psi(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)\right] \tag{11}$$

Из изложенного выше следует, что ряд (9) представляет изображение функции $\bar{\varphi}(p)$ (соотношение 6) только вне круга на комплексной плоскости. Это изображение возможно только на правой полуплоскости этого круга. Внутри круга этот ряд (9) не представляет изображения функции (6). Однако, оригинал ряда (6) представляет экспоненту, т.е. является оригиналом для изображения (6) на всей числовой оси.

II. Ядро Кольрауша. Представляет собой дробную экспоненту вида:

$$\varphi(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{b}\right];\quad 0<b\le 1 \tag{12}$$

Преобразование Лапласа для этой функции:

$$\bar{\varphi}(p)=\int_0^{\infty} e^{-(t/\tau)^{b}} e^{-pt}dt=\int_0^{\infty} e^{-\left[(t/\tau)^{b}+pt\right]}dt \tag{13}$$

Вычисление в аналитическом виде данной функции затруднительно, поэтому применяется аппроксимация функции (13) с разложением её в степенной ряд:

$$e^{-(t/\tau)^{b}}=1-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{b}+\frac{1}{2!}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{2b}-\frac{1}{3!}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{3b}+\ldots+\frac{1}{n!}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{nb}+\ldots=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^{n}}{n!}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{nb} \tag{14}$$

Интервал сходимости этого ряда – вся числовая ось, т.е. при любых значениях t этот ряд представляет функцию (13). Преобразование Лапласа к соотношению (14) имеет вид:

$$\begin{aligned}\varphi(p)&=\Lambda\left[e^{-(t/\tau)^{b}}\right]=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^{n}}{n!\tau^{nb}}\Lambda\left[t^{nb}\right]=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^{n}}{n!\tau^{nb}}\cdot\frac{\Gamma(nb+1)}{p^{nb+1}}=\\&=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^{n}}{n!}\cdot\frac{\tau\Gamma(nb+1)}{(p\tau)^{nb+1}}=\tau\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^{n}\cdot\frac{\Gamma(nb+1)}{n!}\cdot\frac{1}{(p\tau)^{nb+1}}\end{aligned} \tag{15}$$

Этот ряд сходится во внешней части круга, при $|p|>0$. Таким образом, ряд (15) сходится во всей комплексной плоскости, кроме начала координат. Но так как, каждый член ряда (15) имеет смысл лишь в правой полуплоскости $\mathrm{Re}\,p>0$, то ряд может рассматриваться также при всех значениях $\mathrm{Re}\,p>0$.

III. Ядро Работнова. Данное ядро имеет вид ряда:

$$\varphi(t)=\frac{t^{\gamma-1}}{\tau^{\gamma}}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^{n}\left(t/\tau\right)^{\gamma n}}{\Gamma\left[\gamma(n+1)\right]};\quad 0<\gamma\le 1 \tag{16}$$

Для определения интервала сходимости рассматривается предел (с учетом обозначений):

$$U_n=\frac{(-1)^{n}\left(t/\tau\right)^{\gamma n}}{\Gamma\left[\gamma(n+1)\right]};$$

$$U_{n+1}=\frac{(-1)^{n+1}\left(t/\tau\right)^{\gamma(n+1)}}{\Gamma\left[\gamma(n+2)\right]}$$

$$\lim_{n\to\infty}\left|\frac{U_{n+1}}{U_n}\right| = \lim_{n\to\infty}\left|\frac{\left(t/\tau\right)^{\gamma(n+1)}\cdot\Gamma\left[\gamma(n+1)\right]}{\Gamma\left[\gamma(n+2)\right]\cdot\left(t/\tau\right)^{\gamma n}}\right| = \lim_{n\to\infty}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{\gamma}\frac{\Gamma\left[\gamma(n+1)\right]}{\Gamma\left[\gamma(n+2)\right]} = \tag{17}$$

$$= \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\gamma}\lim_{n\to\infty}\frac{\Gamma\left[\gamma(n+1)\right]}{\Gamma\left[\gamma(n+2)\right]} = \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\gamma} < 1$$

Из этого следует, что ряд (21) сходится при малых временах, т.к. $\left(t/\tau\right) < 1$, т.е. $t < \tau$. Однако в соотношении (20) перед знаком суммы имеется множитель $\frac{1}{t}$, за счет которого при $t \to \infty$ ряд $\varphi(t)$ расходится $\varphi(t) \to \infty$.

Для получения преобразования Лапласа от ядра Работнова последнее можно представить в виде:

$$\varphi(t) = \sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\frac{t^{\gamma(n+1)-1}}{\tau^{\gamma(n+1)}\cdot\Gamma\left[\gamma(n+1)\right]} \Rightarrow \varphi(p) = \sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{(p\tau)^{\gamma(n+1)}}$$

Этот ряд сходится вне круга $|p| > 1/\tau$. Область сходимости данного ряда определена в виде:

$$\bar{\varphi}(p) = \frac{1}{1+(p\tau)^{\gamma}}; \quad |p\tau| > 1 \tag{18}$$

В полученном соотношении не сходится размерность, т.к. изображение $\bar{\varphi}(p)$ должно иметь размерность времени, что следует из интеграла Лапласа. Данная ошибка определяется размерностью ядра Работнова (соотношение 18). Ядро (функция релаксации) должно быть безразмерным, а в соотношении 18 имеется размерность $\left[c^{-1}\right]$. Для исправления этой ошибки ядро Работнова должно иметь вид:

$$\varphi(t) = \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\gamma-1}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n\left(t/\tau\right)^{\gamma n}}{\Gamma\left[\gamma(n+1)\right]}, \text{ тогда } \bar{\varphi}(p) = \frac{\tau}{1+(p\tau)^{\gamma}} = \tau\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{(p\tau)^{\gamma(n+1)}} \tag{23}$$

IV. Ядро Ржаницына. Изображение данного ядра имеет вид:

$$\bar{\varphi}_p(p) = \frac{\tau}{(1+p\tau)^{\gamma}} \tag{24}$$

V. Ядро Гаврильяка-Негами. Лапласовское изображение данного ядра представляется:

$$\bar{\varphi}_{г-н}(p) = \frac{\tau}{\left[1+(p\tau)^{\alpha}\right]^{\gamma}} \tag{25}$$

Для определения возможности применения всех рассмотренных выше ядер при описании процессов релаксации в исследуемых системах, необходимо проверить эти ядра и их изображения на условия асимптотической сходимости. Для ядра Максвелла:

$$\lim_{t\to 0}\varphi_m(t) = \lim_{t\to 0}e^{-\left(t/\tau\right)} = 1 \quad \text{и} \quad \lim_{t\to\infty}\varphi_m(t) = \lim_{t\to\infty}e^{-\left(t/\tau\right)} = 0 .$$

Условия асимптотического схождения выполняются.

Для ядра Кольрауша эти условия также выполняются.

Для ядра Работнова:

$$\lim_{p\to 0}p\bar{\varphi}_p(p) = \lim_{p\to 0}\frac{p\tau}{1+(p\tau)^{\gamma}} = 0,$$

т.е. $\lim\limits_{t\to\infty}\varphi_p(t)=0$ - данное условие сходимости для ядра Работнова выполняется.

$$\lim_{p\to\infty} p\bar{\varphi}_p(p)=\lim_{p\to\infty}\frac{p\tau}{1+(p\tau)^{\gamma}}=\lim_{z\to\infty}\frac{z}{1+z^{\gamma}}=\lim_{z\to\infty}\frac{1}{\gamma z^{\gamma-1}}=$$

$$=\frac{1}{\gamma}\lim_{z\to\infty}\frac{1}{z^{\gamma-1}}=\begin{cases}0, \textit{при } \gamma>1\\ \infty, \textit{при } \gamma<1\end{cases}\Rightarrow\lim_{t\to 0}\varphi(t)=\begin{cases}0, \textit{при } \gamma>1\\ \infty, \textit{при } \gamma<1\end{cases}$$

- данное условие сходимости для ядра Работнова не выполняется, поэтому функция Работнова не может удовлетворительно описывать релаксационные явления.

Для ядра Ржаницына:

$\lim\limits_{p\to 0} p\bar{\varphi}_p(p)=\lim\limits_{p\to 0}\dfrac{p\tau}{(1+p\tau)^{\gamma}}=0\Rightarrow\lim\limits_{t\to\infty}\varphi_p(t)=0$ - данное условие сходимости для ядра Ржаницына выполняется.

$$\lim_{p\to\infty} p\bar{\varphi}_p(p)=\lim_{p\to\infty}\frac{p\tau}{(1+p\tau)^{\gamma}}=\lim_{z\to\infty}\frac{z}{(1+z)^{\gamma}}=\lim_{z\to\infty}\frac{1}{\gamma(1+z)^{\gamma-1}}=$$

$$=\frac{1}{\gamma}\lim_{z\to\infty}\frac{1}{(1+z)^{\gamma-1}}=\begin{cases}0, \textit{при } \gamma>1\\ \infty, \textit{при } \gamma<1\end{cases}\Rightarrow\lim_{t\to 0}\varphi_p(t)=\begin{cases}0, \textit{при } \gamma>1\\ \infty, \textit{при } \gamma<1\end{cases}$$

- данное условие сходимости для ядра Ржаницына не выполняется, поэтому функция Ржаницына не может удовлетворительно описывать релаксационные явления.

Для ядра Гаврильяка-Негами:

$\lim\limits_{p\to 0} p\bar{\varphi}_{г-н}(p)=\lim\limits_{p\to 0}\dfrac{p\tau}{\left[1+(p\tau)^{\alpha}\right]^{\gamma}}=0\Rightarrow\lim\limits_{t\to\infty}\varphi_{г-н}(t)=0$ - данное условие сходимости для ядра Гаврильяка-Негами выполняется.

$$\lim_{p\to\infty} p\bar{\varphi}_{г-н}(p)=\lim_{p\to\infty}\frac{p\tau}{\left[1+(p\tau)^{\alpha}\right]^{\gamma}}\Rightarrow\{p\tau=z\}\Rightarrow\lim_{z\to\infty}\frac{z}{(1+z^{\alpha})^{\gamma}}=\lim_{z\to\infty}\left(\frac{z^{1/\gamma}}{1+z^{\alpha}}\right)^{\gamma}$$

Вводятся обозначения: $f(z)=\left(\dfrac{z^{1/\gamma}}{1+z^{\alpha}}\right)^{\gamma}$ и $\varphi(z)=\dfrac{z^{1/\gamma}}{1+z^{\alpha}}$, тогда $f(z)=\left[\varphi(z)\right]^{\gamma}$.

Предварительно необходимо найти предел функции $\varphi(z)$, а затем предел функции $f(z)$. При этом возникает несколько вариантов:

1) $\{\ \alpha>1,\quad \gamma>1\ \}$.

$$\lim_{z\to\infty}\varphi(z)=\lim_{z\to\infty}\frac{z^{1/\gamma}}{1+z^{\alpha}}=\lim_{z\to\infty}\frac{\frac{1}{\gamma}z^{\frac{1}{\gamma}-1}}{\alpha z^{\alpha-1}}=\frac{1}{\gamma}\lim_{z\to\infty}z^{\frac{1}{\gamma}-\alpha}=\frac{1}{\gamma}\lim_{z\to\infty}\frac{1}{z^{\alpha-1/\gamma}}$$

Т.к. $\alpha-\dfrac{1}{\gamma}>0, \textit{то}\ \lim\limits_{z\to\infty}\varphi(z)=0, \textit{т.е.}\ \lim\limits_{z\to\infty} f(z)=0\ \textit{и}\ \lim\limits_{t\to 0}=0$ - данное условие сходимости для ядра Гаврильяка-Негами при условии $\{\ \alpha>1,\quad \gamma>1\ \}$ не выполняется.

2) $\{0<\gamma<1;\alpha>1\}$.

$$\lim_{z\to\infty}\varphi(z)=\lim_{z\to\infty}\frac{z^{1/\gamma}}{1+z^{\alpha}}=\frac{1}{\gamma}\lim_{z\to\infty}z^{\frac{1}{\gamma}-\alpha}=\begin{Bmatrix}\infty,\ при\ \frac{1}{\gamma}>\alpha\\ 0,\ при\ \frac{1}{\gamma}<\alpha\end{Bmatrix}\Rightarrow\lim_{p\to\infty}p\bar{\varphi}_{г-н}(p)=\begin{Bmatrix}\infty,\frac{1}{\gamma}>\alpha\\ 0,\frac{1}{\gamma}<\alpha\end{Bmatrix}$$

т.е. данное условие сходимости для ядра Гаврильяка-Негами при условии $\{0<\gamma<1;\alpha>1\}$ также не выполняется.

3) $\{\gamma\gamma>1;0<\alpha<1\}$.

$$\lim_{z\to\infty}\varphi(z)=\lim_{z\to\infty}\frac{z^{1/\gamma}}{1+z^{\alpha}}=\frac{1}{\gamma}\lim_{z\to\infty}z^{(1/\gamma)-\alpha}=\begin{Bmatrix}\infty;\frac{1}{\gamma}>\alpha\\ 0,\frac{1}{\gamma}<\alpha\end{Bmatrix}\Rightarrow\lim_{p\to\infty}p\bar{\varphi}_{г-н}(p)=\begin{Bmatrix}\infty,\frac{1}{\gamma}>\alpha\\ 0,\frac{1}{\gamma}<\alpha\end{Bmatrix}$$

т.е. данное условие сходимости для ядра Гаврильяка-Негами при условии $\{\gamma>1;0<\alpha<1\}$ также не выполняется.

4) $\{0<\gamma<1;0<\alpha<1\}$.

$$\lim_{z\to\infty}\varphi(z)=\lim_{z\to\infty}\frac{z^{1/\gamma}}{1+z^{\alpha}}=\frac{1}{\gamma}\lim_{z\to\infty}z^{(1/\gamma)-\alpha}=\infty,\ т.к.\ \frac{1}{\gamma}>\alpha\Rightarrow\lim_{p\to\infty}p\bar{\varphi}_{г-н}(p)=\infty$$

т.е. данное условие сходимости для ядра Гаврильяка-Негами при условии $\{0<\gamma<1;0<\alpha<1\}$ также не выполняется.

Таким образом, для предлагаемой функции Гаврильяка-Негами асимптотические условия не выполняются ни при каких положительных значениях коэффициентов α и γ.

Выводы. Ядра Работнова, Ржаницына и Гавлильяка-Негами не удовлетворяют асимптотическим условиям сходимости рядов при положительных значениях входящих в них параметров. В этом случае они не могут быть использованы в качестве функций релаксации, описывающей реакцию агрегатной подсистемы в интервале температур выше гомологической температуры 0.4. Описание вязкоупругой реакции высокотемпературной ветви фона внутреннего трения и соответственно температурно-частотного изменения модуля сдвига, возможно лишь при использовании функции Максвелла или Кольрауша, которая переходит в функцию Максвелла при единичном значении параметра дробности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 18–08–00427-а).

Список литературы: 1. Валишин А.А., Горшков А.А., Ломовской В.А. Релаксационные явления и их механизмы в ликвирующих стеклах. // Известия РАН Механика твердого тела. 2011. №2. С. 169-182. **2.** Горшков А.А., Ломовской В.А.,, Наими Е.К. О природе фона внутреннего трения в поликристаллическом палладии // Вестник МИТХТ, 2009, т.4, №6, с. 85-89. **3.** Коровайцева Е.А., Горшков А.А., Ломовской В.А. Дислокационный вклад в гистерезисный механизм внутреннего трения при гомологических температурах ниже 0.2// Известия РАН Механика твердого тела. 2017. №2. С. 80-92**. 4.** Чадек И. Ползучесть металлических материалов. М.: Мир, 1987, 302 с. **5.** Korovaytseva E.A., Pshenichnov S.G., Tarlakovskii D.V. Propagation of one-dimensional nonstationary waves in viscoelastic half space// Lobachevskii Journal of Mathematics, 2017, Vol. 38, №5, pp. 827-832. **6.** Коровайцева Е.А., Пшеничнов С.Г. Об исследовании переходных волновых процессов в линейно-вязкоупругих телах с учетом непрерывной неоднородности материала// Проблемы прочности и пластичности, 2016. – том 78, №. 3. – с. 262-270. **7.** Коровайцева Е.А. Влияние параметров ядер релаксации на распространение волн в вязкоупругом слое// Тезисы докладов XI Всероссийской школы-семинара. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – с. 72.

ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПОМОЩЬЮ КОНЦЕПЦИИ DIGITAL TWIN

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

Abstract. *In article use of technology of the digital double for design of optimal cycles of round grinding in the conditions of the automated production taking into account the following variable technology factors blunting grains, fluctuations of an allowance in parties of a detail, fluctuation of initial radial beating, dimensional wear of a grinding wheel, etc. is considered.*

Важнейшим этапом разработки технологического процесса обработки деталей на операциях круглого шлифования, выполняемых на станках с ЧПУ, является проектирование циклов управления радиальной и осевой подачами при разработке режимов резания для управляющих программ. Цикл программной подачи работает в автоматическом режиме по командам прибора активного контроля и переключает подачи в зависимости от оставшейся части припуска. От качества разработки цикла зависит производительность операции, полнота использования технологических возможностей станка, количество бракованной продукции.

Обработка всей партии деталей на шлифовальном станке с ЧПУ ведется по спроектированным циклам шлифования радиальной и осевой подач в условиях действия различных переменных технологических факторов, связанных с затуплением режущего инструмента, переменным припуском, разным исходным радиальным биением заготовки и др. В результате действия переменных технологических факторов обработка каждой детали при одинаковом цикле ведется при разной динамике сил резания, а, следовательно, и при различных значениях фактической радиальной подачи, что и обуславливает колебания показателей точности размеров и качества обрабатываемой поверхности в партии деталей.

Существует три метода проектирования циклов. Первый основывается на нормативно-справочной литературе, разработанной с учетом статистических данных, полученных в 60х-90х годах для универсальных станков. Что делает данный способ не пригодным в условиях современного автоматизированного производства, т.к. не учитывает производственные возможности и мощности современных станков с ЧПУ. Ко второму методу можно отнести различные инженерные методики проектирования циклов. Вопросами проектирования циклов шлифования для станков с ЧПУ посвящено достаточно много работ [1-5 и др.]. Анализ литературных источников показал, что ни в одной из этих работ не рассматриваются вопросы проектирования оптимальных циклов шлифования, устойчивых к переменным условиям обработки. Отсутствие у технолога инструментов для проектирования оптимальных циклов и их проверки на устойчивость к воздействию переменных технологических факторов приводит к тому, что на производстве вынуждены вручную корректировать режимы резания для станка с ЧПУ, сознательно занижая при этом уровень режимов резания до безопасного уровня, при котором гарантированно выполняются требования чертежа по точности и качеству (третий метод).

Для решения проблемы проектирования оптимальных по быстродействию и устойчивых к переменным условиям обработки циклов круглого шлифования для станков с ЧПУ разработана методология проектирования оптимальных циклов шлифования, устойчивых к переменным условиям обработки. В качестве

математического метода оптимизации в данной методологии используется метод динамического программирования (МДП), т.к. данный метод не требует построения заранее области допустимых значений управляющих параметров (в нашем случае допустимых скоростей подач и времени циклов обработки) [6]. Оптимизация цикла с применением МДП проводится по аналогии с оптимизацией транспортной задачи, в которой задана сеть дорог (для нашей задачи – возможные варианты переключения радиальной подачи в цикле) с промежуточными станциями (состояния заготовки в процессе обработки) и требуется найти оптимальный маршрут (оптимальный цикл) между двумя пунктами А (заготовка) и В (готовая деталь). В качестве целевой функции принято минимальное время цикла шлифования, что позволит повысить производительность современных станков. Более подробно с методологией проектирования оптимальных циклов шлифования можно ознакомиться в следующих статьях [7].

Оптимальный цикл шлифования, спроектированный на основе усредненных детерминированных условий шлифования, обладает низкой надежностью и устойчивостью к воздействию переменных технологических факторов на точность обработки и обеспечение других параметров качества. Следовательно, предложенная методология проектирования оптимальных циклов [7] не учитывает непредвиденных ситуаций, связанных с нестабильными условиями шлифования, затуплением зерен шлифовального круга, колебанием припуска или исходного радиального биения заготовки и др., что может привести к появлению брака на операции шлифования.

При проектировании оптимального цикла шлифования на устойчивость, учитывались следующие основные переменные технологические факторы:

1) затупление зерен круга в процессе обработки. В начале обработки заготовки после правки круга зерна острые, в процессе обработки происходит затупление режущих зерен круга. В конце стойкости непосредственно перед правкой круга зерна имеют максимальное затупление;

2) колебание припуска на обработку. Из-за рассеивания размеров обрабатываемой поверхности в партии деталей, припуск на каждой детали имеет различное значение. Припуск в партии деталей изменяется от минимального до максимального значения;

3) колебание исходного радиального биения заготовки, находится в зависимости от точности обработки на предыдущей операции. Теоретически может изменяться от нуля до максимального значения;

4) размерный износ шлифовального круга и снижение скорости резания. При обработке партии деталей происходит периодическая правка круга, после которой диаметр круга уменьшается, в результате снижается скорость резания. Размерный износ изменяется от минимального до максимального значений;

5) количество зон с разными режимами резания. При круглом шлифовании с осевой подачей (внутреннее и наружное шлифование) имеются две реверсные и одна нереверсная зона, в которых в одном и том же цикле шлифования фактические режимы резания разные. В реверсной зоне обработка ведется с использованием разных видов шлифования (врезание с радиальной подачей, выхаживание с радиальной подачей во время реверса, шлифование с осевой подачей). Кроме того имеются зоны с прерывистыми поверхностями, в которых другая динамика сил резания и возможно получение брака.

При разработке системы диагностики на устойчивость цикла шлифования к совокупному воздействию постоянно меняющихся переменных факторов, возникающих при обработке партии деталей, применена концепция «цифрового

двойника» («digital twin», DT). В рамках этой концепции разработана системная модель DT, предназначенная для

– предотвращения брака и причин его возникновения на операции круглого шлифования;

– повышения надежности и устойчивости цикла шлифования к совокупному воздействию переменных факторов;

– обеспечения полной автоматизации проектирования управляющей программы на этапе расчета и программирования режимов резания;

– прогнозирования колебаний точности, шероховатости, твердости обрабатываемой поверхности после обработки партии деталей;

– фиксации массива переменных факторов, при которых возникают условий получения каждого вида брака;

– формирования массива ограничений целевой функции по переменным условиям шлифования для системы оптимизации цикла.

Разработанная система «DT-CicleStab» обеспечивает синтез системы диагностики и системы оптимизации по следующему алгоритму (рис. 1):

1) формирование пакета исходных данных для операции шлифования;

2) в системе проектирования оптимального цикла проектируется первая версия оптимального цикла шлифования на основе усредненных постоянных условий шлифования с проверкой ограничений при этих условиях;

3) оптимальный цикл шлифования передается в цифровой двойник для тестирования цикла на устойчивость к нестабильным условиям обработки. Формируется модель обработанной поверхности готовой детали в конце цикла шлифования. Формируется паспорт точности обработки цикла шлифования (рис. 1), в котором для каждого заданного параметра точности указывается чертежное поле допуска и поля рассеяния погрешности от воздействия переменных факторов в каждой зоне (реверсных и нереверсной зонах);

4) в случае наличия брака генерируется массивы условий возникновения брака для заданного цикла шлифования и сочетаний переменных факторов. Проводится коррекция ограничений целевой функции для системы оптимизации цикла шлифования МДП.

Выводы

1. Разработанная методология проектирования оптимальных циклов шлифования [7-9], устойчивых к переменным условиям обработки позволяет автоматизировать процесс разработки управляющих программ для станков с ЧПУ и стать основой для разработки и внедрения производственных киберфизических систем в рамках концепции «Индустрия 4.0».

2. Синтез технологий цифрового двойника и МДП для проектирования оптимального цикла шлифования на устойчивость к переменным технологическим факторам дает возможность:

– предотвращения брака на операции круглого шлифования;

– установить причины возникновения брака;

– повысить надежность и устойчивости цикла шлифования к совокупному воздействию переменных факторов;

– прогнозировать колебания точности, шероховатости, твердости обрабатываемой поверхности после обработки партии деталей.

3. Практическим результатом синтеза технологий цифрового двойника и метода динамического программирования является повышение уровня автоматизации проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ, обеспечивающей расчет оптимальных значений радиальной подачи на всех ступенях цикла, оптимальное

распределение снимаемого припуска по ступеням цикла, при которых обеспечивается минимальное основное время цикла шлифования и снижению рисков по выполнению заданных требований к качеству обрабатываемой детали.

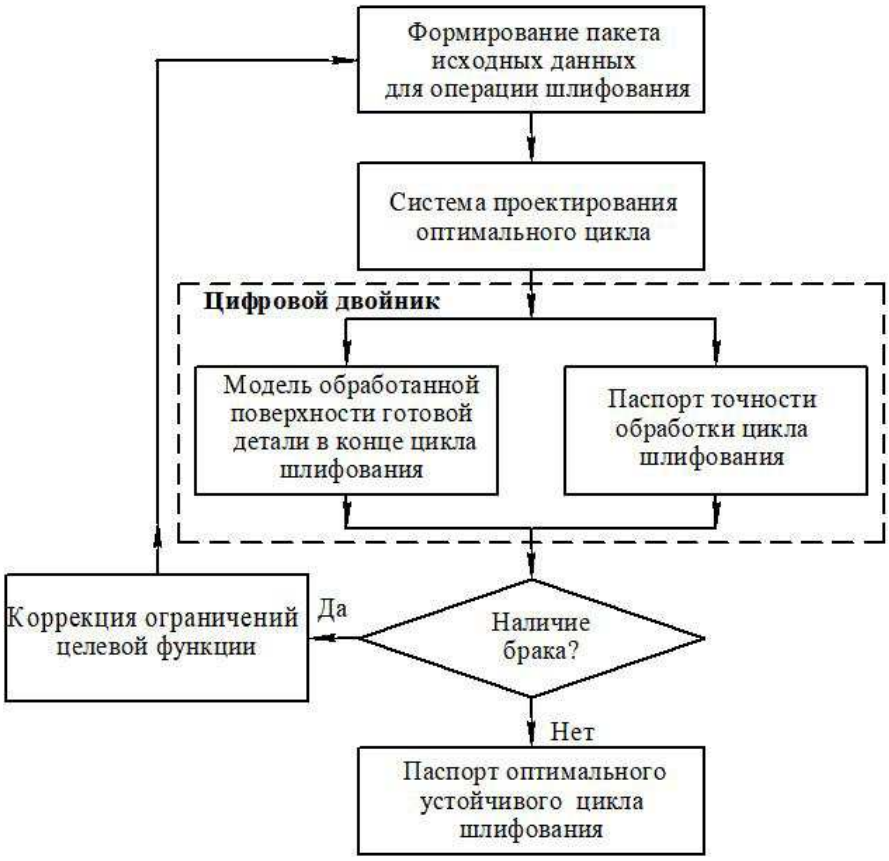


Рис. 1. Алгоритм система «DT-CicleStab», которые обеспечивает синтез системы диагностики и системы оптимизации

Список литературы: **1.** Horiuchi, O. Computer simulations of cylindrical plunge grinding – Influence of work stiffness on grinding accuracy / O. Horiuchi, T. Shibata // Key Engineering Materials. – 2007. – Vol. 329. – P. 51–56. DOI 10.4028/0-87849-416-2.51. **2.** Nathan, R.D. Intelligent estimation of burning limits to aid in cylindrical grinding cycle planning / R.D. Nathan, L. Vijayaraghavan, R. Krishnamurthy // Heavy Vehicle Systems.– 2001. – Vol. 80. – P. 48–59. **3.** Malkin, S. Grinding technology. Theory and application of machining with abrasives / S. Malkin // New York: Society of Manufacturing Engineers. – 1989. – pp. 275. **4.** Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 286 с. **5.** Guzeev, V.I. Researching the CNC-Machine Stiffness Impact on the Grinding Cycle Design / Guzeev V.I., Nurkenov A.K. **6.** Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: издательство иностранной литературы, 1960. – 400 с. **7.** Akintseva, A.V. Complex Optimization of Parameters for Controlling the Cycle of Internal Grinding by the Method of Dynamic Programming / A.V. Akintseva, P.P. Pereverzev // MATEC Web of Conferences. – 2017. – vol. 129 – 01019.

ПЕРЕДАЧИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТЕЛ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРИВОДОВ СО СПЕЦИФИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Ан И-Кан, Беляев Д.В. *(ТПУ, г. Томск, Россия)*
Тел. +7 (3822) 606375, E-mail: dvb@tpu.ru

Abstract: *In Tomsk Polytechnic University at the department of Theoretical and Applied Mechanics the gears with intermediate rolling are developed. The advantages of the gear are presented. The principle of operation is described. The expression for gear ratio is shown. The two options depends on the number of intermediate bodies are compared. The design scheme for determining the torques when the output link is the wheel or separator is presented.*

Key words: *trains with intermediate rolling bodies, gear ratio, direction of rotation, forces, torque.*

В 1968 году на кафедре прикладной механики машиностроительного факультета Томского политехнического института под руководством Беляева А.Е. была организована научная школа по исследованию и разработке передач зацепления промежуточных тел (ПЗПТ).

Основными достоинствами ПЗПТ являются:

– упрощение технологии изготовления массовостью производства промежуточных тел;

– увеличение КПД за счет качения промежуточных тел;

– повышение нагрузочной способности передачи увеличением количества промежуточных тел, находящихся в зацеплении;

- компактность и конструктивная гибкость;

– возможность синтеза многопараметрических передач с увеличенными степенями свободы выходного звена.

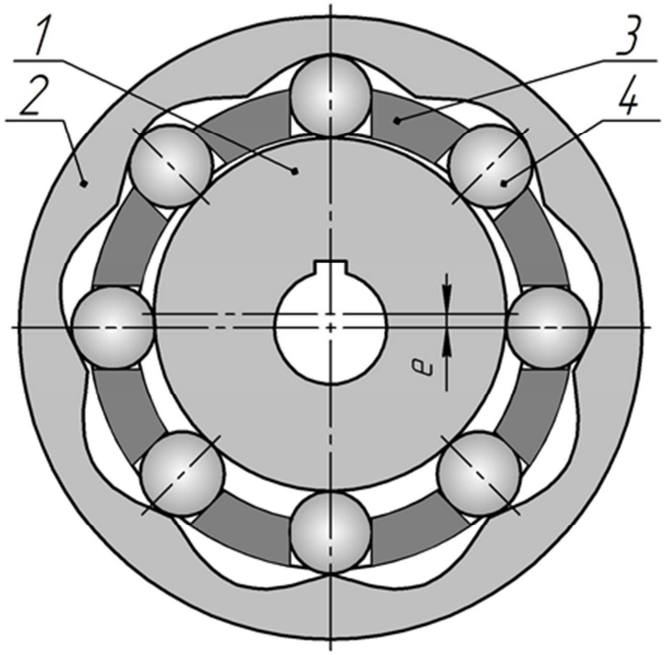


Рис. 1. Пример передачи зацепления промежуточных тел

Схема передачи представлена на рис. 1. Передача работает следующим образом: при сообщении движения кулачку 1, промежуточные тела 4, волнообразно перекатываются по профилям зубьев центрального колеса 2 и поступательно двигаясь внутри гнезд сепаратора 3, могут передавать движение сепаратору и/или колесу. Впадина колеса представляет собой две симметричные ветви циклоиды. Особенность работы ПЗПТ заключается в том, что половина всех имеющихся промежуточных тел в передаче передают крутящий момент. В качестве промежуточных тел могут выступать шарики либо ролики. Наибольшее распространение

получила передача, имеющая в качестве выходного звена сепаратор.

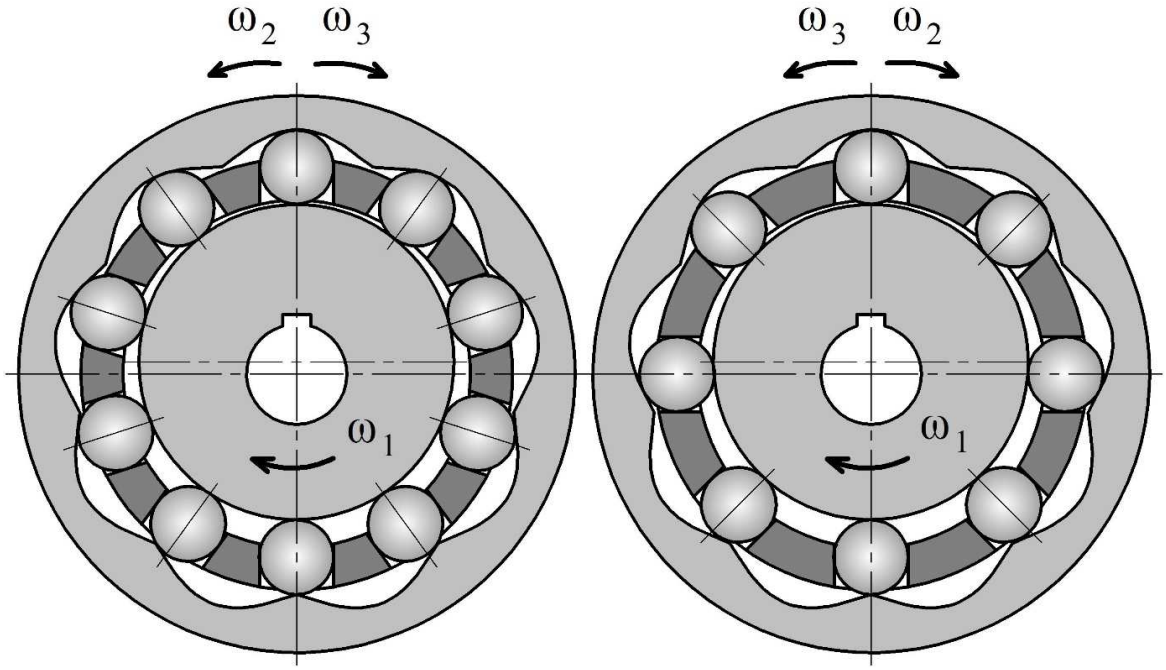
Передаточное отношение такой передачи определяется следующим образом

$$i_{13} = \frac{Z_4}{Z_4 - Z_2},$$

где: Z_4 – количество промежуточных тел, Z_2 – число впадин или зубьев колеса.

Возможны два варианта такой передачи, когда количество промежуточных тел больше чем число зубьев или впадин центрального колеса и когда промежуточных тел меньше. На рис. 2 а) и б) представлены оба варианта такого механизма.

Зафиксируем центральное колесо и примем в качестве выходного звена сепаратор. Таким образом, если $Z_4 - Z_2 = 1$, то направления вращения ведущего звена и выходного будут совпадать, а если $Z_4 - Z_2 = -1$, то направления вращения кулачка и сепаратора будут в разные стороны.



а) б)

Рис. 2. Два варианта ПЗПТ в зависимости от количества промежуточных тел

Также благодаря своему принципу работы некоторые виды ПЗПТ обладают еще некоторыми уникальными свойствами. Среди них, в зависимости от принятого конструктивного решения можно повысить или понизить величину передаваемого крутящего момента практически при одних и тех же габаритах передачи.

Для этого рассмотрим отдельно взятое промежуточное тело и элементы деталей, с которыми оно контактирует. Составим расчетную схему, которая представлена на рис. 3. На промежуточное тело в узле действуют три силы, со стороны кулачка P, сепаратора N и центрального колеса F.

Введем глобальную систему координат Oxy, с началом, совпадающим с центром передачи. Линии действия указанных сил относительно принятой системы координат расположены следующим образом: вектор силы F образует с осью Oy угол γ, линия действия силы N параллельна Ox и находится на расстоянии S от нее, вектор силы P находится на прямой, проходящей через геометрические центры кулачка и промежуточного тела.

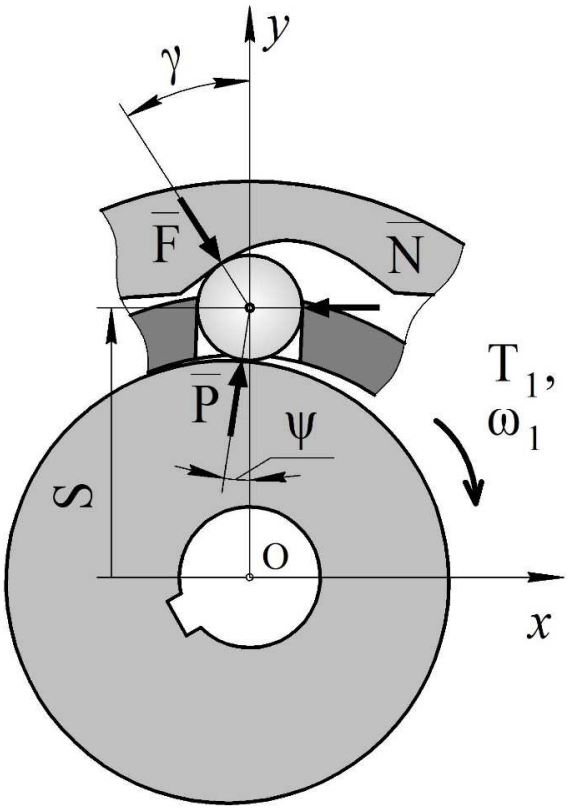


Рис. 3. Расчетная схема

Таким образом, данные усилия представляют собой систему сходящихся сил, линии действия которых, пересекаются в геометрическом центре промежуточного тела. Для этой системы можно записать уравнение

$$\bar{F}+\bar{N}+\bar{P}=0.$$

Исходя из этого уравнения, при известной геометрии и крутящем моменте T на входном звене, можно определить все усилия из следующих соотношений:

$$P=\frac{T_1}{S\cdot\sin\psi},$$

где ψ – угол между линией действия силы P и осью Oy (см. рис. 3);

$$N=\frac{T_1}{S\ tg\psi\ cos\gamma},$$

$$F=\frac{tg\gamma}{S\ tg\psi}+\frac{T_1}{S}.$$

Поскольку выходным звеном может являться центральное колесо или сепаратор то, при зафиксированном сепараторе, выходной крутящий момент:

$$T_2=\frac{tg\gamma}{tg\psi}T_1,$$

а при зафиксированном центральном колесе:

$$T_3=\left(\frac{tg\gamma}{tg\psi}+1\right)T_1,\ \text{т.е.}\ T_3=(T_2+1)T_1.$$

Полученные выражения также показывают, что при прочих равных условиях, наиболее выгодной с точки зрения передаваемого крутящего момента, является конструкция, когда выходным звеном является сепаратор, а центральное колесо неподвижно закреплено в корпусе передачи.

Благодаря своим достоинствами ПЗПТ находят все более широкое применение, на данный момент только в г. Томске шесть предприятий выпускают приводы на базе таких передач, которые с успехом применяются в нефтегазовой отрасли. Так на пример, в перемешивателе бурового раствора, гидравлических и электромеханических лебедках для подъемных установок, бурильно-крановых и бурильно-сваебойных машин. Также хорошо себя зарекомендовали в приводах задвижек.

По имеющейся информации, за рубежом также активно осваивают выпуск приводов на базе ПЗПТ. Это компании Японии, Великобритании, Нидерландов, Сербии и США.

Вывод. Благодаря своим достоинствам, передачи зацепления промежуточных тел являются перспективной базой для создания приводов, в т.ч. со специфическими свойствами.

Список литературы: 1. Планетарные передачи / В. Н. Кудрявцев. — 2-е изд., перераб. и доп. - М.; Л.: Машиностроение, 1966. - 307 с.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Антипин В.А., Степанова Е.А.

(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)
Тел. +7(914)6221790; E-mail: len_sta@rambler.ru; zeronight@mail.ru

Abstract: *The types of environmental pollution at the oil production sites are considered. Particularly hazardous waste during drilling operations are given. The ways to reduce the negative impact on the environment are given.*

Key words: *ecosystems, drilling fluids, pollution.*

Из-за добычи, транспортировки и переработки нефти экологические проблемы возникли и стали масштабными. Воздействие нефти экологические проблемы вызывает лишь после ее изъятия из природных хранилищ.

Природа получает ущерб не только при бурении скважин, прокладке трубопровода. Экологические проблемы следует рассматривать комплексно. Они состоят из проблем, вызванных нефтью и производственными процессами, в которых она участвует. Воздействие на природу происходит при непосредственном соприкосновении экосистемы с сырой нефтью, во время работ по разведке, добыче, хранению, транспортировке и ее переработке, а также перевозке нефтепродуктов и их использовании.

У нефтяной промышленности сущность экологической проблемы заключается в несовершенстве технических процессов и оборудования, их недостаточной оснащенности для обеспечения безопасности, исключении аварий и максимально эффективного использования ее на каждом технологическом этапе.

Нефтяная промышленность является одной из ведущих отраслей экономики РФ. Промышленность состоит из нескольких подразделений. Каждое подразделение выполняет определенный комплекс работ. Деятельность разбита на этапы: добыча, которой предшествует разведки и бурение, хранение, транспортировка и переработка.

Первым этапом «взаимоотношений» человека с нефтью является ее добыча. Это сложный производственный процесс, включающий в себя геологоразведку, бурение скважин, очистку добытого сырья от воды, парафина, серы и других примесей, а также перекачку до первичных пунктов хранения и учета [1].

При добыче нефти экологические проблемы возникают практически сразу. Начинаются они с расчистки мест для установки бурового оборудования. Для этого производится вырубка леса или иная зачистка участка от растительности (рис. 1).

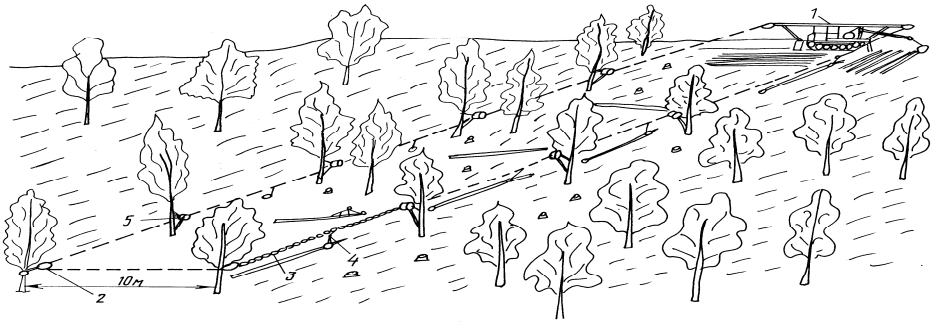


Рис. 1. Вырубка леса под место установки оборудования [2]

Одновременно участок, отведенный под работы, засоряется продуктами жизнедеятельности людей, отработанными материалами, грунтом, поднятым на поверхность. Страдает прилегающая территория. Ее используют работники для своих

нужд. К месту бурения прокладывают подъездные пути. Расчищают места для прокладки трубопровода. В итоге природа получает целый комплекс загрязнений. Но это только предварительный этап.

С начала добычи сырья, наносимый окружающей среде вред значительно возрастает. В первую очередь за счет разлива сырой нефти. Это может быть как технологический, так и аварийный вылив. В этом случае почва, наземные и подземные водные источники получают такое загрязнение, для восстановления после которого им потребуются долгие годы. Возникающие в результате пустоты, приводят к движению грунтов. Происходят провалы почвы, ее смещение и эрозия. Следует отметить, что, как правило, месторождения углеводородов находятся в природных зонах с очень хрупкой экосистемой. Экологический баланс в этих местах формировался очень сложно и может быть легко разрушен.

Далее идут транспортировка нефти, ее хранение и переработка. Наибольшие проблемы возникают при транспортировке. Какой бы вид транспорта для этого ни был задействован, везде происходит ее вылив. При транспортировке трубопроводом, железнодорожным или автомобильным транспортом вылившаяся нефть попадает на почвы, если водным (рис. 2) – остается на поверхности воды. Она растворима в органических растворителях и не растворима в воде. Потому ее пятна долго остаются на поверхности.

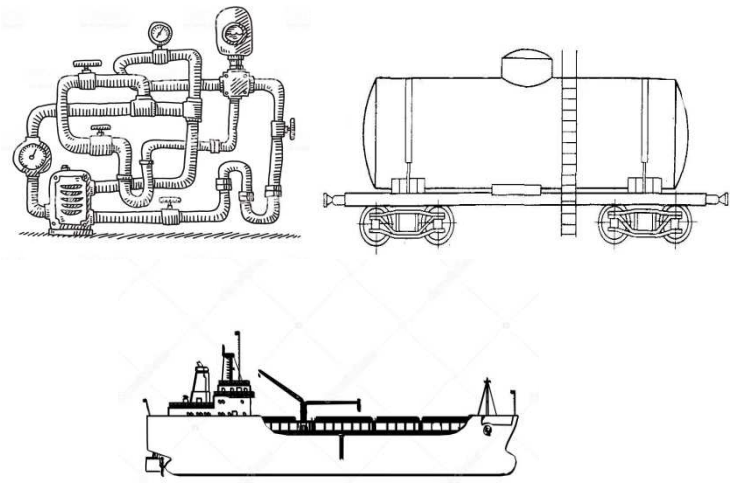


Рис. 2. Транспортировка нефти [3]

Последний этап, который относят к нефтяной промышленности – это переработка. Из нее производят различные виды топлива, сырье для химической промышленности, материалы строительства и так далее.

Продукты, получаемые в результате переработки, обладают большинством ее свойств. При сжигании их в качестве топлива выделяется большое количество углекислого газа, оксид азота, различные сернистые соединения. Повышение их содержания в атмосфере ведет к изменению климата, «кислотным дождям» и «парниковому эффекту» [4].

Нефтью и нефтепродуктами загрязняются воды планеты. Ежегодно в Мировой океан их попадает до 10 млн. тонн. А ведь только литр нефти, плавающий пятном на поверхности морской воды, лишает ее 40 тысяч литров кислорода. Тонна же может оказать отрицательное воздействие на площадь в 12 км^2 [5].

Уменьшение кислорода в воде и увеличение углекислого газа в атмосфере – это основные «симптомы болезни» биосферы. Не приняв необходимых действий, может привести к фатальным в первую очередь для человека, последствиям.

Во время проведения разведочных и эксплуатационных буровых работ («разбуривания месторождения»), а также в ходе извлечения и первичной обработки нефти образуются десятки тысяч тонн различных отходов, основными из которых являются буровые растворы, шламы и пластовые воды.

Буровые растворы – это наиболее токсичная часть буровых отходов. Принципиально буровые растворы можно разделить на три группы: на нефтяной основе, синтетические и на водной основе (наименее токсичные).

При добычи нефти на морских шельфах буровые растворы на водной основе обычно сбрасываются в воду без предварительной очистки и нейтрализации.

Шлам – представляет собой выбуренную в скважине горную породу, поднятую на поверхность с буровым раствором. Насколько известно, состав и количество конкретных загрязняющих веществ в буровых шламах на шельфе как следует не изучены.

Пластовые воды – воды, поступающие из нефтегазоносных подземных пластов вместе с нефтью и газом в процессе нефтедобычи. Как правило, они содержат остаточные количества нефти, загрязнены природными низкомолекулярными углеводородами, неорганическими солями и взвешенными веществами. Объем нефти, поступающей в море в составе пластовых вод, может достигать десятков тонн в год.

Ежегодно в отрасли рекультивируется и сдается землепользователям около 7 тыс. га. Но задолженность предприятий по рекультивации нарушенных земель как постоянного, так и временного пользования остается еще значительной [6].

Таким образом, газовая промышленность вносит свой вклад в загрязнение атмосферного воздуха России. Наиболее существенна доля отрасли по выбросам жидких и газообразных веществ (5% промышленного объема выброса этих веществ).

Доля газовой промышленности в использовании свежей воды и сбросе сточных вод в поверхностные водоемы незначительна.

Для уменьшения негативного воздействия производственной деятельности на окружающую среду предприятия и объединения отрасли проводят комплекс природоохранных мер: утилизацию нефтяных газов; восстановление герметичности колонн скважин; организацию производства технических средств; внедрение систем диагностики трубопроводов и резервуаров.

Список литературы: 1. Барабанщиков Д. А., Сердюкова А. Ф. Экологические проблемы нефтяной промышленности России: Молодой ученый,2016. - №26. - С. 727-731. **2.** Грей Ф. Добыча нефти. М.: Олимп-Бизнес, 2001– 113 с. **3.** Юденич Марина Нефть; Популярная литература - Москва, 2014. – 312 с. **4.** Танасийчук В. Экология в картинках; Наука - Москва, 2013. – 362 с. **5.** Фомин Г.С., Фомина О.Н. Нефть и нефтепродукты. Энциклопедия международных стандартов; ПРотектор - Москва, 2006. – 346 с. **6.** Хаустов А.П., Редина М.М. Охрана окружающей среды при добыче нефти. М.: Дело, 2006. – 80 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОЯВЛЯЕМЫХ НА СПЕКТРАХ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Антуфьев Б.А., Белашова И.С., Горшков А.А., Коровайцева Е.А., Ломовской В.А.
(МАИ, РТУ МИРЭА, НИИ механики МГУ, ИФХЭ РАН, г. Москва, Россия)
Тел.: +7 (495) 4272743; E-mail: ag60341@gmail.com

Abstract: *Theoretical analysis of description of modulus defect observed on internal friction spectra obtained in a wide variety of temperatures in dynamic regime of free damped torsional oscillations showed that continuous spectrum of relaxation times for dissipation process of relaxation mechanism can be described by a simple exponential Maxwell law and is in a good agreement with experimentally observed temperature changes of frequency. It is shown that this exponential law can be used as relaxation kernel in Boltzmann-Volterra equations for description of relaxation processes obtained experimentally in dynamic regime of investigations.*

Key words: *Internal friction, dissipation, relaxation time spectra, relaxation kernels, modulus defect.*

Исследование локальных диссипативных процессов по спектрам внутреннего трения $\lambda - f\left(T,°C\right)$ и температурным зависимостям частоты $\nu - f\left(T,°C\right)$ колебательного процесса, возбуждаемого в исследуемых системах, позволило отделить диссипативные процессы, имеющие релаксационную природу, от диссипативных процессов нерелаксационной природы механизма внутреннего трения. Разделение локальных диссипативных процессов, налагаемых на общий фон внутреннего трения, возможно провести на базе теоретического анализа локального аномального изменения частоты свободных затухающих крутильных колебаний, наблюдаемого в различных областях температур, а именно в тех интервалах, где на спектре $\lambda - f\left(T,°C\right)$ наблюдаются пики диссипативных потерь.

Для определения аналитического вида соотношения, описывающего аномальное поведение частоты ν, требуется выявить связь этой частоты с модулем сдвига и его температурным изменением при исследованиях спектра $\lambda - f\left(T,°C\right)$ и зависимости $\nu - f\left(T,°C\right)$. При этом необходимо ввести допущение о том, что геометрические размеры исследуемого образца могут быть приняты постоянными или незначительно изменяющимися при изменениях температуры.

В общем виде известна связь между частотой колебательного процесса и модулем упругости материала, из которого изготовили образец:

$$\nu = f\left(E, I\right), \tag{1}$$

где I - момент инерции образца, принятый нами в виде допущения $I = const$, т.к. момент инерции определяется геометрическими характеристиками исследуемых образцов. В развернутом аналитическом виде соотношение (1) представляется следующим уравнением:

$$\nu = E\left[\frac{I_a}{4l\left(I_s + 2I\right)}\right]^{1/2} \tag{2}$$

Из уравнения (2) следует:

$$\nu^2 = E\, I_t, \tag{3}$$

где $I_t = \dfrac{I_a}{4l\left(I_s + 2I\right)}$ - общий момент инерции образца при его колебаниях относительно продольной линии, I_s - полярный момент инерции площади поперечного сечения образца, I_a - полярный момент инерции образца, I - полярный момент инерции дополнительных элементов колебательной системы.

При крутильных колебаниях соотношение (3) представляется в виде:

$$\nu^2 \approx G\, I_t, \tag{4}$$

где G - модуль сдвига.

Из соотношения (4) следует:

$$G \approx \frac{\nu^2}{I_t} \approx k_1 \nu^2, \text{ где } k_1 = \frac{1}{I_t} \tag{5}$$

Известно из положений термодинамики и, в частности, зависимости теплоемкости и плотности от температуры, что модуль сдвига G линейно зависит от температуры (до температуры стеклования аморфных материалов или до температуры кристаллизации кристаллических материалов) и повышение температуры на 100 градусов приводит к уменьшению модуля на $2 \div 4\%$.

Таким образом, изменение температуры приводит к одновременному изменению как модуля сдвига G, так и частоты колебаний ν свободно затухающего колебательного процесса, возбужденного в образце исследуемого материала, т.е.:

$$k_1 \nu^2\left(T\right) \approx k_2 G\left(T\right), \tag{6}$$

где $k_1 = const$ и $k_2 = const$ - коэффициенты пропорциональности $\left(k_1 \neq k_2\right)$.

Соотношение (6) в безразмерном виде может быть представлено:

$$\frac{k_2 G_i\left(T_i\right)}{k_2 G_0\left(T_0\right)} = \frac{k_1 \nu_i^2\left(T_i\right)}{k_1 \nu_0^2\left(T_0\right)} \Rightarrow \Delta G\left(T\right) = \Delta \nu^2\left(T\right) \tag{7}$$

В экспериментах по исследованию температурных зависимостей диссипативных потерь $\lambda - f\left(T, °C\right)$ и изменениям частоты ν колебательного процесса $\nu - f\left(T, °C\right)$ установлено, что в температурных интервалах проявления локальных пиков диссипативных потерь на спектре $\lambda - f\left(T, °C\right)$ частота ν, а, следовательно, и модуль сдвига G отклоняются от соотношения (7) и теоретического снижения модуля на $2 \div 4\%$ при повышении температуры на 100 градусов. Для теоретического анализа и описания данного явления используется понятие «дефект модуля», который аналитически может быть представлен в виде:

$$\Delta G = \frac{G_0\left(T_0\right) - G_i\left(T_i\right)}{G_0\left(T_0\right)} \equiv \frac{\nu_0^2\left(T_0\right) - \nu_i^2\left(T_i\right)}{\nu_0^2\left(T_0\right)} \tag{8}$$

Теоретический анализ зависимостей $\lambda - f\left(T, °C\right)$ и $\nu - f\left(T, °C\right)$ показывает, что для одних локальных диссипативных пиков потерь на спектре $\lambda - f\left(T, °C\right)$ знак дефекта модуля $\Delta G > 0$, а для других $\Delta G < 0$. Это позволило разделить диссипативные процессы, наблюдаемые на спектрах $\lambda - f\left(T, °C\right)$ на процессы, имеющие релаксационный механизм и процессы, имеющие фазовый механизм рассеивания в исследуемом образце в виде тепловой формы части энергии внешнего деформирующего воздействия, выводящего все структурно-кинетические элементы исследуемой системы (материала) из состояния механического и термодинамического

равновесия. Каждый пик потерь релаксационной природы, накладываемый на фон внутреннего трения, может быть описан феноменологической моделью, уравнение которой имеет следующий вид:

$$\lambda(T_i) = 2\lambda_{\max}\frac{\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2}, \qquad (9)$$

где τ - дискретное время релаксации в максимуме пика диссипативных потерь $\lambda_{\max}$ на спектре $\lambda - f(T,°C)$.

Однако, в соотношении (9) дискретное время τ_i в отличие от времени релаксации в изотермическом режиме ($T = const$) статического режима внешнего деформирующего воздействия (исходя из модели Максвелла, где $\tau = \eta/G$) является функцией температуры, т.е. $\tau_i = f(T,°C)$.

Таким образом, в динамическом режиме внешнего деформирующего воздействия в области температур проявления пика диссипативных потерь время релаксации будет зависеть как от температуры исследования, так и от частоты колебательного процесса, т.е.:

$$\tau_i = f(T,°C;\nu) \qquad (10)$$

Температурная зависимость времени релаксации может быть теоретически представлена в виде аррениусовского соотношения вида:

$$\tau_i = \tau_o \exp\frac{u_i}{RT_i}, \qquad (11)$$

где $\tau_0 \approx 10^{-12}\,c$ - теоретическое значение предэкспоненциального коэффициента, u_i - энергия активации релаксационного процесса, R - универсальная газовая постоянная.

Теоретический анализ изменения времени релаксации τ_i от температуры T_i по соотношению (11), где T_i изменяется в интервале от температуры начала проявления локального диссипативного релаксационного процесса на спектре $\lambda - f(T,°C)$ до температуры окончания проявления этого пика потерь. Таким образом, локальный диссипативный релаксационный процесс, проявляемый на спектре $\lambda - f(T,°C)$, полученном в динамическом режиме, описывается не одним дискретным временем релаксации τ_i, а некоторым непрерывным по температуре набором дискретных времен релаксации $\sum_{i=1}^{n}\tau_i$, т.е. непрерывным спектром времен релаксации:

$$H(\tau) \equiv \sum_{i=1}^{n}\tau_i \qquad (12)$$

Теоретическое описание и анализ зависимости непрерывного спектра времен релаксации $H(\tau)$ для динамических режимов внешнего воздействия $\sigma(t) = \sigma_0 e^{i\omega t}$ может быть осуществлено на основании экспериментального температурного изменения дефекта модуля $\Delta G = f(T)$ и связи дефекта модуля с аналитическим выражением ядра релаксации в уравнении Больцмана-Вольтерра $\varphi(t-\Theta)$.

Зависимость (7) и экспериментальные данные $\Delta G = f(T,°C)$ на температурной зависимости $\nu = f(T,°C)$ могут быть в первом приближении описаны

экспоненциальным соотношением, т.е.:

$$\Delta\nu^2 \equiv \Delta G \equiv \varphi\left(t-\Theta\right) = \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \equiv H\left(\tau\right), \tag{13}$$

где t для динамического режима $\sigma\left(t\right) = \sigma_0 e^{i\omega t} = \sigma_0 e^{i2\pi\nu t}$ может быть представлено как период колебания колебательного процесса, возбужденного в исследуемой системе.

Таким образом, соотношение (13) устанавливает в общем виде связь между ядром интегрального уравнения Больцмана-Вольтерра, непрерывным спектром времен релаксации, дефектом модуля ΔG и квадратом изменения частоты ν^2 на экспериментальной температурной зависимости $\nu = f\left(T, °C\right)$.

Как было показано в представленной на предыдущей конференции работе [1], в качестве ядра релаксации $\varphi\left(t-\Theta\right)$ может быть использована как простая экспонента феноменологической модели Максвелла, так и дробная экспонента – функция Кольрауша для описания релаксационных процессов, получаемых в динамических режимах. В этом случае, соотношение (13) для ядра релаксации в виде простой экспоненты Максвелла может быть представлено в виде:

$$H\left(\tau\right) = \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] = \exp\left[-\frac{t}{\tau_0 \exp\dfrac{u}{RT_i}}\right] \tag{14}$$

Учитывая, что период колебаний колебательного процесса Θ, получаемый экспериментально, может быть представлен в виде:

$$\Theta \equiv t = \frac{1}{\nu}, \tag{15}$$

уравнение (14) преобразуется к виду:

$$H\left(\tau\right) = \exp\left[-\frac{1}{\nu\tau_0 \exp\dfrac{u}{RT_i}}\right] \equiv \Delta G\left(T\right) = \frac{G_{T_1} - G_{T_2}}{G_{T_1}} = \frac{\nu_{T_1}^2 - \nu_{T_2}^2}{\nu_{T_1}^2} \tag{16}$$

На основании полученных аналитических соотношений были рассчитаны теоретические значения модуля G_{T_1} и G_{T_2} при температурах начала T_1 и конца T_2 проявления локального диссипативного процесса α - релаксации для полиэтилена с молекулярной массой $M_w = 2,7 \cdot 10^5$, а также промежуточные значения G_{T_i} в интервале температур $T_1 \le T \le T_2$. Рассчитанные значения G_{T_1} и G_{T_2}, а также полученная экспериментально величина дефекта модуля ΔG показали удовлетворительное совпадение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 18-08-00427-а).

Список литературы: 1. Белашова И.С., Горшков А.А., Коровайцева Е.А., Ломовской В.А., Ломовская Н.Ю. Определение локальных областей неупругости в материалах различной природы, строения и структуры по данным динамических методов исследования // Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века». Т.1. − Донецк: ДонНТУ, 2018. − С. 25-27.

НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ

Байков А. В., Мугандин В.К., Ефимов В.Г. *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел./факс +38 062 3010805; E-mail: tm@fimm.donntu.org

***Abstract**: Questions of ensuring geometric accuracy of non-rigid shaft during grinding due to purpose of the rational modes of cutting are considered. The comparative analysis of the deflection of the axis of the machined shaft under the influence of cutting forces for a shaft of equivalent diameter and solid-state model is carried out.*
***Key words**: grinding, non-rigid shaft, geometric accuracy, modes of cutting.*

Современные тенденции машиностроения ставят достаточно жесткие требования к материалоемкости изготавливаемых изделий, в результате чего достаточно большое количество деталей, в частности валов, имеют малую жесткость. К геометрической точности ответственных поверхностей таких деталей выдвигают повышенные требования, однако их достижение затруднено по причине возникающих в процессе резания упругих деформаций технологической системы [1]. По этой круглое шлифование нежестких валов в производственных условиях ведется на пониженных режимах резания, что сказывается на производительности и конечной себестоимости продукции [2]. Снижение основного времени на обработку и, как следствие, снижение общей трудоемкости операции круглого шлифования может быть реализовано на основе подбора рационального сочетания режимов резания, при которых величина упругих перемещений оси детали лежит в пределах допуска формы поверхности.

В технологии машиностроения схема установки валов в центрах считается оптимальной для операций круглого шлифования. В результате прогиба заготовки под действием преимущественно радиальной составляющей силы резания обработанная поверхность получается бочкообразной. Допускк цилиндричности , соответсвущющий нормальной степени точности уровня А составляет примерно 30% допуска размера [3]. Рассматривая допустимую величину прогиба как ограничивающий фактор, можно определить режимы шлифования, удовлетворяющие этому условию.

Радиальная составляющая силы резания вследствие отрицательных передних углов у зерен шлифовального круга превышает тангенциальную составляющую в 1…2,5 раза. В свою очередь величина тангенциальной составляющей силы резания определяется по формуле:

$$P_z = \frac{9{,}8 \cdot 7{,}8\, N_э}{0{,}736\, V_{шк}}, \qquad (1)$$

где $N_э$ – эффективная мощность, кВт; $V_{шк}$ – окружная скорость шлифовального круга, м/с.

Эффективная мощность при шлифовании периферией круга с продольной подачей определяется по формуле [4]:

$$N_э = C_N\, V_з^r\, t^x\, s^y\, d^q, \qquad (2)$$

где C_N – поправочный коэффициент (1,3 для шлифования с поперечной подачей на двойной ход); r, x, y, q – показатели степени; $V_З$ – окружная скорость заготовки, м/мин; t – глубина шлифования, мм; s – величина продольной подачи, мм/мин; d – диаметр

шлифования, мм.

Из управляемых параметров режимов резания наибольшее влияние на величину силы резания оказывает глубина шлифования [5]. Приняв P_y/P_z=1,5 (для шлифовального круга после правки), из формул (1) и (2) представим зависимость глубины шлифования от силы резания:

$$t = \left(\frac{155{,}8 \cdot V_{шк}}{C_N \, V_з^{r} \, s^{y} \, d^{q}} P_y \right)^{\frac{1}{x}}.$$

Для определения лимитирующей глубины шлифования необходимо выразить величину погиба обрабатыываемого вала от силы P_y. Один из вариантов получения данной зависимости – представить ступенчатый вал гладким эквивалентного диаметра и рассматривать его как балку на двух опорах с приложенной сосредоточенной силой. Величина прогиба δ в сечении на расстоянии «z» от торца вала определяется выражением [6]:

$$\delta = \frac{P_y}{6 \cdot E \, J_x} \left[\frac{l-a}{l} z^3 - (z-a)^3 + \frac{(l-a)^3}{l} z - (l-a) l \, z \right], \qquad (3)$$

где l – длина вала; E – модульупругости материала; J_x – осевой момент инерции поперечного сечения; a – координата приложения силы резания.

Для оценки погрешности данной схематизации конструкции вала при определении допустимой величины его прогиба при шлифовании, сравним расчет по формуле (3) с результатами расчета деформации реальной конструкции вала в среде программного обеспечения SolidWorks Simulation 2017.

Эскиз вала приведен на рисунке 1. Обрабатываемая поверхность - Ø65h8. Расчет прогиба вала проведен для указанных на эскизе точек: начало и конец обрабатываемой поверхности и средина вала, соответственно точки A, B и C.

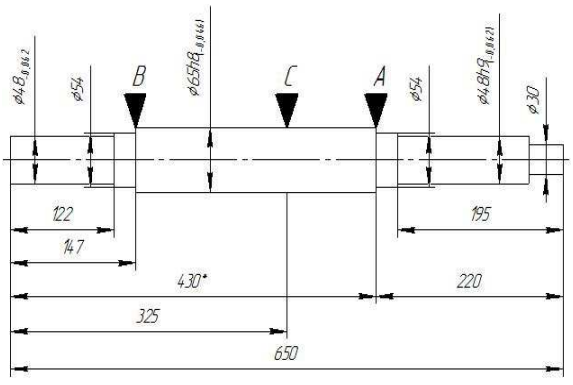


Рисунок 1. Эскиз вала с указанием расчетных точек

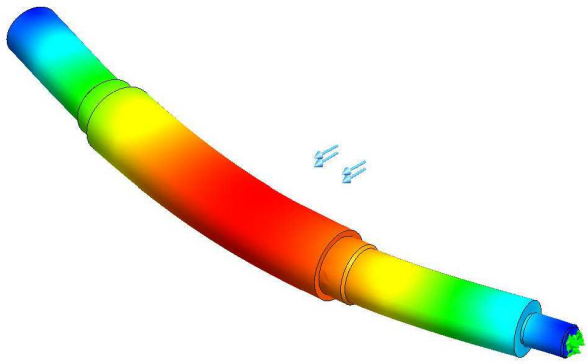


Рисунок 2. Прогиб вала в точке С

Результаты расчета по формуле (3) и с использованием пакета SolidWorks Simulation представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета максимальной прогиба оси вала под действием радиальной составляющей силы резания

Расчетное сечение	Радиальная сила P_y, Н	Расчетные значения прогиба вала, мм	
		Эквивалентного диаметра	Твердотельной модели
A	80	0,003962	0,002625
	200	0,009905	0,006562
B	80	0,002421	0,001866
	200	0,006051	0,004664
C	80	0,00494	0,002663
	200	0,01236	0,006658

Анализ полученных результатов показывает существенное различие величины прогиба вала, рассчитанной различными методами. Расчет с использованием твердотельной модели в различных сечениях дает результат на 30÷90% отличающийся от расчета для вала эквивалентного диаметра. Кроме того, расчеты, проведенные с использованием пакета SolidWorks Simulation, показывают, что максимальная величина прогиба вала находится не на середене его длины. Линия изогнутой оси вала наиболее точно описывается полиномом третьей степени (коэффициент корреляции r = 0,9989):

$$\delta = 0.013896062 + 0.014984387 \cdot z - 1.7204296 \cdot 10^{-5} \cdot z^2 - 9.0195528 \cdot 10^{-9} \cdot z^3$$

Приравняв производную от данного полинома к нулю, получим, что максимальный прогиб вала расположен на расстоянии 343 мм от левого торца (на 18 мм правее середины вала), величина его при P_y = 80 Н равна δ = 0,002766 мм.

Сравнительные результаты расчета величины прогиба вала показали, что замена конструкции реального многоступенчатого вала валом эквивалентного диаметра существенно искажает полученные результаты как по величине прогиба, так и по расположению сечения максимального прогиба. Расчеты с использованием твердотельного моделирования геометрии вала позволяют назначать более корректные режимы шлифования для обеспечения геометрической точности детали.

Список литературы: 1. Ломова О.С. Обеспечение точности обработки цилиндрических деталей в центрах круглошлифовальных станков. / О.С. Ломова, С.М. Ломов, А.П. Моргунов. – Журнал «Технология машиностроения», №10, 2010. – с. 12-17. **2.** Мрочек Ж.А. Процессы шлифования в машиностроении: учеб. пособие. / Ж.А. Мрочек, М.Г. Киселев, Л.М. Кожуро. – Минск, Новое знание, 2013. – 358 с. **3.** Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т 1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2001. – 912 с. **4.** Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т 2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2001. – 944 с. **5.** Носенко, В.А. Исследование влияния факторов на радиальную составляющую силы шлифования методом полного факторного эксперимента / В.А. Носенко, С.В. Орлов, А.А. Крутикова // 10-ая научно-практич. конф. профессорско-преподавательского состава ВПИ (филиал) ВолгГТУ, Волж-ский, 27–28 янв. 2011 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – С. 143–146. **6.** Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя: В 3 т. - Т 1. – 8-е изд., перераб и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. - М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ С МАЛЫМИ СЕЧЕНИЯМИ СРЕЗА НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОДНОЛЕЗВИЙНЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Баранов А. В., Рыкунов А.Н. (*РГАТУ имени П.А. Соловьёва, г. Рыбинск, Россия*)
Тел. +79108141404: E-mail: alexbar57@mail.ru

Abstract: *The report describes the main features of machining with a single-edged axial tool, highlights the configuration features of the cutting blade, shows the distribution of cutting forces, also presents formulas for calculating the geometric parameters of the section of the cut, components of cutting forces and other quantities.*
Key words: *hole machining, single-edged axial tool, slice thickness, cutting process, surface quality.*

Важной задачей современного производства, на фоне постоянного роста требований к параметрам качества изделий, является создание конкурентоспособной продукции. Следствием этого является постоянный рост удельного значения методов лезвийной обработки с малыми сечениями среза. В частности, все большее применение находят операции сверления однолезвийным инструментом. Широкое применение этого метода во многом сдерживается отсутствием надежных математических моделей оптимизации таких процессов.

Особенностью такого инструмента является наличие одного лезвия, смещенного в одну сторону от оси, а также направляющие элементы (один или два в зависимости от конфигурации). В этих инструментах надежно и просто обеспечивается определенность базирования. Однако, из-за того, что лезвие всего одно, равнодействующая составляющих сил резания даже частично не уравновешивается и обусловливает появление значительных реакций на направляющих элементах и соответствующие им давления на контактных поверхностях этих направляющих. Это негативным образом сказывается на работе инструмента, может привести к разрыву масляной пленки в местах контакта направляющих с обработанной поверхностью. Подобные отрицательные последствия удается уменьшить благодаря своеобразной конфигурации лезвия. Оно затачивается с двумя главными режущими кромками: внутренней и наружной. Установлено [1], что в процессе резания наружная кромка работает в условиях, аналогичных условиям работы главной режущей кромки стандартного спирального сверла. Однако, в отличие от стандартного сверла, режущая кромка установлена в диаметральной плоскости, т. е. по центру. Внутренняя кромка работает как резец при наружном точении. При работе таких сверл толщина срезаемого слоя сопоставима с радиусом округления режущей кромки, поэтому при расчете сил, действующих на инструмент, очень важно учитывать явление подмятия металла.

В докладе представлена схема, поясняющая процесс упругопластического подмятия металла при резании. Рабочий участок режущей кромки будет сминать слой обрабатываемого материала определённой высоты. В результате этого смятия металл упругопластически деформируется, а режущая кромка испытывает дополнительную силу, действующую со стороны обрабатываемого материала. Касательные напряжения на участке подмятия распределены равномерно и равны сопротивлению обрабатываемого материала пластическому сдвигу [2].

При толщине среза менее трех радиусов округления режущей кромки изменяется характер ее влияния на ряд выходных параметров процесса. Например, искажается линейный закон влияния подачи на удельную силу, что объясняется изменением фактических углов в зоне резания. В соответствии с упругопластической моделью деформирования среды, деформационные возмущения распространяются во всех направле-

ниях, в том числе – против вектора скорости. Возникающая волна повышенного давления деформирует набегающий поток металла, который «приспосабливается» к обтеканию режущей кромки вдоль некоторой разграничительной линии, причем его скорость уменьшается от исходной величины до 0 на разграничительной линии, а давление соответственно растет до давления торможения. Форма, величина и характер застойных явлений зависят от теплофизических характеристик зоны резания. При температурах порядка 300°С максимальное развитие получает нарост. Значительные размеры обуславливают нестабильность этого образования. С ростом скорости и температуры резания нарост постепенно уменьшается и преобразуется в относительно стабильную застойную зону, также состоящую из частиц обрабатываемого материала, но не остающуюся на лезвии инструмента. Ее размеры – на порядок меньше, но в условиях малых сечений среза она существенно влияет на фактическую геометрию режущего клина, уменьшая его радиус округления. Дальнейшее увеличение скорости все более «прижимает» застойную зону к инструменту, при этом уменьшается ее размер и увеличивается радиус округления, в пределе – до исходной величины [3].

Большое значение имеет установление минимальной величины толщины срезаемого слоя $a_1^{\min}$ (имеется в виду среднее значение вдоль режущей кромки). При уменьшении подачи на зуб инструмента ниже значения, обеспечивающего величину $a_1^{\min}$, на большей длине режущей кромки прекращается срезание металла и происходит лишь его смятие. При этом металл упрочняется, что приводит к усиленному износу зубьев инструмента от трения об упрочненную поверхность. То есть требуется не допускать уменьшения величины a_1 ниже ее минимального значения $a_1^{\min}$.

Выполненные исследования [2] показали, что для расчёта данной величины может быть использована формула

$$a_1^{\min} = 1{,}6 \cdot \rho_1 \cdot \mathrm{B}^{1{,}35},$$

где ρ_1 – радиус округления режущей кромки; B – тангенс угла наклона условной плоскости сдвига, определяется аналитически [2].

Выражение хорошо согласуется с выводами П.Е.Дьяченко и М.О. Якобсона, А.И.Исаева и Г.Л.Цвирко о связи $a_1^{\min}$ не только со значением радиуса округления режущей кромки ρ_1, но и величиной угла наклона условной плоскости сдвига.

Таким образом, для наиболее полного представления о процессах, происходящих при сверлении однолезвийным инструментом необходимо рассмотрение как подмятия металла режущей кромкой, так и застойных явлений в зоне резания. Сегодняшний уровень развития науки о резании металлов позволяет сделать это аналитически с учётом физических особенностей, присущих микрорезанию.

Список литературы: 1. Обработка глубоких отверстий /Уткин Н. Ф., Кижняев Ю. И., Плужников С. К. и др. Под общ. ред. Н. Ф. Уткина. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 269 с. **2.** Баранов А.В. Оптимизация процессов лезвийной обработки отверстий // Монография. – Рыбинск: РГАТА, 2004. – 152 с. **3.** Рыкунов А. Н. Теплофизический анализ лезвийной обработки с малыми толщинами среза // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьёва– Рыбинск: РГАТА, 2010. № 1. с. 128 – 134.

МАШИНА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОЖЕВЕННОГО ПОЛУФАБРИКАТА

Бахадиров Г.А., Цой Г.Н., Набиев А.М. *(ИМСС АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан)*
Тел./Факс: (+998971) 262-71-55; E-mail: instmech@rambler.ru

Abstract: *A new design of a multi-operational machine for the mechanical processing of a leather semi-finished product has been developed. The machine has the ability to provide mechanical processing of semi-finished leather processing of various technological operations on the same machine, and to increase productivity, many times reduce manual work, reduce inter-operational transportation costs, reduce overall material consumption, reduce production space, and increase the level of mechanization in leather production.*
Key words: *Mechanical processing, leather semi-finished product, technological process, quality of processing, inter-operational transportation.*

Нами разработана конструкция многооперационной машины для механической обработки кожевенных полуфабрикатов [1-3]. Целью является повышение эффективности процесса механической обработки рабочими валами кожевенного полуфабриката и расширение функциональных возможностей машины [4].

Предлагаемая машина состоит из двух станин 1, 2 на которых установлены параллельно валы 3, 4. На концах вала 3 установлены крестовины 5 и 6, а на концах вала 4 установлены крестовины 7 и 8. На концах крестовин 5 и 6 установлены рабочие валы 9, 10, 11, 12, а на крестовинах 7 и 8 установлены рабочие валы 13, 14, 15, 16. Рабочие валы 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 закреплены болтами 67 по четыре штуки крышкой на крестовины 5, 6 и 7, 8. На станине 2 установлен цепной конвейер, состоящий из двух бесконечных цепей 45 и 49, которые огибают звездочки 43, 47, 46, 48 и 44, 51, 52, 50 (Рис. 1, 2 и 3).

На этом конвейере на осях цепей установлены металлические опорные плиты 53 с упругими покрытиями в виде резины или волокнистого материала. На плиту 53 навешивают кожевенный полуфабрикат 54. Цепной конвейер подает опорную плиту 53 с кожевенным полуфабрикатом 54 снизу-вверх между двумя рабочими органами, которые расположены горизонтально и параллельно в зоне механической обработки.

Машина для механической обработки кожевенного полуфабриката работает следующим образом:

Необходимые рабочие валы в зону механической обработки устанавливаются с помощью ручки 42, электродвигателя 41, редуктора 40, втулки 38, шестерней 37, 26, звездочек 25, 30, цепи 31, валика 29, шестерней 27, 28. Ручкой 42 переключается шестерня 37 в контакт с шестерней 36.

Коробкой переключения скоростей 64 устанавливается требуемая скорость вращения рабочих валов необходимой технологической операции и устанавливается цепи 55, 57 на звездочки рабочих валов в зоне механической обработки. Кнопками управления электродвигателя 41 устанавливается необходимая скорость подачи опорной плиты 53. Навешивается вперегиб кожевенные полуфабрикаты 54 на опорные плиты 53.

Включаем электродвигателей 41 и 65 вращаются рабочие валы и подаются опорные плиты 53 с кожевенным полуфабрикатом 54. Далее продолжается навешивание кожевенного полуфабриката 54 на следующие не завешанные опорные плиты 53.

После обработки всего кожевенного полуфабриката 54 выключаются электродвигатели 41 и 65, и машина останавливается. Затем снимаются цепи 55 и 57 со

звездочек 17 и 21, соответственно. Далее ручкой 42 переводится шестерня 37 в контакт с шестерней 26. Затем включается электродвигатель 41 и вращается вал 3 шестерней 26, а вал 4 через звездочку 25, цепь 31, звездочку 30, оси 29, шестернями 27, 28 и устанавливаются нужные рабочие валы в зону обработки поворотом крестовин 5, 6 и 7, 8. Затем останавливается электродвигатель 41. Потом устанавливается цепь 55 на звездочку нового рабочего вала крестовины 5 в рабочей зоне, аналогично цепь 57 устанавливается на звездочку нового рабочего вала крестовины 7 в рабочей зоне.

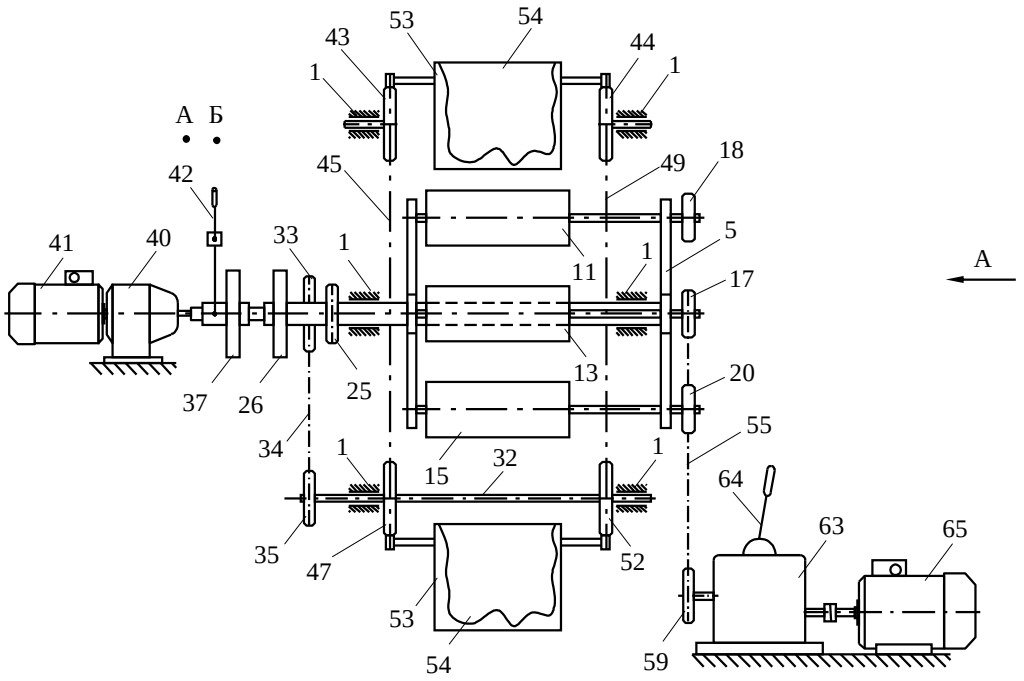


Рис. 1. Подача кожевенного полуфабриката в зону обработки

Ручкой 42 устанавливается контакт шестерни 37 с шестерней 36, а ручкой коробки скоростей 64 устанавливается на нужную скорость для данной технологической операции.

Далее включается электродвигатели 41 и 65 и обрабатываются все загруженные кожевенные полуфабрикаты 54 на опорную плиту 53, подающего транспортера. Для следующей технологической операции все повторяется. Только необходимо установить нужные рабочие валы в зону обработки, скорость обработки и направления вращения рабочих валов. Кнопками управления электродвигателя 41 устанавливается требуемая скорость подачи опорной плиты 53.

Для установки нужных рабочих валов в зону обработки кожевенного полуфабриката необходимо вращение валов 3, 4 крестовин 5, 6 и 7, 8. На один конец вала 3 установлена звездочка 25 и шестерня 26, а на вал 4 установлена шестерня 27. Причем, звездочка 25 с помощью цепи 31 контактирует со звездочкой 30, установленной на оси 29, а шестерня 27 контактирует с шестерней 28 на оси 29. На оси 68 установлена звездочка 33, которая цепью 34 контактирует со звездочкой 35 на оси 32. На оси 68 установлена шестерня 36, которая может контактировать с подвижной шестерней 37, которая скользит вместе с втулкой 38 по оси 39 по пазам вала редуктора 40, который соединен с электродвигателем 41.

Рычагом 42, перемещая втулку 38 с шестерней 37, можно контактировать с шестерней 26 на оси вала 3 или контактировать с шестерней 36.

Подачу опорных плит 53 с кожевенным полуфабрикатом 54 осуществляется следующим образом.

Ручкой 42 устанавливается шестерню 37 в контакт с шестерней 36. Далее включается электродвигатель 41. Вращение от электродвигателя передается в редуктор 40, далее через звездочку 37 передается звездочке 36 на оси 68. Далее вращение от оси 33 цепью 34 передается звездочке 35, которая через ось 32 вращает звездочку 52 и двигает цепь 49, а также звездочкой 47 вращает цепь 45. Следовательно, цепи 45 и 49 двигают опорные плиты 53 с кожевенным полуфабрикатом в зону механической обработки.

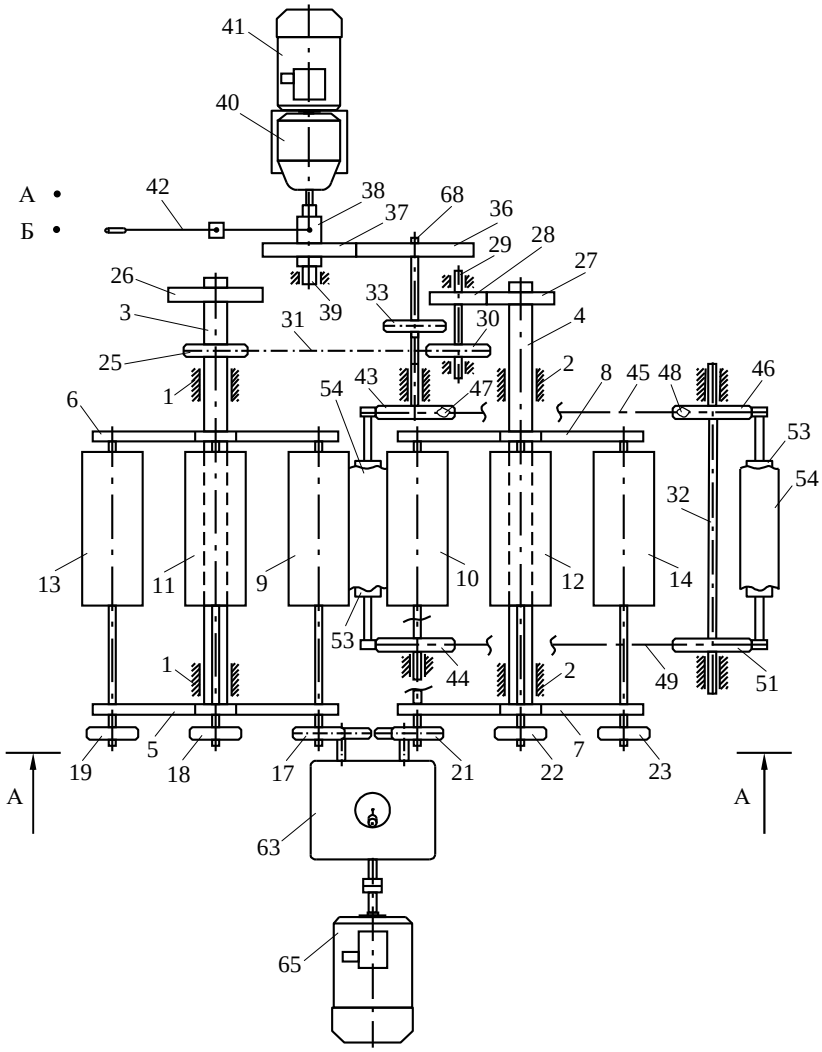


Рис. 2. Общий вид конструкции многооперационной машины (вид сбоку)

При замене другой пары технологических рабочих валов поворотом ручки 42 устанавливается контакт шестерни 37 с шестерней 26, при этом шестерня 36 останавливается и не вращается, то есть цепной транспортер останавливается. При включении электродвигателя 41 вращение через редуктор 40 и звездочки 37 передается шестерне 26, которая вращает вал 3 и устанавливает нужный рабочий вал в зону обработки.

Звездочка 25 цепью 31 вращает звездочку 30, которая через вал 29 шестерни 28 и 27 передает вращение валу 4, а вал 4, вращая крестовины, устанавливает второй рабочий вал в зону обработки.

После установки пары рабочих валов нужной технологической операции отключается электродвигатель 41 и перемещается ручка 42 для контакта шестерни 37 от шестерни 26 к шестерне 36.

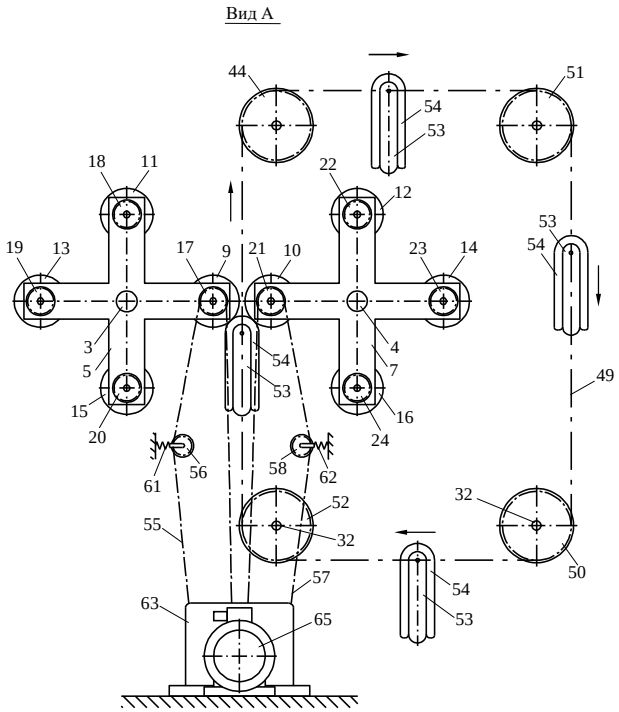


Рис. 3. Многооперационная машина (вид сверху)

Если необходимо обработать обратную поверхность, то кожевенный полуфабрикат переворачивается на опорной плите и повторяется процесс обработки.

Эффективность разработанной многооперационной машины заключается:

- в обеспечении повышения производительности машины за счет одновременной обработки обоих половинок кожевенного полуфабриката;
- в снижении затрат ручного труда в навеске и съеме кожевенного полуфабриката на транспортирующие устройства;
- в уменьшении межоперационного транспортирования кожевенного полуфабриката от одной технологической машины к другой;
- в возможности механической обработки средних и больших размеров кожевенного полуфабриката;
- в снижении материалоемкости предлагаемой машины;
- в снижении производственной площади занимаемой машиной;
- в возможности осуществления различных технологических механических операций на одной машине и др.

Список литературы: 1. Бахадиров Г.А., Цой Г.Н., Набиев А.М., Умаров А.А. Разроботка многооперационной валковой машины для механической обработки кож // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Наука в современном мире: теория и практика». Уфа. 2018. -С. 42-44. **2.** Бахадиров Г.А., Мусиров М.У., Набиев А.М., Умаров А.А. Исследование факторов, влияющих на процесс обработки кожевенного полуфабриката // Международный Академический вестник" Уфа, 2018. - № 10. -С. 28-85. **3.** Аманов Т.Ю., Баубеков С.Д., Цой Г.Н., Набиев А.М., Устройство для обеспечения усилия прижима между рабочими органами валковых технологических машин // «Современные наукоемкие технологии» Пенза. 2018. -№9. -С. 9-14. **4.** Патент РФ № 2024614. Машина для механической обработки кож и шкур. Авторы: Ганус В.П., Зюнкин В.Г., Поломошных С.П., Мельченко В.И. Опубл. в Бюл. 15.12.1994 г.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Белов О.А., Белова Е.П. (*КамчатГТУ, Петропавловск-Камчатский, Россия)*
Тел. +7(962)2817245 E-mail:boa-1@mail.ru

Abstract: *One of the criteria for the development of modern society are indicators of labor productivity growth rates. Quality indicators of the standard of living of the population are also closely interrelated with the development of production. The more high-tech production is, the more effective, more stable it is under market conditions, and it successfully solves economic problems. The basis of such production, the dominant factor of productivity growth and the main driving force of the modern economy becomes engineering thought. A high level of development can be achieved only by increasing the efficiency of the use of human potential. Including due to high-quality training of highly professional engineering personnel.*
Keywords: *engineering, engineering education, technological development, labor productivity, vocational guidance, educational standard, educational program.*

В настоящее время на различных уровнях все чаще подчеркивается, что инженерное образование и инженерная деятельность играют ключевую роль в обеспечении производительности труда на предприятии и в целом по экономике. Так в рамках V Московского международного инженерного форума отмечалось, что «необходимость подготовки в стране квалифицированного современного инженерного корпуса приобретает, особенно сейчас, когда наша страна находится под прессом экономических санкций, все большее значение». В целях повышения эффективности инженерной деятельности, плодотворности «инженерной мысли» необходимо постоянно совершенствовать как подготовку инженеров, так и создание условий для их деятельности [1].

Инженерное образование является ключевым фактором технологического развития, повышения инновационной активности, а значит и развития экономики инновационного типа [2]. Важность и неоспоримость данной формулировки подтверждается всей мировой практикой. И основной задачей в данном направлении является подготовка специалиста с развитым инженерным мышлением.

Современные технологии развиваются гораздо быстрее чем учатся студенты. Если ВУЗ подготовил инженера для обслуживания только конкретных механизмов и устройств, значит ВУЗ подготовил инженера устаревшей квалификации. В дальнейшем такая подготовка может свестись к обучению квалифицированной обслуги для импортных технологических систем. Как отмечалось в [1], основная задача ВУЗа не в том, чтобы подготовить готового специалиста для решения конкретных инженерных задач, а в том, чтобы молодой инженер смог как можно быстрее овладеть навыками решения новых инженерных задач. Именно такие инженеры способны решать амбициозные технологические задачи.

Подготовка инженерных кадров основывается на тесном взаимодействии трех базовых составляющих: школа, ВУЗ, предприятие. Но в настоящее время возникает ряд противоречий и проблем, снижающих эффективность инженерного образования. Особенно остро эти противоречия и проблемы стоят перед региональными ВУЗами, в большинстве случаев не имеющих достаточных возможностей как для формирования кадрового ядра, так и для развития материально-технической базы. На наш взгляд, среди основных можно выделить следующие проблемные точки.

1. Ослабление и утрата связей между школой, ВУЗом и предприятием. В силу развития рыночных взаимоотношений многие предприятия профориентационную работу в такой связи воспринимают как обузу для себя – она отвлекает сотрудников, предприятия затрачивают средства ничего не получая взамен. Школа больше ориентирована на успешную сдачу выпускником ЕГЭ, в результате только около 10% выпускников сдают

ЕГЭ по профильной физике и математике, что существенно снижает поток абитуриентов в инженерные ВУЗы. В результате ВУЗ оказывается изолированным как от потенциальных абитуриентов, так и от производственной базы. Это приводит к снижению требований к выпускникам при приеме ВУЗ и влияет на качество подготовки специалистов.

2. Значительная часть поступивших на инженерные специальности не готовы воспринимать лекционный материал первого курса. Тем более сложно выполнять практическую часть учебной программы. Это говорит о несоответствии школьной программы современным требованиям ВУЗа. В большей степени школа учит находить правильные ответы на предложенные в учебниках задачи. Для общего развития это важный навык, но основа инженерного подхода состоит в том, чтобы самостоятельно формулировать инженерные задачи [3].

3. Необходимость реформирования системы дошкольного образования. Скорость технологических изменений нарастает настолько стремительно, для использования этой технологической волны «необходимо создавать кадровую базу инженерного образования с дошкольного возраста». Это общемировая тенденция. Так президент Франции Эммануэль Макрон, выступая 27 марта 2018 года на съезде работников дошкольных общеобразовательных учреждений, заявил: «Я решил сделать обязательным дошкольное образование в детских садах и снизить с шести до трех лет возраст, с которого во Франции обучение становится обязательным.» очевидно, что эта проблема требует комплексного подхода на государственном уровне. Скорость технологических изменений нарастает настолько стремительно, что уже на уровне общеобразовательных школ должны создаваться полноценные инженерные классы, направленные на формирование и развитие у школьников технического мышления [3].

4. Необходимость создания и развития практики ориентированной системы образования во взаимодействии с предприятиями и организациями науки. Обеспечить решение этой проблемы невозможно без активного участия предприятий в этом процессе. В системе инженерного образования этот фактор является основополагающим, поскольку невозможно подготовить высококвалифицированного инженера в отрыве от реального производства [4,5]. Наличие практического опыта для студента является важным стимулирующим обстоятельством в развитии инженерного мышления. Для преодоления данного противоречия необходимо укреплять связи между предприятием и ВУЗом, стимулировать предприятия для тесного сотрудничества, создавать условия для повышения заинтересованности предприятий в результатах деятельности учебных заведений.

Применительно к профессиональной подготовке курсантов морских специальностей мы должны априорно исходить из того, что профессиональная подготовка в условиях программы обучения должна максимально охватывать вопросы технической эксплуатации судового оборудования и вестись по двум основным направлениям. Первое направление - отработка практических действий и натренированности личного состава по выполнению мероприятий технической эксплуатации. Второе направление - формирование профессиональных навыков управления технической эксплуатацией судовых систем и устройств [6].

5. Несоответствие уровня развития материально-технической базы кафедр ВУЗа уровню современного технологического потенциала. Только за последние пять лет несколько раз поменялись образовательные стандарты и основные образовательные программы. При этом материально-техническая база не изменилась, продолжает устаревать и отстает от образовательных стандартов на 15-20 лет. Инженерное и программное обеспечение также не всегда соответствует современным требованиям. Все это приводит к тому, что осваивать сложную техническую базу студентам приходится по «картинкам в учебниках», то есть формально. Очевидно, что такой подход ведет к деградации технического образования, так как для формирования инженерной мысли, способности решать практические задачи, необходим качественный контакт в системе «человек-машина» [7].

6. Перегруженность преподавательского состава и снижение престижа профессии преподавателя ВУЗа. В настоящее время очевиден факт, что кроме значительной аудиторной нагрузки преподаватели обречены заниматься формальной бюрократической отчетностью, что не оставляет ни времени, ни сил на научную работу и самообразование. Все это существенно сказывается как на уровне преподавания, так и на уровне подготовки студентов.

Учитывая возрастающую потребность общества в высококвалифицированных инженерных кадрах и интенсивность развития современных технологий для устранения вышеназванных противоречий требуются комплексные преобразования в системе инженерной подготовки. Только в этом случае возможно формирование эффективной национальной инновационной системы и переход на качественно иной уровень в инженерном образовании.

Список литературы: 1. Панина Е.В. Инженерная мысль – доминирующий фактор роста производительности труда / Е.В. Панина //Русский инженер. – 2017. №04(57). – С. 8-12. **2.** Кудж С. Инженерное образование как ключевой фактор успешного перехода к инновационной экономике / Станислав Кудж, Елена Бодрова, Наталия Голованова, Владимир Кондратенко//Русский инженер. – 2018. №04(61). – С. 49-51. **3.** Панина Е.В. Технологический прорыв – дело рук инженеров / Е.В. Панина //Русский инженер. – 2018. №04(61). – С. 11-17. **4.** Белов О.А. Обзор основных факторов снижения безопасности сложных технических систем / О.А. Белов, А.И. Парфенкин // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2016. № 35. С.11-14. **5.** Белов О.А. Системная интеграция контроля электрооборудования / О.А. Белов, А.И. Парфенкин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т.10. №1 С.14-17. **6.** Белов О.А. Моделирование процесса обучения курсантов для формирования навыков технической эксплуатации / О.А. Белов, Л.А. Толстова // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2016. № 3(16). С.78-81. **7.** Белов О.А. Оценка технической готовности системы с учетом влияния человеческого фактора / О.А. Белов // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2014. № 30. С.11-16.

ПРОЦЕДУРА ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ ПРОЦЕССОРОВ В МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

Борзов Д.Б., Сизов А.С., Басов Р.Г. (*ЮЗГУ, г. Курск, Россия*)
Тел./Факс: +79192736700; E-mail: borzovdb@kursknet.ru

Abstract: *Multiprocessor systems of critical purpose are discussed. The procedure for creating a plan for loading processors in multiprocessor critical systems is proposed. The analysis of the operating time of the proposed algorithm is carried out, the conclusion is made that the proposed algorithm complies with the necessary requirements of accuracy and speed.*
Keywords: planning, loading, multiprocessor systems, allocation, processor, critical systems

Работа посвящена мультипроцессорным системам критического назначения (наблюдение, слежение, прицеливание и т.д.). Рассмотрена задача планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах критического назначения, в которых особенно важна минимизация времени реакции системы на поступающие задания, увеличение производительности, повышение надежности и снижение коммуникационной задержки [1].

Существующие алгоритмы невытесняющего планирования и фиксированного кванта времени задают порядок расположения процессов в очереди процессов, что для систем критического назначения неприемлемо [2,3]. Алгоритм гарантированного планирования задает строго определенную часть процессорного времени на обслуживание, что также неприемлемо для систем рассматриваемого типа. Многоуровневые очереди и многоуровневые очереди с обратной связью приписывают фиксированные приоритеты для обслуживания, что не подходит для критических систем. Из этого следует необходимость разработки специализированного подхода и алгоритма, ориентированного на аппаратную реализацию.

Требуется на одном процессоре выполнить множество заданий $N = \{1, 2, \ldots, n\}$. Для каждого задания $j \in N$ определена длительность выполнения на процессоре $p_j > 0$, время поступления задания на процессор $r_j > 0$ и крайний директивный срок $D_j > 0$, к которому задание должно быть выполнено. Процессор готов к выполнению заданий с момента времени 0 и может выполнять одновременно только одно задание. Прерывания при выполнении любого задания запрещены. Необходимо построить допустимое расписание выполнения заданий, при котором все условия задачи соблюдены, то есть для каждого требования $j \in N$ определить момент начала выполнения S_j такой, что $S_j \geq r_j$ и момент окончания выполнения $C_j = S_j + p_j \leq D_j$. Причем если $S_j < S_i$, то $S_j + p_j \leq S_i$, где S_i – момент начала выполнения другого задания $i \in N$, $i \neq j$.

Время в задачах ТР задается в условных единицах. То есть параметры p_j , r_j , D_j , C_j , S_j измеряются в минутах, часах, днях и т.п. Очевидно, что для систем критического назначения расписание должно быть оптимальным. Поэтому, D_j не заданы, т.е. $D_j = \pm\infty$ ($j = 1, 2, \ldots, n$). Остальные условия задаются аналогично. Обозначим C_j – момент окончания выполнения задания j, т.е. $C_j = S_j + p_j$, где S_j – момент начала выполнения задания j. Тогда, необходимо построить допустимое расписание, при котором значение функции $\sum_{j=1}^{n} C_j \to \min$.

Подход планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах, позволяющий уменьшать нагрузку на хост-процессор и повысить отказоустойчивость системы состоит из следующих шагов:

1. Получить матрицу N распараллеленных операторов.
2. Разбить построчно матрицу N на матрицу S с размерностью P- количество процессоров.
3. Сопоставить данные из матрицы S со свободными процессорами P.
4. Записать результат распараллеливания в матрицу R.

При этом принимаются следующие ограничения на время и порядок выполнения операций процессорами:

1) Каждый процессор выполняет одновременно не более одной операции;
2) Операции выполняются в указанной последовательности;
3) Общая длительность всех операций вычисляется по формуле $t_{ij} = \sum_{j=1}^{g_i} t_{ij}$.

Работа алгоритма планирования загрузки процессоров состоит из следующей последовательности шагов:

1. Задать $F = \{Y, B\}$;
2. Представить $\{\mathrm{N}_{nm}\} = \{Y, B\}$;

3. Записать $N^{i1}_{nm} > N^{i2}_{nm}$, где $i1 > i2$ - порядковые номера, t_{i1}, t_{i2} - время выполнения операции, причем $i1 > i2$;;
4. Представить $\{N_{nm}\} = \{S_k\}$, где $k = 1 \ldots m$, $m = \lim p$;
5. Принять $S_k \to S^k_{p_i}$, $k = 1 \ldots m$;
6. Найти t_{ij} : $t_{ij} = \min\{S\}$ и получить $t_{ij} \supset S_{ij}$, $i, j = 1 \ldots p$.;
7. Если $t = 0$ для m, то п.8, иначе п.9;
8. $\{R_{nm}\} = N^i_{nm}$, $i = 1 \ldots p$.
9. Если $\{S\} \neq \varnothing$, то п. 5-9, иначе п. 10;
10. Конец алгоритма.

В представленном алгоритме для исходного графа задачи, полученного в пункте 1 происходит его преобразование в множество $\{N_{nm}\}$ с соответствующими временами выполнения каждой подзадачи. После этого на шаге 4 и 5 выполняется сортировка содержимого этого множества в порядке убывания соответствующих значений с учетом длительности выполнения. В данном случае учитывается ограничение на количество участвующих в выполнении общей задачи процессоров мультипроцессорной системы. На шаге 6 и 7 сортировка, заключающаяся в последовательном вычитании всех временных интервалов, соответствующих задачам из множества $\{S\}$. Таким образом выполняется своеобразная сортировка по времени выполнения всех задач, находящихся в множестве $\{S\}$. На шаге 9 и 10 полученные результаты сохраняем в множестве $\{R_{nm}\}$.

Для предложного подхода было проведено моделирование с помощью программы, написанной языке С++. Целью моделирования было определение времени решения задач при увеличении количества процессоров мультипроцессорной системы и определение необходимое и достаточное количество процессоров для обработки определенного количества информации.

Длительности операций, для моделирования выбраны параметры $t = \{1 \ldots 16\}$, которые присваиваются произвольно. Результат моделирования представлены на рисунке 1.

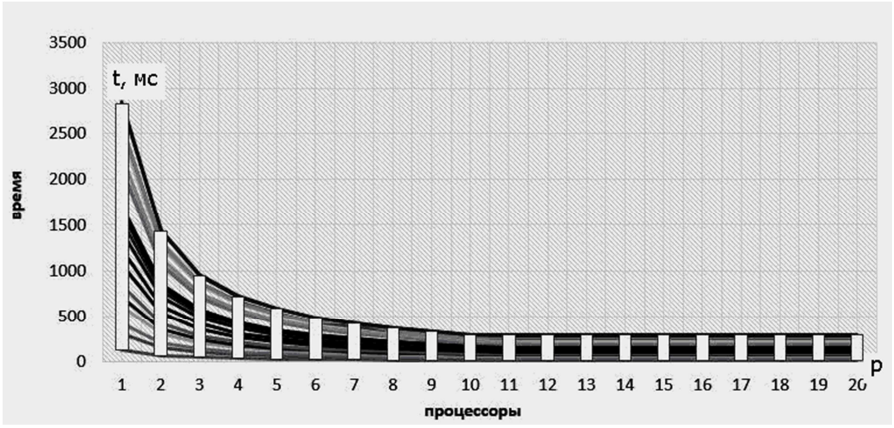


Рис. 1. График загрузки процессоров (доверительный интервал +/- 0,14)

График (рис. 1), показывает уменьшение времени $d = \sum_{i=1}^{n} t_i$. Из анализа зависимости, представленной на рисунке 1 можно сделать выводы:

– Падание времени загрузки для первого и второго процессора (с 3000 мс до 1500 мс); падение времени загрузки между вторым и четвертым процессором (с 1500 мс до 1000 мс);

– Относительно небольшое падение времени на интервале между четвертым и десятым процессором;

– С десятого процессора падение времени не происходит, что не влияет на общую производительность системы. Этот показатель соответствует закону Амдала, утверждавший, что объем решаемой задачи с адаптированным числом процессоров в системе, выделенным для ее решения, остается неизменным.

График, представленный на рисунке 2 демонстрирует необходимое и достаточное количество процессоров для обработки определенного количества информации.

Из анализа графика, представленного на рисунке 2 следует, что при изменении количества команд с 10 до 500, увеличение количества процессоров возрастает примерно в 6 раз, что является фактором быстродействия при оптимальной загрузке.

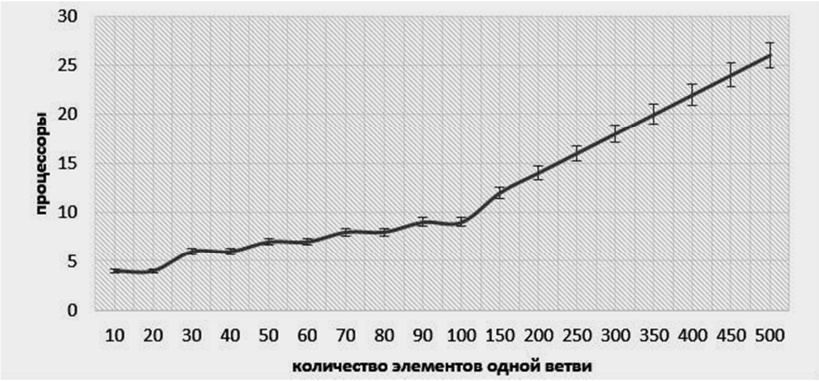


Рис. 2. График влияния элементов одной ветви на количество процессоров (доверительный интервал +/- 0,14)

На рисунке 3 показано падение точности вычислений по сравнения с алгоритмом полного перебора для пяти случайно сгенерированных примеров, включающих по 10 примеров с 5, 10, 15, 25, и 50 процессорами.

Из анализа графика, представленного на рисунке 3 видно, что средний проигрыш предложенного алгоритма не превышает 7,7%, а существующий алгоритм показывает проигрыш в среднем на 11,6 %.

В результате анализа зависимостей, представленных на рисунках 2 и 3, можно сделать вывод о том, что предложенный алгоритм позволяет поддерживать необходимую точность и быстродействия. В системах реального времени для компенсации временных потерь целесообразно перейти на специализированное устройство.

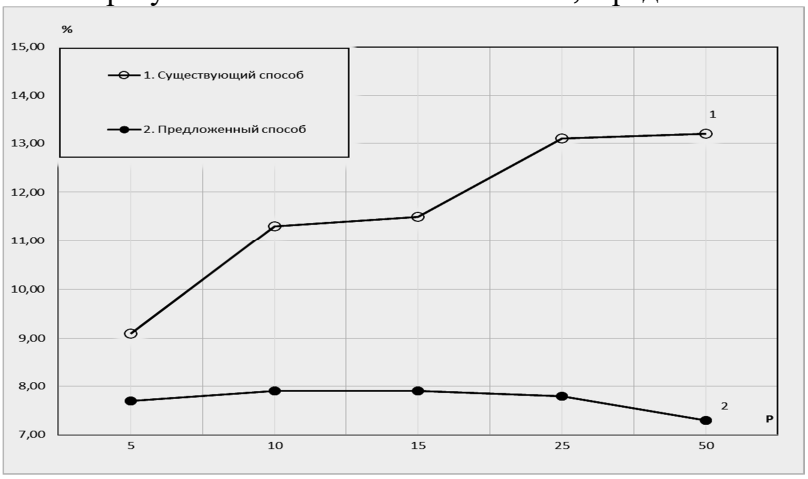


Рис. 3. График проигрыша алгоритмов на множестве случайных примеров (доверительный интервал +/- 0,6)

Список литературы:

1. Головкин Б.А. Параллельные вычислительные системы. – М.: Наука, 1980. – 520 с. **2.** Duncan R. A survey of parallel computer architectures. Computer. V.23. N 2. 1990. P. 5–16. **3.** Андон Ф. И., Кукса А. И., Поляченко Б. Е Об оптимальном планировании процесса обработки на ЭВМ взаимосвязанных задач.– Кибернетика, 1980, Я. 3, с. 51–53.

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЯ ЗАГРУЗКИ ПРОЦЕССОРОВ В МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

Борзов Д.Б., Сизов А.С., Басов Р.Г. (*ЮЗГУ, г. Курск, Россия*)
Тел./Факс: +79192736700; E-mail: borzovdb@kursknet.ru

Abstract: *The multiprocessor systems for critical purposes (observation, tracking, assignment, etc.) and the task of scheduling are analyzed. The task of scheduling the loading of processors in multiprocessor systems of critical purpose is considered. A description of the structural and functional scheme of a specialized device based on the proposed algorithm is given. The results of the evaluation of the complexity and performance of the device are given.*
Keywords: *scheduling theory, algorithms, processors, loading plan, multiprocessor system, data.*

Сложность и быстродействие задач (программ, подпрограмм, алгоритмов) постоянно возрастает [1]. Для систем критического назначения (системы слежения, наблюдения, прицеливания и т.д.) необходим контроль и повышение быстродействия и производительности мультипроцессорных систем [1,2]. Существующие подходы к решению данной проблемы разработаны в основном в расчете на программную реализацию, которая не способна обеспечить достаточную для практики величину коммуникационной задержки [3]. В критических системах необходимо также следить за постоянным присутствием очередей задач на каждом процессоре системы. Одним из методов решения этого вопроса являются методы теории расписаний и планирование загрузки процессоров в мультипроцессорных системах [4].

Существующие подходы планирования загрузки процессоров основаны, как правило, на краткосрочном планировании, подходящем для быстрого реагирования на процессы. При этом соответствующие алгоритмы используют свойства предсказуемость, минимизация ресурсов, равномерное распределение ресурсов системы и масштабируемость [4]. С учетом объемов решаемых в мультипроцессорных системах задач, программное решение этого вопроса неприемлемо, для чего целесообразно применение специализированных аппаратных средств планирования загрузки процессоров.

Пусть требуется выполнить множество $N = \{1, 2, \ldots, n\}$ заданий (данных, алгоритмов, подпрограмм), $i \in N$, $j \in N$ ($i \neq j$) [5]. При этом для каждого задания $j \in N$ определены: длительность выполнения $p_j > 0$; время $r_j \geq 0$ поступления задания на процессор; крайний директивный срок $D_j > 0$, к которому задание должно быть выполнено. Прерывания при выполнении любого задания запрещены. Необходимо для каждого требования $j \in N$ определить момент начала выполнения S_j такое, что $S_j \geq r_j$ и момент окончания выполнения $C_j = S_j + p_j$, причем если $S_j < S_i$, то $S_j + p_j \leq S_i$, где S_i – момент начала выполнения другого задания $i \in N$, $i \neq j$. В задачах теории расписаний (ТР) время задается в условных единицах (минутах, часах, днях и т.п.). Так как для систем критического назначения расписание должно быть оптимальным, то $D_j = +\infty$ ($j = 1, 2, \ldots, n$). Пусть t_j – момент окончания выполнения задания j, т.е. $t_j = S_j + p_j$, где S_j – момент начала выполнения задания j. Тогда необходимо построить допустимое расписание, при котором значение функции:

$$\sum_{j=1}^{n} t_j \to \min . \qquad (1)$$

Введем матрицу времени Time:

$$Time = \left\| Time_{ij} \right\|, \qquad (2)$$

где $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, $m = n$. В матрице *Time* вершины столбцов обозначают процессоры

P_{ij} мультипроцессорной системы, а в строках отложены номера задач $1,2,\ldots,m$, планируемых к составлению плана загрузки. На пересечении предполагаемое время выполнения задачи n_m.

Факт выполнения или невыполнения каждой задачи n_{nm} из множества задач $\{N_{nm}\}$ заносится в матрицу порядка exec:

$$Exec = \left\| Exec_{ij} \right\|, \tag{3}$$

где $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, $m = n$. В матрице порядка Exec вершины столбцов обозначают процессоры P_{ij} мультипроцессорной системы, а в строчках отложены задачи, подлежащие выполнению в порядке возрастания номеров. Единица ставится в том случае если задача выполнена.

Матрица очередности Q отображается очередь выполнения задач Z_i, $i = \overline{1,m}$.

$$Q = \left\| Q_{ij} \right\|, \tag{4}$$

где $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, $m = n$. В Q отображается очередь выполнения задач Z_i. Столбцы матрицы обозначают процессоры P_{ij} мультипроцессорной системы, строки – задачи, подлежащие выполнению в порядке возрастания номеров соответственно.

Предлагается подход, основанный на конвейерном планировании загрузки процессоров в мультипроцессорных системах, основанный на (1), а также использовании (2-4). Фрагменты программ предлагается назначать конвейерно независимо на процессоры мультипроцессорной системы без учета других операторов, ожидающих выполнения с учетом матрицы следования последовательной программы, отображающей ее выполнение.

На основе предложенного подхода был разработан алгоритм планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах.

1. ProcNum, ProcNumQ = 1.
2. Если $\mathrm{Time}(\mathrm{ProcNum},\mathrm{P_j}) = 1$, то п.3, иначе п. 5.
3. Если $\mathrm{Exec}(\mathrm{ProcNum},\mathrm{P_j}) = 0$, то п. 4, иначе п. 13
4. Temp = 1.
5. Если $\mathrm{Q}(\mathrm{ProcNumQ},\mathrm{Temp}) = 1$, то п. 6, иначе п. 7.
6. Temp = Temp + 1 и п. 5.
7. $\mathrm{Q}(\mathrm{ProcNumQ},\mathrm{Temp}) = Z_i$.
8. $\mathrm{Time}(\mathrm{ProcNumQ},\mathrm{P_j}) = Z_i$.
9. Temp =1.
10. ProcNumQ = 1.
11. j = j + 1.
12. Если $\mathrm{P_j} > \mathrm{nm}$, то конец алгоритма, иначе п. 2.
13. ProcNum=ProcNum+1.
14. Если $\mathrm{ProcNum_j} > \mathrm{n_{nm}}$, то конец алгоритма, иначе п. 3.

Первоначально анализируется наличие в матрице Time задач. В случае присутствия задач, то на следующем шаге проверяется матрица Exec и если $\mathrm{Exec} \neq \varnothing$, то присутствует задача для постановки в очередь. Для этого в Q ищется свободной ячейка и задача ставится в очередь загрузки процессоров с одновременной фиксацией этого факта в Time. Таким образом проверяются все строки матрицы задач Time.

По предложенному алгоритму планирования загрузки процессоров разработана структурная схема соответствующего устройства (рис. 1).

На рисунке 1 приняты следующие обозначения блоков и узлов: АПЗП – акселератор планирования загрузки процессоров, ПЗП – блок планирования загрузки процессоров, УУ – устройство управления, МП - микропроцессор, ОП – оперативная память, КПДП – контроллер прямого доступа в память, Ппорт – последовательный порт, Прпорт – параллельный порт, МО микрооперация, А - адрес ячейки памяти.

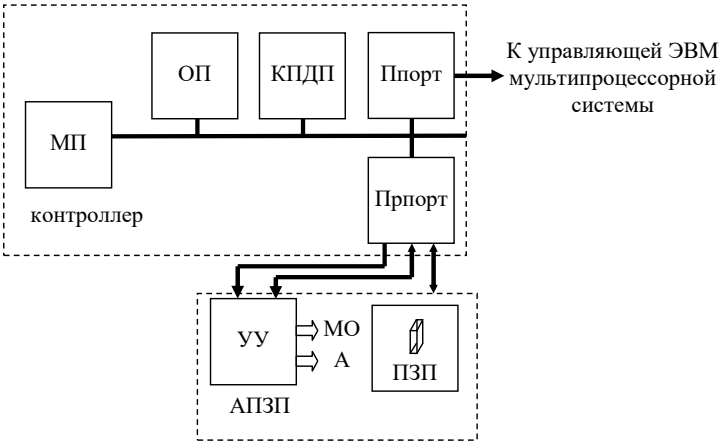


Рис. 1. Структурная схема устройства планирования загрузки процессоров

Согласно предложенному алгоритму планирования загрузки процессоров устройство выполняет составление плана загрузки по предложенному алгоритму. Соответственно блок ПЗП включает в себя устройство, подключенные к параллельному порту ЭВМ.

В соответствии со структурной организацией устройства составления плана загрузки процессоров (рис. 1), была разработана его функциональная организация (рис. 2). На функциональной схеме (рис. 2) ОЗУ 2 процессоров предназначено для хранения очередей загрузки заданий в каждом из соответствующих процессоров. Например, ситуация $\begin{matrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \\ A_1 & A_1 & A_1 & A_4 \end{matrix}$, где p_1 означает процессор, а A_1 – означает, что на процессор p_1 назначено задание A_1; промежуточное 3 ОЗУ служит для временного хранения очередей загрузки заданий; вычитатель 4 служит для вычисления очередного минимального значения задания; элемент 5 сравнения предназначен для вычисления кода минимального значения загрузки; элемент 6 сравнения поиска минимального значения загрузки необходим для поиска кода минимального значения загрузки; счетчик 7 адреса предназначен для хранения адреса ячейки ОЗУ 2 процессоров; реверсивный 8 счетчик адреса необходим для хранения адреса ячейки промежуточного 3 ОЗУ; первый 9 регистр минимума предназначен для хранения текущего минимального значения кода загрузки процессора; регистр 10 кода нуля необходим для хранения кода значения нуля; второй 11 регистр минимума служит для хранения текущего минимального значения кода загрузки процессора; счетчик 12 уровня предназначен для хранения кодов очередей загрузки заданий.

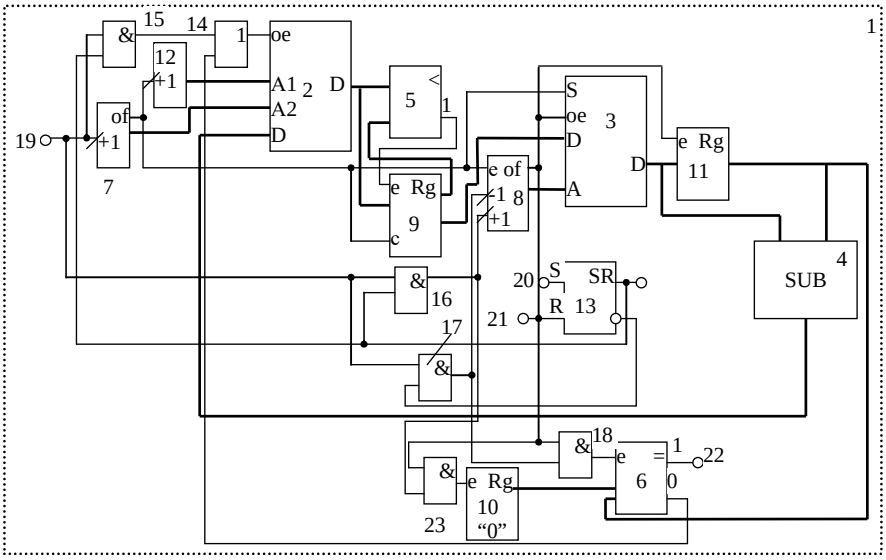


Рис. 2. Устройство планирования загрузки процессоров

Список литературы: **1.** Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных системах. М.: Наука, 1986. **2.** Головкин Б.А. Параллельные вычислительные системы. – М.: Наука, 1980. – 520 с. **3.** Duncan R. A survey of parallel computer architectures. Computer. V.23. N 2. 1990. P. 5–16. **4.** Андон Ф. И., Кукса А. И., Поляченко Б. Е Об оптимальном планировании процесса обработки на ЭВМ взаимосвязанных задач.– Кибернетика, 1980, Я. 3, с. 51–53. **5.** Оре О. Теория графов. – М.: Наука, 1968. – 352 с.

ИДЕИ В НАУЧНОМ ТВОРЧЕСТВЕ И УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

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

Abstract*: examples from the history of the emergence of remarkable ideas in mechanics, the role of problems in the educational process.*
Key words*: ideas, the history of the emergence of ideas, the learning process, setting goals.*

На роль идей в научном творчестве и учебном процессе обращалось внимание в работах [1-8] и других.

Возникновение идей продолжает оставаться таинственным, но упорно ищущий находит чаще. ***Некоторые ошибочные "идеи":*** "люди прекрасно осведомлены о том, что голос невозможно передать через провода. Даже если бы это было возможно, пользы от этого не было бы никакой (The Boston Post, 1865)"; "летающие машины, весом тяжелее воздуха невозможны! (Лорд Кельвин - президент Королевского Общества, Royal Society, 1895)"; "все, что могло быть изобретено, уже изобрели (Чарльз Дьюэлл – специальный уполномоченный американского Бюро Патентов, 1899)".

Из истории: драматическое объявление принципа наименьшего действия (Пьер Мопертьюи, 1747г.); неожиданная формулировка Гаспаром Кориолисом теоремы об абсолютном ускорении материальной точки при сложном движении.

Идеи, как результат интуитивного предвидения, требуют самого пристального внимания. Продвижение в данном направлении может повлиять на современный учебный процесс, особенно в технических учебных заведения, ***стать стратегической целью образования!***

Начало XIX века. Наполеоновские войны. Возникли задачи строительства мостов. Неразрезные балки, которые монтируются на нескольких опорах, выдерживают большую нагрузку. В этих балках неизвестных реакций опор больше, чем уравнений для их определения.

Балки считаются очень жесткими, укрепилось мнение, что деформации малы и не влияют на реакции. Другая точка зрения - для появления даже малых деформаций необходимо прикладывать большие усилия. В 1808 г. член Берлинской академии Этельвайн находит реакции в статических неопределимых балках путем интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси балки, т.е. он учитывает деформированное состояние балки.

В методе сил отрицаются перемещения по направлению «лишних» неизвестных (например, реакций связей), а в методе деформаций отрицаются усилия в искусственно добавленных связях. Метод деформаций - внезапное озарение исследователей начала XX века.

Обращает на себя внимание диалектическое единство диаметрально противоположных утверждений и подходов, дающих одинаковый точный результат. ***Трудно в других науках найти нечто подобное!***

Инженерные задачи, которые в прошлом решались практиками с большим опытом работы и, как следствие, развитой интуицией, в настоящее время моделируются на основании принципов и методов фундаментальных наук. *Решение задач механики сводится к четкой последовательности действий, что формирует алгоритмическое мышление.* Дать интересную задачу – способ привлечения студента к работа на пределе своих возможностей! Преподаватель в первую очередь обязан *сосредоточить внимание на развитии творческих способностей* ***самых одаренных,*** привлекая их к участию в олимпиадах, конференциях, в исследованиях!

ЗАДАЧИ В ОБРАЗОВАНИИ

Истинная наука включает цепь задач, уже решенных и требующих своего решения!

Сосредоточение внимания на решении задач (по математике, информатике, физике, теоретической и прикладной механике, теории оптимального управления) должно обеспечить *преимущество* (!) нашей высшей технической школы перед другими.

Необходимо больше внимания уделять тайнам зарождения идей и построению математических моделей! История естествознания дает убедительные примеры зарождения фундаментальных идей исключительно на гуманитарном уровне – на основании анализа явлений. Интересные задачи не редко сочиняются и решаются на основании правдоподобных рассуждений, опыта и энтузиазма [1-8].

В романтике научного поиска заключена облагораживающая сила. С.П. Капица писал: *“ Так же как сказки являются первым образом реального мира, так и задачи дают студенту первое представление о мире физическом”.*

Конечно, чрезвычайно трудно предложить задачу такой актуальности как, например, И. Бернулли сформулировал в 1697г. - задачу о брахистохроне, которая привела к вариационному исчислению; но не исключаются простые задачи, решение которых потребует напряжения и развития черт исследователя.

Задача 1. Покажите, что при колебаниях материальной точки (они вызваны только не нулевыми начальными условиями), на которую действует сила упругости пружины и сила сухого трения, *саму силу сухого трения* (функцию времени) можно рассматривать как оптимальное релейное управление. Найдите его с использованием принципа максимума.

Задача 2. Задан стержень длины L с распределенной по длине массой m и сосредоточенной массой M на правом конце. Стержень вращается в горизонтальной плоскости с постоянной угловой скоростью ω относительно оси, перпендикулярной продольной оси стержня и проходящей через левый конец стержня. Учитывая только изгиб, составьте дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня (с учетом центробежных сил). Жесткость стержня на изгиб EJ.

Задача 3. На идеально гладкой (без трения) горизонтальной плоскости расположена замкнутая нерастяжимая нить, заключенная по всей длине в желобок без трения. Масса нити распределена по ее длине. Каждой точке нити сообщена скорость V. Что произойдет с нитью, если мгновенно убрать желобок?

Задача 4. Леонард Эйлер писал: ***“… в мире не происходит ничего, в чем не был бы виден смысл какого-либо максимума или минимума…”.*** Можно ли непосредственно воспользоваться утверждением Л. Эйлера?

Можно ли принцип действия Гамильтона-Остроградского использовать, как критерий оптимальности, при решении задач синтеза оптимального управления движением деформируемых объектов?

Задача 5. Существует аналогия между экстремумом функции и экстремумом функционала. Если необходимое условие экстремума функции - равенство нулю дифференциала $(df = 0)$, то необходимое условие экстремума функционала - равенство нулю его вариации $(\delta I = 0)$. Под вариацией функции можно подразумевать разность близких функций, взятых, например, в классе полиномов; функции близки в смысле близости нулевого порядка, если модуль их разности мал.

Проверка достаточных условий экстремума функционала зависит от вида функционала и сопряжена с преодолением ряда трудностей. И до настоящего времени графическая интерпретация функционала, как правило, не проводилось, в связи с трудоемкостью процедуры.

Найти экстремум функционала $I = \int_0^{\pi/2} \left(\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2 + 2x_1x_2\right)dt$ при граничных условиях $x_1(0) = x_2(0) = 0$; $x_1(\pi/2) = 1$, $x_2(\pi/2) = -1$ для функций $x_1(t)$ и $x_2(t)$.

Как построить поверхность функционала? Построение графиков зависимости функционала от параметров, характеризующих вариации функций, позволяет дать ответ на вопрос о существовании экстремума.

Превзойти любую систему образования можно за счет развития у молодежи воображения, фантазии, способности воспринимать новые идеи, любви к поиску решения трудных задач современной техники.

Творчески одержимый исследователь может и должен зажечь факел поиска истины.

Список литературы: 1.Бохонский А.И. Роль инженерных дисциплин в высшей школе: традиции и современность / А.И. Бохонский, Е.П. Первухина// Вестник СевГТУ. Вып.64: Педагогика.- Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005.–С.14-21. 2.Бохонский А.И**.** Идеи в научном творчестве и учебном процессе / А.И. Бохонский //Збірнік наукових праць. Вип. 1(9).-Севастополь: Севастопольський ВМІ ім. П.С.Нахімова, 2006. –С.232-236. 3**.** Бохонский А.И. Системы аналитических вычислений в теоретической и приклад ной механике / А.И. Бохонский // Сб. тр. II междунар. науч.-практ. конф. «Инфотех-99». – Севастополь, 1999. – С. 33 – 35**. 4**. Бохонский А.И. Гносеологические особенности компьютерного образования. Тезисы докладов. Международная науч.-практ. конференция ”TQM / EMS – 2001 Total Quality Management / Environmental Management System. Актуальные аспекты и практические вопросы” Изд-во «Арт-принт», Севастополь, 2004. – С. 18 – 20. **5**. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с. **6.** Бохонский А.И. Исполнительные органы минимальной массы манипуляторов с управляе мым деформированием при учете температурных воздействий. Материалы междун. конф. по крупногабаритным космическим конструкциям. НПО “Энергия”, Центр программных исслед. РАН и др. – Новгород, 1993. – С. 77. **7.** Бохонский А.И. Принцип действия как критерий синтеза оптимального управления переносным движением упругих объектов/ А.И. Бохонский, Н.И. Вармин ская// Оптимизация производственных процессов. Вып. 9.- Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – С.3–7. **8.** Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. Монография. М. Вузовский учебник. Инфра – М., 2016 – 17/

ЭНЕРГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТИПА “РАЗГОН – ТОРМОЖЕНИЕ” ДВИЖНИЕМ ОБЪЕКТА

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

Abstract: *Using the algorithm for designing optimal control of the type “acceleration - deceleration” by the portable movement of an object, a tendency of energy reduction depending on the type of control has been revealed.*

Key words*: construction of controls, portable movement, minimum energy of movement.*

С использованием алгоритма реверсионного конструирования оптимального управления типа “разгон – торможение” переносным движением объекта выявлена тенденция уменьшения энергии в зависимости от типа управления. Известные критерии оптимальности управляемого движения объектов в ряде случаев позволяют нахо-

дить аналитические решения задач синтеза [1-5]. На практике часто представляет интерес определение реальных затрат энергии на реализацию оптимального движения.

Как показано в работах [6-10], не исключается такое целенаправленное конструирование оптимальных управления на основании заданной цели движения, свойств управления (например, косой симметрии) и ограничений, при которых обеспечивается существенное снижение энергозатрат на реализацию управлений.

Полная обратная задача вариационного исчисления означает переход от функции, описывающей проектируемое движение, через уравнение Эйлера к восстанавливаемому функционалу-критерию, отражающему оптимальность результата; в [10] такая процедура названа реверсионным исчислением, а полученный результат отражал сущность сформулированного реверсионного принципа оптимальности (РПО). Достигаемый эффект такого конструирования всегда можно проверить при вычислении энергии, затраченной на управление, и сравнить результат с другими решениями известными классическими методами теории оптимального управления движение объекта.

Представляет практический интерес совершенствования алгоритма поиска оптимального управления перемещением объекта из исходного состояния покоя в конечное состояние абсолютного покоя за заданное время движения.

Целью исследований является сравнение энергозатрат традиционных управлений и новых типов управлений, сконструированных на основании РПО. Дальше рассматриваются три типа управлений.

1. Релейное управление.

Для описания релейного управления может использоваться функция Хевисайда, которая удобна для изображения на графике (рисунок 1):

$$Ue = a\cdot\left(H(t) - 2\cdot H\left(t - \frac{T}{2} \right) + H(t-T) \right).$$

Однако, при простом описании релейного управления типа “разгон – торможение” для первого участка с временным интервалом $T/2 > t > 0$ выражения для перемещения, скорости и ускорения принимают вид:

$$S_e(t) = at^2/2,\ V_e(t) = at,\ U_e(t) = a,$$

а на втором участке движения объекта, на временном интервале $T > t > T/2$

с начальными условиями $S_e(0)=0,\ V_e(0)=aT/2$ выражения для перемещения, скорости и ускорения будут следующие

$$S_e(t) = aTt/2 - at^2/2,\ V_e(t) = aT/2 - at,\ U_e(t) = -a.$$

2. Управление, которое находится классическим вариационным методом либо с использованием реверсионного конструирования.

Пусть предполагаемое управление (ускорение) имеет вид $U_e(t) = a(T-2t)/2$, где $a, T = const.$ Скорость и перемещение находятся путем интегрирования:

$$V_e(t) = \int U_e(t)dt + C_1,\ S_e(t) = \int V_e(t)dt + C_2,$$

с учетом следующих краевых условий: $S_e(T/2) = L/2;\ S_e(T) = L;\ V_e(T) = 0,$

где $L-$ общее перемещение объекта. Решение полученной системы алгебраических уравнений : $C_1 = C_2 = 0;\ a = 6L/T^2.$

Теперь в данном примере перемещение, скорость и ускорение (управление) принимают вид:

$$Se = \frac{L\,t^2\,(3\,T - 2\,t)}{T^3};\ Ve = \frac{6\,L\,t\,(T-t)}{T^3};\ Ue = \frac{6\,L\,(T-2\,t)}{T^3}.$$

Затраченная на управление энергия $A = 2\int_0^{T/2} U_e V_e \, dt$ и норма мощности $I = \int_0^T U_e{}^2 \, dt$ соответственно равны:

$$A := \frac{1.125000000\, L^2}{T^2}, \quad J = \frac{6\, L^2}{T^3}.$$

3. Управление, найденное реверсионно

Аналитические преобразования выполняются аналогично преобразованиям предыдущего примера. Здесь ускорение (управление), скорость и перемещение:

$$U_e(t) = \frac{10L}{T^5}(T-2t)^3, \; V_e(t) = \frac{10Lt(T-t)(2t^2-2tT+T^2)}{T^5},$$

$$S_e(t) = \frac{Lt^2}{T^3}(5T^3 - 10tT^2 + 10t^2T - 4t^3).$$

Энергия управления и норма мощности:

$$A = \frac{0.7812500000\, L^2}{T^2}, J = \frac{7.142857143\, L^2}{T^3}.$$

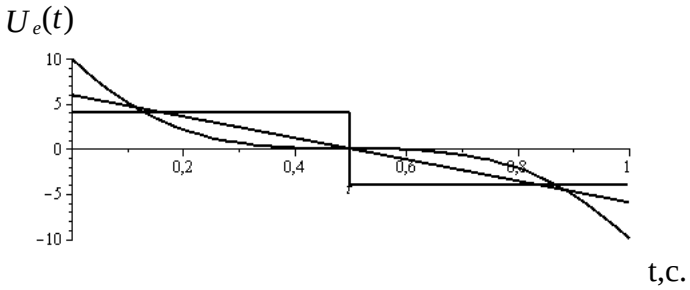


Рис. 1. Графики управлений

На рисунке 1 изображены графики трех типов управлений.

Дальше осуществляется оценка этих управления (для m=1кг., $Se(T) = 1$м., $T = 1$с., Таблица 1) по критериям: затраченной на управление энергии $A = 2\int_0^{T/2} U_e V_e \, dt,$ и нормы мощности $I = \int_0^T U_e{}^2 \, dt.$

Таблица 1 – Сравнения управлений

Тип управления	$A = 2\int_0^{T/2} U_e V_e \, dt$	$I = \int_0^T U_e{}^2 \, dt$
1	4	16
2	2.25	6
3	1.5625	7.1428

Определение времени оптимального движения в случае упругого объекта (с одной степенью свободы)

Дифференциальное уравнение относительного движения без учета сопротивления для оптимального ускорения $U_e(t) = \frac{6L}{T^3}(T-2t)$ имеет вид:

$$\frac{d^2x_r}{dt^2} + k^2 x_r = -U_e(t), \qquad (1)$$

где k – частота собственных колебаний. Общее время движения связано с периодом собственных колебаний: $T = nT_1 = n\dfrac{2\pi}{k}$, где n – параметр, подлежащий определению из системы трансцендентных уравнений. Решение уравнения (1) при нулевых начальных условиях:

$$x_r(t) = \frac{6L}{k^2T^2}\left(-\frac{2}{kT}\cdot\sin(kt)+\cos(kt)-\frac{T-2t}{T}\right),\ v_r(t)=\frac{dx_r}{dt}. \qquad (2)$$

Моментные соотношения $x_r(T)=0$, $\dot{x}_r(T)=0$, после преобразований, приводят к следующей системе трансцендентных уравнений:

$$\pi n\cos(2\pi n)-\sin(2\pi n)+\pi n=0,\qquad \pi n\cos(2\pi n)-\sin(2\pi n)+\pi n=0, \qquad (3)$$

из которой находятся общие корни. На рисунке 2 изображены графики, подтверждающие существование общих корней.

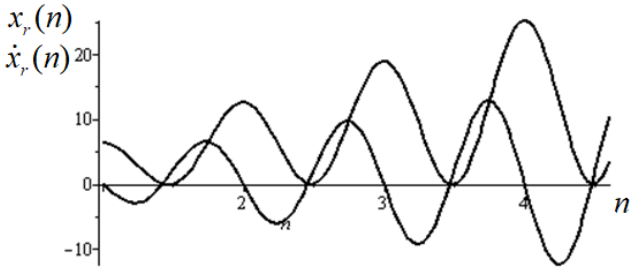


Рис. 2. Графики $x_r(n)$ и $\dot{x}_r(n)$

Выводы. **1.** При реверсионном конструировании управлений **с** увеличением степени полинома затраты энергии на реализацию управлений уменьшаются. Естественно, что нет необходимости в избыточной энергии разгона, которая требует затраты такой же избыточной энергии на торможение. **2.** Как показано в работах [7-10], найденные из системы трансцендентних уравнений (3) общие корни (времена движения) позволяют достичь состояния абсолютного покоя упругого объекта в конце дижения (как суммы относительного и переносного покоя).

Список литературы: 1.Теория автоматического управления. Ч.II. Теория нелинейных специальных систем автоматического управления. Под ред. А.А. Воронова. М.: «Высшая школа», 1997.– 288с. **2.** Галиулин А.С. Методы решения обратных задач динамики/ А.С. Галиулин. – М.: Наука, 1986.–224с. **3.** Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели/ П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1988. – 326 с. **4.** Красовский Н.Н. Игровые задачи о встрече движений / Н.Н. Красовский. – М.: "Наука", 1970. – 420 с. **5.** Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с. **6.** Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic systems in motion / A.I. Bokhonsky, Y. Zolkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011.– 171p. **7.** Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике: Монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская.– Севастополь: СевНТУ, 2012. –212с. **8.** Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; под ред. Бохонского А.И. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с. **9.** Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления. Монография. А.И. Бохонский. Palmarium Academic Publishing. Deutchland/ Германия, 2013 – 77 р. **10.** Бохонский А.И., Реверсионный принцип оптимальности: монография / под общ. ред. А.И. Бохонского. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016 – 174 с

ДОСТИЖЕНИЕ УСЛОВИЯ ЭКСТРЕМУМА ВОСТАНОВЛЕННЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ

Бохонский А. И., Мозолевская Т. В. (*СевГУ, ЧВВМУ им. П.С. Нахимова, г. Севастополь, Россия)*

Abstract. *By the example of a system with one degree of freedom, sufficient conditions for an extremum (minimum) of reversely reconstructed functionals are verified. Attention is paid to the existence of two functionals for one Euler equation. The dependence of functionals on the variation parameter in the field of extremals of functions close to the "skeleton function", which is a solution of the Euler equation, is constructed.*

Key words*: function, Euler equation, functionals, extremum condition of functionals.*

Использованию классических достаточных условий экстремума функционала посвящены работы [1,2] и другие. Анализ непрерывных функционалов в нормированных функциональных пространствах, на которых определен функционал, посвящена работа [3].

Продолжают вызывать интерес полные обратные задачи вариационного исчисления – восстановление функционала по заданной аналитической функции (функция – уравнение Эйлера – функционал) [7,5]. На возможность практических приложений алгоритмо восстановления функционалов («реверсионное исчисление») указано в работах [7,5].

Цель исследования – применение достаточных условий оценки экстремума реверсионно восстановленного функционала.

Процедура восстановления функционала по заданной аналитической функции иллюстрируется на элементарном примере. Задана функция (рис. 1):

$$y(t) = \frac{t}{2} - \frac{t^2}{4}. \tag{1}$$

После преобразований из (1) получено дифференциальное уравнение (m = 1 кг, второй закон Ньютона):

$$\frac{d2y}{dt^2} = -\frac{1}{2}. \tag{2}$$

Из (2), как уравнения Эйлера, следуют два функционала:

$$J_1 = \int_0^T \frac{1}{2}((\frac{dy}{dt})^2 - y)dt, \qquad J_2 = \int_0^T ((\frac{dy}{dt})^2 + \mathrm{t}\frac{dy}{dt})dt. \tag{3}$$

Проверка существования дифференциального уравнения (2) основана на использовании уравнения Эйлера в общем виде:

$$F_y - \frac{d}{dt}F_{\dot{y}} = 0. \tag{4}$$

Функционал J_1 по своему физико-математическому образу является принципом наименьшего действия. Представляет интерес оценка его стационарного значения.

Для обоих функционалов проверка классических достаточных условий экстремума (минимума) возможна с использованием уравнения Якоби, условий Вейерштрасса и Лежандра.

Условие Якоби.

Для функционала J_1 следует уравнение:

$$(F_{yy} - \frac{d}{dr}F_{y\dot{y}})\,\mathrm{u(t)} - \frac{d}{dt}(\mathrm{F}_{\dot{y}\dot{y}} \cdot \dot{\mathrm{u}}) = 0, \tag{5}$$

которое, после вычисления производных, сводится к уравнению:

$$\frac{d}{dt}\left[F_{\dot{y}\dot{y}}\cdot\dot{u}\right]=\dot{u}=0,$$

имеющему решение $u(t)=C_1t+C_2$.

Из условия $u(0) = 0$ следует $C_2 = 0$, т.е. $u(t) = C_1t \neq 0$ при всех $\left[t\in 0;T\right]$. Итак, выполняется достаточное условие экстремума функционала.

Аналогично для функционала $J_2=\int_0^T((\frac{\dot{y}}{2})^2+t\dot{y})dt$ получено $u(t) = C_1t \neq 0$ для $\left[t\in 0;T\right]$.

Условие Вейерштрасса.

Для функционала J_1 условие Вейерштрасса:

$$E(t,y,\dot{y},p)=\frac{\dot{y}^2}{y}-y-(\frac{p^2}{2}-x)-(\dot{y}-p)\,p=(\dot{y}-p)^2\geq 0 \qquad (6)$$

выполняется для точек, близких к точкам на скелетной кривой. Для функционала J_2 условие аналогичное

$$E(t,y,\dot{y},p)=(\dot{y}-p^2)\geq 0\ . \qquad (7)$$

Итак, условия Вейерштрасса минимума функционалов выполняются для J_1 и J_2.

Характерно, что усиленное условие Лежандра для обоих функционалов

$$F_{\dot{y}\dot{y}}=1>0, \qquad (8)$$

что подтверждает существование слабого минимума.

Графическая оценка экстремумов функционалов

В алгоритме используются функции, близкие к «скелетной кривой», которая является решением уравнения Эйлера, т.е. к исходной функции (1). Близость функций обусловлена участием малого параметра, изменяющегося в заданном коридоре поля экстремалей и близостью нулевого порядка. Использована функция

$$y(t)=\frac{t}{2}-\frac{t^2}{4}+(\frac{t}{2}-\frac{t^2}{4})\lambda, \qquad (9)$$

λ – малый параметр, значение которого взяты в пределах $0{,}1\geq\lambda\geq -0{,}1$.

Графики функций $y(t)$, отображающих поле экстремалей при различных значениях параметра λ, изображены на рисунке 2. Средняя кривая соответствует значению $\lambda=0$, т.е. является скелетной кривой.

В соответствии со значениями λ вычислены функционалы, и табличные значения аппроксимированы по способу наименьших квадратов аналитическими функциями вида:

$$J=a\lambda+b\lambda^2-J_0, \qquad (10)$$

где $a, b = const$.

Получены следующие функции:

$$\begin{aligned} J_1^*(\lambda)&=0{,}05\lambda+8{,}33\cdot10^7\cdot\lambda^2-8{,}33\cdot10^7,\\ J_2^*(\lambda)&=-0{,}5\lambda+1{,}67\cdot10^8\cdot\lambda^2-1{,}67\cdot10^8. \end{aligned} \qquad (11)$$

Графики функций (11), которые подтверждают существование минимумов функционалов, изображены на рисунке 3.

Общее время движения, при котором функционалы равны между собой $(J_1(T)=J_2(T))$, найдено с использованием теоремы о равенстве определённых интегралов с различными подынтегральными функциями из уравнения:

$$\int_0^T\frac{1}{2}(\dot{y}^2-y)dt-\int_0^T(\dot{y}^2-t\dot{y})dt=0. \qquad (12)$$

После подстановки (1) в (12) и вычислений, получено уравнение

$$T(4T^2-6T-3)=0, \qquad (13)$$

из которых T=1,8956 с. Для найденного времени движения функционалы численно равны $J_1=J_2=-0{,}09375$.

С увеличением T значения интегралов отличаются ($J_1(T)$ $J_2(T)$), что может свидетельствовать о естественном соответствии функционала J_1 принципу действия.

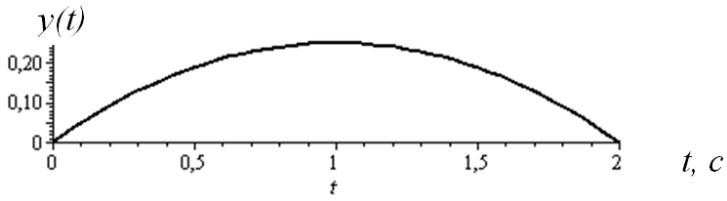


Рис. 1. График исходной функции *y(t)*

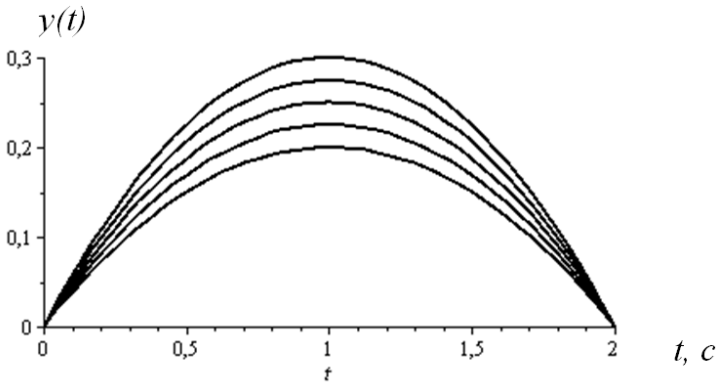


Рис. 2. Поле экстремалей в окрестности «скелетной функции» (средняя кривая)

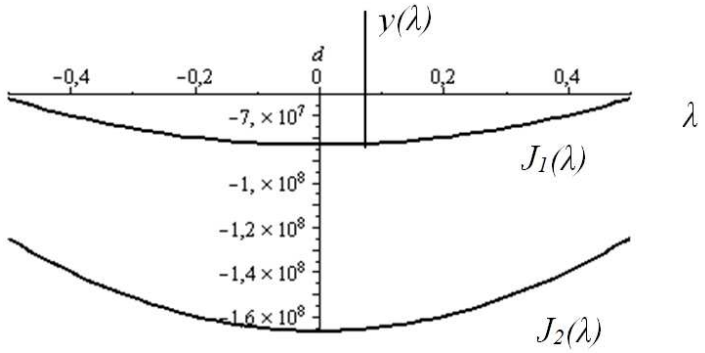


Рис. 3. Графики зависимости функционалов J_1 и J_2 от параметра λ варьирования функции

Выводы.

Пример подтверждает не единственность восстановления функционала по заданной аналитической функции; существует такое значение предела интегрирования T, при котором интегралы численно равны.

Обращено внимание на построение графиков зависимости функционалов от параметра варьирования функций, образующих нормированное функциональное пространство в окрестности «скелетной кривой», являющейся решением уравнения Эйлера. Построенные графики представляют собой дополнение к известным достаточным условиям существования экстремумов функционалов.

Список литературы: 1. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1965. – 424 с. **2.** Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб., пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высшая школа, 2000. – 544 с. **3.** Колмогоров А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – М.: Наука, 1968. – 496 с. **4.** Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационные исчисления / А.И. Бохонский. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 с. **5.** Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФА– М., 2016. – 174 с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ РОТОРНЫХ МАШИН И ЛИНИЙ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0

Буленков Е. А. *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел./Факс: +38 (062) 3010805; E-mail: bulenkov@ukr.net

Abstract: *Technologies of Industry 4.0 are being introduced in all industries and lead to the need to revise approaches to the design of technological machines. The aim of this work is to develop a design methodology for multinomenclature rotary machines and lines that allow them to be adapted to work in Industry 4.0.*
Key words: *Industry 4.0, design, automatic rotor line.*

Внедрение технологий Индустрии 4.0 во все отрасли промышленности приводит к необходимости пересмотра подходов к проектированию технологических машин. Современные клиентоориентированные производства направлены на увеличение числа типоразмеров изделий при одновременном снижении объемов выпуска продукции. При этом, для большого количества изделий, отличающихся только второстепенными элементами и имеющих похожую технологию производства - крепеж, мебельная фурнитура и т. д., использование гибких производственных систем для их изготовления неэффективно из-за доступности более дешевого и более производительного, переналаживаемого и однономенклатурного оборудования. Кроме того, затруднено применение уже отработанных технологий Индустрии 4.0, т.к. в большинстве случаев такое оборудование либо вовсе не содержит цифровых управляющих элементов, либо не подразумевает использование данных высокопроизводительных станков-автоматов в составе цифрового производства. Решением этой проблемы может быть создание гибких производств на основе многономенклатурных роторных линий [3], позволяющих объединить группу серийных производств в многономенклатурное массовое и созданных с учетом их работы с технологиями Индустрии 4.0.

Целью данной работы является разработка методики проектирования многономенклатурных роторных машин и линий, адаптированных для работы в условиях Индустрии 4.0.

Технологии Индустрии 4.0, - большие данные, интернет вещей, виртуальная и дополненная реальность, аддитивные технологии и композитные материалы, печатная электроника, квантовые вычисления, блокчейн и облачные вычисления, - оказывают влияние не только на конструкции технологических машин и способы их взаимодействия друг с другом, но и на технологии производства. Особенно актуален этот вопрос для технологических систем непрерывного действия. Будучи средством комплексной автоматизации производства, многономенклатурные роторные линии позволяют реализовать весь технологический процесс изготовления изделия на одной производственной системе, тем самым существенно сократив затраты времени и средств на межмашинное взаимодействие. Высокая модульность технологических систем непрерывного действия позволяет в полной мере использовать все возможности цифрового проектирования.

Список литературы: 1. Новая технологическая революция: вызовы и возможности для России: экспертно-аналитический доклад.- Москва, 2017. — 136 с**. 2.** Михайлов А. Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем непрерывного действия.- Донецк: ДонНТУ, 2002.- 379. **3.** Буленков Е. А. Разработка технологических процессов изготовления крепежных изделий на многономенклатурных роторных линиях: учебное пособие / Е. А. Буленков.- Донецк: ДонНТУ, 2016. – 126 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИИ НА НАПРЯЖЕНИЕ ТЕКУЧЕСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ТИТАНА ВТ1-0

Бурлаков И.А., Костюков А.А. (*Производственный комплекс «Салют» АО «ОДК», г. Москва, РФ*), **Петров П.А., Бач Ву Чонг (***Московский политехнический университет, г. Москва, РФ*)
E-mail: burlakov-ia@uecrus.com

Abstract. *The problem of finding the relationship of tensile strength and stain and strain velocity of commercial fine-grained titanium VT1-0 at various temperatures is solved. The application of the found relationship in the program QForm had shown a good coincidence of simulated and experimental data.*
Key words: *tensile strength, stain, fine-grained titanium, temperature.*

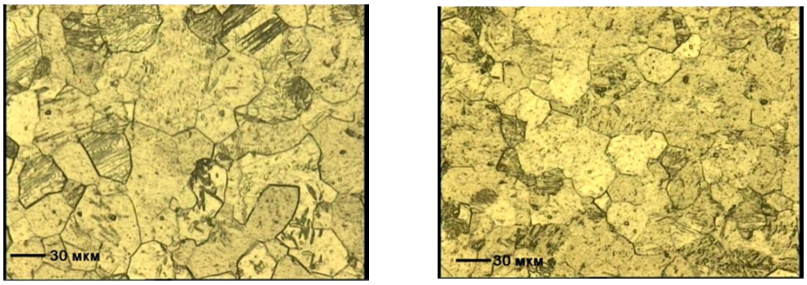
Технически чистый титан и его сплавы в силу их уникальных свойств широко используются во многих отраслях промышленности и, в первую очередь, в авиастроении [1]. Особенности структуры, их физические и химические свойства, относительно низкий удельный вес предопределяют эксплуатационные и технологические свойства, кардинально отличающиеся от других цветных металлов и сталей. Освоение новых областей применения титана и его сплавов, поиск новых технологических способов повышения эксплуатационных характеристик способствуют дальнейшему развитию и все большему распространению этого конструкционного материала [2]. В частности, важной задачей является повышение механических характеристик титановых материалов путем формирования в них заданной мелкозернистой микроструктуры, что позволяет повышать эксплуатационные характеристики изготавливаемых деталей и снижать их массу. К сожалению, в настоящее время отсутствуют реологические свойства таких материалов, что ограничивает область их применения, в частности, из-за отсутствия этих данных в программах по моделированию процессов пластического формообразования заготовок из упомянутых материалов. Авторы настоящей работы сделали попытку частично восполнить этот пробел.

Цель работы. Определить зависимость напряжения текучести от скорости и величины деформаций при комнатных и высоких температурах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **задачи**:

1. Выполнить экспериментальные работы по изготовлению образцов с мелкозернистой структурой.
2. Разработать матрицу активного эксперимента по осадке заготовок с различными температурными и скоростными параметрами.
3. Осуществить осадку образцов в соответствии с матрицей.
4. Выполнить обработку экспериментальных данных и определить в явном виде реологическую модель исследуемого титанового сплава.

Материал и методы исследования. Исследование проводили на образцах из технически чистый титановый сплав марки ВТ1-0, химический состав которого (% (мас.): Fe - 0,25; O - 0,20; Si - 10; C - 0,07; N - 0,04. Структура исходного материала показана на рис. 1. Величина зерна составляет 20 - 40 мкм. С целью повышения прочностных характеристик был применен метод интенсивной ковки, изложенный в работе [3], позволивший получить мелкозернистую структуру с размером зерен 1,5 – 3,0 мкм.



продольное сечение х500 поперечное сечение х500

Рис.1. Микроструктура образца исходного материала ВТ1-0

Испытание на сжатие. Образцы на сжатие изготавливались электроэрозионным методом и имели диаметр и высоту 10 мм. Деформацию осуществляли на испытательных машинах мод. LFM50 и LFM250 при комнатной и повышенных (400, 600 и 800 °С) температурах со скоростями деформирования, обеспечивающими

Рис. 2. Деформированные образцы технического титана ВТ1-0

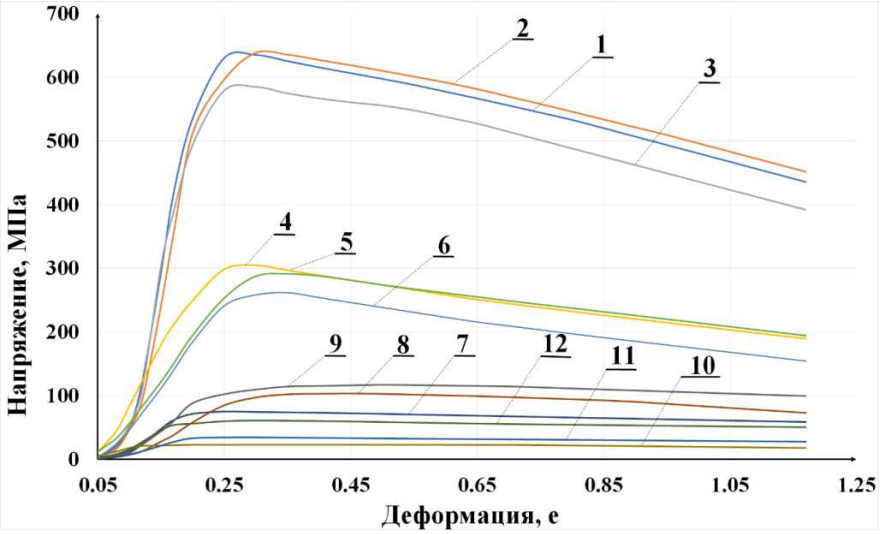


Рис. 3. Зависимость напряжения текучести титана ВТ1-0 от деформации и температуры

1, 2, 3 – при температуре 20° С и скоростях деформаций 0,001; 0,01; 0,1 (сек$^{-1}$),
4, 5, 6 - при температуре 400° С и скоростях деформаций 0,001; 0,01; 0,1 (сек$^{-1}$),
7, 8, 9 - при температуре 600° С и скоростях деформаций 0,001; 0,01; 0,1 (сек$^{-1}$),
10, 11, 12 - при температуре 800° С и скоростях деформаций 0,001; 0,01; 0,1 (сек$^{-1}$)

постоянные скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 10^{-1}$, 10^{-2} и 10^{-3}. Результаты обрабатывались в соответствии с разработанной матрицей активного эксперимента. Образцы после осадки показаны на рис. 2.

Исследование микроструктуры. Металлографические исследования осуществляли на бинокулярном микроскопе “Olympus Delta” с увеличениями 500 и 10000.

Результаты и обсуждение. Как видно из полученных при сжатии диаграмм (рис. 3) их характер резко меняется с повышением температуры. Если при комнатной температуре наблюдается экстремум и снижение напряжения текучести с увеличением деформации, что соответствует результатам исследований других авторов [4 - 5]. С повышением температуры осаживаемых образцов экстремум уменьшается и при температурах 600 и 800 °С практически отсутствует. Это связано, по всей видимости, с изменением структуры титана в ходе горячей деформации, связанной с появлением зубчатости на границах, образованием выступов и языков и последующим формированием новых зерен по исходным границам, что указывает на протекание в титане прерывистой динамической рекристаллизации, что согласуется с исследованиями других авторов [6].

В результате обработки полученных данных была получена реологическая зависимость напряжения текучести σ от величины деформации ε, скорости деформации $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ и температуры металла $T_з$:

$$\sigma = 26.227 + 328.66 \text{Ч} \varepsilon + 0.16115 \text{Ч} T_з + 2387.1 \text{Ч} \dot{\varepsilon} - 0.42287 \text{Ч} \varepsilon \text{Ч} T_з - \\ - 2573.8 \text{Ч} \varepsilon \text{Ч} \dot{\varepsilon} - 4.1523 \text{Ч} T_з \text{Ч} \dot{\varepsilon} + 5.1775 \text{Ч} \varepsilon \text{Ч} T_з \text{Ч} \dot{\varepsilon}$$

Полученная зависимость в графическом виде представлена на рис. 4.

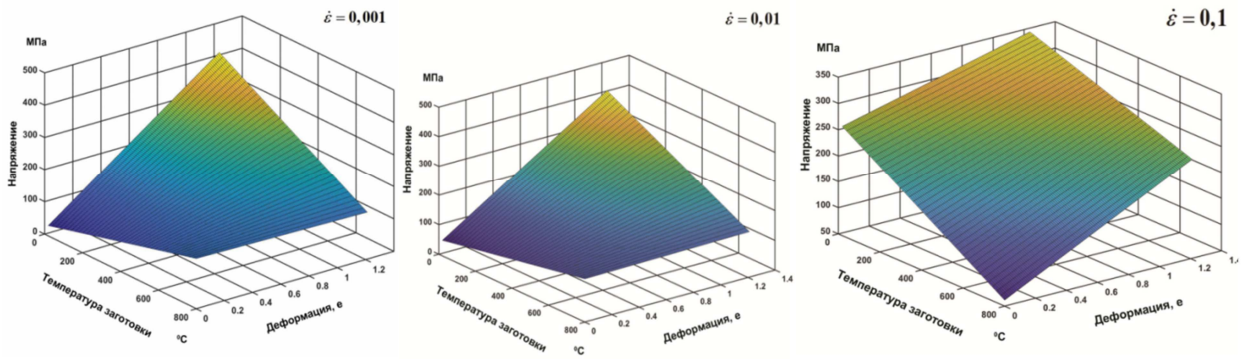
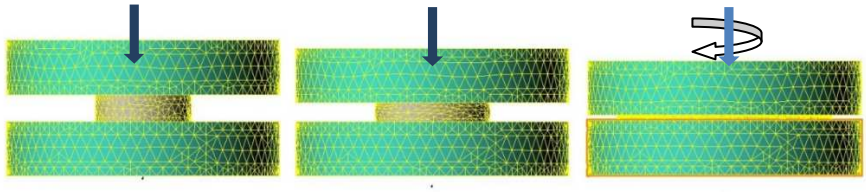


Рис. 4. Зависимости напряжения текучести от величины деформации, скорости деформации и температуры металла



а) б) в)

Рис. 5. Последовательность деформирования цилиндрического образца, где Р – осевая сила, Ω - крутящий момент
а – исходное положение; б – осадка без кручения; в – осадка с кручением

Для экспериментальных исследований и моделирования были выбраны следующие режимы: температура заготовки 20 градусов, температура инструмента 300 градусов, пуансон совершает 2 оборота, скорость осевого перемещения инструмента 1

мм/сек.

Схема формообразования заготовок показана на рис. 5. На рис. 6 показаны образцы, полученные осадкой с кручением (а) и без кручения (б) и результаты моделирования (в и г, соответственно), которые показывают хорошую сходимость результатов.

а) б) в) г)

Рис.6. Деформирование образцов титана и результат моделирования, а – экспериментальная заготовка после осадки с кручением, б – экспериментальная заготовка после осадки без кручения, в – заготовка, полученная моделированием осадки с кручением, г – заготовка, полученная моделированием осадки без кручения

Выводы:

1. Получена реологическая зависимость напряжения текучести от скорости деформации для различных температур и величин деформаций технического титана ВТ1-0 с мелкозернистой структурой, позволяющая пополнить базу данных деформируемых материалов программ для имитационного моделирования процессов обработки давлением и получать более точные результаты расчета.

2. Полученная модель применена при моделировании процесса осадки с кручением и ротационной вытяжки; показала результаты близкие к экспериментальным данным.

3. Результаты имитационного моделирования с применением программы QForm хорошо согласуются с экспериментальными данными.

4. Применение программного продукта QForm VX с применением полученной реологической модели титана ВТ1-0 позволяет достаточно точно моделировать процесс осадки с кручением и без нее.

Список литературы: 1. Е.А. Борисова, Г.А. Бочвар, М.Я. Брун и др. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М., «Металлургия, 1980. 464 с. **2.** Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. М., «Металлургия», 1979. 512 с. **3.** Латыш В.В., Бурлаков И.А., Забельян Д.М., Алимов А.И., Петров П.А., Степанов Б.А., Бач Ву Чонг. Повышение прочности технического титана ВТ1-0 методом интенсивной пластической деформации. «Проблемы машиностроения и надежности машин» № 6, 2018, стр. 54 – 60. **4.** Кандаров И.В. Формирование регламентированной структуры в сплаве ВТ6 для повышения эксплуатационных свойств лопаток газотурбинного двигателя. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Набережные Челны: 2016. 148 с. **5.** И.А. Курзина, И.А. Божко, М.П. Калашников, А.Ю. Ерошенко, Ю.П. Шаркеев. Эволюция структуры и механических свойств ультрамелкозернистого титана. Томск: Материаловедение, № 5, 2010, С. 48-55. **6.** Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб, Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. Уфа, 2013. 376 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСО- И ЗАДИРОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЁВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСИСТЕМ

Бутенко В.И.[1)], **Шаповалов Р.Г.**[2)]
([1)]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
[2)]Южный Федеральный университет, г. Таганрог, Россия)
Тел. +7(8634)371-697; E-mail: shapovalov116@mail.ru

Abstract: *The results of comprehensive studies of wear resistance and scoring resistance characteristics of modified metal layers on the surfaces of parts of tribosystems, obtained by non-abrasive combined treatment, and an explanation from the point of view of atomic-force microscopy. The conditions of creation on the surfaces of the parts of tribosystem modified layers with a structurally rebuilt by the material thickness, ensuring maximum wear resistance and scoring resistance.*
Keywords*: part, surface layer, machining, modification, metalcomponents, friction coefficient, clusters.*

Одним из эффективных способов снижения потерь на трение и повышения износостойкости деталей трибосистем является модифицирование материала поверхностного слоя и создание на них многокомпонентных функциональных слоёв (МФС) различного состава за счёт модификации материала поверхностного слоя [1 – 3]. Перспективным в этом направлении является введение в МФС мелкодисперсных частиц металлов, образующих на поверхностях сопрягаемых деталей кластеры с низкими коэффициентами трения [4]. Для этого могут быть использованы технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин, предусматривающие подачу в зону обработки смазочно-плакировочной композиции, содержащей мелкодисперсные порошки металлов, или технология одновременной безабразивной комбинированной обработки сопряжённых поверхностей деталей с подачей в зону их контакта металлических порошков. Современные исследования механизма действия таких металлоплакировочных слоёв, разработка их составов и технологий применения в трибосистемах базируются на применении известных средств, методов и продуктов нанотехнологий как при обсуждении причин, приводящих к повышению триботехнических свойств МФС [4], так и при управлении их трибологическими характеристиками [2]. Однако отсутствие сравнительного анализа эффективности применения в составах МФС триботехнического назначения металлокомпонентов для обеспечения надёжности и долговечности трибосистем машин и механизмов значительно затрудняет их выбор и сдерживает развитие технологий их создания. В связи с этим проведение сравнительных исследований износо- и задиростойких свойств модифицированных слоёв (МС) поверхностей деталей путём введения них мелко- и ультрадисперсных металлических порошков, а также разработка на их основе новых высокоэффективных МФС являются актуальными и представляют решение важной народнохозяйственной задачи современного машиностроительного производства.

Исследованиям подвергались МС с содержанием таких металлокомпонентов, как медь Cu, цинк Zn, никель Ni и кадмий Cd , созданные на сопряжённых поверхностях деталей трибосистем с использованием технологии безабразивной одновременной комбинированной обработки [5, 6]. В качестве электролитов для создания МС использовались 20-процентные водные растворы солей тех металлокомпонентов, которые в виде мелкодисперсных порошков вводились в зону контакта сопряжённых поверхностей деталей. Плотность тока составляла i = 0,5 А/см^2, начальная шероховатость сопряжённых поверхностей деталей – Ra = 0,40 – 0,63 мкм, время обработки – 10 мин. Были проведены комплексные исследования износо- и задиростойкости МС, являющиеся важными триботехническими характеристиками поверхностного слоя деталей трибосистем. Исследования

проводились на четырёх шариковой машине трения (точечный контакт) с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) по следующим показателям:

– износостойкость МС по диаметру пятен износа на поверхности детали;

– несущая способность поверхностного слоя с МС (по критической нагрузке);

–задиростойкие свойства МС на поверхности детали (по индексу задира).

Антифрикционные свойства МС (по коэффициенту трения) определялись на трибокомплексе Tribotester T-11 (ASTM G99 и DIN 50324) по контакту площадей. Исследования проводились без смазки.

На рис. 1 и 2 представлены гистограммы износо- и задиростойких свойств МС при нагрузке P = 196 Н и времени испытания t = 3300 с, из анализа которых видно, что наилучшие износо- и задиростойкие показатели для принятых режимов трения имеют МС, содержащие в качестве металлокомпонента кадмий (Cd). Исследования несущей и предельной нагрузочной способности различных МС на поверхностях деталей машин в течение t = 20 с (рис. 3) также свидетельствуют о том, что более высокие показатели по несущей и нагрузочной способности имеют те МС, у которых в качестве металлокомпонента был использован кадмий, что хорошо согласуется с результатами исследований, представленными в работе [4].

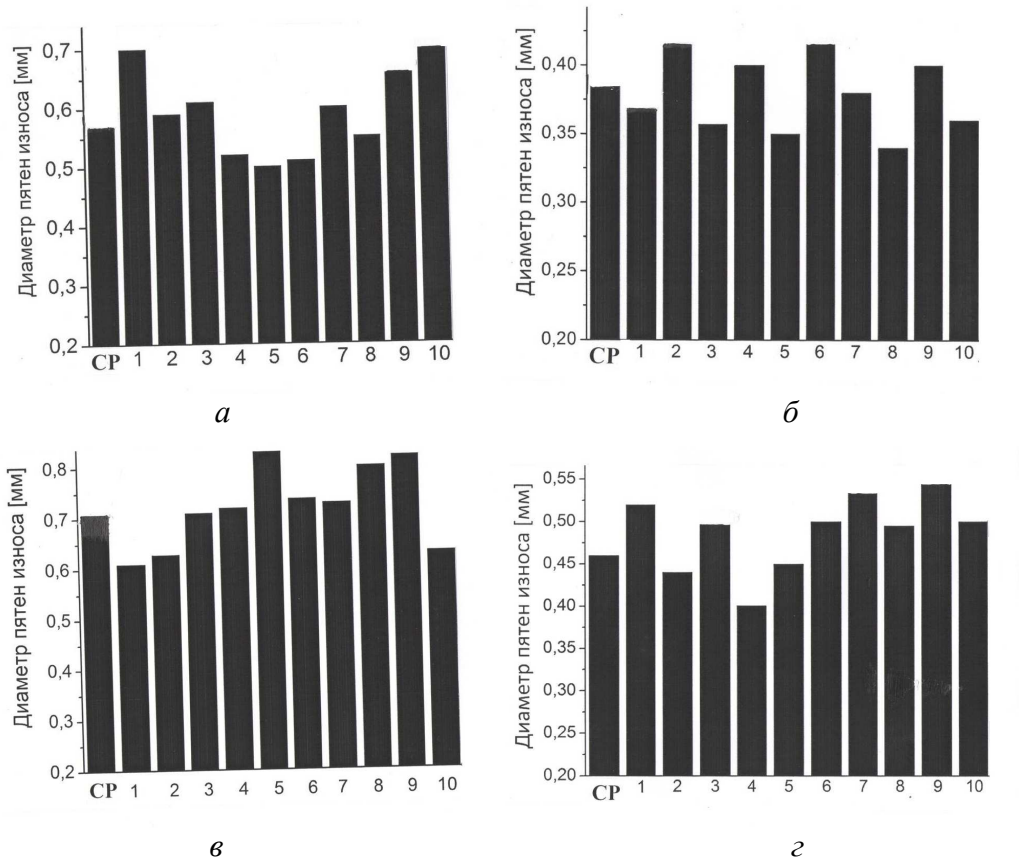


Рис. 1. Гистограммы износостойких свойств МС на поверхностях деталей, содержащих: *а* – Cu; *б* – Cd; *в* – Zn; *г* – Ni (P = 196Н, $V_{ск}$ = 0,2 м/с, t = 3300 с)

Исследования хода эволюции процесса изменения коэффициента трения, как результата антифрикционных свойств различных МС, выполненный на Tribotester T-11 (по контакту площадей) в паре трения «сталь 30ХГСА – сталь 30ХГСА» (рис. 4) на одних и тех же режимах ($V_{ск}$ = 0,2 м/с, p = 1,0МПа) позволили выявить одну и ту же тенденцию: снижение коэффициента трения при наличии на контактирующих поверхностях деталей МС и его рост при отсутствии МС. Такая тенденция может означать, что время эволюции трибосистемы является таким же значимым фактором при определении износо- и задиростойких характеристик МС, как и их значения.

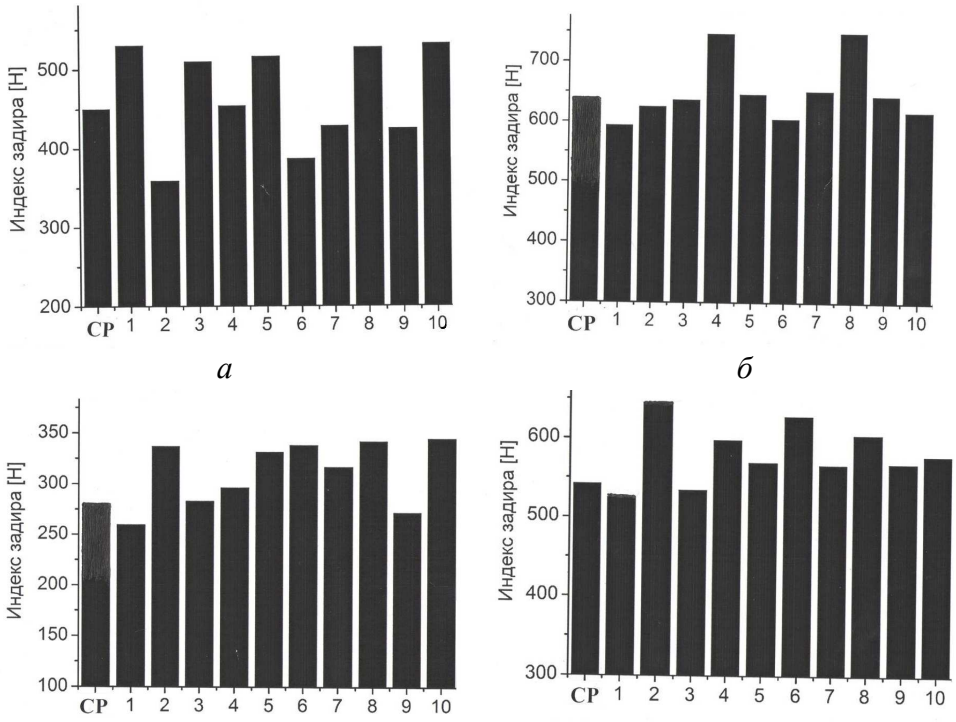


Рис. 2. Задиростойкие свойства МС на поверхностях деталей, содержащих: *а* – Cu; *б* – Zn; *в* – Cd; *г* – Ni (P = 196Н, $V_{ск}$ = 0,2 м/с, t = 3300 с)

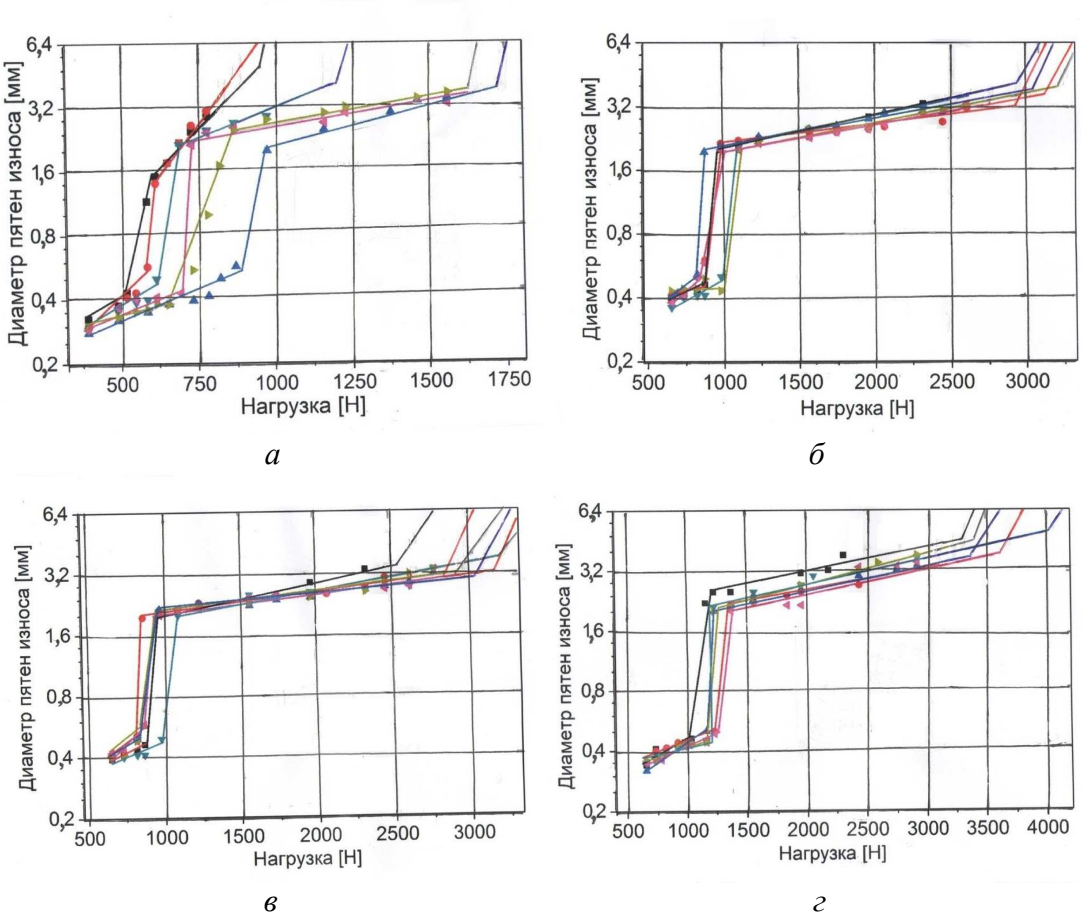


Рис. 3. Несущая и предельная нагрузочная способности МС, содержащей: *а* – Cu; *б* – Zn; *в* – Ni; *г* – Cd (P = 196 Н, $V_{ск}$ = 0,2 м/с, t = 20 с)

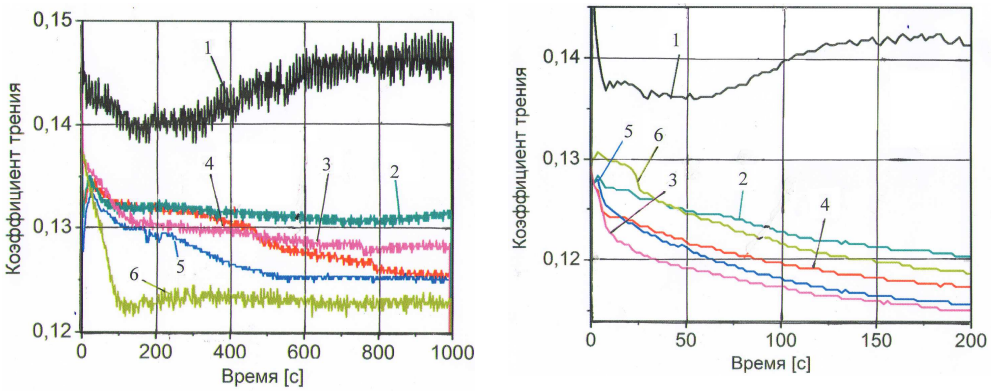
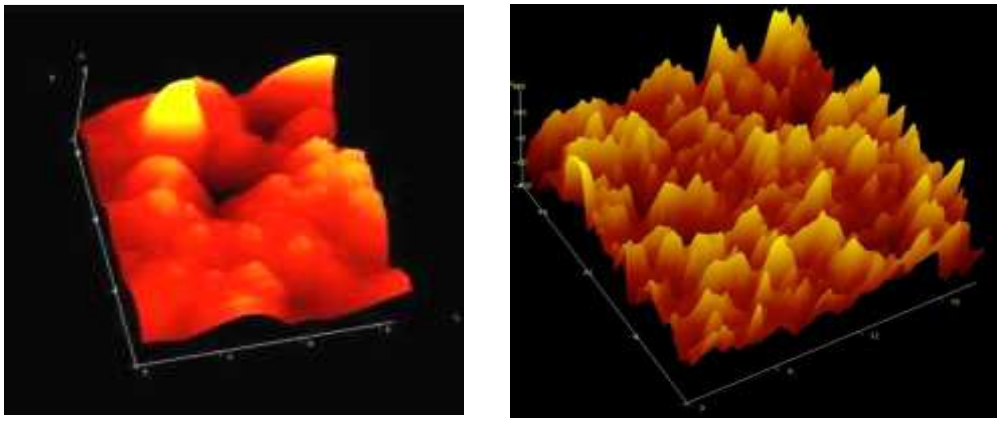


Рис. 4. Эволюция коэффициента трения при испытаниях деталей трибосистем с различными МС (Tribotester T-11, $V_{ск}$ = 0,2 м/с, p = 1,0 МПа): 1 – без МС; 2 – Cu; 3 – Zn; 4 – Cd; 5 – Ni; 6 –



а *б*

Рис. 5. Топография поверхностей деталей по результатам АСМ: *а* – исходная поверхность стали 30ХГСА без МС; *б* – поверхность с МС, содержащем Cu

На рис. 5 приведены топографии исходной поверхности стали (*а*) и поверхности с МС, содержащем мелкодисперсные частицы меди (*б*), выполненные с использованием АСМ, из анализа которых следует, что в процессе трения ультрадисперсные частицы меди формируют на поверхностях трения сопряжённых деталей металлические структуры, обладающие низким коэффициентом трения. Одновременно модифицированные поверхности трения нивелируются, становятся более гладкими с явно выраженной наноструктурой и особенностями микрорельефа в нанодиапазоне. Это приводит к улучшению противоизносных и противозадирных характеристик поверхностей трения деталей и, позволяет успешно решать задачу технологического трибоэкранирования поверхностей деталей трибосистем [7].

Установлено, что наилучшие результаты по износо- и задиростойкости достигаются в случае, если толщина сформированного на поверхности детали МС со структурно перестроенным материалом $h_{пер}$ соответствует величине, определяемой по формуле [3]

$$h_{пер} = C_h^1 HB_c^{a_1} p^{b_1} V_{ск}^{c_1} \theta^{d_1} K, \qquad (1)$$

где $C_h^1, a_1, b_1, c_1, d_1$ – коэффициент и показатели степеней, зависящие от применяемого металлокомпонента; HB_c – микротвёрдость МС, определяемая его составом; p – давление сопряженных поверхностей деталей трибосистем, МПа; $V_{ск}$ – скорость скольжения сопряжённых поверхностей, м/с; Θ – средняя температура в зоне контакта, град. С; K – поправочный коэффициент, учитывающий химический состав материалов сопряжённых деталей: для сталей с содержанием углерода до 0,3% K = 1,1; 0,3 – 0,7% K = 1,0; при содержании в стали углерода более 0,7% K = 1,1.

В табл. 1 приведены значения $C_h^1, a_1, b_1, c_1, d_1$ для случаев использования в качестве металлокомпонентов в МС деталей трибосистем Cu, Zn, Ni, Cd при изменениях режимов трения в следующих диапазонах: p = 0,5 – 2,0 МПа; $V_{ск}$ = 0,1 – 0,5 м/с; Θ = 20 – 100° С.

Таблица 1. Значения коэффициента C_h^1 и показателей степеней a_1, b_1, c_1, d_1 в формуле (1)

Металлокомпонент	C_h^1	a_1	b_1	c_1	d_1
Cu	1,237	0,328	0,849	-0,361	0,537
Zn	1,385	0,364	0,781	-0,296	0,603
Ni	1,428	0,315	0,826	-0,349	0,542
Cd	1,206	0,357	0,853	-0,335	0,504

В случае применения одновременной безабразивной комбинированной обработки сопряжённых поверхностей деталей с подачей в зону их контакта металлических порошков зависимость $h_{пер}$ от режимов обработки имеет вид:

$$h_{пер} = C_h^2 i^{a_2} p^{b_2} t^{c_2} K_ц^{d_2} R_a^{f_2}, \qquad (2)$$

где i – плотность тока, А/см^2; t – время обработки, с; $K_ц$ – концентрация электролита, г/г; R_a – начальная шероховатость сопряжённых поверхностей деталей, мкм.

В табл. 2 приведены значения C_h^2, a_2, b_2, c_2, d_2, f_2 для случаев использования в качестве металлокомпонентов Cu, Zn, Ni, Cd при относительной скорости взаимного перемещения контактируемых поверхностей обрабатываемых деталей v = 0,3 м/с и температуре электролита $\Theta_э$ = 20±1°С.

Таким образом, выполненные исследования и их обсуждение на основе современных представлений о формировании МС на поверхностях деталей позволили выявить наиболее эффективные металлокомпоненты для формирования в материале поверхностного слоя кластеров при создании на поверхностях деталей трибосистем эффективных МС требуемой толщины $h_{пер.}$

Таблица 2. Значения коэффициента C_h^2 и показателей a_2, b_2, c_2, d_2, f_2 в формуле (2)

Металлокомпонент	C_h^2	a_2	b_2	c_2	d_2	f_2
Cu	2,368	1,029	0,214	1,205	1,382	0,471
Zn	2,530	1,103	0,272	1,194	0,948	0,439
Ni	2,429	1,047	0,243	1,097	0,963	0,418
Cd	2,295	1,095	0,226	1,108	1,007	0,425

Список литературы: 1. Бутенко, В.И. Модифицированные и многокомпонентные функциональные слои на поверхностях деталей машин / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издпт. Центр ДГТУ, 2016. – 235 с. **2**. Бутенко, В.И. Наукоёмкие технологии создания высокоресурсных деталей машин / В.И. Бутенко, Д.И. Дуров, Р.Г. Шаповалов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – 404 с. **3**. Бутенко, В.И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем / В.И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с. **4.** Кужаров, А.С. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Часть VIII. Физико-химические и функциональные свойства реметаллизантов современного рынка автохимии / А.С. Кужаров, А.А. Кужаров, Х. Нгуен, А.А. [и др.] // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, №1. – С. 62 – 68. **5**. Клименченков, А.А. Технология контактно-электрохимической обработки / А.А. Клименченков, В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, Ю.Р. Шаров // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2013. – №6. – С. 33 – 36. **6**. Клименченков, А.А. Безабразивная прецизионная обработка сопрягаемых поверхностей запорных устройств / А.А. Клименченков // ССП-2013. – Воронеж: ЦНТИ, 2013. – С. 183 – 185. **7**. Шульга Г.И. Технологическое трибоэкранирование поверхностей деталей трибосистем / Г.И. Шульга, В.И. Бутенко, Л.В. Гусакова // Практика и перспективы развития партнёрства в сфере высшей школы: Материалы 13-го Междунар. науч.-практич. семинара. – Кн. 3. – Таганрог-Донецк: Изд-во ТТИ ЮФУ 2012. – С. 278 – 286.

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И АГРЕГАТОВ

Витренко В.А., Киреев А.Н., Киреева М.А. (*ЛНУ им. В.Даля, г. Луганск*)

Abstract: *The comprehensive method for assessing defects detected in machines and units cast parts by ultrasonic diagnostics, when calibrating the sensitivity for two types of reflectors: flat-bottom cylindrical reflector and spherical reflector has been proposed. The complexity of the method lies in the application of the amplitude-distance-diameter diagrams for the evaluation of defects, and the determination of the type of defect by the two-frequency method.*

Key words: *diagnosis, ultrasonic, non-destructive testing, ultrasonic testing, defect.*

Для повышения эффективности использования машин и агрегатов разработаны методы и средства диагностирования, которые применяют как при их изготовлении и проведении технического обслуживания и ремонтов, так и в качестве самостоятельного технологического процесса. Диагностирование позволяет повысить коэффициент готовности и вероятность безотказной работы машин и агрегатов, снизить трудоемкость и стоимость периодического обслуживания их узлов.

В состав методов тестового диагностирования входят методы неразрушающего контроля [1].

Для выявления внутренних недопустимых несплошностей преимущественно применяются акустические методы неразрушающего контроля [2], среди которых наибольшее распространение получил ультразвуковой эхоимпульсный метод.

Оценка обнаруженных в процессе ультразвукового контроля несплошностей осуществляется путем сравнения амплитуды эхо-сигнала от выявленной несплошности с амплитудой эхо-сигнала от настроечного отражателя. Для настройки дефектоскопа применяются различные типы искусственных отражателей, имитирующих реальные несплошности. Однако их применение имеет свои недостатки [3]. В работах [3, 4] предложены методы безэталонной оценки несплошностей при ультразвуковом контроле.

Искусственным отражателем, имитирующим плоскостную несплошность (трещины, флокены, ликвации, приводящие к нарушению сплошности и др.) является отверстие с плоским дном, ориентированным перпендикулярно оси цилиндра (плоскодонный цилиндрический отражатель). Искусственным отражателем, имитирующим объемную несплошность (пора, раковина, неметаллическое включение и др.) является отверстие с полусферическим дном (сферический отражатель).

Настройка чувствительности осуществляется по одному из отражателей, однако в литых деталях машин и агрегатов, с одинаковой степенью вероятности могут встречаться как плоскостные, так и объемные несплошности. Поэтому в случае контроля литых деталей целесообразно настраивать чувствительность ультразвукового контроля по двум типам отражателей: по плоскодонному цилиндрическому отражателю (ПЦО) и сферическому отражателю (СО).

Был предложен комплексный метод оценки несплошностей при ультразвуковом контроле литых деталей при настройке чувствительности по плоскодонному цилиндрическому отражателю и сферическому отражателю

Сущность предлагаемого метода заключается в следующем:

- При обнаружении в объекте контроля эхо-сигнала от несплошности измеряются следующие характеристики: амплитуда донного сигнала на бездефектном участке объекта контроля, амплитуда эхо-сигнала от несплошности, расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до несплошности.
- Рассчитываются значения амплитуд эхо-сигналов от настроечных ПЦО и СО на расстоянии от поверхности ввода ультразвуковой волны такой же, как и обнаруженная несплошность.
- Производится сравнение значения амплитуды эхо-сигнала от обнаруженной несплошности со значениями амплитуд от настроечных отражателей.
- Если значение амплитуды эхо-сигнала от несплошности больше значений амплитуд эхо-сигналов как от ПЦО, так и от СО, то несплошность классифицируется как дефект.
- Если значение амплитуды эхо-сигнала от несплошности меньше или равна значениям амплитуд эхо-сигналов как от ПЦО, так и от СО, то несплошность классифицируется как допустимая.

Однако может быть ситуация, когда величина амплитуды эхо-сигнала от обнаруженной несплошности будет находиться между значениями амплитуд эхо-сигналов от ПЦО и СО. В данном случае необходимо знать, какой тип несплошности обнаружен. В работе [4] предложен двухчастотный метод дефектометрии, позволяющий определить тип обнаруженной несплошности (объемная или плоскостная) при ручном ультразвуковом контроле эхоимпульсным методом. Метод основан на измерении амплитуд эхо-сигналов от обнаруженной несплошности на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц, расчете коэффициента формы несплошности, и сравнении его с граничными значениями для идеальной плоскостной и идеальной объемной несплошности.

- Следовательно, когда величина амплитуды эхо-сигнала от обнаруженной несплошности находится между значениями амплитуд от ПЦО и СО, дополнительно измеряется амплитуда эхо-сигнала от несплошности и амплитуда донного эхо-сигнала на частоте 5,0 МГц и с помощью двухчастотного метода определяется тип несплошности.
- Далее, зная какой тип несплошности обнаружен, производится сравнение величины амплитуды эхо-сигнала от обнаруженной несплошности на частоте 2,5 МГц с соответствующим значением амплитуды эхо-сигнала (если несплошность плоскостная – то с ПЦО, если объемная – то с СО).
- В случае превышения значения амплитуды от настроечного отражателя – несплошность классифицируется как дефект, в противном случае – несплошность классифицируется как допустимая.

Для автоматизации расчетов применения комплексного метода оценки несплошностей при ультразвуковом контроле литых деталей машин и агрегатов разработан программный продукт NDTRT-25. Окна программного продукта представлены на рис. 1 и 2.

Рис. 1. Окно «Оценка несплошности» программного продукта NDTRT-25

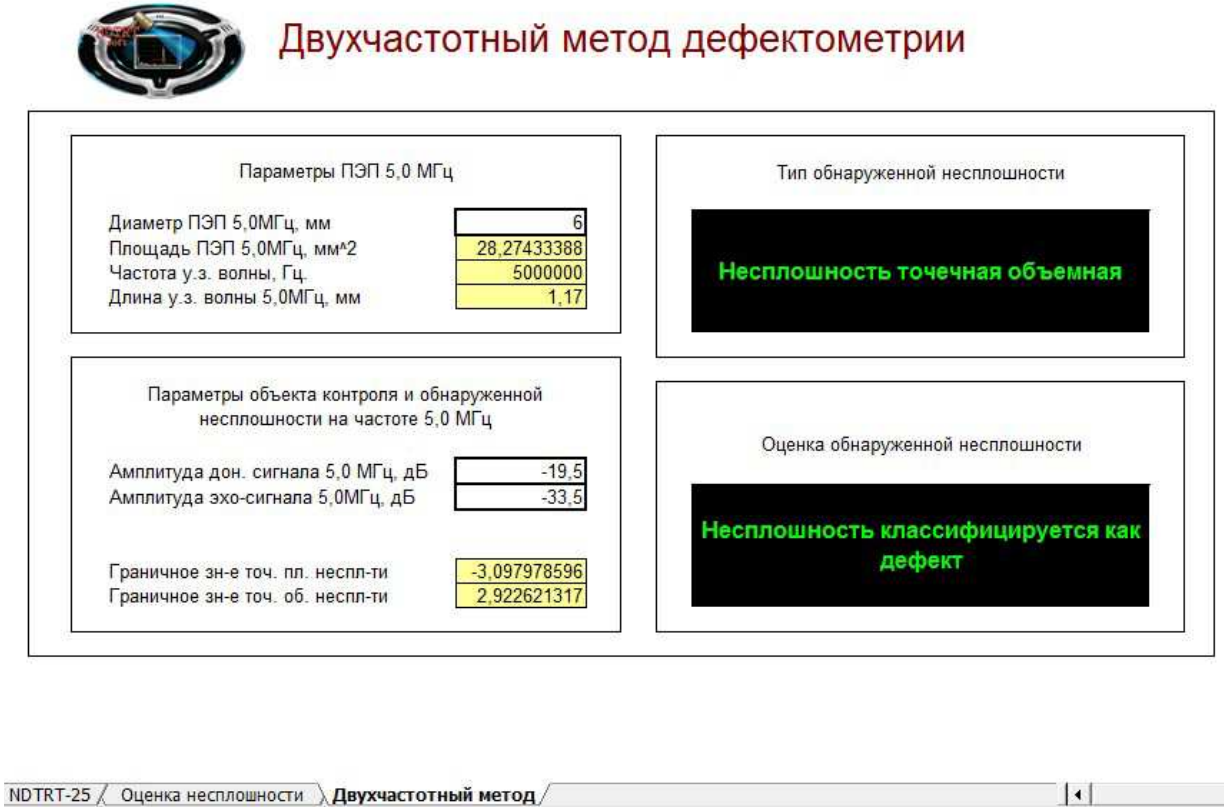


Рис. 2. Окно «Двухчастотный метод» программного продукта NDTRT-25

Список литературы: 1. Киреев А.Н. Диагностика транспортных средств: конспект лекций. – Луганск: изд-во ВНУ им. В.Даля, 2007. – 37 с. **2.** Алешин Н.П. Белый В.Е. – Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989. – 456с. **3.** Киреев А.Н., Витренко В.А. Совершенствование ультразвукового контроля осей колесных пар подвижного состава железных дорог. – Вестник ВНИИЖТ. 2016. Том 75. №2. С. 116-122. **4.** Киреев А.Н. Дефектометрия при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог. Монография. – Луганск: Ноулидж. 2016. – 147с.

ВАРИАНТЫ МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ ДЛЯ УСТАНОВОК КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА СКВАЖИН

Гаврилова Л.А., Чучманова Л.Д.
(ФГБОУ ВО «УГГУ», г. Екатеринбург, РФ)

Abstract: *the article considers the issues of the functional purpose of the delivery mechanisms in installations for the repair of oil wells, the relevance and ways to improve their design, the use of a systematic approach in the design to ensure the quality of the overhaul.*

Установки капитального ремонта нефтяных скважин являются сложной механической системой. Эффективность системы функционирования зависит от согласования конструктивного исполнения, так называемых, «конструктивных параметров», и режимов работы при выполнении различных технологических операций, связанных с видом капитального ремонта скважин, так называемых, «технологических параметров».

Выполнение основных и вспомогательных спуско-подъемных операций (СПО) осуществляется спуско-подъемным комплексом (СПК) установок для ремонта скважин.

Выявление взаимосвязи между конструктивными и технологическими параметрами, их влияние на показатели функционирования сложной системы установки позволяют находить решения повышения эффективности бурового оборудования.

Механизм подачи, участвующий в операциях с перемещением насосно-компрессорных и бурильных труб по оси скважины, является одним из основных механизмов.

Назначение механизмов подачи - регулирование осевой нагрузки на породоразрушающем инструменте и скорости перемещения снаряда в процессе бурения, а также осуществление наращивания бурильной колонны, перекрепление патронов, осевое расхаживание труб, ликвидация прихватов инструмента.

Используя системный подход при проектировании, механизмы подачи можно классифицировать по функциональному назначению элементов их конструкции (табл. 1) [1].

Основные функции механизма подачи:

- создание осевого усилия через колонну труб на забой скважины;
- перемещение механизмов захвата труб и колонны труб при спуске в скважину, как в процессе бурения, так и при спуско-подъемных операциях;
- перемещение механизмов захвата труб и колонны труб при подъеме из скважины;
- обеспечение скорости спуско-подъемных операций;
- восприятие нагрузки от силы тяжести труб (колонны труб) при перемещении по оси скважины.

Традиционно в установках капитального ремонта скважин используется канатный механизм подачи. В канатных механизмах подачи связь привода с подвижным звеном буровой установки осуществляется с помощью каната. Осевая нагрузка на инструмент создаётся весом колонны труб. Вся система механизмов и связей объединена в **талевую систему** буровой установки.

Талевые системы характеризуются максимальной допустимой нагрузкой на крюке, числом рабочих струн каната, его диаметром, кратностью полиспаста.

Основные недостатки канатных механизмов подачи:

- значительные габариты;
- необходимость синхронного регулирования каждой ветви канатов по мере их вытяжки;
- относительная сложность системы привода.

Таблица 1. Функциональная классификация механизмов подачи

Функция	**Исполнительный орган**	**Варианты конструкций**				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Создание и регулирование осевой нагрузки	Регулятор подачи	Тормоз лебёдки	Гидроцилиндр	Двигатели с приводным звеном	Рычаг с грузом	Вес подвижных частей и бурильные трубы
Перемещение вдоль оси скважины и передача осевой нагрузки на бурильные трубы	Подвижное звено с опорным узлом	Подвижный вертлюг	Каретка и корпус вращателя	Траверса и зажимной патрон	Траверса и упорный подшипник	Рольганг или прижимные плашки
Связь между опорным узлом и регулятором подачи	Трансмиссия	Жёсткая			Гибкая	
		Шток (тяга)	вал	рейка	канат	цепь

В связи с увеличением фонда ремонтируемых скважин и проведение работ капитального ремонта к механизмам подачи предъявляют новые требования, что расширяет спектр выполняемых функций.

Механизм подачи должен быть:

- удобным и безопасным в работе, исключая возможность падения колонны;
- обеспечить возможность работы в условиях, затрудненных для схемы с талевой системой, например при наклонном бурении, бурении вторых стволов;
- обеспечивать принудительную подачу инструмента вне зависимости от веса колонны;
- монтироваться на мачте мобильной буровой установки;
- эффективно работать в составе системы верхнего привода (СВП).

Этим требованиям удовлетворяет конструктивная схема с реечным механизмом подачи.

Поэтому в последнее время наметилась тенденция к смещению акцента в сторону реечного (или реечно-шестеренного) механизма подачи.

Эти механизмы в современных станках могут обеспечивать совмещение функции подачи инструмента при бурении и функции СПО. Они могут иметь достаточно большой ход (до 20 метров) и усилие подачи (подъёма) – до 3 000 кН. Как правило, такие механизмы используются в сочетании с подвижными (СВП) и шпиндельными вращателями.

Реечный механизм подачи выполняет те же самые функции, что и талевая система, но дает возможность применения принудительной подачи и, тем самым, создания усилия на забой. Вместо лебедки и талевой системы используется рейка с подвижной шестерней зубчатой передачи, приводимой в действие двигателем.

При реечно-шестерёнчатой подаче (рис. 1) перемещение каретки вращателя *2* вдоль направляющих мачты *5* при бурении и СПО осуществляется за счёт вращения зубчатого колеса *3* (шестерни), приводимого в действие от двигателя *М2* и контактирующего с зубчатой рейкой *4*. Обычно на боковых направляющих мачты устанавлива-

ются две рейки *4*. Колонна бурильных труб *1* вращается вращателем от двигателя *М1* и перемещается при бурении и СПО с помощью механизма подачи. Скорость подачи регулируется путём изменения частоты вращения вала мотора *М2*, а усилие подъёма (подачи) – изменяется путём использования нескольких приводных звеньев (двигатель плюс зубчатое колесо) и увеличением момента на двигателе.

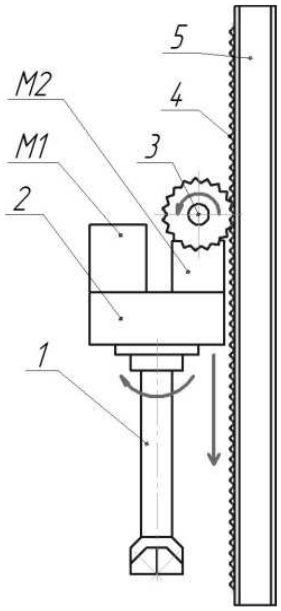


Рис. 1. Реечно-шестерёнчатый механизм подачи

При выборе спуско-подъемного комплекса установки для ремонта скважин, в состав которого входит реечный механизм подачи, были проведены математические исследования различных вариантов конструктивного исполнения.

В качестве объекта выбран универсальный подъемный агрегат для бурения и ремонта скважин УПА-100 грузоподъемностью 1000 кН.

В процессе исследования выбраны следующие направления совершенствования:

- удлинение мачты, связанное с применением СВП;
- замена телескопической мачты на цельную конструкцию;
- расположение рейки по внешней стороне мачты для обеспечения возможности варирования размерами шестерни;
- расположение рейки симметрично с двух сторон мачты для снижения на нее нагрузки;
- применение гидромотора для привода шестерни;
- возможность установки нескольких гидродвигателей с целью снижения нагрузки на шестерню и уменьшения ее размеров.

Моделирование вариантов компоновки механизма подачи для различных условий эксплуатации, связанных с видом капитального ремонта, неразрывно связано с анализом нагрузок, действующих на проектируемые металлоконструкции. Применение программного комплекса АРМ WinMachin значительно упрощает процесс поиска наилучших решений.

Создание методики выбора вариантов компоновки механизма подачи на основе сочетания функционального и прочностного подходов к проектирования позволит находить новые конструкторские решения для обеспечения эффективной работы установки капитального ремонта с системой верхнего привода.

Список литературы: **1.** Порожский К.П., Гаврилова Л.А., Эпштейн В.Е. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин. Часть 2. Вращатели и механизмы подачи буровых установок/ учебно-методический электронный комплекс.- Екатеринбург: УГГУ, 2016.- 68 с. **2.** Гаврилова Л.А. Научно-методологические подходы к совершенствованию бурового оборудования/ Технологическое оборудование для горной и нефтяной промышленности: сборник трудов XVI международной научно-техн. конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека. – Екатеринбург: УГГУ, 2018. – с.176-179.

ВЫБОР СТАЛИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОПРАВКИ ДЛЯ ПРОШИВКИ И ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ БЕСШОВНЫХ ТРУБ

Геворгян Г.А., Воробьев Р.А., Филиппов А.А., Пачурин Г.В. (*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, Россия)*
Тел.: 89065563966; E-mail: pachuringv@mail.ru

Abstract: *Seamless pipes are mainly used in the oil, gas and industrial industry, which places special demands on their reliability and safety. It is very important to select the steel grade and heat treat the mandrels for flashing and cross rolling of seamless pipes in order to ensure the required operational characteristics. The work is devoted to the substantiation of the choice of 4H5MF1S steel and the development of the technological cycle of manufacturing mandrels of increased strength for sheet and transverse-spiral rolling of seamless pipes. The optimal combination of strength and ductility of this steel during heat treatment was established, which includes quenching at 1070 ° C and tempering in the temperature range 650–700 ° C.*

Keywords: *alloyed steels, piercing rolling production, seamless pipes, heat treatment, operational properties.*

Бесшовные трубы в основном используются в нефте– и газодобывающих отраслях, а также в оборонной промышленности, что накладывает на них особые требования к безотказности в работе. Надежность металлоизделий зависит от условий эксплуатации [1-4], природы материала и режима его технологической обработки [5-8] и в значительной мере обусловливается структурой и свойствами применяемых материалов [9-12] и обеспечивается оптимизацией режимов технологических процессов [13-16]. В связи с этим задача выбора марки стали и разработки технологического цикла изготовления оправок повышенной стойкости к физическим и механическим воздействиям для прошивки и поперечно-винтовой прокатки бесшовных труб, с целью обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик, является весьма актуальной.

В процессе изготовления труб центральная часть круглой заготовки, нагретая до заранее определенной температуры, прошивается в прошивном стане, в результате получается полая трубная заготовка, называемая «полой гильзой». Основным инструментом для прошивки отверстия в трубной заготовке является оправка, которая устанавливается на переднем конце стержня. Температура операции прошивки примерно составляет 1200 °С.

Оправки одного и того же диаметра могут многократно использоваться в прошивном стане, но в ходе работы оправка подвергается воздействию высоких температур и высоких контактных давлений, что значительно снижает сроки эксплуатации данного инструмента. Проблема стойкости оправок, обусловленная агрессивными условиями работы, является типичной для всех прошивных станов. Для обеспечения бесперебойной работы трубного производства необходимо поддерживать запас из большого числа оправок, чтобы даже при частой замене оправок не могла возникать их нехватка.

Основными факторами, влияющими на износостойкость прошивных оправок, являются свойства прокатного инструмента и прошиваемого материала (марка стали, твердость, режимы термообработки инструмента и др.); температурные условия работы, распределение температуры по объему инструмента; режим деформации (вытяжка, обжатие перед носком оправки, время прошивки и др.).

В результате циклического температурного воздействия, характеризующегося многократным нагревом и охлаждением оправок, образуются раз-гарные трещины. В процессе работы по мере увеличения количества прокатанных труб, развитие трещин

продолжается, они окисляются вследствие взаимодействия с агрессивной средой смазки и проникают вглубь металла, что в конечном итоге может привести к образованию глубоких трещин, выкрашиванию частиц металла и как следствие выходу оправки из строя [17]. Прошивные оправки, как правило, изготавливаются из штамповых сталей, которые должны отвечать высоким техническим требованиям и иметь определенный комплекс свойств: высокую теплоемкость, жаропрочность, термостойкость (разгаростойкость), вязкость, износо- и окалиностойкость, теплопроводность, прокаливаемость и низкую слипаемость [18].

Целью данной работы является изучение влияния режимов термической обработки стали 4Х5ФМ1С на ее микроструктуру и механические свойства. В работе проведено сравнение свойств сталей марок 4Х5МФ1С, 4Х5В2ФС и 5ХНМ и выбрана оптимальная для производства оправок сталь марки 4Х5МФ1С карбидного класса, обеспечивающая наилучшее сочетание цены и качества. Данная марка стали широко используется для изготовления пресс-форм литья под давлением цинковых, алюминиевых и магниевых сплавов, молотовых и прессовых вставок (сечением до 200-250 мм) при горячем деформировании конструкционных сталей, инструмента для высадки заготовок из легированных конструкционных и жаропрочных материалов на горизонтально-ковочных машинах.

В качестве исходного материала использовался кованый пруток круглого сечения из стали диаметром 60 мм, который с помощью плазменной резке разрезался на штучные заготовки длиной 130 мм. Кованый пруток хорошо подходит для инструментальной стали, так как такой полуфабрикат получается мелкозернистым и равномерным распределением легирующих элементов по всему объему металла. Конечная структура получается равновесной мелкозернистой. Для улучшения условий вторичного захвата и уменьшения разностенности с одного торца заготовки путем сверления в холодном состоянии наносилось зацентровочное углубление диаметром 12 мм и глубиной 7-8 мм. Несоосность заготовки и зацентровочного углубления не превышала 0,15 мм.

Стандартный режим термической обработки для данной стали включает закалку от 1020°С в масле и отпуск при 580°С в масле. Известно, что после такой термической обработки, изделие наравне с высокой твердостью (47-50 HRC) имеет достаточную высокую вязкость (39Дж/см^2) и износостойкость. Наличия такого комплекса механических характеристик позволяет расширить интервал применимости данной стали не только для изготовления инструмента, но и использовать ее как конструкционную, для изготовления деталей машин.

Для выявления микроструктуры в работе использовались азотная кислота 5 см^3, соляная кислота 50см^3 и дистиллированная вода 50 см^3. Исследования проводились на образцах призматической формы с размерами 10х10х55. Данные образцы подвергались закалке от 1070°С в масло и различным режимам отпуска:230, 550, 600, 650, 700, 750 °С, выдержка при отпуске 3 часа. Проводились испытания на растяжение образцов №7 тип II по ГОСТ 1497, на ударную вязкость образцов с U–образным концентратором (тип 8 с высотой рабочего сечения 5 мм) при положительных (+20 ºС) температурах по ГОСТ 9454, микроструктурный анализ образцов, измерение твердости по методу Роквелла.

Установлено, что в интервале температур отпуска 230-550^{o}С твердость практически не изменяется (54,2–52,9 HRC). Начиная с температуры отпуска с 600^{o}С, происходит резкое снижение твердости. При отпуске 600^{o}С твердость равна 47 HRC, при отпуске 750^{o}С-24,3 HRC. Постоянство высокой твердости стали 4Х5МФ1С до 550^{o}С обусловлено ее высокой теплостойкостью. Твердость стали формируется при закалке, а именно при растворении легирующих элементов в аустените. За счет этого, образующийся после закалки легированный мартенсит имеет высокую стойкость

против отпуска. Поэтому в интервале температур отпуска 230-550°С сталь 4Х5МФ1С имеет постоянную и высокую твердость.

С повышением температуры отпуска выше 550°С значение твердости стали снижается из-за выделений карбидной фазы (карбиды типа $Me_{23}C$ и Me_6C), перехода от одного типа карбидов к другому их коагуляции, а также снижения внутренних (закалочных) напряжений. После закалки структура стали состоит из мартенсита и остаточного аустенита. При отпуске на 230 °С значительных изменений в структуре не происходит. Основной структурной составляющей является мартенсит, но результате нагрева до 230°С незначительно увеличивается травимость микрошлифов, что, вероятно, связано с некоторым уменьшением закалочных напряжений.

Существенное повышение травимости образцов наблюдается после отпуска на 550 °С. Матрица имеет грубо игольчатую структуру. Вероятно, при данной температуре отпуска выявление характера структуры мартенсита происходит более четко. Так же необходимо отметить, что после данного отпуска в структуре начинают визуально наблюдаться дисперсные карбидные частицы.

С повышением температуры отпуска на 600°С происходит увеличение количества карбидной фазы, уменьшается степень игольчатости матрицы. Отпуск на 650°С активирует процессы рекристаллизации матрицы, игольчатость не выявляется. Структура состоит из дисперсной феррит-карбидной смеси (троостосорбит отпуска). Дальнейшее повышение температуры отпуска до 750 °С приводит к интенсификации процессов выделения и коагуляции карбидной фазы, микроструктура классифицируется, как сорбит отпуска.

Это свидетельствует о том, что отпуск при температуре не выше 600 °С, для стали 4Х5МФ1С является низким. В данном температурном интервале реализуется первое и второе превращение при отпуске. Микроструктура состоит из мартенсита с твердостью 52–55 HRC. В таком структурном состоянии сталь 4Х5МФ1С имеет максимальные прочностные и минимальные пластические характеристики, что не позволяет ее использовать в качестве конструкционного материала.

Повышение температуры отпуска от 600 до 700 °С приводит к монотонному снижению прочности и увеличению пластичности и вязкости стали. Механические свойства образцов при температурах отпуска 650 и 700°С при этом существенно отличаются от образцов, отпущенных на 600°С.

После отпуска на 650 °С относительное удлинение повысилось с 5,6 до 7,9 %, ударная вязкость повысилась с 11 до 14.8 Дж/см^2 по сравнению с 600 °С. Величина относительного сужения ψ практически не изменилась (14,7–14,9 %). Проведенные металлографические исследования и анализ полученных механических характеристик выявили оптимальное сочетание прочности и пластичности у стали 4Х5МФ1С при термической обработке, включающей в себя закалку от 1070 °С и отпуск в интервале температур 650–700 °С. Выбор температуры отпуска в этом случае зависит от требуемой категории прочности металлоизделия. Температура отпуска 600 °С стали 4Х5МФ1С, используемой в качестве конструкционного материала из-за низкой ударной вязкости и наличия в структуре, унаследованной от мартенсита закалки, игольчатости не рекомендуется.

Выводы.

На основе сравнения свойств сталей марок 4Х5МФ1С, 4Х5В2ФС и 5ХНМ выбрана оптимальная для производства оправок сталь марки 4Х5МФ1С, обеспечивающая наилучшее сочетание цены и качества. Анализ структуры и механических свойств позволили выбрать режим термической обработки для стали 4Х5МФ1С: закалка от 1070 °С в масло и отпуск в течение 2-х часов при температуре

650–700 ^{o}C, что позволяет использовать ее в качестве теплостойкого конструкционного материала для металлоизделий с пределом текучести $\sigma_{0.2}$ от 750 до 1000 МПа.

Список литературы: 1. Воробьев Р.А., Дубинский В.Н., Евстифеева В.В. Оценка трещиностойкости среднеуглеродистой хромоникельмолибденовой стали на основе комплексного исследования изломов, микроструктуры и физико-механических свойств // Физика металлов и металловедение. - 2017. - Т. 118. - № 10. - С. 1065-1071. **2.** Pachurin G.V., Vlasov V.A. Mechanical properties of sheet structural steels at operating temperatures // Metal Science and Heat Treatment. - 2014. - Т. 56. - № 3–4. - S. 219–223. **3.** Guslyakova G.P., Zhbannikov S.I., Pachurin G.V. Fatigue failure resistance of deformed structural steels // Materials Science. - 1993. - Т. 28. - № 2. - S. 182-185. **4.** Пачурин Г.В., Гущин А.Н. Повышение эксплуатационной долговечности металлоизделий технологическими методами // Вестник машиностроения. – 2007. - № 6. – С. 62-65. **5.** Воробьев Р.А., Дубинский В.Н., Сорокина С.А. Влияние исходного состояния заготовки из стали 38ХН3МФА на микроструктуру и механические свойства бесшовных труб // Металлы. - 2017. - № 6. - С. 81-87. **6.** Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А., Матвеев Ю.И., Деев В.Б. Оценка качества стального проката для холодной объемной штамповки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Том 61. - №7. – С. 551-556. **7.** Pachurin G.V., Shevchenko S.M., Mukhina M.V., Kutepova L.I., Smirnova J.V. The Factor of Structure and Mechanical Properties in the Production of Critical Fixing Hardware 38XA // Tribology in Industry. 2016. - Vol. 38, - No. 3 - S. 385-391. **8.** Filippov A.A., Pachurin G.V., Naumov V.I., Kuzmin N.A. Low-Cost Treatment of Rolled Products Used to Make Long High-Strength Bolts // Metallurgist. - 2016. - Vol. 59. - Nos. 9-10. January. - S. 810-815. **9.** Пачурин Г.В. Усталостное разрушение при нормальной температуре предварительно деформированных сплавов. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1990. № 10. - С. 35-38. **10.** Пачурин Г.В. Кинетика усталостного разрушения меди М1 и латуни Л63 // Цветная металлургия. Известия ВУЗов СССР. - 1989. - № 1. - С. 96-101. **11.** Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. - 2008. - Т. 38. - №3. - S. 217-220. **12.** Хлыбов А.А., Воробьев Р.А., Дубинский В.Н. Влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства стали 38ХМ в случае несквозной закалки // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2018. - № 7 (757). - С. 21-26. **13.** Pachurin G.V. Life of Plastically Deformed Corrosion-Resistant Steel // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32. – № 9–10. – S. 661–664. **14.** Пачурин Г.В. Долговечность листовых штампованных материалов на воздухе и в коррозионной среде // Материаловедение. - 2003. № 7. - С. 29-32. **15.** Pachurin G.V., Shevchenko S.M., Filippov A.A., Mukhina M.V., Kuzmin N.A. Defining rolled metal performance for cold bolt upsetting (bolt head). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2018. - 327, 032040 doi:10.1088 / 1757–899X/327/3/032040. **16.** Пачурин Г.В., Гончарова Д.А., Филиппов А.А., Шевченко С.М., Мухина М.В. и др. Development of fatigue test technology of sheet automobile materials // Eastern-european journal of enterprise technologies ISSN 1729-3774. – Vol 5, No 12 (95). – 2018. – S. 31-37: Materials science. UDC 620.169.1 DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144524. **17.** Мишин С.Н. Исследование характера износа оправок стана МРМ и пути повышения срока их эксплуатации // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. - 2016. - № 1. - С. 125-130. **18.** Геллер Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ БЕСКОНЕЧНОГО СОЛЕНОИДА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СТЕРЖНЕМ ПОСТОЯННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

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

Abstract: *The precise solution of a problem on allocation magnetic and electrical fields intensity in space around of the metal cylinder placed inside the infinite solenoid on which the alternating current leaks is received. The solution is received for the Maxwell equations featuring a cylindrical symmetric electromagnetic field outside of the metal cylinder for complex values magnetic and electrical component of an electromagnetic field. Comparison of the received precise solution with approximate is submitted. Their asymptotic convergence is shown.*

Key words: *Maxwell equations, electromagnetic field, intensity, the solenoid, conductance.*

В классической электродинамике известна задача о нахождении распределения напряженности магнитного и электрического полей в пространстве вокруг металлического цилиндра с проводимостью σ, помещённого внутри бесконечного соленоида, по которому течет переменный ток с частотой ω. Задачи такого рода часто приходится решать при проектировании устройств индукционного нагрева металлов и высокочастотных индукционных плазмотронов.

Приближенное решение этой задачи в комплексной постановке имеет вид [1]:

при $R_1 \le r \le R_2$

$$H_z = H_z^a(0)\left[-bei(R_1) + iber(R_1)\right] \tag{1}$$

$$E_\varphi = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} H_z^a(0)\left[bei'\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right) - iber'\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right)\right] \times \frac{R_1}{r} -$$

$$-\frac{\omega}{2rc} H_z^a(0)\left(r^2 - R_1^2\right) \times \left[ber\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right) + ibei\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right)\right]; \tag{2}$$

при $r \ge R_2$

$$E_\varphi = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} H_z^a(0)\left[bei'\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right) - iber'\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right)\right] \times \frac{R_1}{r} -$$

$$-\frac{\omega}{2r_c} H_z^a(0)\left(R_2^2 - R_1^2\right) \times \left[ber\left(\sqrt{\alpha\beta}R_2\right) + ibei\left(\sqrt{\alpha\beta}R_2\right)\right] \tag{3}$$

В этих формулах H_z и E_φ - комплексные амплитуды продольного магнитного и азимутального электрического полей; c – скорость света в пустоте; R_1 - радиус цилиндра; R_2 - радиус соленоида; $H_z^a(0)$ - амплитуда магнитного поля в центре цилиндра; ber и bei функции Кельвина первого рода нулевого порядка; $\alpha = \frac{\omega}{c}$; $\beta = \frac{4\pi\sigma}{c}$. Вне соленоида магнитное поле отсутствует. При этом как с практической, так и с чисто научной точек зрения интересно рассмотреть точное решение данной задачи. Напомним, что для модели металлического цилиндра задача о распределении магнитного и электрического полей внутри него была впервые решена Дж. Дж. Томпсоном в [2].

Полученная Дж. Дж. Томпсоном формула для комплексной напряженности аксиального магнитного поля имеет вид:

$$H_z(r) = H_z^a(0)\left[-bei\left(\sqrt{\alpha\beta}\,r\right) + iber\left(\sqrt{\alpha\beta}\,r\right)\right]; \quad (4)$$

В рамках этой модели распределение азимутального электрического поля внутри цилиндра записывается в виде

$$E_\varphi = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} H_z^a(0)\left[bei'\left(\sqrt{\alpha\beta}r\right) - iber'\left(\sqrt{\alpha\beta}r\right)\right] \quad (5)$$

Дадим теперь точное, а не приближенное решение задачи о распределении электрического и магнитного полей вне металлического цилиндра.

Запишем систему максвелловских уравнений, описывающих цилиндрически симметричное электромагнитное поле вне металлического цилиндра для комплексных значений магнитной $H_z(r,t) = H_z(r)\exp(i\omega t)$ и электрической $E_\varphi(r,t) = E_\varphi(r)\exp(i\omega t)$ компоненты электромагнитного поля. В итоге имеем систему уравнений для комплексных амплитуд $H_z(r)$ и $E_\varphi(r)$:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rE_\varphi\right) = -i\alpha H_z; \quad \frac{\partial H_z}{\partial r} = i\alpha E_\varphi.$$

Повышая порядок системы, получим

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial H_z}{\partial r} - i\alpha\beta H_z = 0; \quad \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial E_\varphi}{\partial r} - \left(i\alpha\beta + \frac{1}{r^2}\right)E_\varphi = 0.$$

Для области $R_2 \ge r \ge R_1$ решение полученной системы уравнений, очевидно, имеет вид:

$$H_z(r) = AI_0(\alpha r) + BK_0(\alpha r); \; E_\varphi(r) = -i\left[AI_1(\alpha r) + BK_1(\alpha r)\right],$$

где $I_{0,1}(x)$ и $K_{0,1}(x)$ —модифицированные функции Бесселя и функции Макдональда нулевого и первого порядка соответственно. Константы A и B находятся тогда из условия сшивания электрического и магнитного полей на границе $R_1 : H_z(-R_1) = H_z(+R_1); \; E_\varphi(-R_1) = E_\varphi(+R_1)$. В результате внутри данной области решение запишется в виде:

$$H_z(r) = \frac{H_z^a(0)}{\Delta}\times$$
$$\times\left\{-\Phi_1(r)bei\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right) - \Psi_1(r)ber'\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right) + i\left[\Phi_1(r)ber\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right)\right] - \Psi_1(r)bei'\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right)\right\}; \quad (6)$$

$$E_\varphi(r) = \frac{H_z^a(0)}{\Delta}\times$$
$$\times\left\{\Phi_2(r)bei'\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right) - \Psi_2(r)ber\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right) - i\left[\Phi_2(r)ber'\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right)\right] + \Psi_2(r)bei\left(\sqrt{\alpha\beta}R_1\right)\right\}, \quad (7)$$

Где $\Phi_1(r) = I_0(r)K_1(R_1) - I_1(R_1)K_0(r); \; \Psi_1(r) = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}\left[I_0(r)K_0(R_1) - I_0(R_1)K_0(r)\right];$

$$\Phi_2(r) = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}\left[I_0(R_1)K_1(r) - I_1(r)K_0(R_1)\right]; \; \Psi_2(r) = \left[I_1(R_1)K_1(r) - I_1(r)K_1(R_1)\right];$$
$$\Delta = \Phi_1(R_1) = \Phi_2(R_1) = I_0(R_1)K_1(R_1) - I_1(R_1)K_0(R_1).$$

Решение же во внешней области соленоида (при $r \ge R_2$) для электрического поля имеет вид: $E_\varphi(r) = CI_1(\alpha r) + DK_1(\alpha r)$. Константа C=0 из очевидных физических соображений, а константу D находим из условия сшивания электрического поля на границе $R_2 : \; E_\varphi(-R_2) = E_\varphi(+R_2)$. В итоге решение в данной области примет вид:

$$E_{\varphi}(r) = E_{\varphi}(R_2) \times \frac{K_1(r)}{K_1(R_2)} = \frac{H_z^a(0)}{\Delta} \times$$

$$\left\{ \Phi_2(R_2) bei'\left(\sqrt{\alpha\beta} R_1\right) - \Psi_2(R_2) ber\left(\sqrt{\alpha\beta} R_1\right) - i\left[\Phi_2(R_2) ber'\left(\sqrt{\alpha\beta} R_1\right)\right] + \Psi_2(R_2) bei\left(\sqrt{\alpha\beta} R_1\right) \right\} \times$$

$$\times \frac{K_1(r)}{K_1(R_2)} \qquad (8)$$

На рис. 1-2 представлены имеющие наибольший практический интерес распределения амплитуды продольного магнитного и азимутального электрического полей, рассчитанные по формулам (6), (7), (8). Здесь же представлены результаты приближенного решения [1], рассчитанные по формулам (1), (2), (3). Также на рис. 1-2 представлены результаты расчетов для решения Дж. Дж. Томсона внутри цилиндра по формулам (4) и (5). Результаты расчетов приведены для случая $H_z^a(0) = 24{,}8$ Э, f=1,76 МГц высокочастотной индукционной установки ВЧИ-11-60, мощностью 60 КВт, R_1=3,3 см, R_2=4 см, описанной в цикле работ [3-7].

Как видно из рис. 1-2. в области $R_1 \le r \le R_2$ точное решение проходит выше приближенного, тем самым, приближенные расчеты распределения электромагнитного поля вблизи соленоида оказываются заниженными в несколько раз по сравнению с точным решением, что должно учитываться при проектировании высокочастотных индукционных установок термического нагрева проводящих сред. При увеличении радиальной координаты оба решения асимптотически приближаются друг к другу, что иллюстрируется рис. 3.

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы специалистами в области высокочастотной индукционной электротермии и проектирования энергетических установок, основанных на принципе индукционного нагрева проводящих сред.

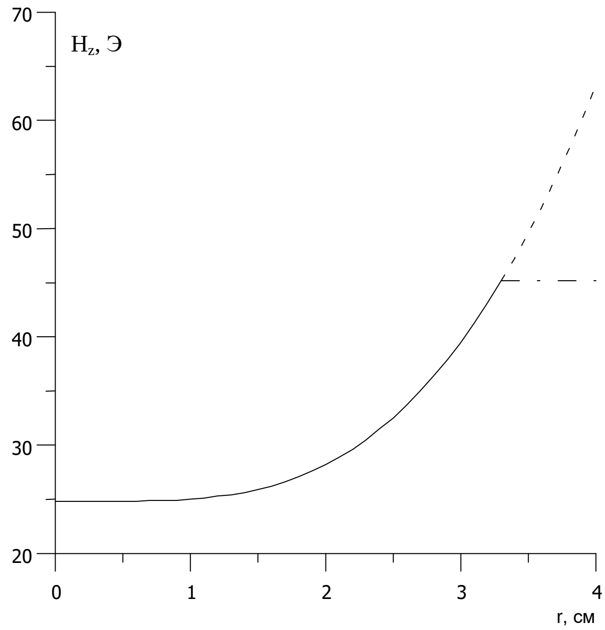


Рис. 1. Радиальное распределение аксиальной составляющей магнитного поля

———————— - решение Томсона (4)

_ . _ . _ . _ . _ . _ - приближенное решение (1)

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ - точное решение (6)

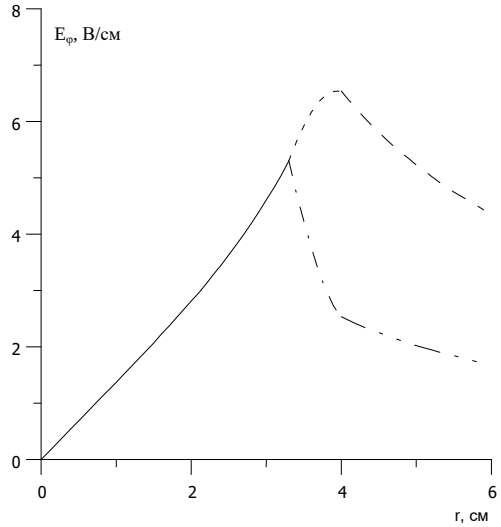


Рис. 2. Радиальное распределение азимутальной составляющей электрического поля

———— - решение Томсона (5)

– · – · – · – · – · – - приближенное решение, расчет по формуле (2)

– – – – – – – – – – - точное решение, расчет по формуле (7)

— · · — · · — · · — · - приближенное решение, расчет по формуле (3)

— — — — — — — - точное решение, расчет по формуле (8)

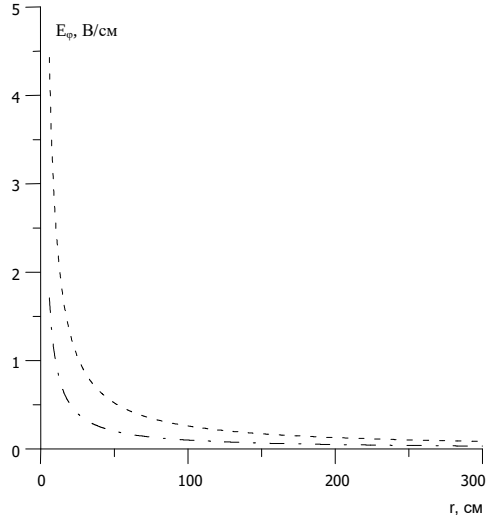


Рис. 3. Асимптотика решений для азимутальной составляющей электрического поля

– · – · – · – · – · – - приближенное решение, расчет по формуле (3)

– – – – – – – – – – - точное решение, расчет по формуле (8)

Список литературы: 1. Топтыгин И.Н. Современная электродинамика, часть 2. Теория электромагнитных явлений в веществе. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 848 с. **2.** Tomson J. J. // Philos. Mag. 1926. V.2 № 9. P.674. **3.** Гайнуллин Р.Н., Герке А.Р., Кирпичников А.П. // Изв. вузов. Физика. 1992. № 6. С.121. **4.** Гайнуллин Р.Н., Герке А.Р., Кирпичников А.П. // ИФЖ. 1995. Т. 6. № 2. С.248. **5.** Гайнуллин Р.Н., Кирпичников А.П.//Известия Вузов. Проблемы энергетики. 2008. №1-2. С. 87. **6.** Гайнуллин Р.Н., Кирпичников А.П.//Прикладная физика. 2008. №5. С. 44. **7.** Гайнуллин Р.Н., Герасимов А.В., Герке А.Р., Кирпичников А.П. Поля температур высокочастотной индукционной плазмы в приосевой области плазменного сгустка. Казань, 2006. 36 с. (Препринт/ Казан. Гос. Технол. Ун-т; ПТ-1.08).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СООСНОСТИ СТАТОРНЫХ УЗЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Герасимова М.С., 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 stator units of gas turbine engines.*
***Key words:** Accuracy, size, technology, machine quality, assembly.*

Повышение требований к точности сборки узлов ГТД привело к тому, что допуски на радиальные и торцевые биения базирующих поверхностей статорных деталей существенно ужесточились. В процессе сборки ГТД, особенно на стадии их освоения, постоянно возникают проблемы с обеспечением соосности осесимметричных корпусных деталей, которые решаются путем повторных сборок и подгонок.

Вследствие неблагоприятного суммирования эксцентриситетов основных и вспомогательных, базовых и исполнительных поверхностей этих деталей и узлов, возникает недопустимая погрешность их центровки, приводящая к отказам в процессе производственных испытаний и эксплуатации ГТД. В одних случаях при сборке должен быть выдержан зазор, обеспечивающий взаимное перемещение деталей, в других – необходимый натяг, обеспечивающий прочность соединения.

При конструировании машин и аппаратов и проектировании технологических процессов их изготовления производят размерный анализ, с помощью которого достигают правильного соотношения взаимосвязанных размеров и определяют допустимые отклонения (допуски). Подобные расчеты выполняют на базе теории размерных цепей [1].

В зависимости от объекта производства, характера продукции, а также точности обработки деталей она может быть достигнута методами взаимозаменяемости, пригонки и регулирования. В силу особенностей конструкции, производственных условий два последних метода больше всего подходят для достижения качества изготовления статора ГТД. При методе пригонки предписанная конструктором точность исходного размера достигается дополнительной обработкой при сборке деталей по одному из заранее намеченных составляющих звеньев размеров цепи. При этом методе детали по всем размерам, входящим в размерную цепь, изготовляют с допусками, экономически приемлемыми для данных условий производства. Чтобы осуществлять пригонку по предварительно выбранному размеру, необходимо по этому размеру предусмотреть припуск, достаточный для компенсации исходного размера. В то же время этот припуск должен быть наименьшим для сокращения объема пригоночных работ.

Способ пригонки можно применять только в единичном и мелкосерийном производствах, когда нельзя использовать иные способы обеспечения требуемой точности замыкающего звена. В них применяют также способ совместной обработки деталей в предварительно собранном виде или установленных в одном приспособлении. По существующей технологии метод пригонки применяется в виде последовательной обработки основных исполнительных поверхностей по мере установки деталей и сборочных единиц высших порядков для обеспечения необходимой точности относительно базовых поверхностей *А* и *Б* (рис. 1).

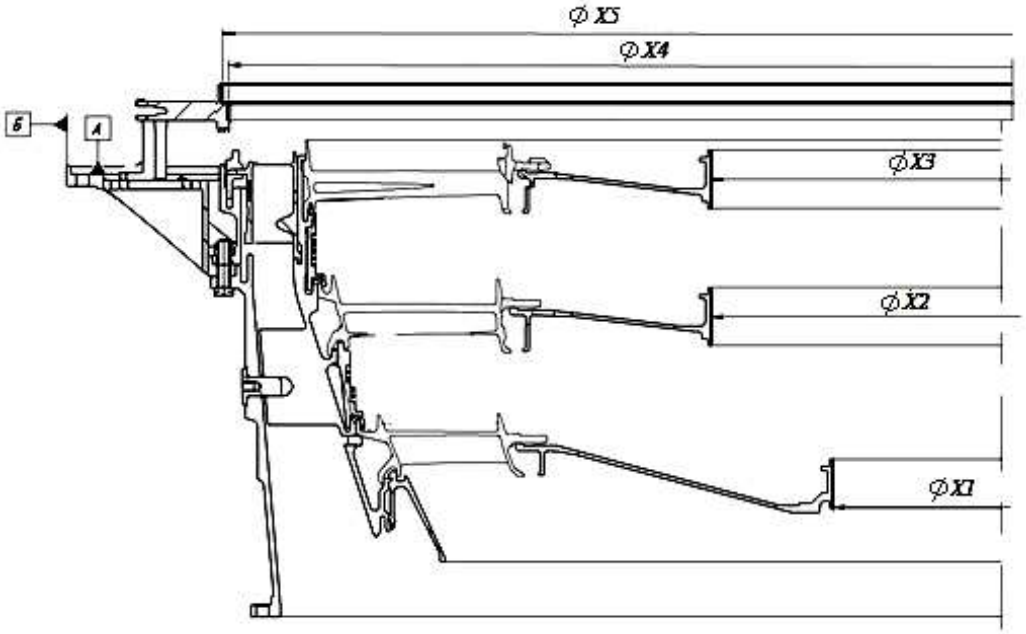


Рис. 1. Схема обработки исполнительных поверхностей лабиринтов силовой турбины

Сущность метода регулирования заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается путем взаимной компенсации погрешностей расположения звеньев за счет изменения расположения деталей друг относительно друга. Для расчетного определения вероятности достижения точности замыкающего звена методом непосредственной установки деталей необходимо использовать анализ размерных цепей, который позволяет выявить взаимосвязь деталей и сборочных единиц, составляющих машину и повысить технологичность сборки конструкции. При анализе роторных узлов необходимо рассматривать векторные размерные цепи, звенья которых определяются не только номинальным (линейным) значением эксцентриситетов поверхностей, но и их угловым положением, т.е. отклонения от соосности цилиндрических поверхностей, радиальное и торцовое биения.

Выделим следующие составляющие погрешности, входящие в состав размерной цепи, отражающей формирование соосности базовых и исполнительных поверхностей лабиринтов силовой турбины E_1 … E_5 (рис. 2). Расчет цепей с векторными звеньями возможен лишь вероятностным методом, поскольку совпадение предельных составляющих погрешностей в одном направлении даже у малоизвестных цепей практически нереально. В этом случае погрешности расположения биений будут находиться на одной оси, а результирующая погрешность E_Δ будет равняться алгебраической сумме составляющих и, в наихудшем варианте, замыкающее звено будет иметь максимальное значение, равное сумме составляющих погрешностей, что неприемлемо.

Формула для вероятностного расчета поля рассеивания E_Δ модуля вектора замыкающего звена размерной цепи имеет вид:

$$E_\Delta = t_B \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \xi_i^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot E_i^2}$$

где t_B – коэффициент риска, функционально связанный с процентом риска P. При P = 0,15%, t_B = 3,6; при P = 0,5%, t_B = 3,25; ξ_i – передаточное отношение для составляющих звеньев цепи (для векторов, расположенных в одной плоскости или параллельных плоскостях ξ_I = 1); λ_i – коэффициент относительного рассеяния модуля вектора составляющего звена, зависящий от закона распределения модуля этого звена.

Используя приведенную зависимость для расчета поля рассеивания E_Δ модуля вектора замыкающего звена размерной цепи, подставив значения допустимых погрешностей, находится вероятностная величина E_Δ, равная 0,37 мм, что является недопустимым для обеспечения качества сборки такого точного узла как статор.

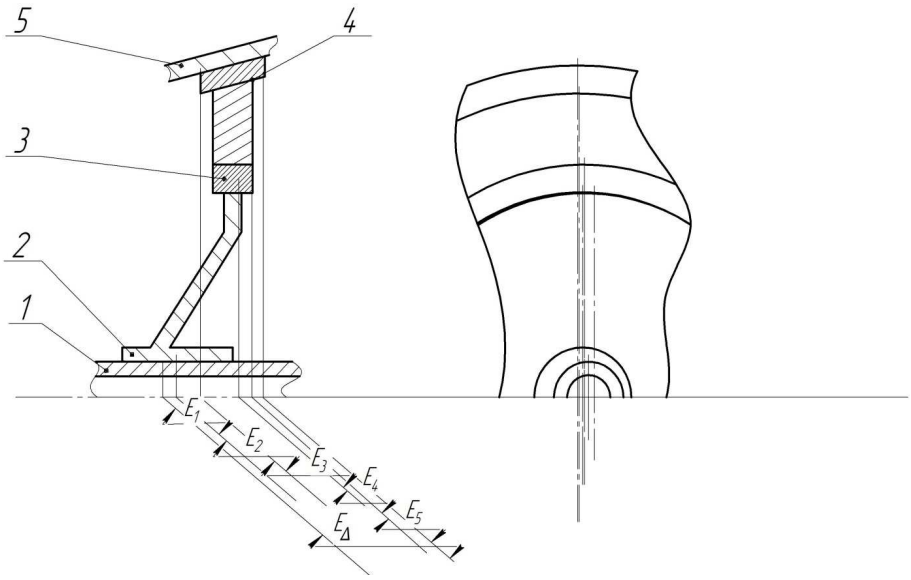


Рис. 2. Схема определения погрешностей расположения базирующих поверхностей силовой турбины

Поэтому сборка, основанная на использовании методов взаимозаменяемости, не может быть применена, следовательно, необходимо применять компенсирующие методы сборки – пригонку или регулировку.

При использовании метода компенсации возможно взаимное поглощение отклонений звеньев E_1… E_5 разных знаков, а величина замыкающего звена может стремиться к нулевому значению (рис. 3).

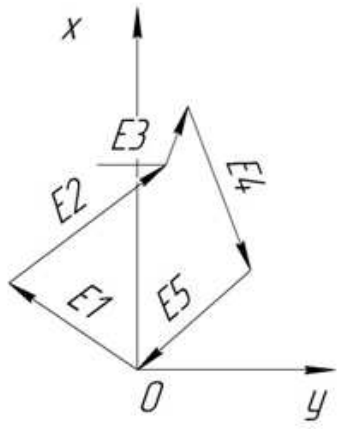


Рис. 3. Схема векторной размерной цепи с безусловным обеспечением точности (E_Δ=0)

Представленная выше технология сборки на основе совместной обработки деталей методом пригонки требует выполнения трудоемких операций по выверке положения деталей, тонкой обработки с тщательной настойкой, не гарантирующей безусловного обеспечения качества.

В этой связи, использование метода компенсирующей сборки, основанного на регулировке углового расположения осесимметричных деталей статорного пакета, может являться более практичным, поскольку не требует применения станочных приспособлений, механической обработки, которая недопустима в сборочных цехах.

Знание фактических отклонений от номинального расположения базирующих и исполнительных поверхностей деталей статорного пакета позволяет рассчитать необходимое взаимное расположение деталей и обеспечить требуемое выходное качество сборки данного и аналогичных узлов.

Список литературы: **1.** Размерный анализ конструкций. Справочник / С. Г. Бондаренко и др. – К.: Техника, 1989. – 150 с.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

[1]Голубев В.С., [1]Вегера И.И., [2]Чернашеюс О.

([1]Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,
[2]Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса, г. Вильнюс, Литва)
E-mail: gvs_fti@mail.ru

Abstract:*The features of the influence of energy parameters and technological factors on the efficiency of surface treatment using laser methods: alloying, modifying, surfacing are investigated.*

Key words: *laser alloying, laser modifying, laser surfacing*

Введение. Оплавление поверхностного слоя при лазерной обработке обеспечивает возможность лазерного легирования, наплавки и модифицирования (как промежуточного процесса между наплавкой и легированием) элементами, наносимыми на поверхность в виде шликерной обмазки, напыленного покрытия, инжекцией порошка в ванну расплава, наведенную лазерным лучом. Процесс лазерного легирования происходит путем конвективного массопереноса в жидкой ванне и диффузионного перераспределения легирующих элементов. Применение лазерного излучения является перспективным также в технологии наплавки износостойких покрытий. При этом обеспечивается высокая прочность сцепления покрытия с основой вследствие частичного проплавления и минимального теплового воздействия на обрабатываемое изделие.

Следует отметить, что большие потенциальные возможности этих методов обработки зачастую сложно реализовать на практике вследствие не всегда верного выбора энергетических характеристик луча, таких как интенсивность излучения, частота импульсов облучения и т.д. Помимо этого, сложности с правильным выборам легирующих и наплавочных материалов, связующих компонентов, отсутствие достаточной информации относительно количественных показателей составов, получаемых физико-механических и эксплуатационных свойств серьезно до сих пор сдерживают развитие процессов лазерного легирования-модифицирования-наплавки, как весьма перспективных способов лазерной поверхностной обработки[1-6].

Методика эксперимента. В рамках данной работы проведено изучение геометрических размеров, качества и структуры поверхностных слоев, создаваемых в результате лазерной обработки легирования-модифицирования-наплавки на образцах на основе металлического порошка марки DIN 1.2083 со средним размером частиц 3 мкм, изготовленных селективным лазерным спеканием (SLS - selective laser sintering) [7], и из стали 40Х. Химический состав порошка в первом случае был следующим: C ~0.4%; Si ≤1%; Mn ≤0.8%; P ~0.03%; S ~0.03%; Cr ~1.3%; Ni ≤0.8%. В качестве легирующих материалов использовались порошки вольфрама и различных химических соединений, таких как W_2B_5, Co_3B, B_4C, TiC, $Cr_{23}C_6$, TiN, $TaSi_2$. Предварительно на поверхности формировали слой, нанося на нее шликерным методом вышеуказанные порошки. Толщина слоя составляла ~100–150 мкм. Дальнейшее увеличение толщины слоя > 300 мкм обычно приводит к большой шероховатости поверхности, появлению трещин и пор.

При лазерном модифицировании и наплавке предварительно на образцы указанных сталей шликерным методом наносили порошок износостойкого состава, содержащего карбиды вольфрама, хрома, бориды и другие тугоплавкие соединения. Для наплавки использовали порошки износостойких сплавов на кобальтовой ПГ-10К-

01 и никелевой основах ПГ – 10Н – 01 и Т – Термо 650 (ПГ – 10Н – 01 + 50% WC). Обработку поверхности проводили с использованием CO_2-лазера непрерывного действия «Комета-2».

Результаты исследований и обсуждение. Установлено, что размеры легированной зоны зависят в основном от энергетических параметров излучения и фокусирующей системы, окружающей газовой атмосферы. При оптимальных режимах обработки вся зона поверхностного легирования может иметь достаточно однородный состав, зависящий в основном от толщины слоя предварительно нанесенного материала ($TaSi_2$, B_4C) и глубины оплавления. В то же время при использовании других порошков в зависимости от режима лазерной обработки в структуре могли наблюдаться нерастворившиеся остаточные включения. При этом микротвердость включений составляла на уровне 16000 – 25000 МПа.

Отметим также, что при лазерном легировании упрочняющие фазы могут иметь свои морфологические особенности. После лазерного воздействия в структуре легированных зон, также как и наплавленных слоев [5], могут присутствовать глобулярные, линейчатые или звездчатые фрагменты. Например, линейчатые фрагменты характерны для карбидов хрома, а звездчатые дендриты - для боридов железа, тогда как глобулярные характерны и для боридов, и для карбидов железа и хрома. Микротвердость в зоне легирования могла достигать 13000-18000 МПа, при этом в зоне легирования могли быть полностью исключены такие дефекты, как поры и трещины. Причем такая картина была более выраженной при обработке в инертной атмосфере.

Особый интерес представляет собой протекание процесса модифицирования поверхностного слоя. По сути, этот процесс происходит при режимах на грани процессов легирования-наплавки. Размеры заглубления в металл основы при этом процессе приблизительно равны толщине наращенного слоя. Общая толщина получаемого слоя составляет порядка 0,2 – 0,3 мм. При этом размеры предварительно наносимой шликерной обмазки такого же порядка ~ 0,2 мм.

С этой целью предварительно нанесенный слой шликерной обмазки из порошкового сплава ПГ – 10К – 01 на кобальтовой основе оплавлялся излучением CO_2 – лазера при различных скоростях сканирования лазерного луча. Обработка проводилась в воздушной атмосфере. Показано, что с увеличением скорости сканирования заглубление в металл основы снижается, а наплавочный материал стягивается с краев под действием сил поверхностного натяжения и постепенно формируется наплавочный валик. При этом постепенно снижаются размеры зон термического влияния (ЗТВ) в материале основы. Так ширина ЗТВ уменьшается с 2,2 мм до 1,25, а глубина с 1,0 мм до 0,5 мм. Наблюдается также, что под действием давления от «паров отдачи» расплав может смещаться за пределы ЗТВ. Максимальная интенсивность лазерного факела при лазерной обработке наблюдалась именно при минимальных скоростях сканирования луча, то есть при максимальных энерговкладах.

Аналогичный эксперимент был проведен с использованием порошков на никелевой основе ПГ – 10Н – 01 и Т – Термо 650. Обработка проводилась как на воздухе, так и в инертной атмосфере – при подаче в зону наплавки аргона. Обнаружено, что в наплавленном материале может присутствовать большое количество пор, что связывается с взаимодействием частиц WC с воздухом, протеканием соответствующих экзотермических реакций, парообразованием. В то же время при обработке в аргоне порообразование менее выражено, чем на воздухе. Тем не менее, при подаче аргона возможен все-таки небольшой подсос воздуха, кроме того в нанесенном самом покрытии сохраняется остаточное количество воздуха. 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 формированию упрочненного слоя. Следует отметить, что в данном случае картина несколько отличается от эксперимента с оплавлением самофлюсующегося порошка ПГ – 10Н – 01. Эти отличия в ходе поведения микротвердости по глубине для различных режимов (скоростей) обработки свидетельствуют также о том, что определенную роль при лазерном воздействии играют коэффициенты поглощения падающего излучения как непосредственно самим порошковым материалом, так и в дальнейшем с началом плавления коэффициенты отражательной способности поверхностей расплава. Что касается порошка Т – Термо 650, представляющего собой механическую смесь самофлюса на никелевой основе и частиц карбида вольфрама, то такой порошок будет заведомо иметь более высокие поглощательные свойства. В дальнейшем при окислении вольфрама должны возрастать и поглощательные свойства поверхности расплава. Все это будет вносить свою специфику в формирующиеся структурно-фазовые состояния поверхностных слоев.

Твердость основы наплавленных валиков из порошков на Ni- основе с увеличением содержания бора и углерода возрастает от 5200 – 5700 до 7900 – 9300 МПа. С использованием электронного микроскопа SEM 515 с приставкой EDAX для элементного анализа было проведено изучение распределения различных элементов по глубине валиков при лазерной наплавке в воздушной атмосфере и в инертной среде – в аргоне. Обнаружено, что при обработке на воздухе наблюдается более неоднородная структура. При этом наиболее крупные включения идентифицируются в первую очередь с вольфрамом, а далее с кремнием и углеродом. Особенно отчетливо это выражено при осуществлении наплавки в атмосфере аргона. Можно предположить, что в порошке Т – Термо 650 помимо непосредственно карбида присутствуют довольно крупные частицы вольфрама. При оплавлении обычного самофлюсующегося порошка с присутствующими в нем добавками бора и кремния происходит их окисление окружающим воздухом. При этом легкие оксиды последних всплывают в виде шлака и в конечном итоге защищают расплав от дальнейшего окисления. В то же время при наплавке в инертной атмосфере - аргоне окисления этих добавок бора и кремния не происходит, и они могут активно взаимодействовать с имеющимися в расплаве частицами вольфрама с образованием соответствующих силицидов или боридов. В этой связи образующиеся при лазерной наплавке в инертной атмосфере слои на основе самофлюсующегося порошка Т – Термо 650 могут обладать повышенным комплексом физико-механических свойств, таких как износостойкость, термостойкость и т.д. Следует также отметить появление железа в зоне наплавки, что связано с подплавлением основы и с перемешиванием с наплавляемым материалом. В то же время концентрация хрома и никеля в наплавленном слое постепенно снижается при приближении к границе наплавки.

Выводы: Отмечено, что лазерная обработка типа легирование-модифицирование-наплавка из обмазок увеличивает разнообразие возможных структур получаемых поверхностных слоев по сравнению с традиционными способами химико-термической обработки. По аналогии с лазерным поверхностным упрочнением сталей в этом случае также наблюдается волнообразный характер изменения микротвердости по сформированным слоям: сформированный слой с измененным химическим составом, закалки в твердой фазе, отпуска и основного металла подложки. В зависимости от поглощенной энергии лазерного излучения меняются глубины слоев и степень упрочнения мартенситно-аустенитной структуры при перекристаллизации. Микротвердость в зоне легирования могла достигать 13000-18000 МПа, при этом в зоне легирования могли быть полностью исключены такие дефекты, как поры и трещины.

Причем такая картина была более выраженной при обработке в инертной атмосфере. Глубина зоны упрочнения уменьшается по мере увеличения линейной скорости перемещения луча, суммарная протяженность зоны термического влияния также уменьшается по мере увеличения скорости обработки.

Установлено влияние рода защитного газа на топологию и твёрдость поверхности сформированной композиции. Лазерная наплавка композиционного порошка на никелевой основе в аргоновой среде по сравнению с воздушной обеспечивает более однородный по высоте и регулярный рельеф поверхности. Более высокая твёрдость имеет место при воздушной защите зоны наплавки. Такая тенденция может быть связана как с формированием твёрдых нитридных и оксидных фаз в процессах взаимодействия ванны расплава с азотом и кислородом при воздушной защите, так и с образованием силицидов вольфрама при обработке в аргоне порошка Т – Термо 650.

В результате выполненной работы показано, что при обработке в аргоне порообразование менее выражено, чем на воздухе. При использовании порошка Т – Термо 650, представляющего собой механическую смесь порошкового самофлюсующегося сплава на никелевой основе и 50% частиц карбида вольфрама, с уменьшением скорости сканирования луча возрастает не только глубина оплавленного слоя, но и его микротвердость. Твердость матрицы в наплавке возрастает по мере растворения упрочняющих фаз и насыщения твердого раствора основы и может достигать 15000-18000 МПа. Плавный характер снижения микротвердости связывается с перемешиванием материала основы с порошком.

Следует считать перспективным применение методов лазерного легирования-модифицирования-наплавки для упрочнения быстроизнашивающихся поверхностей деталей широкой номенклатуры, в частности, для лазерной модификации поверхности изделий, спеченных с помощью SLS технологии дисперсных порошков на основе железа. Глубина упрочненных слоев при модифицировании может составить до 0,2-0,3 мм, при легировании – до 0,7-1,0 мм, при наплавке – до 1,0-1,5 мм. Достигаемые твердости при этом могут быть от 50 до 70 HRC.

Список литературы: 1.Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. − 2006.− 664 с. **2.**Астапчик С.А., Голубев В.С., Маклаков А.Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке — Минск: Белорусская наука, 2008. — 252 с. **3.**Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник/Н.Н. Рыкалин, А.А.Углов, И.В.Зуев, А.Н.Кокора. — М.:Машиностроение,1985. **4.**Технологические лазеры: Справочник: В 2-х том./Г.А. Абильсиитов, В.С. Голубев, В.Г. Гонтарь и др.; Под общ. Ред. Г.А. Абильсиитова. — М.: Машиностроение,1991. **5.**Тарасова Т.В., Кузьмин С.И., Голубев В.С. и др. ”Особенности структуры наплавленных слоев при лазерной обработке”, «Упрочняющие технологии и покрытия. ISSN 1813-1336. Машиностроение, 2010». **6.** Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин/ И.Н. Шило, Г.Ф. Бетеня, Л.А. Маринич, В.С. Голубев - Минск: БГАТУ,2010.–320с. **7.**Маркович В., Межевска Ж.А., Голубев В.С., Чернашеюс О., Индришюнас С., Лукаускаите Р. Лазерная модификация спеченных дисперсных порошков на основе железа. В сб. трудов межд. н.-т. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск,16-18 сентября 2015г., Кн.2,с.330-335.

СЕНСОРНОЕ УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОКАРНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ

Горобец И.А., Ященко А.А. *(ГОУ ВПО ДонНТУ, г.Донецк)*
Тел.: +38 (062) 3010805; E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

Abstract: *Further modernization of CNC machines involves the use of an adaptive control system with sensors to measure the cutting forces of the part. The choice of the place of installation of the sensor in the tool holder is substantiated. A scheme for the design of the sensor and a method for calculating its parameters are proposed.*
Key words: *sensor, force, control, machine, design, technique.*

Развитие технической базы машиностроительных предприятий, использование станков с ЧПУ и станков типа «обрабатывающий центр», внедрение гибких производственных систем существенно сократило вспомогательное время технологических операций и позволило повысить производительность и качество обработки деталей, снизить себестоимость их изготовления[1,2]. Однако в процессе эксплуатации станков с ЧПУ выявлен и существенный недостаток – отсутствие обратной связи между входными и выходными параметрами механической обработки. Ко входным параметрам относятся параметры и особенности конструкции обрабатываемой заготовки (конфигурация, материал, габариты детали), технологические параметры (режимы обработки, припуск и его изменения в процессе обработки детали), параметры обрабатывающей системы (коэффициент жесткости основного технологического оборудования, приспособлений, инструмента, особенности технологической среды). Выходными параметрами являются: качество обрабатываемой поверхности детали, производительность обработки, стойкость и прочность инструмента. Эта задача может быть решена за счет использования адаптивных систем управления станками с ЧПУ, позволяющих учитывать входные и выходные параметры технологического процесса механической обработки деталей [2,3]. Важной частью адаптивной системы является сенсорное устройство, позволяющее проводить измерение мгновенных значений механических усилий и крутящих моментов, реализуемых в процессе обработки заготовки на металлорежущих станках.

Для модернизации токарного станка с ЧПУ, путем оснащения его адаптивной системой управления, было решено разместить сенсорное устройство в механическом узле инструментального резцедержателя, рис.1. Узел состоит из выходного вала 4 со съемной инструментальной головкой (на рисунке не показана), которая связанная с подвижной полумуфтой 6 плоскозубчатой муфты. Поворот резцедержателя осуществляется через червячную пару 1 — 2, кулачковую полумуфту 7, другая половина 8 которой жестко связана с валом 4. В начальный момент движения этой кулачковой муфты вал 4 подается влево, при этом подвижная полумуфта 6 плоскозубчатой муфты отходит от неподвижной полумуфты 8 и резцедержатель осуществляет поворот в нужную позицию, которая определяется при нажиме кулачка 10 на соответствующий конечный выключатель 9. Затем происходит реверс двигателя, и полумуфта 7 вращается в другую сторону, при этом полумуфта 6 с инструментальной головкой удерживается от поворота фиксатором. Кулачки полумуфты 7 упираются в кулачки полумуфты 8, пружина 5 сжимается, и полумуфта 6 фиксируется на зубьях полумуфты 8. Конечный выключатель зажима подает команду, электродвигатель поворота отключается и начинается рабочий цикл обработки.

Контроль параметров мгновенных величин усилия резания в системе адаптивного управления планируется осуществлять с помощью специальных сенсорных устройств [3]. Поскольку сенсорное устройство для измерения силы резания необходимо устанавливать, как можно ближе к месту их возникновения, то в этом случае целесообразно конструкцию сенсорных устройств выполнить в виде втулок и расположить на опорах вала 4 (рис.1)

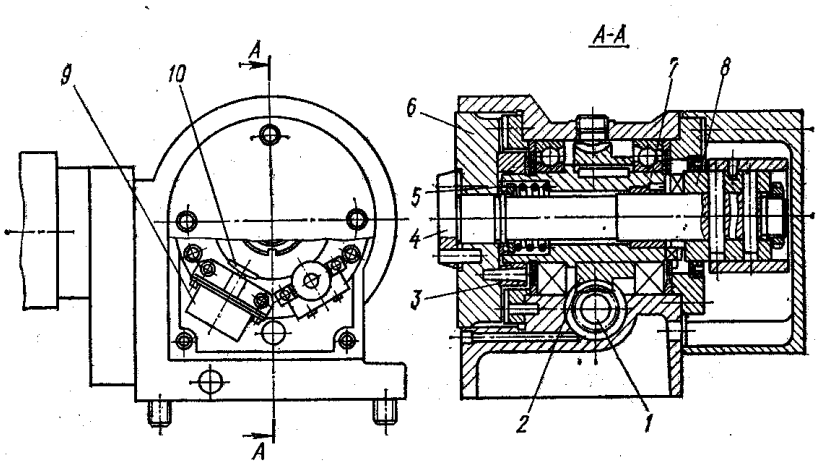


Рис. 1. Вид резцедержателя токарного станка модели 16К20ФЗ

Рассмотрим конструктивные параметры сенсорных устройств, расположенных в месте опор вала поворотного резцедержателя. Учитывая особенности конструкции (рис.2) и выразив наружный диаметр кольца сенсорного устройства через внутренний, с учетом толщины стенки δ, получим зависимость для расчета толщины стенки сенсора:

$$\pi\delta^3 + 2\pi r\delta^2 + \pi r^2\delta - W = 0 \qquad (1)$$

где δ – толщина стенки сенсорного устройства, r=0,5D – радиус поверхности втулки, W – момент сопротивления сенсора.

$$W = M_и/[\sigma]_и, \qquad (2)$$

где $[\sigma]_и$ - допускаемое по чувствительности датчиков напряжения изгиба материала кольца сенсора, $M_и$ – изгибающий момент, действующий на сенсор.

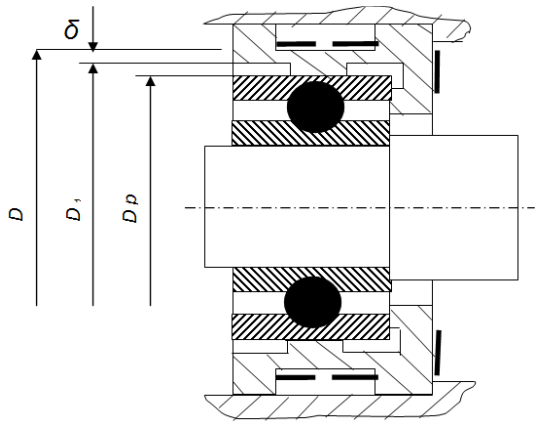


Рис. 2. Схема конструкции и расположения сенсорного устройства

В результате получаем нелинейное уравнение 3 степени относительно δ, решением которого возможно определение конструктивных параметров сенсорного устройства адаптивной системы управления станком с ЧПУ.

3D – модель конструкции сенсорного устройства приведена на рис.3.

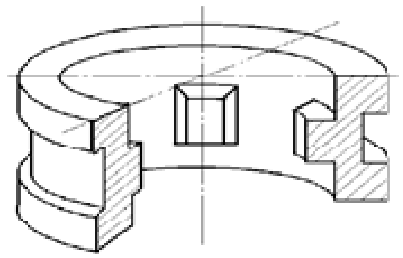


Рис. 3. 3D – модель конструкции сенсорного устройства

Выводы. Дальнейшая модернизация станков с ЧПУ предполагает наличия адаптивной системы управления, включающей сенсорные устройства для измерения мгновенных механических усилий резания заготовки. Одним из вариантов установки таких сенсоров является резцедержатель станка. Обоснован выбор места установки сенсора в резцедержателе станка, предложена схема конструкции сенсорного устройства и методика расчета его конструктивных параметров.

Список литературы: 1. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С. В. Грубый. — Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 149с. **2.** Gorobec I., Golubov N. Adaptronsysteme in der Werkzeugmaschine für die spanabhebende Formung – Entwicklungsmethoden und Entwicklungsprozesse im Maschinenbau. 5 Magdeburger Maschinenbau-Tage.- Berlin, Logos-Verl.,2001,-S.45-51**. 3.** Горобец И.А., Ященко А.А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ - ИНЖЕНЕР: Студенческий научно – технический журнал / Донецк: ДонНТУ, 2018, № 1(25) - 2(26). - С.3-5. **4.** Gorobez I., Navka I., Lapajeva I., Schaban K. Die Parameter der Adaptronsysteme der Drehmaschinen – Modern Technologies, Quality and Restructuring International Conference N.C.M.R – Bulletin of the Politechnic institute of Jassy, Iassy, Romania 23-25 of May 2002 , Vol. XLVIII - S.100-104.

ОГНЕУПОРНЫЕ ВИБРОЛИТЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ СОДЕРЖАЩИХ ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ И ФОСФАТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Гусаров С.В., Подболотов К.Б., Хорт Н.А. *(ФТИ НАН Беларусь, г. Минск, Беларусь)*
Тел./Факс:+375(017)36998762; E-mail: husarausv@mail.ru

Abstract: *The research results of refractory materials based on the systems containing aluminum silicate fireclay, mullite-containing wastes, fireclay and phosphoric acid are given. The relationship between physical-chemical and strength properties of materials on their quantitative content and temperature of burning is determined. It is determined that optimum component content of fireclay and mullite-containing wastes is 0-5 % and 25-35 %, respectively. The samples obtained from this composition at the burning temperature of 1300 °C has the density of 1930-1970 kg/m^3, accessible porosity of 23,3-25,2 %, compression ultimate resistance of 32,0-42,1 MPa and water absorption of 11,7-13,3 %.*
Keywords: *refractory materials, mullite-containing wastes, aluminum silicate fireclay, fireclay, strength, density.*

Введение

В настоящее время огнеупорные материалы применяются почти во всех отраслях промышленности. В машиностроении огнеупорные материалы в основном используются в нагревательных и термических печах, для футеровок тепловых агрегатов, при производстве черных и цветных металлов и сплавов.

Огнеупоры классифицируют по общим, специальным и дополнительным признакам. К общим признакам относятся: химико-минералогический состав; огнеупорность; пористость; область применения. К специальным признакам относятся: способ формования; тип связки; способ термической обработки. Основу большинства видов огнеупорных материалов составляют тугоплавкие оксиды SiO_2, Al_2O_3, Cr_2O_3, CaO, ZrO_2, MgO. Изготовленные из этих оксидов изделия по химико-минералогическому составу подразделяются на 15 типов и 37 групп (ГОСТ 28874). Наиболее распространенные типы огнеупоров являются алюмосиликатные и глиноземистые.

По способу формования огнеупорные изделия различают: полусухого прессования, пластического формования, горячепрессованные, литые, плавленолитые, вибролитые. Формование огнеупорных изделий преимущественно производится способами полусухого прессования и вибролитья. Изделия, полученные методом прессования, имеют наибольшую механическую прочность, однако данный метод применим только при формовании изделий простой формы. Для изготовления изделий сложной геометрической формы целесообразно применять метод вибролитья, он не требует наличия сложного и дорогостоящего оборудования, пресс-форм и т.п. Суть данной технологии заключается в ведении в состав смеси ограниченного количества различных видов связующих, что при механическом воздействии способствует приданию ей тиксотропных свойств [1]. Неформованные огнеупорные материалы применяются в виде огнеупорных бетонов, пластических и набивных масс, огнеупорных растворов и мертелей, для создания монолитных футеровок и ремонта тепловых агрегатов. Преимуществом неформованных огнеупорных материалов является возможность получить конечное изделие без швов с однородной структурой, а также создание заданного фазового состава в процессе эксплуатации [2].

При изготовлении огнеупорного изделия используют заполнители, вяжущие и тонкомолотые добавки. Заполнитель является важным компонентом и во многом определяет свойства изделия. В качестве заполнителей применяют обожженные и необожженные горные породы, искусственные материалы, а также вторичные продукты,

имеющие огнеупорность не менее 1580 °С. Наиболее доступным и распространённым заполнителем при производстве огнеупоров является шамот. В зависимости от процентного содержания $A1_2O_3$ огнеупоры подразделяются на: шамотные (28-45 % $A1_2O_3$, 50-70 % SiO_2); муллитокремнеземистые (45-62 % $A1_2O_3$); муллитовые (62-72 % $A1_2O_3$); муллитокорундовые (72-90 % $A1_2O_3$); высокоглиноземистые корундовые (свыше 95 % $A1_2O_3$). С увеличением содержания Al_2O_3 огнеупорность изделий возрастает, повышается химическая стойкость против кислых и щелочных расплавов. Шамотные огнеупоры применяют для футеровки доменных, нагревательных и обжиговых печей, а также сталеразливочных ковшей. Неформованные шамотные огнеупоры применяют в виде мертелей, набивных масс, порошков, заполнителей бетонов при футеровке и ремонте тепловых агрегатов. Высокоглиноземистые огнеупоры в основном применяются в печах с рабочей температурой 1400-1500 °С, при непрерывной разливке стали, а также как заполнители огнеупорных бетонов и мертелей. Из высокоглиноземистого корундового материала изготавливают тигли, так как высокие характеристики этого материала позволяют использовать его в работе с жидкими металлами и шлаками, расплавленным стеклом, кислотами и щелочами.

В производстве огнеупорных изделий используют вяжущие гидравлические, воздушные и химического твердения [3]. При выборе вяжущего учитывают предельную температуру его применения, а также с каким заполнителем оно будет использовано. Для изготовления шамотных огнеупоров используют вяжущие химического твердения (ортофосфорная кислота, алюмофосфатная связка). Применение алюмофосфатных связок позволяет получать более высококачественные огнеупоры. Качество огнеупоров определяется их способностью не разрушаться под действием высоких температур и физико-химических процессов, проходящих в печах. Однако в связи с применением дополнительного технологического процесса для приготовления алюмофосфатной связки такие огнеупоры имеют высокую стоимость. Шамотные бетоны на ортофосфорной кислоте после сушки имеют низкую прочность и высокую пористость. Введение в смесь глины повышает прочность и плотность огнеупора, уменьшает его усадку, а также облегчает формование [4]. Тонкомолотые добавки в основном вводятся для повышения свойств огнеупоров.

При получении вибролитых огнеупоров на основе фосфатных связующих процесс формирования структуры при нагреве условно состоит из трех последовательно взаимосвязанных процессов: а) твердение происходящее при низких температурах (до 300 °С); б) упрочнение (300-1000 °С); в) спекание (свыше 1000 °С). Процесс твердения обусловлен химическим взаимодействием компонентов, перекристаллизацией химических соединений либо гидратацией компонентов [5]. Для огнеупоров должно преобладать химическое либо перекристаллизационное твердение компонентов, приводящее к упрочнению огнеупорного изделия при средних температурах [6]. После спекания у огнеупоров должна образоваться необходимая структура и достигнуты максимальное постоянство объема и высокая механическая прочность.

На данный момент в Республике Беларусь нет специализированных производств огнеупорных изделий, и предприятия вынуждены использовать импортную продукцию. В связи с этим одним из важных направлений в производстве огнеупорных материалов является разработка технологии получения огнеупорных материалов с минимальными материальными затратами на сырье и энергоресурсы.

Методика работы

Для получения огнеупорных материалов применяли следующие компоненты: шамот марки ША, муллитсодержащие отходы, огнеупорную глину марки ПГБ, ортофосфорную кислоту (ГОСТ 6552). Алюмосиликатный шамот использовали непрерыв-

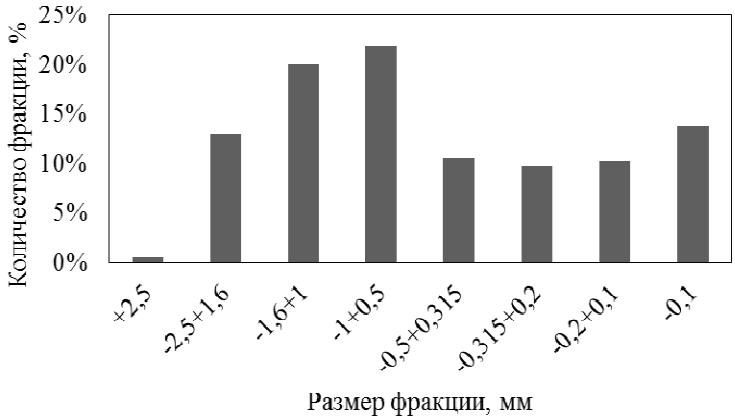


Рис. 1. Фракционный состав алюмосиликатного шамота

ного гранулометрического состава (полифракционный). Исследования гранулометрического состава шамота представлены на рисунке 1.

В качестве вторичного сырья использовали отходы машиностроительной отрасли в виде боя форм для отливки жаропрочных сплавов. Бой измельчали в лабораторной мельнице до прохождения через сито с ячейкой 0,315 мм. По данным рентгенофазового анализа материал состоит из муллита ($Al_6Si_2O_{13}$), примеси оксида кремния (SiO_2), а также отмечается присутствие аморфной фазы (рисунок 2).

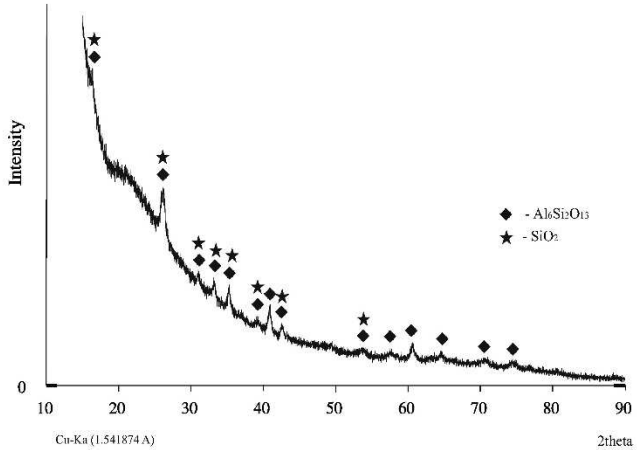


Рис. 2. Дифрактограмма муллитсодержих отходов

Структура материала представлена игольчатыми образованиями фазы муллита и зернами оксида кремния сцементированными аморфной составляющей (рисунок 3).

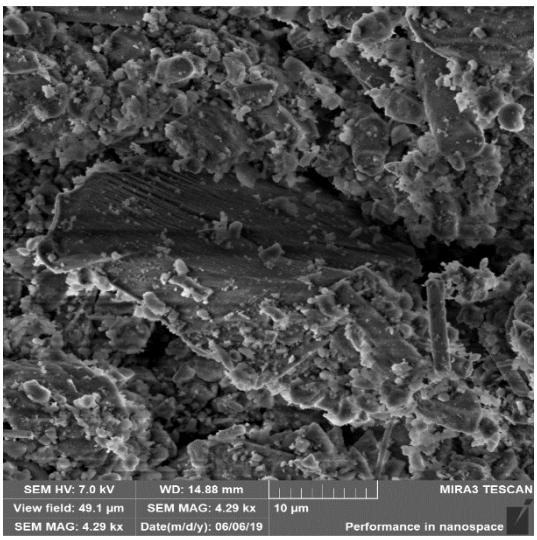


Рис. 3. Структура муллитсодержих отходов

Сырьевую смесь готовили смешиванием исходных компонентов в сухом виде, с последующим добавлением 85% раствора ортофосфорной кислоты в количестве 10 % от массы сухой смеси. Полученную массу выдерживали 20 минут и затем формовали образцы в виде цилиндров высотой и диаметром 40 мм в пластмассовых формах на вибростоле с электрическим вибратором марки ВИ-9-9В. Образцы сушили в сушильном шкафу СНОЛ – 3,9.3,9.3,6/3,5-2Н при температуре 110 ^oC. После сушки образцы спекали на воздухе в лабораторной электропечи типа SNOL 6,7/1300 при температурах 1100, 1200 и 1300 ^oC, со скоростью подъема температуры 10 ^oC/мин и выдержкой при максимальной температуре 1 ч. Образцы охлаждались инерционно вместе с печью до комнатной температуры.

Физико-химические и механические характеристики образцов определяли по стандартным методикам.

Результаты и их обсуждение

Применяемые в машиностроении огнеупоры должны обладать следующими свойствами: высокой механической прочностью; способностью противостоять резким изменениям температуры; сопротивляемостью к воздействию шлаков и газов; невысокой теплопроводностью и теплоемкостью; стабильностью размеров в период эксплуатации. 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.

В данной работе в качестве материала-основы использовался алюмосиликатный шамот; модифицирующей добавки – муллитсодержащие отходы; пластифицирующей и активной добавки – огнеупорная глина; связующего – ортофосфорная кислота.

При введении муллитсодержащих отходов предполагается увеличение механической прочности, поскольку осуществляется армирование структуры материала игольчатыми образованиями муллита, входящего в состав отходов. Кроме того, при взаимодействии муллитсодержащих отходов с ортофосфорной кислотой возможно образование фосфатов алюминия, которые выполняют роль высокотемпературного связующего, что должно способствовать улучшению прочностных и термомеханических характеристик.

Образование фосфатных соединений $Al(H_2PO_4)_3$ подтверждено данными рентгенофазового анализа материала, полученного при обработке муллитсодержащих отходов ортофосфорной кислотой в сушильном шкафу при температуре 120 °С. Данные РФА высушенных при температуре 200 °С продуктов взаимодействия представлены на рисунке 4.

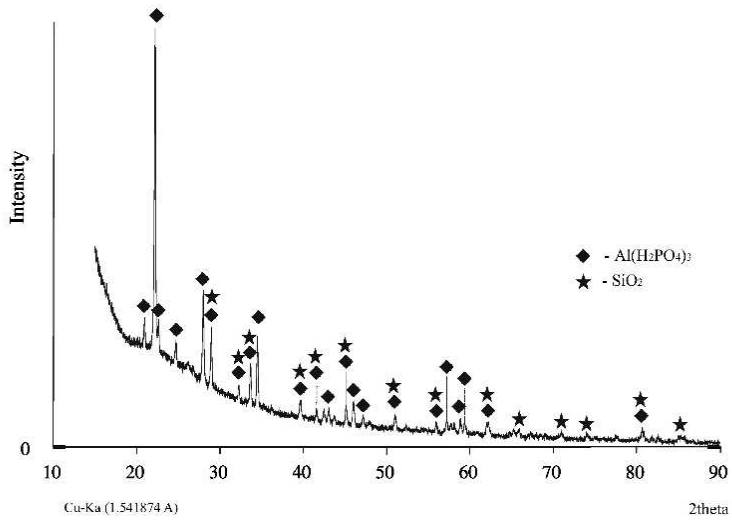
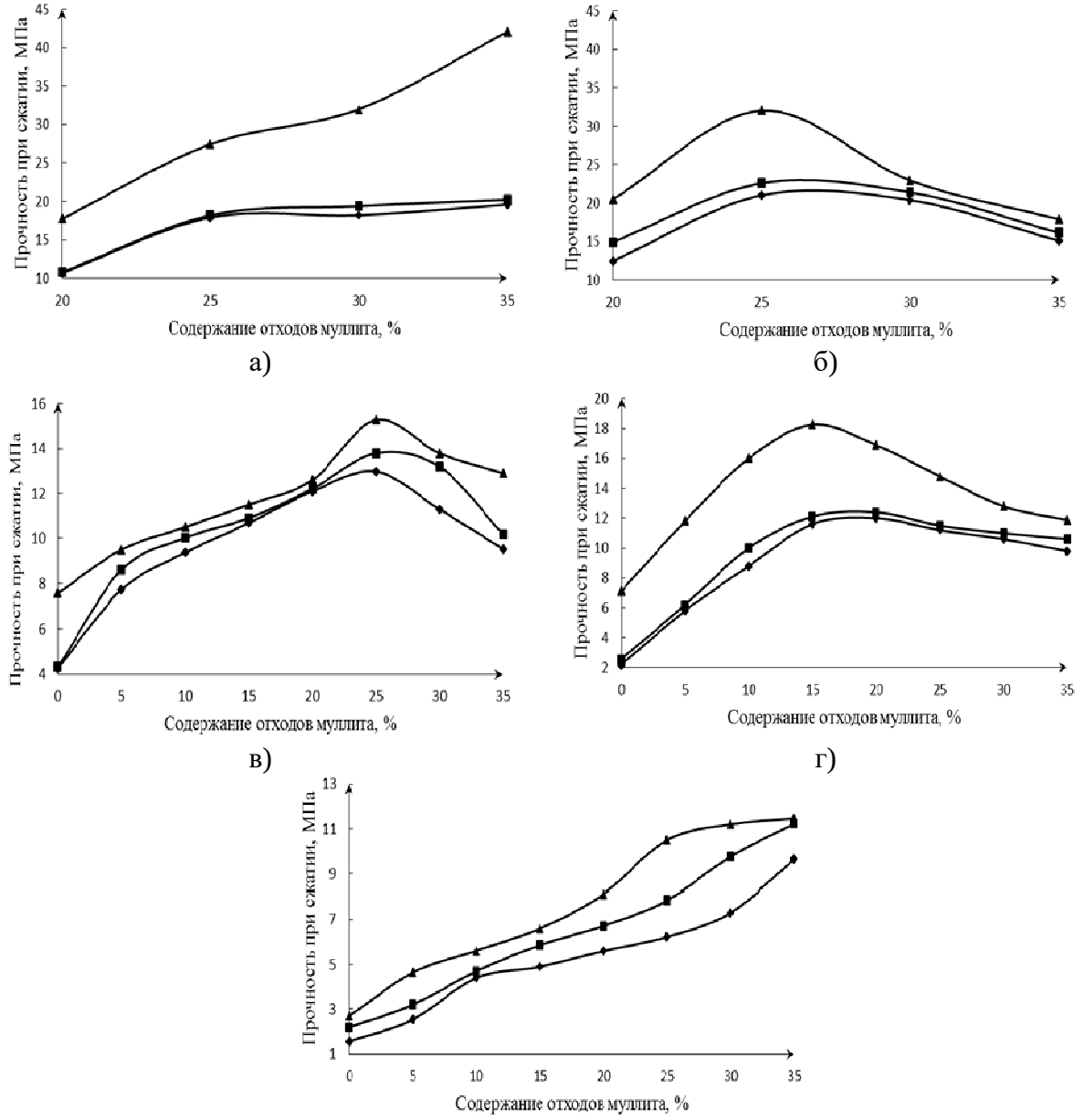


Рис. 4. Дифрактограмма результата взаимодействия между муллитсодержими отходами и ортофосфорной кислотой

Для исследований были выбраны составы содержащие 0-90 % алюмосиликатного шамота, 0-35 % муллитсодержащих отходов, 0-30 % огнеупорной глины, 10 % ортофосфорной кислоты от массы сухой смеси.

При проведении экспериментальной работы установлена зависимость прочности материала от соотношения компонентов (рисунок 5). Из приведенных данных видно, что при формовании изделий вибролитьем не целесообразно вводить в состав смеси огнеупорную глину более 5 %, так как это приводит к снижению прочности материала, при этом зависимость прочности от состава имеет максимумы при содержании 65 % алюмосиликатного шамота и 35 % муллитсодержащих отходов, а также 70 % алюмосиликатного шамота, 25 % муллитсодержащих отходов и 5 % огнеупорной глины. Вероятно, это связано с тем, что на начальном этапе происходит армирование структуры игольчатой составляющей за счет чего происходит упрочнение материала, однако в последующем нарастание общего количества отощителя в системе не позволяет обеспечить необходимую степень связанности частиц и прочность снижается.

На рисунке 6 представлена зависимость плотности материала от состава и температуры обжига. Из приведенных данных видно, что с увеличением содержания в составе смеси муллитсодержащих отходов происходит увеличение плотности за счет более плотной упаковки частиц. При введении в состав смеси более 10 % огнеупорной глины происходит значительное снижение плотности материалы. Вероятно это объясняется торможением процессов уплотнения при вибролитье ввиду образования высоковязкой малотекучей массы.

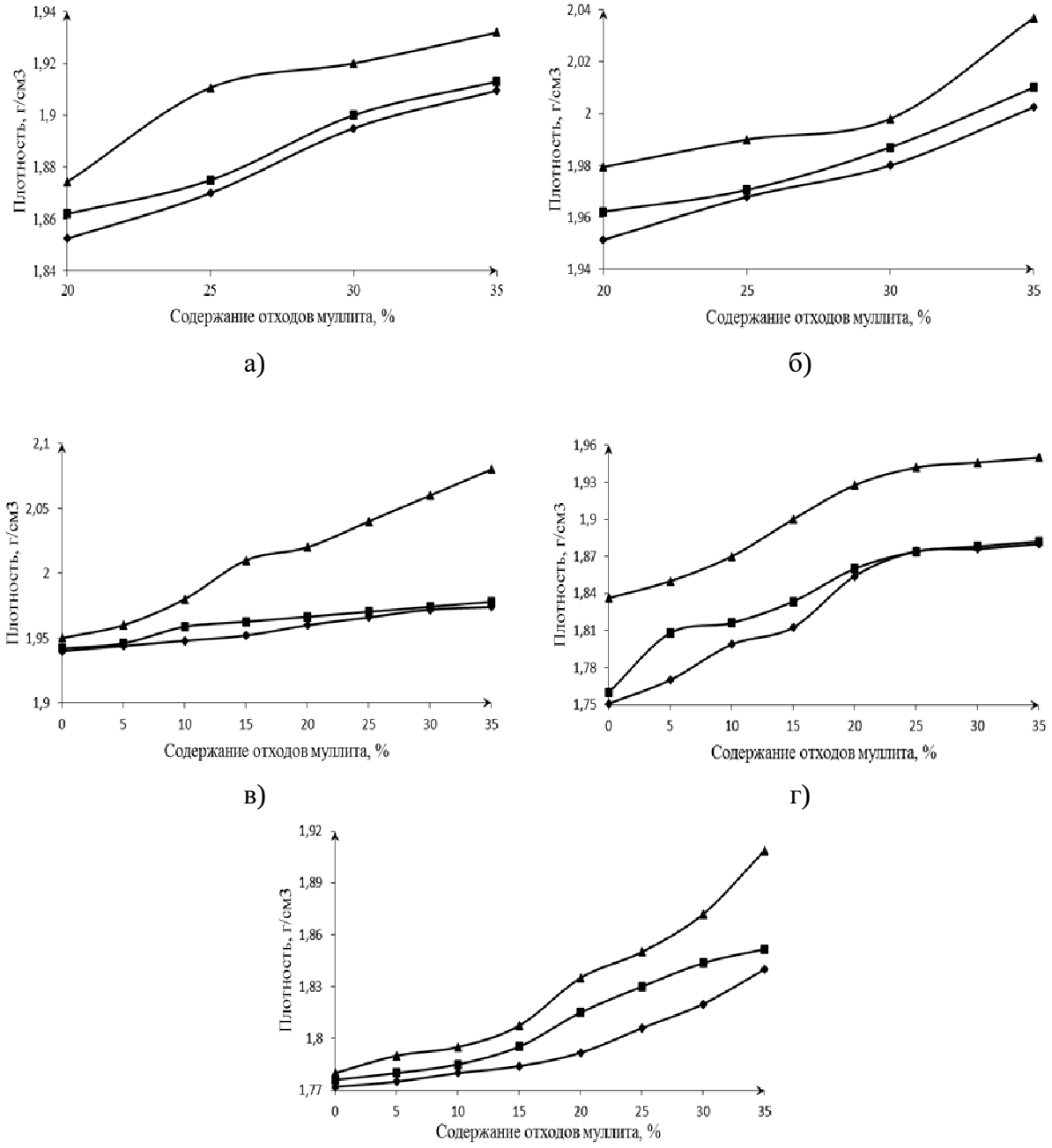


Температура обжига, °С: 1100; 1200; 1300

Содержание огнеупорной глины, %: а – 0; б – 5; в – 10; г – 20; д – 30

Рис. 5. Зависимость прочности от содержания отходов муллита и глины, при различных температурах обжига

Из графиков зависимостей прочности и плотности, представленных на рисунках 5 и 6, отмечено влияние температуры обжига на свойства материала.



Температура обжига, °С: 1100; 1200; 1300.

Содержание огнеупорной глины, %: а – 0; б – 5; в – 10; г – 20; д – 30

Рис. 6. Зависимость прочности от содержания отходов муллита и глины, при различных температурах обжига

Так, механические характеристики образцов обожженных при температурах 1100 °С и 1200 °С существенно не отличаются друг от друга и в 1,5-2 раза уступают образцам, обожженным при температуре 1300 °С. Это можно объяснить структурно-фазовыми изменениями, протекающими в процессе спекания. Так, при температуре более 1300 °С происходит взаимодействие оксида кремния и аморфной составляющей в составе муллитсодержащих отходов с компонентами смеси, в первую очередь

с глиной, с образованием первичного муллита. Данный процесс приводит к разрушению связки волокон муллита в структуре отходов и обеспечивает их подвижность, а образование первичного муллита приводит к зарастанию пор. Таким образом объясняется повышение прочности и плотности материала.

Таким образом, при проведении исследований для производства огнеупорных керамических материалов методом вибролитья можно рекомендовать состав, включающий 65-70 % алюмосиликатного шамота, 25-35 % муллитсодержащих отходов, 0-5 % огнеупорной глины, 10 % ортофосфорной кислоты от массы сухой смеси. При применении данного состава возможно получение огнеупорного материала, обладающего следующими свойствами: плотность 1930-1970 кг/м^3; открытая пористость 23,3-25,2 %; предел прочности при сжатии 32,0-42,1 МПа; водопоглощение 11,7-13,3 %, при температуре обжига 1300 ºС.

Заключение

В работе показана возможность изготовления огнеупорных керамических материалов с высокими прочностью и плотностью на основе алюмосиликатного шамота, муллитсодержащих отходов, огнеупорной глины, ортофосфорной кислоты.

Установлены зависимости физико-химических и прочностных характеристик материалов от содержания добавок и температуры обжига. Показано, что наиболее эффективно и оптимально использовать состав с содержанием 65-70 % шамота алюмосиликатного, 25-35 % муллитсодержащих отходов, 0-5 % огнеупорной глины, 10 % ортофосфорной кислоты от массы сухой смеси. Образцы из данного состава при температуре обжига 1300 ºС имеют плотность 1930-1970 кг/м^3, открытую пористость 23,3-25,2 %, предел прочности при сжатии 32,0-42,1 МПа и водопоглощение 11,7-13,3 %.

Разработанный состав можно применять для изготовления огнеупорных изделий сложной геометрической формы, при футеровке и ремонте тепловых агрегатов.

Список литературы: 1. Пивинский, Ю. Е. Огнеупорные бетоны нового поколения. Виброреология. Вибрационные методы уплотнения и формования // Огнеупоры. – 1994. – № 7. – С. 2-11. **2.** Семченко, Г.Д. Неформованные огнеупоры: Учеб. пособие / Г.Д. Семченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 207. – 304 с. **3.** Трофимов, Б.Я. Специальные вяжущие вещества: Учебное пособие для самостоятельной работы / Б.Я. Трофимов, В.А. Абызов // Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. – 32 с. **4.** Будников, П.П. Огнеупорные бетоны на фосфатных связках / П.П. Будников, Л.Б. Хорошавин // Москва: Изд-во «Металлургия», 1971. – 192 с. **5.** Гершберг О.А. Технология бетонных и железобетонных изделий / О.А. Гершберг // Москва : Стройиздат, 1971. – 359 с. **6.** Замятин, С.Р. Огнеупорные бетоны / Замятин С.Е., Пургин А.К., Хорошавин Л.Б. // Справочник – М.: Металлургия, 1982. – 192 с.

РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОМПОЗИТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Гусев Е.Л. *(Институт проблем нефти и газа Сибирского Отделения РАН, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник; Северо-Восточный федеральный университет, Институт математики и информатики, профессор кафедры прикладной математики, г. Якутск, Россия)*
E-mail: elgusev@mail.ru

Abstract: *Within the framework of variational refined statements of inverse problems of forecasting, the questions of development of effective, refined methods of forecasting resource, strength, reliability, durability of structures made of polymeric, composite materials are investigated. Formulated the principle of a plurality of prediction models, whose inclusion in the refined formulation of the inverse task of forecasting opens new and promising possibilities to improve the efficiency of solving problems of forecasting the defining characteristics of structure composites.*
Keywords*: composite materials, residual life, durability, strength, variational statement, the principle of multiplicity of forecasting models, inverse problems of forecasting.*

Введение. В последние десятилетия при разработке различных конструкций, машин и механизмов значительное внимание уделяется проблеме создания надежных методов количественной оценки работоспособности конструкций из полимерных и композиционных материалов [1-12]. Одним из эффективных подходов для создания математических моделей прогнозирования долговечности композиционных материалов являются вариационные методы [5-12] . Предложенный подход основан на более точных постановках задач прогнозирования и разрабатывается в рамках вариационных принципов решения обратных задач, в которые впервые включена оценка точности прогнозируемых решений, что позволило получить новые научно обоснованные результаты и удовлетворить требуемой точности прогноза.

1.Предельно допустимая точность прогноза. Под предельно допустимой точностью прогноза (ПДТП) $\gamma_R^{\max}$ будем понимать предельно допустимое отклонение прогнозируемой зависимости $\tilde{R}(t)$ определяющего свойства R от реальной зависимости $R^*(t)$ на прогнозируемом отрезке времени $[T_{\min}, T_{\max}]$. В соответствии с введенным определением ПДТП $\gamma_R^{\max}$ удовлетворяет условию

$$\max_{T_{\min} \le t \le T_{\max}} \left| \tilde{R}(t) - R^*(t) \right| \le \gamma_R^{\max} \ . \qquad (1)$$

В соответствии с введенной предельно допустимой точностью прогноза, обратная задача прогнозирования может быть сформулирована в следующей постановке:

На основе кратковременных испытаний, проведенных на интервале времени [0, T_{min}], т.е. на основании информации о значениях определяющего свойства R – $R_1, R_2, \ldots, R_m$, измеренных в моменты времени t_1, t_2 , …,t_m спрогнозировать изменение определяющего свойства композиционной конструкции на интервале [T_{min}, T_{max}], с погрешностью, не превышающей заранее заданной ПДТП $\gamma_R^{\max}$ (1).

2. Построение обобщенной математической модели прогнозирования. В предположении , что различные физические факторы оказывают на полимерный композит воздействие, независимое от воздействия других факторов, и изменения, вызванные в композите, суммируются, то можно принять что обобщенная модель, описывающая одновременное воздействие нескольких факторов может быть представлена в виде:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^{p} F_j\left(u_{j,1}, u_{j,2},..., u_{j,l_j}; t\right). \qquad (2)$$

Каждая из функций $F_j\left(u_{j,1}, u_{j,2},..., u_{j,l_j}; t\right), (j = 1,2,..., p)$, описывающая воздействие j-го фактора на полимерный композит, может быть представлена в виде разложения в ряд по некоторой системе базисных функций $\psi_{kj}\left(\beta_{kj}; t\right), (k = 1,2,3,...)$, которые в наиболее полной мере характеризуют особенности процесса увеличения поврежденности материала при воздействии экстремальных факторов внешней среды.

$$F_j = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_{kj}(u_{j,1},..., u_{j,l_j})\psi_{kj}\left[\beta_{kj}(u_{j,1},..., u_{j,l_j}); t\right], \quad (j = 1,2,..., p). \qquad (3)$$

В этих обозначениях:

$\alpha_{kj}(u_{j,1},..., u_{j.,l_j}), \beta_{kj}(u_{j,1},..., u_{j.,l_j}), (j = 1,2,..., p;\ k = 0,1,2,...)$ неопределенные параметры модели, описывающие воздействие j-го фактора

3. Модель прогнозирования оптимальной сложности. В рамках принятой в качестве базисной системы опорных функций, по которой строится разложение в ряд модели прогнозирования, и введенного параметрического семейства моделей прогнозирования $\left\{R^N\right\}_{N=1}^{\infty}$ строится модель прогнозирования оптимальной сложности, под которой понимается модель, содержащая оптимальное число слагаемых, позволяющая решать задачу прогнозирования с требуемой точностью. Проблема построения модели оптимальной сложности сводится к решению следующей экстремальной задачи:

$$\max_{T_{\min} \le t \le T_{\max}} \left|R^{N^*}(u^{*N^*}; t) - R^*(t)\right| = \min_{1 \le N < \infty} \max_{T_{\min} \le t \le T_{\max}} \left|R^N(u^{*N}; t) - R^*(t)\right|,$$

$$\max_{T_{\min} \le t \le T_{\max}} \left|R^N(u^{*N}; t) - R^*(t)\right| \le \gamma_{\max}, \qquad (4)$$

$$1 \le N < \infty.$$

В этих обозначениях : N^* - оптимальное число параметров модели прогнозирования оптимальной сложности R^{N^*} ; u^{*N} - оптимальный вектор параметров оптимальной модели прогнозирования параметрического семейства, соответствующей параметру N, γ_{max} предельно допустимая требуемая точность решения задачи прогноза; $R^*(t)$ - реальная зависимость от времени определяющего свойства композита (остаточного ресурса, долговечности и т.п.). .

4. Принцип множественности моделей прогнозирования. В основу развиваемого подхода положен принцип множественности моделей прогнозирования, формулируемый следующим образом: Если в заданном многопараметрическом семействе мо-

делей прогнозирования M существует модель $R_{n^*}^{*}\left(u^{n^{**}};t\right)$, наиболее адекватная реальной прогнозируемой временной зависимости $R^{*}(t)$, то данная модель в рассматриваемом параметрическом семействе является моделью оптимальной сложности:

$$J\left(R_{n^*}^{*}\left(u^{n^{**}};t\right)\right)=\min_{\substack{\{R_n(u^n;t)\}\\1\le n<\infty}} J\left(R_n\left(u^n;t\right)\right). \qquad (5)$$

Обозначения: - u^n - вектор параметров модели прогнозирования параметрического семейства, соответствующей значению параметра n: $u^n=\left(u_1^n,u_2^n,...,u_n^n\right)$; $J\left(R_n(u^n;t)\right)$ - оценка степени отклонения данной модели $R_n(u^n;t)$, многопараметрического семейства, соответствующего значению параметра n ($1\le n<\infty$), от реальной временной зависимости определяющего свойства $R^{*}(t)$; $R_n^{*}\left(u^{n*};t\right)$ - модель прогнозирования многопараметрического семейства оптимальной сложности; $u^{n^{**}}$ - вектор параметров модели прогнозирования оптимальной сложности, соответствующей оптимальному числу параметров, равному n^{*}.

5. Сравнительные расчеты на основе моделей прогнозирования оптимальной сложности. На основе разработанных обобщенных моделей прогнозирования в уточненных вариационных постановках обратных задач прогнозирования, на основе введенного принципа множественности моделей прогнозирования проведена оценка погрешности прогноза, допускаемой при использовании моделей прогнозирования остаточного ресурса, долговечности с малым числом параметров, таких как модель В. Н. Булманиса (число параметров не превышает четырёх) [13]. На основе проведенных вычислительных экспериментов показано, что применение моделей прогнозирования с малым числом параметров может быть не адекватным сложности решаемой задачи прогнозирования и приводить к значительным ошибкам прогноза. Проведены сравнительные вычислительные эксперименты по прогнозированию остаточного ресурса композитов на основе оптимальной модели прогнозирования $R_n^{*}(\ ;t)$, построенной для случая фиксированного числа параметров, равного четырем (n=4), и модели прогнозирования оптимальной структуры и оптимальной сложности с оптимальным числом параметров, построенной в рамках уточненных вариационных постановок обратных задач прогнозирования на основе принципа множественности моделей прогнозирования с включением числа неопределенных параметров модели прогнозирования N в число варьируемых параметров ($1\le N<\infty$) (4). Временной отрезок, предшествующий прогнозированию: $0\le t\le T_{min}$, $T_{min}=15$ лет; временной отрезок, на котором необходимо провести прогнозирование изменения остаточного ресурса: $T_{min}\le t\le T_{max}$, $T_{max}=20$ лет. Показано, что прогнозирование определяющего свойства на основе оптимальной модели прогнозирования $R_n^{*}(\ ;t)$, соответствующей фиксированному числу параметров n=4, по числу точек экспозиции m=15, принадлежащих интервалу $[0, T_{min}]$, на интервале $[T_{min}, T_{max}]$, дает ошибку прогнозирования $\delta_n^{*}=4\%$. Прогнозирование остаточного ресурса на основе модели прогнозирования оптимальной структуры и оптимальной сложности с оптимальным числом параметров, построенной в рамках уточненных вариационных постановок обратных задач прогнозирования на основе принципа множественности моделей прогнозирования с включением числа неопределенных параметров модели прогнозирования n в число варьируемых параметров ($1\le n<\infty$) (5), по такому же числу точек m=15, принадлежащих интервалу $[0, T_{min}]$, на интервале $[T_{min}, T_{max}]$, дает

ошибку прогнозирования $\delta^{*}_{n^{*}} = 0{,}5\%$. Таким образом, применение принципа множественности моделей прогнозирования и моделей оптимальной структуры и оптимальной сложности в рамках уточненных вариационных постановок обратных задач прогнозирования, позволяет существенно увеличить точность решения задачи прогноза.

Список литературы: 1. Уржумцев Ю.С. Прогнозирование длительного сопротивления полимерных материалов - М.: Наука, 1982. - 222 с. **2.** Реутов А.И. Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов, применяемых в строительстве // Вестник ТГАСУ, 2009, №2, с. 127-141. **3.** Степанов М.Н., Зинин А.В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2007. 392 с. **4.** Башкарев А. Я. , Веттегрень В.И., Суслов М.А. Долговечность полимерных композитов, СППТУ, С-Птб, 2016. - 147 с. **5.** 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. **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.** Гусев Е.Л. , Бакулин В.Н. Вариационные постановки обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов // Доклады Академии наук, 2018, т. 482, №3. с. 281-286. **8.** 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. **9.** 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. **10.** Гусев Е.Л. Математические методы прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов и конструкций, основанные на принципе множественности моделей прогнозирования в вариационных постановках//Труды третьей Международной 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. **11.** 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. **12.** 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. **13.** Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование измене-ния прочности полимерных волокнистых композитов в результате климатического воз-действия. Препринт, - Якутск, 1988. - 32 с.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ РАСШИРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

[1,2] **Гусев Е.Л.,** [3]**Черных В.Д**. *([1]Институт проблем нефти и газа Сибирского Отделения Российской академии наук,* [2]*Институт математики и информатики Северо-Восточного федерального университета,* [3]*Физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск, Россия)*
E-mail:; elgusev@mail.ru

Abstract: *The question of perspective ways of expansion of potential opportunities in increase of efficiency of methods of forecasting of a residual resource, durability of composite materials and designs at influence of extreme factors of environment is considered. Modifications of methods of search of a global extremum of multiparameter functions taking into account structural features of the criteria of efficiency applied in problems of forecasting of a residual resource, durability of designs from composite, polymeric materials are investigated. One of the promising ways of increasing the potential opportunities associated with the improvement of methods for constructing the optimal directions of finding the absolute minimum performance indicators associated with the solution of problems of predicting the residual life of polymer composites under the influence of extreme environmental factors and operating loads is analyzed.*

Key words*: composite materials, composite constructions, forecasting techniques, promising directions of search, polymer composites, performance criteria, mutually conjugate directions of search, extreme climatic factors.*

1. Введение.

В последние десятилетия одной из важных задач при разработке различных конструкций, машин и механизмов является создание надежных методов количественной оценки работоспособности изделий из полимерных и композиционных материалов [1-13]. Специфика исследуемых задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитов под воздействием экстремальных факторов приводит к тому, что для этих задач подход экстраполяции в традиционной постановке является малоэффективным. Как отмечено в ряде работ [3-7], принципиальное усовершенствование подхода экстраполяции ммможет быть достигнуто на основе выбора математической модели с ориентацией на физические представления.

В настоящее время проблемы математического моделирования задач прогнозирования ресурса, надежности конструкций из полимерных композитов при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды, решаются в значительно упрощенных постановках, не учитывающих значительное число факторов, оказывающих существенное влияние на точность решения. Как правило, применяемые модели прогнозирования имеют небольшое число неопределенных параметров, что не позволяет достичь необходимой степени адекватности модели реальной ситуации [3,5,7]. При этом составной частью проблемы разработки эффективных методов прогнозирования остаточного ресурса является решение проблемы эффективного построения глобально-оптимальных решений, доставляющих абсолютный минимум многопараметрическим критериям эффективности, связанным с решением задач прогнозирования остаточного ресурса полимерных композитов при воздействии экстремальных факторов внешней среды. Проблема же достоверного построения глобально-оптимальных решений сложнопостроенных многопараметрических критериев эффективности в настоящее время является чрезвычайно сложной .

2. **Материалы и методы исследования.**

Модели, описывающие зависимость изменения остаточного прочности R полимерных композитов при воздействии климатических факторов в общем виде, могут быть представлены в форме функциональных зависимостей следующего вида:

$$R(u_1, u_2, ..., u_n; t) = R_0 + \Phi(u_1, u_2, ..., u_n; t). \quad (1)$$

В этих обозначениях: R — остаточный ресурс (прочность) композита, R_0 – прочность композита в исходном состоянии; $u_1, u_2, ..., u_n$ — параметры композиционной конст-рукции, отражающие влияние эксплуатационных нагрузок и экстремальных факторов внешней среды. Обозначим $\Delta R = R - R_0$.

В качестве критерия эффективности целесообразно выбрать среднеквадратическое отклонение аппроксимации экспериментальных данных $\Delta\overline{R}_t^{э}$ от теоретических значений $\Delta R(u;t)$:

$$J(u) = S^2 = \frac{1}{m}\sum_{t=1}^{m}\left(\Delta R(u;t) - \Delta\overline{R}_t^{э}\right)^2. \quad (2)$$

Задача восстановления параметров моделей изменения прочности композиционной конструкции от воздействия экстремальных факторов внешней среды и эксплуатаци-онных нагрузок может быть сведена к решению следующей экстремальной задачи:

$$J(u^*) = \min_u J(u). \quad (3)$$

При решении проблем такого рода значительную актуальность представляет разработка и модификация эффективных методов поиска абсолютного экстремума многопараметрических функций с учетом специфических особенностей задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитов. В работе [14] был предложен метод поиска экстремума многопараметрических функций с оптимальным выбором параметров для решения обратных задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитов при воздействии экстремальных факторов внешне среды.

Для задач, в которых абсолютные минимумы показателей эффективности расположены на направлениях, вдоль которых наблюдается наиболее значительное их убывание, предлагаемый подход будет являться достаточно эффективным. Однако в наиболее распространенных ситуациях, связанных с решением задач прогнозирования, зависимость показателей эффективности J(u) от определяющих параметров, имеют достаточно сложную структуру, при которой абсолютные минимумы могут не находиться вдоль направлений, вычисленных указанным способом. В работе [15] для решения более сложного круга обратных задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитных конструкций при воздействии экстремальных климатических факторов, описываемых моделями, в которых зависимость показателей эффективности J(u) от определяющих параметров u_1, u_2, …, un имеет более усложненную структуру, разработаны модификации методов возможных направлений с определением оптимальных направлений поиска.

В структуру модифицированных методов возможных направлений включены такие дополнительные возможности, как

– дополнительные процедуры генерации значительного числа возможных направлений поиска, задаваемых единичными векторами $\vec{l} \in \Omega = \{\vec{l}\}$, углы $\varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_n$ которых с координатными осями $Ou_1, Ou_2, ..., Ou_n$ представляют собой множество случайных величин с равномерным законом распределения;

– дополнительные процедуры сравнительной оценки перспективности

выделяемых возможных направлений по специально построенным критериям $W\left(\vec{l}\right)$ и нахождения оптимального направления поиска. В структуру модификации методов возможных направлений включены такие дополнительные элементы, повышающие их эффективность, как глобальная оптимизация показателя эффективности вдоль выбранного условно-оптимального направления поиска $\vec{l}_p^*$; построение следующего (p+1)-го приближения к глобально-оптимальному решению, связанного с разложением показателя эффективности J(u) в ряд Тейлора в окрестности p-го приближения вдоль условно-оптимального направления поиска $\vec{l}_p^*$:

$$J(u) = J(u^p) + \frac{\partial J(u^p)}{\partial \vec{l}_p^*}\left(u - u^p\right) + \frac{1}{2}\left(u - u^p\right)^T \frac{\partial^2 J(u^p)}{\partial \vec{l}_p^* \partial \vec{l}_p^*}\left(u - u^p\right) + \ldots \qquad (4)$$

$$\frac{\partial J(u^p)}{\partial \vec{l}} = \left(\nabla J(u^p), \vec{\tau}\right) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial J(u^p)}{\partial u_i}\alpha_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial J(u^p)}{\partial u_i}\cos\varphi_i, \qquad (5)$$

$$\frac{\partial^2 J(u^p)}{\partial \vec{l}^{\,2}} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} \frac{\partial^2 J(u^p)}{\partial u_i \partial u_k}\alpha_i\alpha_k = \vec{\tau}^T \nabla^2 J(u^p)\vec{\tau}, \quad p = 0,1,2,\ldots$$

Как показали результаты вычислительных экспериментов для ряда задач прогнозирования определяющих характеристик композиционных конструкций наибольший эффект может быть достигнут в случае, когда возможные направления совпадают с направлениями координатных осей $Ou_1, Ou_2, \ldots, Ou_n$. Это может быть объяснено различным физическим смыслом вводимых параметров $u_1, u_2, \ldots, u_n$, и в соответствии с этим различным характером изменения показателя эффективности вдоль различных координатных осей. В соответствии с этим в работе [16] разработана модификация методов возможных направлений с определением оптимальных направлений поиска для случая, когда оптимальные направления поиска совпадают с направлениями координатных осей $Ou_1, Ou_2, \ldots, Ou_n$.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что наибольшей эффективностью обладает комбинированный подход, связанный с последовательным применением разработанных методов, основанных на существенно различающихся принципах. При этом наибольший эффект дает следующая последовательность применения разработанных методов:

1) Применение модификации метода поиска экстремума многопараметрических функций с оптимальным выбором параметров, изложенной в работе [14];

2) Применение модификации методов возможных направлений с определением оптимальных направлений поиска, изложенной в работе [15];

3) Применение модификации релаксационных методов, когда оптимальные направления поиска совпадают с направлениями координатных осей $Ou_1, Ou_2, \ldots, Ou_n$, изложенной в работе [16].

Исследован вопрос о расширении потенциальных возможностей в повышении эффективности методов прогнозирования для решения задач оценки остаточного ресурса, надежности, долговечности композиционных материалов и конструкций при воздействии экстремальных внешних факторов. Один из перспективных путей повышения потенциальных возможностей связан с совершенствованием методов построения оптимальных направлений поиска абсолютного минимума показателей

эффективности (2)-(3). В дополнение к методам, изложенным в работах [14-16], и составляющим основу комбинированного подхода, проведен сравнительный качественный анализ методов выбора в качестве наиболее перспективных направлений поиска абсолютного минимума исследуемых показателей эффективности, взаимно сопряженных направлений поиска. Проанализированы преимущества методов поиска абсолютного экстремума показателей эффективности, когда в качестве перспективных направлений поиска выбираются взаимно сопряженные направления. Применение для решения задач прогнозирования методов, связанных с построением в качестве перспективных взаимно-сопряженных направлений поиска позволяет значительно повысить эффективность прогноза.

Характерной особенностью обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов в вариационной постановке со сложнопостроенными показателями эффективности вида (2) состоит в том, что структура показателей эффективности имеет существенно многоэкстремальный характер, что не позволяет эффективно с высокой степенью достоверности с применением известных методов поиска минимума находить абсолютный минимум таких показателей эффективности. При этом проведенные исследования, соответствующие вычислительные эксперименты показали, что применение различных известных методов поиска минимума может приводить к различным существенно различающимся результатам. При этом отсутствует возможность оценить насколько существенно результирующие решения отличаются от искомых глобально-оптимальных решений, доставляющих показателю эффективности глобальный минимум. Следствием же неэффективности существующих подходов к решению обратных задач прогнозирования композитов в вариационной постановке является то, что прогнозируемые решения остаточного ресурса могут значительно отличаться от реальных значений остаточного ресурса композитов, даже при прогнозировании на короткий временной период, даже в том случае, когда разработанная прогнозирующая математическая модель долговечности обладает высокой степенью адекватности реальной ситуации.

Тем не менее, проведенные исследования показали, что показатели эффективности в обратных задачах прогнозирования остаточного ресурса в вариационных постановках обладают рядом специфических особенностей. Учет этих особенностей позволяет разработать для решения обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов в вариационной постановке более эффективные методы поиска абсолютного минимума по сравнению с известными подходами, а также модифицировать известные методы минимизации с учетом специфических особенностей рассматриваемых показателей эффективности.

Проведенные исследования и разработка модификаций известных методов поиска минимума многопараметрических функций , таких как методы поиска экстремума многопараметрических функций с оптимальным выбором параметров, методы возможных направлений с определением оптимальных направлений поиска, релаксационных методов, методов сопряженных направлений, связанных с выбором в качестве наиболее перспективных сопряженных направлений поиска, сравнительная оценка их эффективности, разработка рекомендаций по оптимальной их компоновке и эффективной конструктивной модификации в соответствии со специфическими особенностями рассматриваемых показателей эффективности в обратных задачах прогнозирования остаточного ресурса в вариационной постановке, позволяют существенно расширить потенциальные возможности в повышении эффективности методов прогнозирования остаточного ресурса, долговечности композиционных материалов и конструкций при воздействии экстремальных факторов внешней среды.

3. Заключение.

Проведенные исследования и разработка модификаций методов поиска минимума сложнопостроенных показателей эффективности, применяемых при решении обратных задач прогнозирования остаточного ресурса, долговечности конструкций из композиционных , полимерных материалов позволяют существенно расширить потенциальные возможности в повышении эффективности методов прогнозирования остаточного ресурса, долговечности композиционных материалов и конструкций из них при воздействии экстремальных факторов внешней среды.

Список литературы: 1. Уржумцев Ю. С., Черский И. Н. Научные основы инженерной клима-тологии полимерных и композитных материалов//Механика композитных материалов, 1985, № 4. - С. 708–714. **2.** Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин н конструкций. М., 1984. - 312 с. **3.** Булманис В.Н., Ярцев В.А., Кривонос В.В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов// Механика композитных материалов, 1987, № 5. – С. 915-920. **4.** Карпухин О.Н. Определение срока службы полимерного материала как физико-химическая проблема// Успехи химии, 1980, № 8. - С. 1523-1553. **5.** Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волокнистых композитов в результате климатического воздействия, препринт. — Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1988. - 32 с. **6.** Бокшицкий М.Н. Длительная прочность полимеров. М: Химия, 1978. 312 с. **7.** Филатов И.С., Бочкарев Р.Н. Некоторые проблемы оценки и прогно-зирования климатической устойчивости полимерных материалов//Методы оценки климатической устойчивости полимерных материалов, Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1986. - С. 11-20. **8.** Потапова, Л.Д. , Ярцев В.П. Механика материалов при сложном напря-женном состоянии: как прогнозируют предел. Напряжения. - М.: Машиностроение, 2005. – 242 с. **9.** Башкарев А. Я. , Веттегрень В.И., Суслов М.А. Долговечность полимерных композитов, СППТУ, С-Птб, 2016. - 147 с. **10.** Реутов, А.И. Прогнозирование надежности строительных изделий из полимерных материалов. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2007. - 184 с. **11.** Реутов, А.И. , Сидоренко А.А., Филатов И.С. Оценка климатической устойчивости полимерных материалов на основе вероятностно-статистического метода // Известия ТПУ, 2002, т. 305, в. 5. - С. 196-203. **12.** Реутов, А.И. Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов, применяемых в строительстве // Вестник ТГАСУ, 2009, №2. - С. 127-141. **13.** Степанов М.Н., Зинин А.В. Прогнозирование характеристик сопро-тивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2007. - 392 с. **14.** 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., Всероссийский институт авиационных материалов, 2015. - С.132-141. **15.** Гусев Е.Л. Применение методов возможных направлений с определением оптимальных направлений поиска для решения обратных задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитных конструкций при воздействии экстремальных климатических факторов// Международный журнал «Educatio», 2015, т.13, № 6, с. 68-71. **16.** Гусев Е.Л. Релаксационные методы в прогнозировании определяющих харак-теристик при воздействии экстремальных факторов внешней среды// Международный журнал Международного союза ученых «Наука. Технологии. Производство», 2015, №8. - С. 4-7. **17.** Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. М.: Радио и связь, 1984. - 248 с.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ И ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛАЗЕРОМ ПОКРЫТИЙ

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Косякова И.М. *(БНТУ, г. Минск, РБ)*
Тел./Факс: +375 (17) 3310045; E-mail: scvdmed@bntu.by

Abstract: *The tribotechnical characteristics of coatings after laser doping with AlN, B_4C, Cr+2B and Ti +B by a continuous CO_2 laser have been studied. Dependences of the amount of wear on the sliding speed and pressure at the contact point are obtained.*
Key words: *laser processing, regression model, wear, sliding speed, contact pressure.*

Одной из актуальных проблем современного машиностроения является разработка эффективных технологий обработки, позволяющих придать деталям необходимые свойства поверхностного слоя – износостойкость, коррозионную стойкость, теплостойкость и др. Одним из эффективных методов повышения эксплуатационных характеристик деталей из чугуна является лазерная обработка. Она позволяет успешно решать проблему создания материалов с заданных комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств путем целенаправленного формирования оптимального структурного состояния. Управляя параметрами лазерного излучения и варьируя составы легирующих композиций можно формировать такие свойства поверхностного слоя чугунных изделий, которые обладают неоспоримыми преимуществами по сравнению со свойствами, полученными при обработке традиционными методами. Несмотря на многочисленные исследования в области лазерного воздействия на чугун до настоящего времени недостаточно развиты представления о взаимосвязи между составом и структурой чугуна, формирующегося в процессе лазерной обработки. А также отсутствуют систематизированные данных о влиянии легирующих компонентов при лазерной обработке на физико-механические и эксплуатационные характеристики чугуна.

Важнейшим продуктом черной металлургии в мире наряду со сталью и железом остается чугун. Свое широкое применение в качестве конструкционного материала в машиностроении чугун получил благодаря своим свойствам и массовому применению при изготовлении деталей для машин, станков и оборудования.

По данным World Steel Association (worldsteel, WSA) [1], в декабре 2018 г. мировое производство чугуна составило 104,665 млн. тонн, что на 10,63 % превысило показатель предыдущего года (93,547 млн. тонн).

Структура мирового рынка литья за 2018 г. показывает, что превалируют отливки из серого чугуна (43%). В Республику Беларусь для производственных целей в основном импортируются отливки серого чугуна для производственных целей в соответствии с ГОСТом 1412-85 следующие марки: СЧ15, СЧ20, СЧ25.

Лазерное легирование и упрочнение чугуна дает возможность модифицировать поверхность изделий из чугуна, изменяя его физико механические свойства, триботехнические и прочностные свойства в широких пределах скоростей, применительно для каждого вида производства.

Целью настоящей работы является изучение триботехнических характеристик модифицированных покрытий в широком диапазоне давлений и скоростей.

Методика исследований.

Легирующие компоненты наносились на подготовленную поверхность образцов из чугуна СЧ-20 прямоугольной формы сечением 15 х 15 мм и длиной 20 мм. Обмазка состояла из модифицирующих добавок AlN, B_4C, Cr+2B и Ti +B.

Лазерная обработка проводилась на режимах, обеспечивающих поправление поверхностного слоя чугуна - при мощности N = 1000 Вт, диаметре лазерного луча d=1,0 мм, скорости его перемещения V= 1,5 – 4 м/с.

Исследования износа при сухом трении и трении со смазкой провели на машине по исследованию истирания металлов и искусственных материалов типа Amsler A – 135 по PN-79/H-04329 на образцах типа «диск-колодка».

Для исследования влияния параметров испытания износостойкости (удельного давления и скорости скольжения) на изнашивание лазерно-наплавленных покрытий был использован один из методов математического планирования – метод полного факторного эксперимента [5 – 7]. Так как число варьируемых параметров невелико, оказалось возможным реализовать полную реплику, в которой число опытов равно 2 в степени, равной числу факторов: N = 2k, позволяющую в ходе эксперимента варьировать одновременно несколькими параметрами различной физической природы и получать раздельную, независимую оценку коэффициентов, что невозможно, например, при реализации дробной реплик. При этом необходимо, чтобы все независимые переменные, влияющие на процесс, изменялись на двух уровнях: минимальном и максимальном.

Полученная модель считалась линейной и учитывала взаимодействие факторов.

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_{12} X_1 X_2 \qquad (1)$$

где Y_i - параметры оптимизации,

X_i – варьируемые факторы,

B_{ij} – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметры оптимизации.

Для составления таблицы данных (матрицы планирования) определяли пределы изменения основных входных параметров, в качестве которых были приняты технологические параметры лазерной обработки.

X_1 – скорость перемещения образца.

X_2 – давление в месте контакта.

В качестве выходных параметров принимаем величину износа в зависимости от скорости скольжения и давления в месте контакта.

Для расчетов триботехнических характеристик покрытия выбираем изменение скорости V от 1,5 до 4 м/с, давление от Р 3,5 до 10 МПа. Эксперименты в каждой точке выполнялись трижды.

Таблица 1. Исходных экспериментальных данных и расчетов для покрытий с AlN

	V, м/с	P, МПа
код	X_1	X_2
X_{max}	4	20
X_{min}	1,5	3,5
$X_{осн}$	2,75	11,75
ΔX	1,25	8,25

№ опыта	X_1	X_2	Результаты экспериментов P_{y1}	P_{y2}	P_{y3}	P_{yi}	S_i^2	P_i	$(P_i - P_i)^2$
1	1	1	25	22,5	24	23,83	1,5833	23,8333	0,00001089
2	-1	1	16	13,5	14	14,50	1,7500	14,5100	0,0001
3	1	-1	8	9,5	13	10,17	6,5833	10,1667	0,00001089
4	-1	-1	5	6,5	7	6,17	1,0833	6,1667	0,00001089
Сумма						54,67	11,0000		0,00013267

Таблица 2. Исходные экспериментальные данные и расчеты для покрытий с B_4C

	V, м/с	P, МПа
код	X_1	X_2
X_{max}	4	20
X_{min}	1,5	3,5
$X_{осн}$	2,75	11,75
ΔX	1,25	8,25

№ опыта	X_1	X_2	Результаты экспериментов			P_{yi}	S_i^2	P_i	$(P_i - P_i)^2$
			P_{y1}	P_{y2}	P_{y3}				
1	1	1	27	28	29,5	28,1667	1,5833	28,1517	0,000225
2	-1	1	13	15	14,5	14,1667	1,0833	14,1817	0,000225
3	1	-1	10	12	10,5	10,8333	1,0833	10,8483	0,000225
4	-1	-1	5	7	4	5,3333	2,3333	5,3183	0,000225
Сумма						58,5000	6,0833		0,000900

Таблица 3. Исходные экспериментальные данные и расчеты для покрытий с Cr+2B

	V, м/с	P, МПа
код	X_1	X_2
X_{max}	4	20
X_{min}	1,5	3,5
$X_{осн}$	2,75	11,75
ΔX	1,25	8,25

№ опыта	X_1	X_2	Результаты экс-периментов			P_{yi}	S_i^2	P_i	$(P_i - P_i)^2$
			P_{y1}	P_{y2}	P_{y3}				
1	1	1	30	29	28,5	29,1667	0,5833	29,1567	0,000100
2	-1	1	18	14,5	17	16,5000	3,2500	16,5100	0,000100
3	1	-1	16	14	15,5	15,1667	1,0833	15,1767	0,000100
4	-1	-1	11	8,5	12	10,5000	3,2500	10,4900	0,000100
Сумма						71,3333	8,1667		0,000400

Таблица 4. Таблица исходных экспериментальных данных и расчетов для покрытий с Ti +B

	V, м/с	P, МПа
код	X_1	X_2
X_{max}	4	20
X_{min}	1,5	3,5
$X_{осн}$	2,75	11,75
ΔX	1,25	8,25

№ опыта	X_1	X_2	Результаты экспериментов			P_{yi}	S_i^2	P_i	$(P_i - P_i)^2$
			P_{y1}	P_{y2}	P_{y3}				
1	1	1	29	28	26,5	27,8333	1,5833	27,8417	0,000069
2	-1	1	18	15,5	14	15,8333	4,0833	15,8250	0,000069
3	1	-1	9	10,5	12	10,5000	2,2500	10,4917	0,000069
4	-1	-1	6	7,2	5	6,0667	1,2133	6,0750	0,000069
Сумма						60,2333	9,1300		0,000278

После необходимых преобразований получим следующие уравнения

Для AlN

$$P = 2{,}678 + 1{,}149V + 0{,}312P + 0{,}129VP \quad (2)$$

Для B_4C:

$$P = 1{,}194 + 1{,}496V + 0{,}230P + 0{,}205VP \quad (3)$$

Для Cr+2B:

$$P = 7{,}447 + 1{,}187V + 0{,}073P + 0{,}194VP \quad (4)$$

Для Ti +B

$$P = 2{,}299 + 1{,}131V + 0{,}316P + 0{,}184VP \quad (5)$$

С помощью данных формул рассчитаем зависимость величины износа от скорости скольжения и давления в месте контакта для четырех вышеуказанных покрытий при значениях скоростей скольжения: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4 м/с и давления: 3,5; 7,5; 11,5; 15,5; 20 МПа.

Расчетные зависимости износа от скорости скольжения и давления в месте контакта для покрытий, содержащих AlN, B_4C, Cr+2B и Ti +B, представлены в табл. 6 – 8 .

Таблица 6. Зависимость величины износа от скорости скольжения и давления в месте контакта для покрытия с AlN

Давление, МПа	Величина износа I, мкм					
	Скорость скольжения, м/с					
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,5	6,167	7,167	7,667	8,167	9,167	10,167
7,5	8,250	9,583	10,250	10,917	12,250	13,583
11,5	10,333	12,000	12,833	13,667	15,333	17,000
15,5	12,417	14,417	15,417	16,417	18,417	20,417
20,0	14,500	16,833	18,000	19,167	21,500	23,833

Таблица 7. Зависимость величины износа от скорости скольжения и давления в месте контакта для покрытия с B_4C

Давление, МПа	Величина износа I, мкм					
	Скорость скольжения, м/с					
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,5	5,333	6,708	7,396	8,083	9,458	10,833
7,5	7,542	9,448	10,401	11,354	13,260	15,167
11,5	9,750	12,188	13,406	14,625	17,063	19,500
15,5	11,958	14,927	16,411	17,896	20,865	23,833
20,0	14,167	17,667	19,417	21,167	24,667	28,167

Таблица 8. Зависимость величины износа от скорости скольжения и давления в месте контакта для покрытия с Cr+2B

Давление, МПа	Величина износа I, мкм					
	Скорость скольжения, м/с					
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,5	10,490	11,662	12,248	12,833	14,005	15,177
7,5	11,995	13,664	14,499	15,333	17,003	18,672
11,5	13,500	15,667	16,750	17,833	20,000	22,167
15,5	15,005	17,669	19,001	20,333	22,998	25,662
20,0	16,510	19,672	21,253	22,833	25,995	29,157

Таблица 9. Зависимость величины износа от скорости скольжения и давления в месте контакта для покрытия с Ti+B

Давление, МПа	Величина износа I, мкм					
	Скорость скольжения, м/с					
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
3,5	6,075	7,179	7,731	8,283	9,388	10,492
7,5	8,513	10,092	10,881	11,671	13,250	14,829
11,5	10,950	13,004	14,031	15,058	17,113	19,167
15,5	13,388	15,917	17,181	18,446	20,975	23,504
20,0	15,825	18,829	20,331	21,833	24,838	27,842

Графическая зависимость износа от давления и скорости скольжения в месте контакта для покрытий, содержащих AlN, B_4C, Cr+2B и Ti +B, представлена на рис. 1.

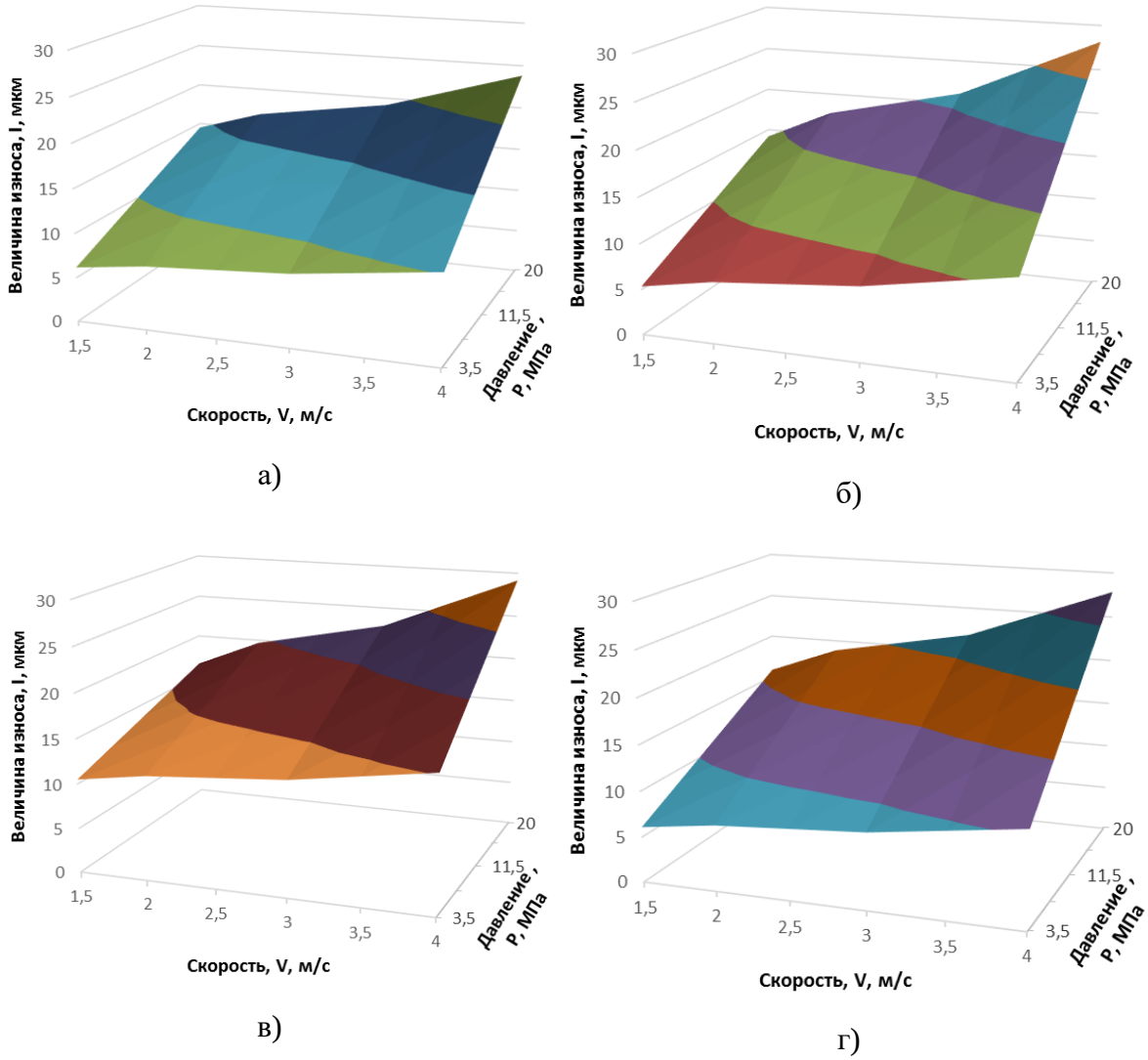


Рис. 1. Поверхность отклика влияния скорости скольжения V и давления P на износ покрытий: а) с AlN, б) с B_4C, в) с Cr+2B и г) Ti +B

Испытания на износ трением со смазкой показали, что у образцов из серого чугуна при испытаниях со скоростями выше 3 м/с и давлениями выше 10 МПа происходит катастрофический износ поверхности, а после обработки лазерным излучением без обмазки - износ в 1,5-2,0 раза выше, чем у образцов с обмазкой и составляет 45–70 мкм. То есть, изделия из серого чугуна, оплавленные лазером без обмазки, можно эксплуатировать при давлениях до 4–6,5 МПа и скоростях скольжения до 2–2,5 м/с.

Из рисунка 1 видно, что увеличением контактного давления и скорости скольжения величина износа образцов с обмазками возрастает: с 6,1 мкм до 23,8 мкм для AlN, с 5,3 мкм до 28,1 мкм для B_4C, с 10,5 мкм до 29,1 мкм для Cr+2B и с 6,0 мкм до 27,8 для Ti+B, при этом кривая износа возрастает постепенно.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований и расчетов получено:

1. Можно рекомендовать покрытия с AlN для эксплуатации особенно для высоких скоростей скольжения и контактных давлений.

2. Можно рекомендовать покрытия с B_4C для эксплуатации при давлениях 2–15 МПа и скоростях не больше 3,5 м/с.

2. Покрытия с Cr+2B и Ti+B можно рекомендовать для эксплуатации при средних скоростях в пределах 2–3 м/с и давлениях не больше 15 МПа и не меньше 5 МПа.

Список литературы: 1. World Steel Association [Electronic resource] // World Steel Association AISBL.- Mode of access: https://www.worldsteel.org. - Date of access: 20.12.2018. **2.** Исакин И.И. Методы поверхностной лазерной обработки металлов и сплавов, - Ростов-на-Дону: Южный университет, (ИУБиП), №2 (18), - 2016, - С. 49 – 58. **3.** Савватимский А. И., Теплофизические свойства многокомпонентного никель-хромового сплава ВСДП-3 при плавлении и в жидкой фазе / А. И., Онуфриев С. В., Мубояджян С. А., Середкин Н. Н., Конюхов С. А./ ТВТ, 55:5 (2017), С. 846–849. **4.** Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров / Под ред. А.Г. Григорьянца–М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2006.– 664 с. **5.** Кузнецова Е.В. Экспериментальная механика / учебно-методическое пособие. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. – 35 с. **6.** Реброва И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие. – Омск: СибАДИ, 2010. – 105 с. **7.** Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. М 30 Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.: ил.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С., Пилецкая Л.И.
(БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)
Тел./Факс: +375 (17) 3310045; E-mail: scvdmed@bntu.by

Abstract: *Method of laser cladding and its possibility for multimodal banded layers forming from heterogeneous work materials are considered in the article. Also shown the possibility of multimodal coatings deposition by combining methods of laser cladding and thermal spraying. It has been justified that multimodal coatings from self-fluxing nickel-based alloy and bronze can be used in various friction conditions including as an alternative to homogeneous nickel-based alloy coatings.*
Key words: *Laser cladding, thermal spraying, multimodal coatings, wear resistance.*

Высокие скорости и нагрузки современных машин и механизмов привели к увеличению роли композиционных материалов, позволяющих значительно увеличить износостойкость, в том числе композиционных упрочняющих покрытий. Особенно высокие физико-механические свойства показывает такой вид композиционных покрытий, как мультимодальные покрытия [1, 2]. Модой считается значение какого-либо признака (размера частиц упрочняющей фазы, величины пористости, вида материала), которые встречаются наиболее часто. Если имеют место несколько значений какого-либо признака, имеющие одинаковую частоту повторения, то покрытие является мультимодальным (бимодальным).

Лазерная наплавка позволяет наносить валики небольших размеров с хорошим сцеплением между собой и подложкой и минимальным взаимным перемешиванием материалов, при этом диапазон технологических параметров лазерной обработки достаточно большой, соответственно параметры нанесения покрытия могут выбираться достаточно свободно[3].

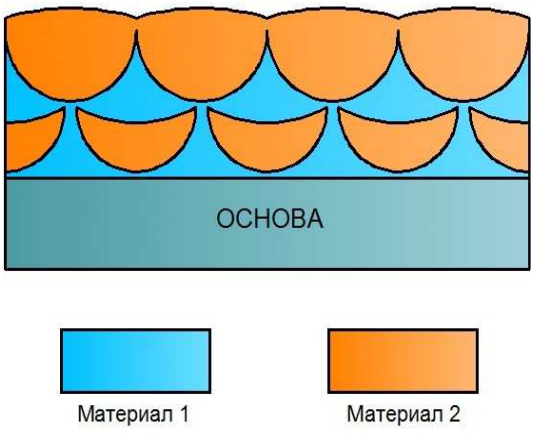


Рис. 1. Схема поперечного сечения мультимодального покрытия полученного методом лазерной наплавки

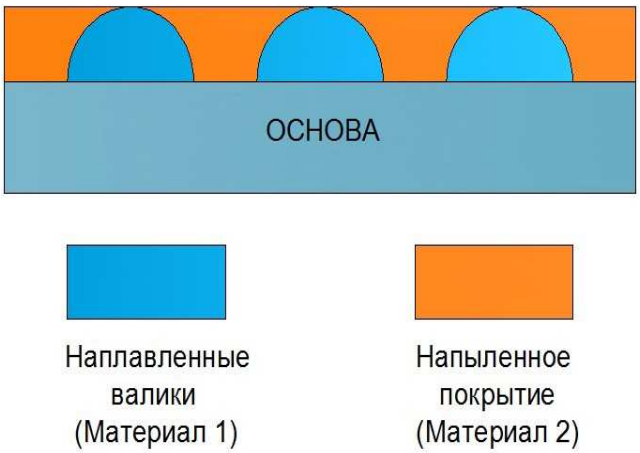


Рис. 2. Схема поперечного сечения мультимодального покрытия полученного сочетанием методов лазерной наплавки и газотермического напыления

Эти свойства лазерной наплавки наводят на мысль о возможности создания с ее помощью мультимодальных покрытий. В-частности, одним из вариантов создания мультимодальных покрытий с использованием возможностей лазерной наплавки

могло-бы стать построение покрытия состоящего из полосчатых слоев, полученных чередованием материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Возможная схема поперечного сечения такого покрытия, состоящего из двух слоев, в каждом из которых чередуются валики из различных материалов, показана на рис. 1. Также видится возможность построения мультимодального покрытия сочетанием методов лазерной наплавки и газотермического напыления. В этом случае один из материалов может наноситься на основу в виде дискретных валиков с определенным шагом, а второй материал может напыляться таким образом, чтобы заполнить промежутки между валиками из первого материала. Возможная схема поперечного сечения такого, условно говоря, армированного покрытия показана на рис. 2. Такие технологии создания мультимодальных покрытий могут быть использованы как для упрочнения новых деталей, так и для восстановления изношенных поверхностей с получением хороших прочностных свойств [4, 5].

Авторами были реализованы оба метода нанесения мультимодальных покрытий из разнородных материалов. В качестве материалов для построения мультимодальных покрытий были выбраны порошок алюминиевой бронзы ПГ-19М-01 и порошок самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01. Порошок бронзы ПГ-19М-01 рекомендован для создания покрытий на подушках прокатных станов, кулисах прессов, литейных моделях, шейках подшипников и других деталях. Покрытия из этого материала имеют низкий коэффициент трения, обеспечивающий максимальную износостойкость при трении по металлу с эффектом самосмазывания [6]. Порошок сплава ПГ-12Н-01 предназначен для нанесения покрытий на детали из углеродистых и нержавеющих сталей и чугунов. Покрытия из этого материала имеют низкий коэффициент трения, высокую износостойкость и твердость 35-40 HRC [6]. Указанный порошок хорошо наносится методом лазерной наплавки, а свойства наплавляемых лазером валиков достаточно изучены[7, 8, 9].

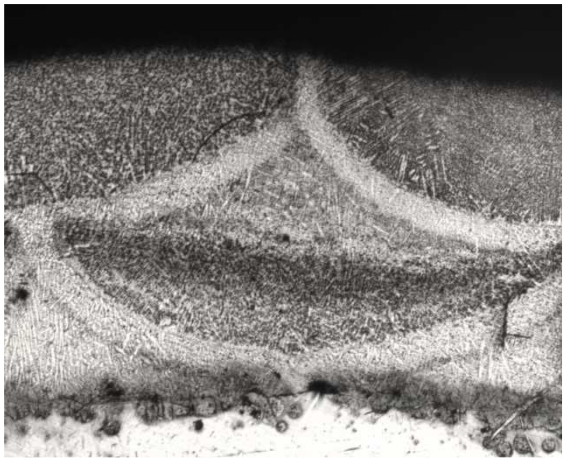


Рис. 3. Поперечное сечение двухслойного мультимодального покрытия, полученного лазерной наплавкой

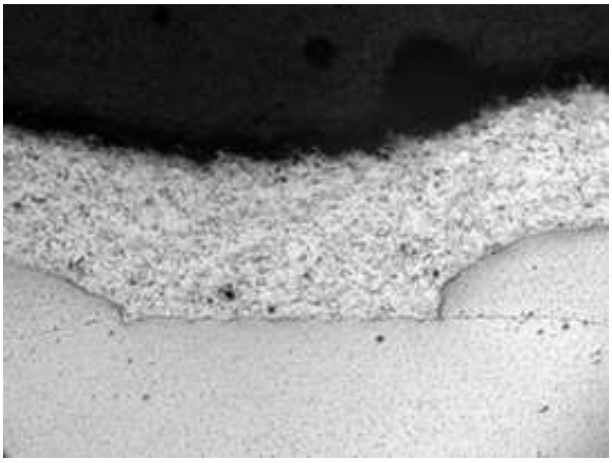


Рис 4. Поперечное сечение покрытия, полученного сочетанием методов лазерной наплавки и плазменного напыления

Лазерная наплавка производилась на технологическом комплексе, изготовленном на базе CO_2-лазера непрерывного действия «Комета-2» и координатного стола с системой числового программного управления «Mach 3». При этом наносились параллельные валики из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, чередовавшиеся друг с другом. Плазменное напыление, при втором способе нанесения мультимодального покрытия производилось на установке плазменного напыления УПУ-3Д с источником питания ИПН-160/600 с использованием в качестве плазмообразующего и

транспортирующего газа азота. Плазменное напыление выполнялось порошком бронзы ПГ-19М-01 на сетку из параллельных валиков из сплава ПГ-12Н-01, нанесенных на основу с определенным шагом методом лазерной наплавки.

Поперечное сечение покрытия, полученного первым методом, показано на рис. 3. На рисунке представлено двухслойное мультимодальное покрытие, полученное при чередовании наплавленных лазером валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. Поскольку второй слой покрытия сдвинут на шаг наплавки валиков относительно первого слоя, хорошо видно чередование валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в шахматном порядке.

На рис. 4 представлено поперечное сечение покрытия, полученного вторым способом. Хорошо видны нанесенные на основу методом лазерной наплавки армирующие валики из сплава ПГ-12Н-01 (справа и слева на рис. 4) и плазменное покрытие из бронзы ПГ-19М-01, заполняющее промежутки между валиками из сплава ПГ-12Н-01.

Проведенные исследования показали, что в поперечном сечении обоих покрытий в направлении параллельно основе наблюдается периодичность изменения микротвердости. Для двухслойного мультимодального покрытия такая периодичность показана на рис. 5. Вначале, когда измерения выполняются в левом валике из бронзы ПГ-19М-01, средняя микротвердость покрытия находится в пределах 4000 Мпа, когда измерения проводятся в валике из сплава ПГ-12Н-01 наблюдается увеличение средней микротвердости до 5000 Мпа, и, наконец, когда измерения проводятся в правом валике бронзы, средняя микротвердость опять уменьшается до 4000 Мпа. Такие периодические изменения микротвердости происходят вдоль всего поперечного сечения мультимодального покрытия.

Рис. 5. Периодическое изменение микротвердости в поперечном сечении двухслойного мультимодального покрытия

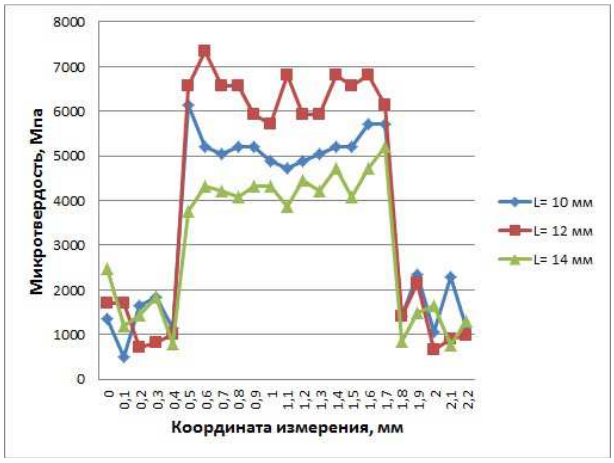


Рис. 6. Периодическое изменение микротвердости в поперечном сечении армированного покрытия

Аналогичная картина наблюдается и в армированном покрытии (рис. 6), отличия состоят только в величинах средней микротвердости. Когда микротвердость измеряется в участках плазменного покрытия из бронзы, ее средняя величина составляет 1500 МПа , при переходе в валик из сплава ПГ-12Н-01 средняя микротвердость составляет 5500 Мпа, периодически изменяясь по всей ширине покрытия.

В обоих случаях существует возможность регулирования величины периода изменения микротвердости за счет изменения шага наплавки валиков из разнородных материалов, в первом случае, и за счет изменения шага наплавки армирующих валиков,

во втором случае. Регулирование периода изменения микротвердости неизбежно приводит к изменению трибологических характеристик покрытий. В частности, авторами уже установлено изменение износостойкости обоих типов покрытий в пределах 10-50% при изменении шага наплавки валиков.

Испытания износостойкости рассматриваемых покрытий в сравнении с однородными покрытиями из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 показали следующее. При сухом трении, рис. 7, наиболее низкую износостойкость имеют наплавленное лазером покрытие из бронзы (1,0) и армированное покрытие (0,88). Низкой износостойкостью обладает также однослойное мультимодальное покрытие (1,88). Двухслойное мультимодальное покрытие, между тем, имеет при сухом трении износостойкость (6,57) равную износостойкости наплавленного лазером покрытия из самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01 (6,55), в то время как его себестоимость значительно ниже себестоимости покрытия из самофлюсующегося сплава. Таким образом, при сухом трении двухслойное мультимодальное покрытие, учитывая его низкую себестоимость, может быть хорошей альтернативой наплавленному лазером покрытию из весьма износостойкого, но дорогого самофлюсующегося сплава на основе никеля. Что касается армированного покрытия, то при сухом трении его использование не имеет перспективы.

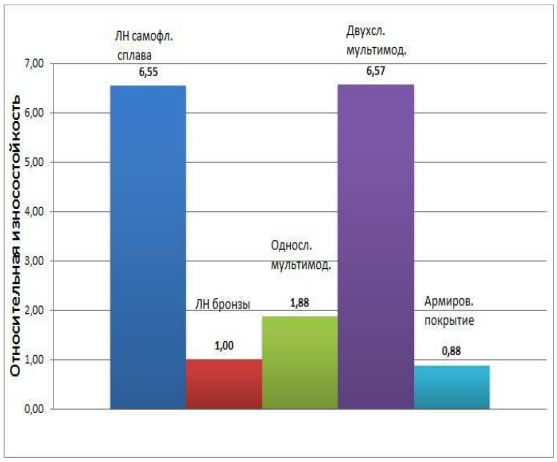


Рис. 7. Относительная износостойкость покрытий в условиях сухого трения

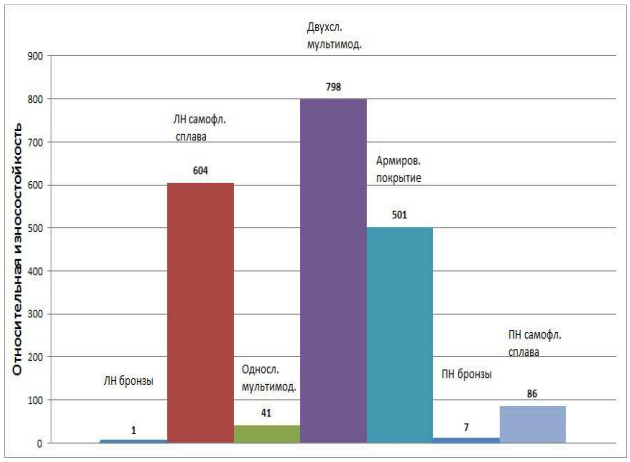


Рис. 8. Относительная износостойкость покрытий в условиях граничной смазки

При трении в условиях граничной смазки, рис. 8, наиболее низкую относительную износостойкость имеют наплавленное лазером покрытие из бронзы (1), плазменное покрытие из бронзы (7) и однослойное мультимодальное покрытие (41). Несколько выше износостойкость нанесенного плазменным напылением сплава ПГ-12Н-01 (86). Износостойкость двухслойного мультимодального покрытия (798) в 1,3 раза превышает износостойкость наплавленного лазером покрытия из самофлюсующегося сплава (604). Таким образом, при трении в условиях граничной смазки двухслойное мультимодальное покрытие, имеющее достаточно низкую себестоимость, может успешно заменять наплавленное лазером покрытие из износостойкого, но дорогого самофлюсующегося сплава на основе никеля. Кроме того, в этих условиях трения армированное покрытие, имеющее относительную износостойкость 501 и удовлетворительную себестоимость, может быть хорошей альтернативой плазменному покрытию из сплава ПГ-12Н-01, имеющему относительную износостойкость 86.

Высокие трибологические характеристики обоих видов мультимодальных покрытий скорее всего объясняются наличием в них бронзовой составляющей, которая

способствует протеканию процесса избирательного переноса и является твердой смазкой при трении [10].

Выводы

1. Имеется реальная возможность нанесения методом лазерной наплавки и сочетанием методов лазерной наплавки и газотермического напыления мультимодальных покрытий из разнородных материалов с возможностью регулирования трибологических характеристик.

2. Мультимодальные покрытия, получаемые из самофлюсующегося сплава на основе никеля и бронзы лазерной наплавкой и сочетанием методов лазерной наплавки и газотермического напыления, имеют хорошую перспективу применения в различных условиях трения, в том числе, как альтернатива дорогостоящим однородным покрытиям из самофлюсующегося сплава на основе никеля.

3. Успешное применение мультимодальных покрытий из разнородных материалов, полученных методом лазерной наплавки, требует проведения комплекса углубленных исследований, которые позволят не только отработать технологию их нанесения, пригодную для промышленного использования, но и найти сочетания материалов, дающие наибольший эффект.

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.** R. Vilar. Laser cladding. *Journal of laser applications*, vol. 11:64 – 79, 1999. **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. **6.** Наплавочные материалы, выпускаемые Торезским заводом наплавочных твердых сплавов.- Донецк: ВНИИТС, 1984. **7.** O.G. Devoyno, P.S. Drozdov, Y.B. Dovoretskiy, M.A. Kardapolova, N.I. Lutsko, E. Tamanis.- Influence of Laser Cladding Parameters on the Distribution of Elements in the Beads of Nickel-Based Ni-Cr-B-Si Alloy.- Latvian Journal of Physics and Technical Sciences/ Versita, Warsaw Volume 49, Number 4 / 2012, P. 61-70. **8.** Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С..- Микротвердость покрытий из самофлюсующегося сплава на основе никеля при различных режимах лазерной наплавки.- Машиностроение и техносфера XXI века// Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 17-22 сентября 2012 г. В 3-х томах.- Донецк: ДонНТУ, 2012, Т. 1.- 300 с., С. 222-226. **9.** О.Г. Девойно, Н.И. Луцко, А.С. Лапковский.- Влияние режимов лазерной наплавки на геометрические размеры получаемых валиков.- Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых/ Юргинский технологический институт.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013.- 654 с., С. 193-195. **10.** Берсенев, В.М. Влияние многокомпонентных и многослойных покрытий на процессы трения и износа/В.М. Берсенев// Физическая инженерия поверхностей. - 2004. - Т. 2. - № 4. - С. 214-219.

УРАВНЕНИЕ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Дуйшеналиев Т.Б., Хроматов В.Е., Цой В.Э., Щугорев В.Н.
(НИУ «МЭИ», Москва, Россия)
Тел.: +7 916 498 6250; E-mail: duishenaliev@mail.ru; DuyshenaliyevT@mpei.ru

Annotation. *None of the greater number of equations proposed as a quantitative description of the Mohr hypothesis has a mathematical justification. The equation proposed in this paper differs in that it can be categorized as well grounded, mathematically derived equations. This equation, which expresses the quantitative ratio between the limiting values of the smallest and the greatest principal stresses, is a very simple relation. Nevertheless, it determines all those stress conditions that lead to the destruction of a material. Using this equation it is possible to construct an envelope line of stress limit circles.*
Keywords: *critical stresses, compression, tension, stress state, destruction, equation of the envelope of stress limit circles.*

Введение.

Любое напряженное состояние можно изобразить на плоскости нормального и касательного напряжений. Такая возможность впервые обнаружена и математически описана Мором. Это обстоятельство сыграло весьма позитивную роль, ибо поиск закономерности на плоскости несравнимо проще, чем в пространстве. Если любое напряженное состояние можно изобразить на плоскости, то на ней можно изобразить и те напряженные состояния, при которых разрушается исследуемый материал.

О. Мор [2] выдвинул гипотезу о том, что наибольшие круги разрушающих напряженных состояний образуют семейство, огибаемое одной линией. Эта линия получила название огибающей линии предельных кругов напряжений. Таким образом, предположение о наличии огибающей наибольших кругов разрушающих напряженных состояний является основным утверждением теории прочности Мора.

В качестве количественного выражения теории прочности Мора предлагается много соотношений, выдвинутых на основе различных соображений. Зачастую вначале задаются типом зависимости, а затем определяются константы [5,6]. Все эти зависимости удовлетворительно описывают опытные данные вблизи тех напряженных состояний, которые использовались при определении констант. С удалением от этих напряженных состояний несоответствия все более и более возрастают [2].

В этой работе был использован другой подход – не задаваться видом зависимости, а вывести его математически.

Уравнение огибающей линии предельных кругов Мора в параметрической форме.

Обозначим главные напряжения через $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, считая сжимающие напряжения как положительные. Уравнение предельных кругов имеет вид [1,2]:

$$\sigma^2 + \tau^2 - (\sigma_1 + \sigma_3)\sigma + \sigma_1\sigma_3 = 0. \qquad (1)$$

Для того чтобы семейство кругов (1) имело общую огибающую линию, оно должно определяться одним параметром. В качестве параметра выберем одно из главных напряжений, например, σ_1.

Для наличия огибающей линии предельных кругов напряжений необходимо, чтобы частная производная уравнения (1) по выбранному параметру была равна нулю:

$$-(1+\sigma_3')\sigma + (\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3') = 0.$$

Отсюда находим:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_3'} \ . \qquad (2)$$

Подставим (2) в уравнение (1):

$$\tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_3'} \sqrt{\sigma_3'} . \qquad (3)$$

Выражения (2), (3) представляют собой уравнение огибающей предельных кругов Мора в параметрической форме.

Функция, служащая параметром в уравнении огибающей линии предельных кругов Мора

Допустим, что из уравнений (2) и (3) удалось исключить параметр σ_1, а также, определяемые этим параметром, функции $\sigma_3(\sigma_1)$, $\sigma_3'(\sigma_1)$. Это привело бы к явному уравнению огибающей линии:

$$\tau = \tau(\sigma) . \qquad (4)$$

Подставим (4) в уравнение (1):

$$\sigma^2 + \tau(\sigma)^2 - (\sigma_1 + \sigma_3)\sigma + \sigma_1 \sigma_3 = 0 . \qquad (5)$$

Теперь на выражение (5) можно смотреть как на уравнение между главными напряжениями σ_1, σ_3, которое содержит параметр σ. Задавая этому параметру разные значения, получим кривую на плоскости σ_1, σ_3, т.е.:

$$\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_1) , \qquad (6)$$

$$\sigma_3 = \frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + \sigma_1^{\,2}} \ . \qquad (7)$$

Допустим, величины констант *a*, *b* для данного материала известны. В этом случае, задаваясь величинами σ_1 в пределах $0 \le \sigma_1 < \infty$ и, вычисляя соответствующие им величины σ_3, можно определить все предельные напряженные состояния. Можно построить и огибающую линию по следующим уравнениям:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_3'}, \ \ \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_3'} \sqrt{\sigma_3'}$$

$$\tilde{a}\ddot{a}\mathring{a}\,\sigma_3 = \frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + \sigma_1^{\,2}}, \ \ \sigma_3' = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + \sigma_1^{\,2}}} \ . \qquad (8)$$

Это уравнение отличается от всех ранее предложенных видов [4,5,6] тем, что оно является математически выведенным.

Определение констант по величинам главных напряжений любых двух напряженных состояний трехосного сжатия

В уравнение огибающей линии (8) механическое свойство материала входит в виде констант *a, b.* Эти константы можно определить через величины главных напряжений любых двух предельных состояний. Обозначим величины главных напряжений одного из этих состояний:

$$\sigma_1 = \sigma 1_r, \ \sigma_3 = \sigma 3_r ,$$

а другого:

$$\sigma_1 = \sigma 1_s, \ \sigma_3 = \sigma 3_s .$$

Подставляя эти величины в (7), получим два уравнения для определения двух констант. Решая их, находим:

$$a = \frac{(\sigma 3_r)^2 - (\sigma 3_s)^2 - (\sigma 1_r)^2 + (\sigma 1_s)^2}{2(\sigma 3_r - \sigma 3_s)} + \sqrt{\frac{((\sigma 3_r)^2 - (\sigma 3_s)^2)^2 - ((\sigma 1_r)^2 - (\sigma 1_s)^2)^2}{2(\sigma 3_r - \sigma 3_s)^2} - (\sigma 1_r)^2 - (\sigma 1_s)^2 + (\sigma 3_r)^2 + (\sigma 3_s)^2}$$

$$b = \frac{(\sigma 3_r)^2 - (\sigma 3_s)^2 - (\sigma 1_r)^2 + (\sigma 1_s)^2}{2(\sigma 3_r - \sigma 3_s)} - \sqrt{\frac{((\sigma 3_r)^2 - (\sigma 3_s)^2)^2 - ((\sigma 1_r)^2 - (\sigma 1_s)^2)^2}{2(\sigma 3_r - \sigma 3_s)^2} - (\sigma 1_r)^2 - (\sigma 1_s)^2 + (\sigma 3_r)^2 + (\sigma 3_s)^2} \quad (9)$$

Введем в уравнения (8) эти величины констант:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_3'}, \quad \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_3'} \sqrt{\sigma_3'} \quad (10)$$

ãääå: $$\sigma_3 = \frac{(\sigma 3_r)^2 - (\sigma 3_s)^2 - (\sigma 1_r)^2 + (\sigma 1_s)^2}{2(\sigma 3_r - \sigma 3_s)} + \sqrt{\frac{(\sigma 3_r - \sigma 3_s)^2}{4} + \frac{((\sigma 1_r)^2 - (\sigma 1_s)^2)^2}{4(\sigma 3_r - \sigma 3_s)^2} - \frac{(\sigma 1_r)^2 + (\sigma 1_s)^2}{2} + \sigma_1^2}$$

$$\sigma_3' = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{(\sigma 3_r - \sigma 3_s)^2}{4} + \frac{((\sigma 1_r)^2 - (\sigma 1_s)^2)^2}{4(\sigma 3_r - \sigma 3_s)^2} - \frac{(\sigma 1_r)^2 + (\sigma 1_s)^2}{2} + \sigma_1^2}}$$

Определение констант по величинам предела прочности материала на осевое сжатие и главных напряжений какого-либо другого предельного напряженного состояния

Зачастую экспериментаторы ограничиваются проведением испытаний материалов только в камерах трехосного сжатия. В таких камерах образцы материалов можно довести до разрушения при осевом сжатии без бокового давления (осевое сжатие) и при осевом сжатии с приложением к боковой поверхности образца различных величин гидростатического давления. Этими испытаниями определяется предел прочности на осевое сжатие σc, а также ряд величин главных напряжений, при которых образец разрушается.

Для таких испытаний величины констант *a, b* необходимо выразить через величины предела прочности на осевое сжатие и через величины какой-либо пары главных напряжений. Пусть, в уравнении (10) в качестве главных напряжений $\sigma 1_s$, $\sigma 3_s$, взяты главные напряжения осевого сжатия:

$$\sigma 1_s = \sigma c, \ \sigma 3_s = 0,$$

где σc - предел прочности материала при осевом сжатии. Введем это в уравнения (10):

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_2'}, \quad \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_2'} \sqrt{\sigma_3'},$$

где: $$\sigma_3 = \frac{(\sigma 3_r)^2 - (\sigma 1_r)^2 + \sigma c^2}{2\sigma 3_r} + \sqrt{\frac{((\sigma 1_r)^2 - (\sigma 3_r)^2)^2 + \sigma c^2(\sigma c^2 - 2(\sigma 1_r)^2 - 2(\sigma 3_r)^2)}{4\sigma 3_r{}^2} + (\sigma_1)^2}. \quad (11)$$

$$\sigma_3' = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{((\sigma 1_r)^2 - (\sigma 3_r)^2)^2 + \sigma c^2(\sigma c^2 - 2(\sigma 1_r)^2 - 2(\sigma 3_r)^2)}{4\sigma 3_r{}^2} + (\sigma_1)^2}}$$

Выражение констант уравнения огибающей линии через пределы прочности материала на осевое растяжение и на осевое сжатие

Самыми распространенными механическими характеристиками конструкционных материалов являются пределы их прочности на осевое сжатие и на осевое растяжение, которые обозначим соответственно σc и σp. Подставим в уравнения (11) главные напряжения при осевом растяжении:

$$\sigma 1_r = 0, \sigma 3_r = \sigma p.$$

При этом получим уравнение огибающей линии предельных кругов напряжений, выраженное через пределы прочности материала на осевое сжатие и на осевое растяжение:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_3'}, \quad \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_3'} \sqrt{\sigma_3'}$$

$$\text{ãää:} \quad \sigma_3 = \frac{\sigma c^2 + \sigma p^2}{2 \cdot \sigma p} + \sqrt{(\frac{\sigma c^2 - \sigma p^2}{2 \cdot \sigma p})^2 + \sigma_1^2}, \quad \sigma_3' = \frac{\sigma_1}{\sqrt{(\frac{\sigma c^2 - \sigma p^2}{2 \cdot \sigma p})^2 + \sigma_1^2}} \quad . \qquad (12)$$

В уравнение огибающей линии (12) механическое свойство материала входит в виде пределов прочности материала на осевое сжатие и на осевое растяжение. Если величины этих пределов установлены, то уравнение (12) определяет все те напряженные состояния, которые приводят к разрушению данный материал.

Определение предела прочности на осевое растяжение

В камерах трехосного сжатия образцы материала доводятся до разрушения при различных величинах бокового (наименьшего σ_3) и осевого (наибольшего σ_1) главных напряжений. В таких испытаниях сначала определяется и величина предела прочности на осевое сжатие. В этом случае к боковой поверхности образца не прикладывается давление. В таких испытаниях предел прочности на осевое растяжение остается не определенным. Можно ли вычислить величину предела прочности из данных таких опытов?

Главные напряжения для осевого растяжения:

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_3 = \sigma p ,$$

где σp - предел прочности на осевое растяжение. Подставим это в третье из уравнений (11):

$$\sigma p = \frac{(\sigma 3_r)^2 - (\sigma 1_r)^2 + \sigma c^2}{2\sigma 3_r} + \sqrt{\frac{((\sigma 1_r)^2 - (\sigma 3_r)^2)^2 + \sigma c^2 (\sigma c^2 - 2(\sigma 1_r)^2 - 2(\sigma 3_r)^2)}{4\sigma 3_r{}^2}} \quad . \qquad (13)$$

Здесь получено уравнение для теоретического определения предела прочности материала по данным его испытаний в камерах трехосного сжатия.

Экспериментальная состоятельность выведенного уравнения (8)

Для различия, опытные величины главных напряжений σ_1, σ_3 далее будем соответственно обозначать $\sigma 1$, $\sigma 3$.

Опытные данные обычно даются в виде следующих векторов:

$$\sigma 3 = (0 \quad \sigma 3_1 \quad \sigma 3_2 \quad \ldots \quad \sigma 3_n) \ , \qquad (14)$$

$$\sigma 1 = (\sigma c \quad \sigma 1_1 \quad \sigma 1_2 \quad \ldots \quad \sigma 1_n) \ , \qquad (15)$$

где σc - определенная опытами величина предела прочности на осевое сжатие, а $\sigma 3_r$, $\sigma 1_r$ (r = 1, 2, ..., n) - опытные величины предельных главных напряжений σ_1, σ_3.

В какой мере выведенное уравнение (7) описывает опытные данные (14)?

Проверить это просто. Надо вычислить величины σ_3 из уравнения (7), последовательно подставляя в него те величины σ_1, которые равны элементам вектора $\sigma 1$. При этом мы получаем расчетные величины σ_3. Если эти величины совпадают или незначительно отличаются от соответствующих элементов вектора $\sigma 3$, то уравнение (7) хорошо описывает действительное поведение материала. В этом случае оно оправдывает свое строгое математическое обоснование.

Выше приведены несколько методов вычисления расчетных величин σ_3. Эти вычисления можно проводить, используя:

1. уравнение (7), предварительно определив константы из уравнений (9);
2. третье из уравнений (10);
3. третье из уравнений (11);
4. третье из уравнений (12), если пределы прочности материала на осевое сжатие и растяжение установлены экспериментально, т.е. опытные данные имеют вид:

$$\sigma 3 = (\sigma p \quad 0 \quad \sigma 3_2 \quad \sigma 3_3 \quad \ldots \quad \sigma 3_n) \ , \tag{16}$$

$$\sigma 1 = (0 \quad \sigma c \quad \sigma 1_2 \quad \sigma 1_3 \quad \ldots \quad \sigma 1_n) \ . \tag{17}$$

Результаты вычислений по этим методам должны совпадать или иметь незначительные отклонения, обусловленные дисперсией опытных данных. Для примера здесь приведем сравнения по первому из этих методов.

Все вычисления осуществлены на ЭВМ на основе компьютерных программ в системе MathCAD [2].

Рассмотрим результаты опытов Кармана [2,4] над каррарским мрамором (здесь и далее напряжения даны в $кг/см^2$):

$$\sigma 1 = (1360 \quad 2350 \quad 3150 \quad 3565 \quad 4055 \quad 5550), \tag{18}$$

$$\sigma 3 = (0 \quad 250 \quad 500 \quad 685 \quad 845 \quad 1650) \ . \tag{19}$$

Определим константы из уравнений (9), подставив в него напряжения осевого сжатия и какого-либо одного из напряженных состояний (18):

a = 3043 кг/см^2, b = – 18560 кг/см^2.

Введем эти значения констант в уравнение (7):

$$\sigma p_3 = \frac{3043 - 18560}{2} + \sqrt{\frac{(3043 + 18560)^2}{8} + \sigma_1^2} \ .$$

Это уравнение определяет все семейство предельных состояний для каррарского мрамора при $\sigma_1 \in 0, \ldots, \infty$. Внесем в это уравнение следующие величины предельного напряжения:

$$\sigma_1 = (0 \quad 1360 \quad 2350 \quad 3150 \quad 3565 \quad 4055 \quad 5550).$$

При подстановке этих величин в предыдущее уравнение получаем следующие расчетные величины наименьшего главного напряжения:

$$\sigma p_3 = (0 \quad 233 \quad 503 \quad 670 \quad 889 \quad 1683).$$

Эти величины почти совпадают с опытными величинами (19), что наглядно видно на рисунке 1:

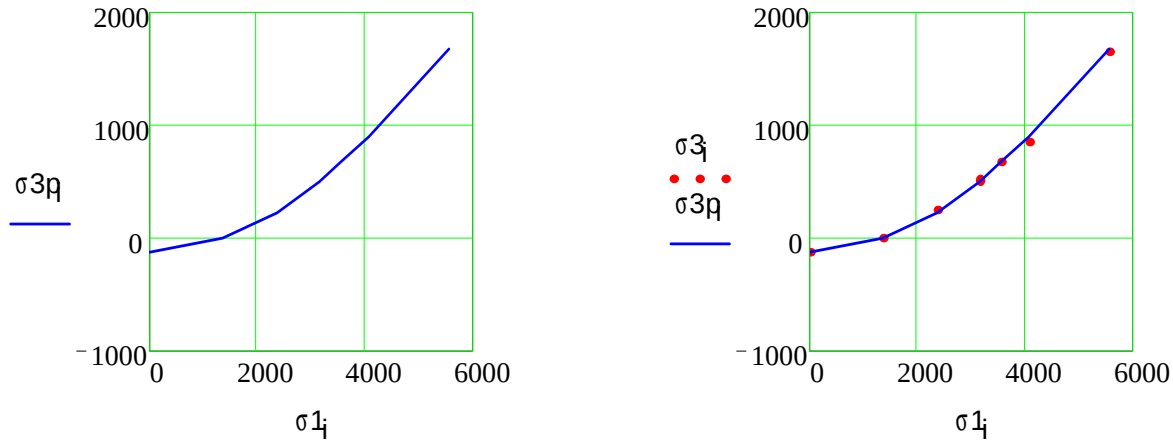


Рис. 1. График уравнения (7) (левый рисунок), график уравнения (7) и опытные точки (правый рисунок) для каррарского мрамора [4]

Далее построим огибающую линию по уравнениям (8) при определенных выше величинах констант a, b и нанесем туда опытные предельные круги напряжений (рисунок 2).

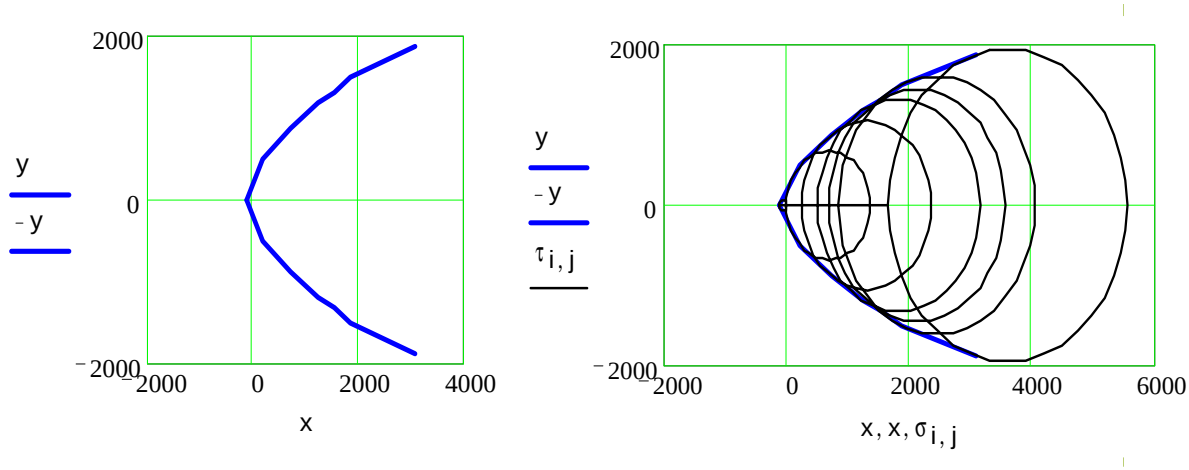


Рис. 2. График уравнения (10) (левый рисунок), график уравнения (10) и опытные предельные круги напряжений (правый рисунок) для каррарского мрамора [4].

Из этого рисунка 2 видно, как теоретическая кривая, показанная на левом рисунке, почти идеально огибает опытные предельные круги напряжений (правый рисунок).

Список литературы: 1. Дуйшеналиев Т.Б. Количественное описание теории прочности Мора [Текст] / Т.Б. Дуйшеналиев // Известия Национальной академии наук КР. - №4 . – 2012. – С. 47-50. **2.** Дуйшеналиев Т.Б. Неклассические решения механики деформируемого тела [Текст] / Т.Б.Дуйшеналиев. – М.: Издательство МЭИ, 2017. – 400 с. **3.** Дуйшеналиев Т.Б., Хроматов В.Е. Уточненные соотношения критерия хрупкого разрушения Мора [Текст] / Т.Б.Дуйшеналиев, В.Е.Хроматов. Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова. – М.: Издательство МАИ (НИУ), 2018. – С. 90-91. **4.** Карман Т. Опыты на всестороннее сжатие [Текст] / Т. Карман // Новые идеи в технике. Сб. статей. – 1915. - №1. – С. 51-102. **5.** Койфман М.И. и др. Прочность горных пород в объемном напряженном состоянии [Текст] /М.И. Койфман и др. – М.: Наука, 1964. – 134 с. **6.** Ставрогин А.Н. О предельных состояниях и деформации горных пород [Текст] / А.Н.Ставрогин // Горное давление. Сб. ВНИМИ. – Л., 1965. -№ 59. – С. 33–62.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ АЛЮМИНИЯ

Дьяченко О.В., Кардаполова М.А., Николаенко В.Л.
(БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)
Тел./Факс: +375 (17) 3310045; E-mail: scvdmed@bntu.by

Abstract: *Investigation of the influence of laser modification modes on the microstructure and microhardness of aluminum. The conditions for obtaining zones of hardening of aluminum.*
Key words: *Laser alloying, microstructure, microhardness, alloying components.*

Введение. Алюминий и сплавы на его основе обладают такими важными для лазерной обработки особенностями как высокая теплопроводность, большая отражательная способность поверхности, относительно низкие температуры плавления [1].

Вторая особенность легирования алюминиевых сплавов вытекает из большого различия в температурах плавления подложки и большинства легирующих компонентов. В связи с этим при легировании порошками с высокой температурой плавления при невысоком энерговкладе довольно часто имеет место неполное растворение и неполное перемешивание присадочных компонентов в легированных зонах.

Алюминиевые сплавы обычно легируют отдельными неметаллическими (Si, B) и металлическими (Fe, Ni, Cr, Co и др.) компонентами, сплавами и смесями этих компонентов, а также различными соединениями [1-4]

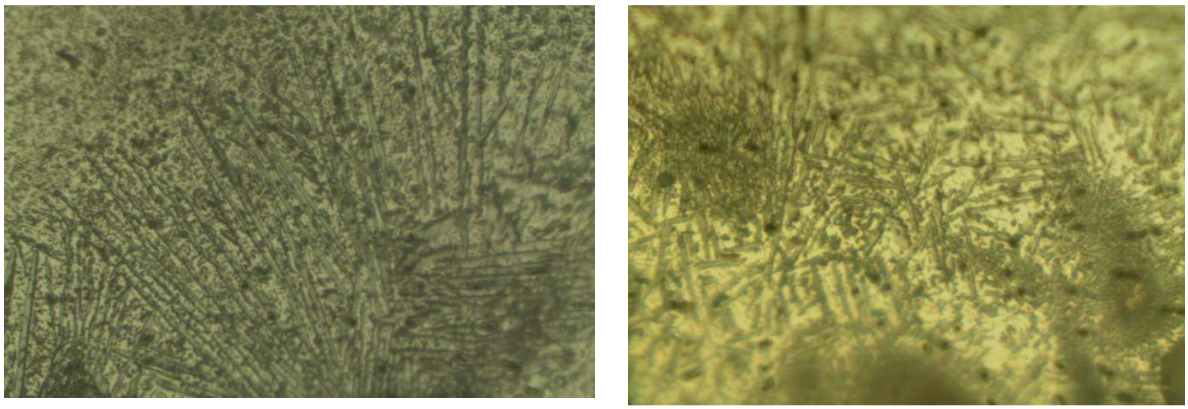
Целью работы является изучение влияния лазерного модифицирования FeB на структуру, фазовый состав и микротвердость алюминия.

Методика исследований. Для исследования использовались образцы из алюминия первичного А95 ГОСТ 11069-2001, химический состав которого Al 99,95%, Si - 0,020% Fe - 0,025 %, Cu – 0,010 %, Mn – 0,002%, Mg – 0,005, Zn - 0,005, Ga – 0,003% Ti – 0,002%, прочие примеси 0,005% ∅ 20 мм и толщиной 15 мм на поверхность которого наносили легирующие элементы в виде порошковых обмазок FeB, на клеевой связке (3% клея «AGO» в ацетоне) [5,6]. Толщина слоя обмазки составляла 0,09 – 0,11 мм и контролировалась толщиномером МТ-40НЦ. Оплавление осуществляли с помощью непрерывного лазера ЛГН-702 мощностью N = 1 кВт при диаметрах лазерного луча d_1 = $1{,}0 \times 10^{-3}$ м и d_2 = $2{,}0 \times 10^{-3}$ м, со скоростями перемещения v_1 = 200 мм/мин и v_2 = 400 мм/мин, с коэффициентом перекрытия $k_{пер}$ = 1 с целью получения единого фазового состава и заданных свойств по всей толщине покрытия.

На рисунке 1, а представлено полное проплавление упрочняемой зоны с образованием литой равновесной структуры, с иглами упрочняющей фазы, ориентированными в направлении теплоотвода.

Имеет место ярко выраженная гетерогенная структура, представляющая собой твердый раствор с выделениями в виде игл. Получение упрочненного слоя, в полной мере удовлетворяющего требованиям значительного повышения износостойкости, возможно лишь при комплексной модификации матрицы и упрочняющей фазы, что может быть реализовано при использовании в качестве обмазок многокомпонентных составов.

Для определения фазового состава проводили рентгеноструктурные исследования с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3.0 при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении; при этом в исследованном интервале углов толщина слоя 75%-ного поглощения энергии первичного пучка составила от 3 до 12 мкм (углы θ от 10 до 75°).



а) б)

Рис. 1. Микроструктура легированного образца при скорости перемещения луча лазера а) 200 мм/мин (х500): б) 400 мм/мин (х500)

Рентгеновский анализ показал, что покрытие состоит из твердого раствора на основе Al, боридов алюминия и боридов железа (таблица 1). Присутствие высокотвердых включений AlB_2, FeB, Fe_2B увеличивает твердость и износостойкость.

Таблица 1. Результаты рентгеноструктурного анализа после легирования

Наименование фазы	Количество линий	Концентрация фазы, %
Al	10	69,8
AlB_2	3	17,2
FeB	10	6,7
Fe_2B	4	6,3

На рисунке 1, б хорошо видны иглы упрочняющей фазы, ориентированные в направлении теплоотвода. В различных участках поверхности они отличаются в размерах. С повышением скорости лазерного луча уменьшается время оплавления. Вследствие этого твердый раствор на основе алюминия становился более пересыщенным.

Графики зависимостей микротвёрдости от глубины легированного слоя представлены на рисунках 2, 3.

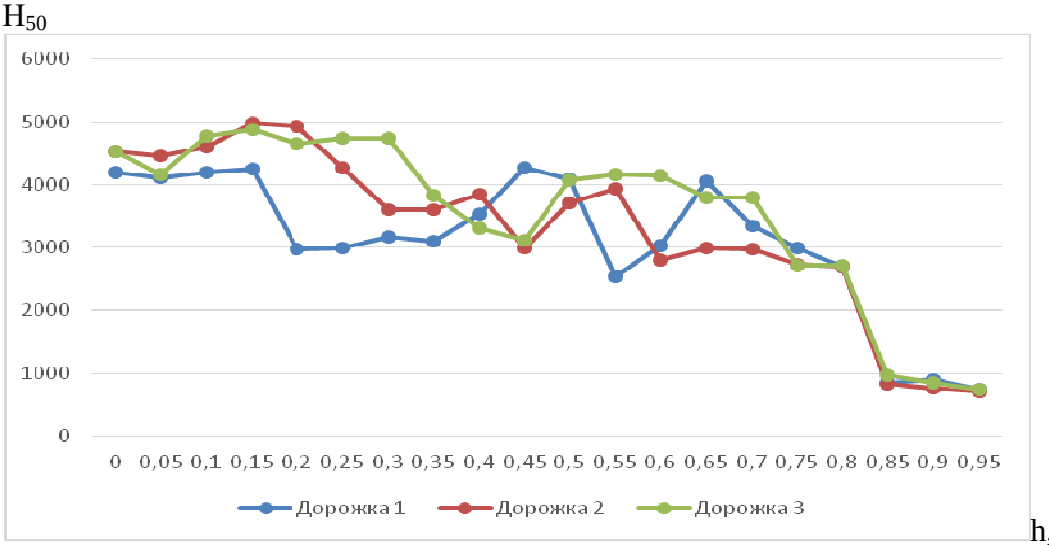


Рис. 3. График зависимости микротвердости поверхности от глубины легированной зоны при скорости оплавления 200 мм/мин

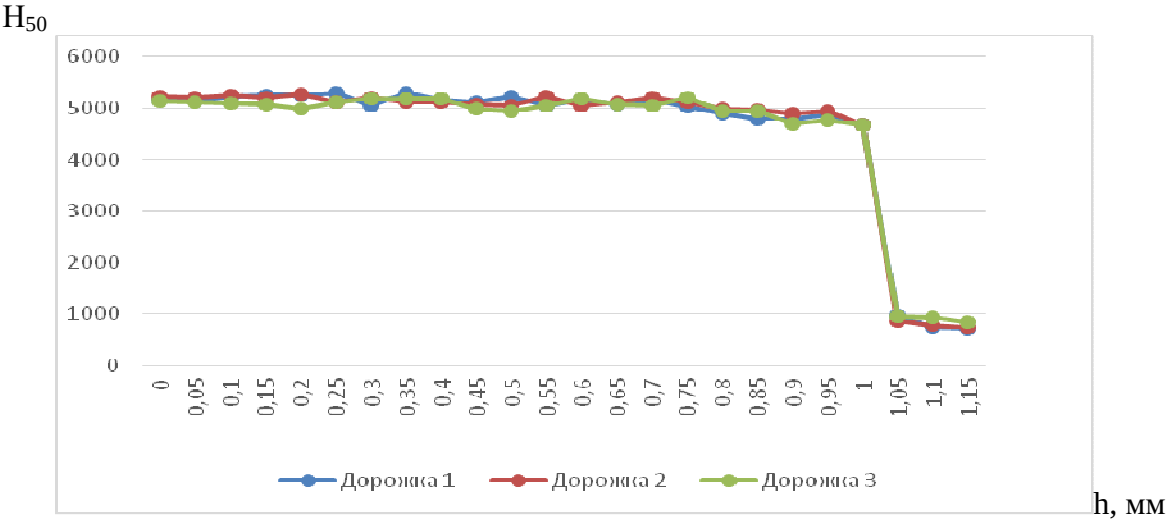


Рис. 4. График зависимости микротвердости поверхностного слоя от глубины легированной зоны при скорости легирования 400 мм/мин

Рассмотрим теперь сочетание влияния скорости оплавления лазерным лучом и легирующих веществ на микротвердость упрочняемого слоя. Как видно из графиков, с увеличением скорости оплавления микротвердость легированных слоев увеличивается.

Максимальных значений (5,0 ГПа) микротвердость достигается при скорости оплавления 200 мм/сек. Большой разброс микротвердости говорит о гетерогенности структуры. Четко прослеживаются три основные зоны: легирования 5,0 – 2,5 ГПа, 2,5 – 1,5 ГПа - зона термического влияния, 1 ГПа – 0,7 ГПа – алюминий без легирования. Повышенная микротвердость зоны термического влияния объясняется произошедшими в ней в процессе лазерного легирования мартенситными превращениями.

Полученная зависимость по всей вероятности определяется микротвердостью образовавшихся при воздействии лазерного луча фаз, что может положительно сказаться на износостойкости полученного покрытия.

Говоря о скорости 400 мм/мин, то в данном случае также четко прослеживается уменьшение микротвердости от 5,3 ГПа в верхней области до 1 – 0,7 ГПа в области алюминия без легирования.

С увеличением скорости луча лазера, то есть с уменьшением энерговклада лазерного излучения, закономерно снижается глубина зоны расплава и одновременно растет ее микротвердость. Последнее может быть связано с увеличением концентрации легирующих веществ из обмазки FeB в зоне расплава вследствие уменьшения ее объема.

Выводы: Варьируя режимами лазерной обработки можно получить изменение микроструктуры от гомогенной с выделением игл упрочняющей фазы до пересыщенной.

Лазерное легирование алюминия позволяет повысить его микротвердость. С увеличением скорости луча лазера, то есть с уменьшением энерговклада лазерного излучения, закономерно снижается глубина зоны расплава и одновременно растет ее микротвердость. Последнее может быть связано с увеличением концентрации легирующих веществ из обмазки FeB в зоне расплава вследствие уменьшения ее объема.

Список литературы: 1. Гвоздева Г.О., Тарасова Т.В. Перспективы использования высококонцентрированных источников энергии для повышения коррозионной стойкости алюминиевых сплавов. // Материалы XVII международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». М.: МАИ, 2011. -213 с. **2.** Александров В.Д. Поверхностное упрочнение алю-

миниевых сплавов. М.: Техполиграфцентр, 2002. 337 с. **3**. Алюминий и его сплавы: Учебное пособие / Сост. А.Р.Луц, А.А. Суслина. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 81 с.:ил. **4.** A thermodynamic description of the Al–Fe–Si system over the whole composition and temperature ranges via a hybrid approach of CALPHAD and key experiments / Y. Du, J. C. Schuster, Z. Liu et. al. // Intermetallics. 2008. Vol. 16. P. 554–570. **5.** Серякова О.В., Дьяченко О.В., Кардаполова М.А. Влияние лазерного легирования боридами на микротвердость и фазовый состав поверхностного слоя изделий из алюминия / Матеріали 84 Міжнароднанай коваконференція молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті".,Київ, 23–24квітня 2018 р.: в 4 ч./ Національний університет харчових технологій; редкол.: А. Украінец [и др]. – Київ, 2018. – Ч. 2. – С. 149. **6.** Серякова О.В., Дьяченко О.В., Кардаполова М.А. «Влияние лазерного легирования боридами на износостойкость деталей из алюминия» / Матеріали 84 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті".,Київ, 23–24квітня 2018 р.: в 4 ч./ Національний університет харчових технологій; редкол.: А. Украінец [и др]. – Київ, 2018. – Ч. 2. – С. 150.

ДЕАЭРАТОРЫ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ МОЩНОСТЬЮ 300 МВт

Егоров П.В., Чупраков М.В., Гиммельберг А.С., Шарапова Н.Е., Эрнандес А.Д.
(ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И.Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), Россия, г. Санкт-Петербург, Тел./Факс:8(812)578-88-00; E-mail: deaerator@ckti.ru)

Abstract: *Developed and implemented thermal deaerators increased pressure capacity of 1000 t/h for the Kostroma GRES and TPP "Wong Bi" in Vietnam. Structurally, deaerators can be made with a vertical or horizontal deaeration column mounted on the deaerator tank of the required capacity. On the basis of the obtained positive results of operation, it is advisable to develop proposals for the composition and design of a serial deaerator of feed water with a capacity of 1000 t/h for use in power units with a capacity of 200÷300 MW.*

В последние два-три десятилетия существенно изменились условия эксплуатации энергоблоков на отечественных тепловых электростанциях. Многие энергоблоки мощностью 200, 300 и 500 МВт, рассчитанные на работу в базовом режиме, вынужденно перешли на работу с переменными нагрузками. Соответственно повысились требования к маневренности, надежности и экономичности оборудования систем регенерации, входящего в состав турбоустановок.

Важным направлением в совершенствовании оборудования систем регенерации является повышение надежности и эффективности работы деаэрационно-питательных установок. Для решения такой задачи, в том числе, целесообразно перевести деаэраторы питательной воды на работу при скользящем давлении в рабочих режимах турбоустановки с соответствующим увеличением значений рабочего давления и тепловых нагрузок. Однако разработанные в 70÷80-х годах прошлого века серийные деаэраторы энергоблоков были рассчитаны на работу при постоянном регулируемом рабочем давлении в деаэраторе 0,6÷0,7 МПа и не могут удовлетворять указанным условиям.

В связи с изложенным, НПО ЦКТИ были начаты работы по созданию и освоению новых деаэраторов повышенного давления для турбоустановок современных тепловых электростанций. При этом, в качестве основных направлений разработки было принято решение интенсифицировать процессы тепломассообмена в деаэрационных колонках струйного типа и в баках деаэраторов. Было предложено: в колонках деаэраторов применить низконапорную гидравлическую форсунку и струйные тарелки, а в баках – «затопленное» барботажное устройство.

В 1991 г. НПО ЦКТИ был разработан деаэратор повышенного давления ДП-1000/100-2 с вертикальной малогабаритной колонкой производительностью 1000 т/ч для использования в схеме приготовления питательной воды паровых котлов энергоблоков 300 МВт Костромской ГРЭС (далее по тексту – КГРЭС) при замене существующих деаэраторов. На КГРЭС в составе турбоустановок находились в эксплуатации деаэраторы с колонками ДСП-500 «насадочного» типа (два деаэратора на энергоблок) и деаэраторы с колонками ДСП-1000 струйно-барботажного типа [1], которые не в полной мере удовлетворяли эксплуатационным требованиям.

Деаэратор ДП-1000/100-2 разрабатывался для работы на скользящих параметрах с повышением рабочего абсолютного давления в деаэраторе до 1,03 МПа (с учетом величины давления в отборе турбины), а также с учетом существующих увеличенных тепловых нагрузок в пусковых режимах. Деаэратор должен обеспечивать устойчивую работу в диапазоне изменения производительности от 100% до 40% при изменении абсолютного рабочего давления в нем соответственно от 1,03 МПа до 0,39 МПа.

Принципиальная схема деаэратора ДП-1000/100-2 представлена на рисунке 1.

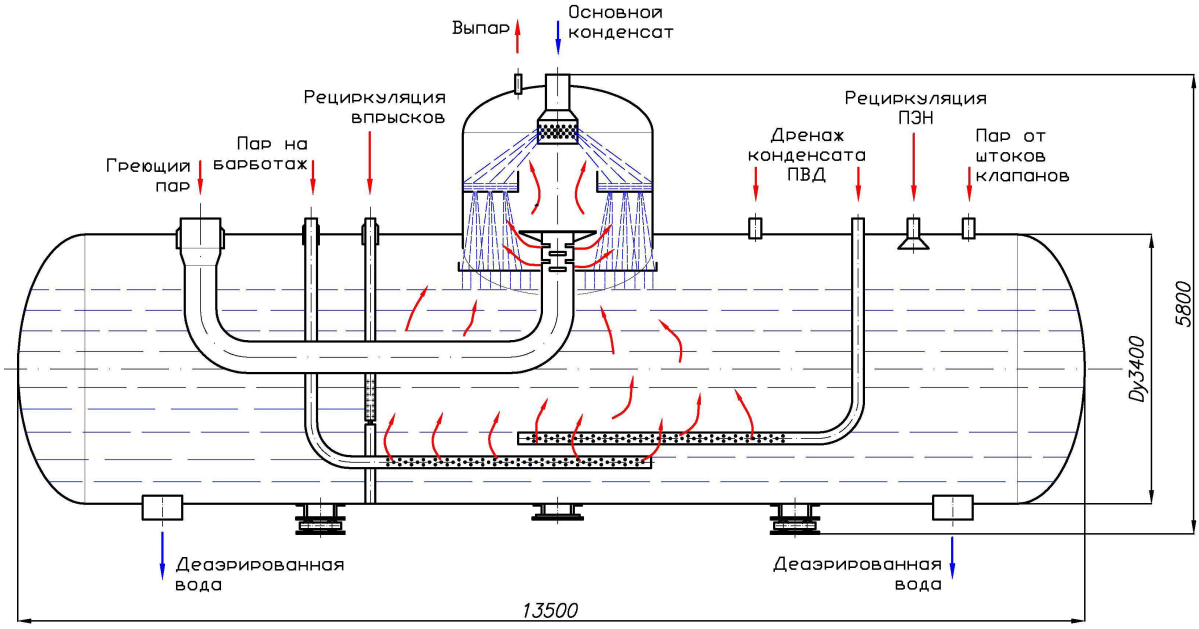


Рис. 1. Принципиальная схема деаэратора ДП-1000/100-2 с малогабаритной колонкой

Головной образец деаэратора ДП-1000/100-2 был изготовлен энергомашиностроительным предприятием АО «Сибэнергомаш» (г. Барнаул) в 1992 г. и установлен в схеме энергоблока 300 МВт КГРЭС взамен деаэратора ДСП-1000/100. С учетом положительных результатов проведенных гидравлических и теплохимических испытаний первого этапа было принято решение о включении в эксплуатацию в 1994 г. на КГРЭС еще одного деаэратора ДП-1000/100-2. Был проведен второй этап испытаний уже двух деаэраторов, которые также подтвердили правильность примененных технических решений.

Учитывая полученные положительные результаты, на остальных шести блоках 300 МВт КГРЭС также были установлены новые деаэраторы ДП-1000/100-2 с вертикальной малогабаритной колонкой [2].

В 2014 г. специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» в период плановых остановов был проведен внутренний осмотр корпусов и устройств деаэраторов, а также рассмотрены эксплуатационные данные КГРЭС.

Анализ полученных данных по деаэраторам ДП-1000/100-2 показал, что они находятся в хорошем техническом состоянии, обеспечивают надежную и устойчивую работу в необходимом диапазоне изменения производительности и рабочего давления. По данным эксплуатации показатели работы деаэраторов удовлетворяет требованиям ГОСТ 16860-88 [3] и ПТЭ [4].

Технические решения, использованные в указанных деаэраторах, были также применены при создании новых термических деаэраторов для ТЭС, АЭС и крупных систем теплоснабжения [5, 6, 7].

При предварительной проработке конструкции деаэратора повышенного давления для энергоблока мощностью 300 МВт ТЭС «Уонг Би» во Вьетнаме рассматривались два варианта его исполнения:

- деаэратор с деаэрационной колонкой горизонтального типа;
- деаэратор с малогабаритной деаэрационной колонкой вертикального типа.

Заказчиком для дальнейшей разработки был принят вариант конструкции с деаэрационной колонкой горизонтального типа.

С учетом изложенного, в 2004 г. ОАО «НПО ЦКТИ» был разработан деаэратор повышенного давления ДП-1000/120 производительностью 1000 т/ч для применения в схеме энергоблока мощностью 300 МВт ТЭС «Уонг Би» во Вьетнаме. Деаэратор состоит из горизонтальной колонки, установленной на деаэраторном баке геометрической вместимостью 186 м^3. Основные характеристики деаэратора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики деаэратора ДП-1000/120

Наименование показателя	Величина
Производительность деаэратора номинальная (расчетная), т/ч	1000
Давление рабочее номинальное абсолютное, МПа (кгс/см^2)	1,08 (11,0)
Давление расчетное избыточное, МПа (кгс/см^2)	1,02 (10,35)
Температура расчетная, ^{o}С	200
Нагрев воды в деаэраторе при номинальной производительности, ^{o}С:	33
Диапазон изменения производительности деаэратора, % номинальной	30 ÷ 100
Удельный расход выпара из деаэратора при номинальной производительности, кг/т д. в.	1,5
Содержание растворенного кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора, мкг/кг, не более	7
Содержание растворенного кислорода в исходной воде на входе в деаэратор, мкг/кг, не более	20
Геометрическая ёмкость деаэраторного бака, м^3	186
Полезная вместимость деаэраторного бака, м^3	120
Необходимый перепад давления на водораспределительном устройстве, кгс/см^2, не более	1,5

Принципиальная схема деаэратора представлена на рисунке 2.

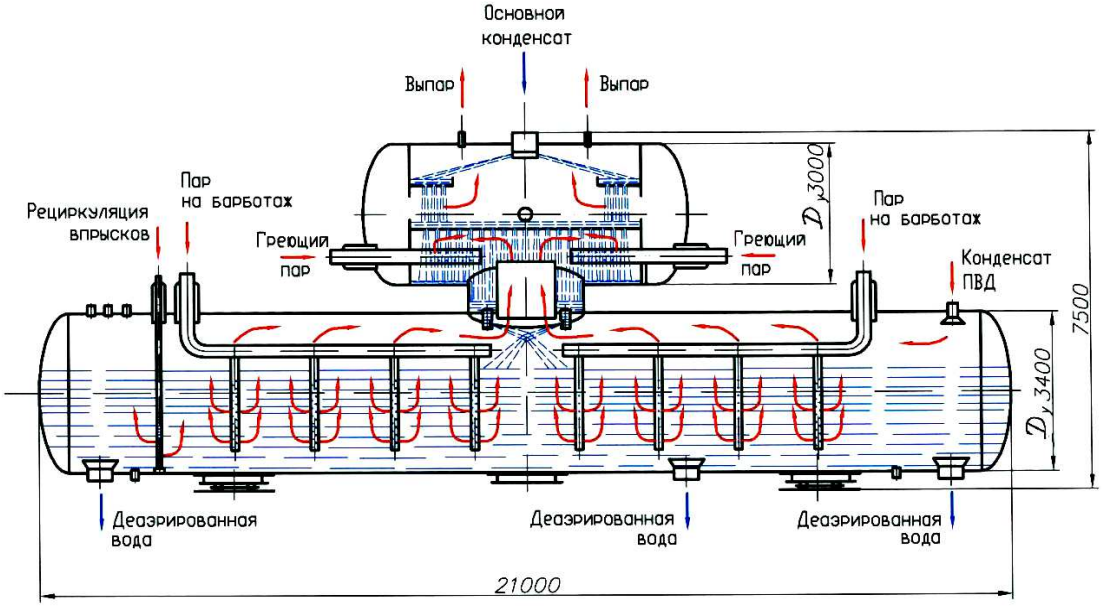


Рис. 2. Принципиальная схема деаэратора ДП-1000/120

Конструкция деаэратора базируется в основном на известных и проверенных в эксплуатации указанных выше решениях. Использование в качестве низконапорного водораспределительного устройства в верхней части колонки струйной форсунки позволяет создать дополнительную поверхность контакта водяной и паровой фаз для улучшения тепломассообмена и, тем самым, повысить эффективность работы деаэрационной колонки. Применение двух струйных ступеней в колонке и затопленного барботажного устройства в баке позволяют надежно гарантировать необходимые нагрев и деаэрацию воды.

В 2005 г. деаэратор ДП-1000/120 был изготовлен ПК «Сибэнергомаш» и позднее установлен в схеме турбоустановки 300 МВт ТЭС «Уонг Би» во Вьетнаме.

Энергоблок мощностью 300 МВт ТЭС «Уонг Би» успешно эксплуатируется с 2009 г. Основные контролируемые показатели работы деаэратора по состоянию на февраль 2019 г. приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные контролируемые показатели работы деаэратора ДП-1000/120

Наименование показателя	***Величина***
Электрическая мощность энергоблока, МВт	295
Давление в деаэраторе, МПа	9,5
Расход основного конденсата на входе в деаэратор, т/ч	640
Расход питательной воды на выходе из деаэратора, т/ч	930
Содержание растворенного кислорода на входе в деаэратор, мкг/кг	< 20
Содержание растворенного кислорода в деаэрированной (питательной) воде на выходе из деаэратора, мкг/кг	< 10
Отклонения в работе деаэратора (шум, вибрация, гидроудары)	отсутствуют

Деаэратор ДП-1000/120 работает надежно и эффективно в проектном диапазоне гидравлических и тепловых нагрузок, обеспечивает необходимые нагрев и качество питательной воды.

Выводы.

1. Разработан и внедрен в эксплуатацию деаэратор повышенного давления ДП-1000/120 производительностью 1000 т/ч с горизонтальной деаэрационной колонкой для ТЭС «Уонг Би» во Вьетнаме. При его создании были использованы многолетний опыт разработки и эксплуатации термических деаэраторов для ТЭС и АЭС, а также проверенные технические решения, обеспечивающие необходимые показатели и надежность работы аппарата.

2. Энергоблок мощностью 300 МВт ТЭС «Уонг Би» во Вьетнаме успешно эксплуатируется с 2009 г. Деаэратор ДП-1000/120 работает надежно и эффективно в проектном диапазоне гидравлических и тепловых нагрузок, обеспечивает необходимые нагрев и качество питательной воды.

3. Опыт разработки и освоения деаэраторов питательной воды производительностью 1000 т/ч ДП-1000/100-2 и ДП-1000/120 широко используется ОАО «НПО ЦКТИ» при проектировании новых деаэраторов для перспективных энергоблоков АЭС и ТЭС в России и за рубежом.

4. На основании полученных результатов и последних наработок, ОАО «НПО ЦКТИ» считает целесообразным разработать предложения по созданию серии новых деаэраторов повышенного давления для применения в схемах новых и модернизации существующих энергоблоков мощностью 200÷300 МВт, направленных на:

- повышение маневренности работы энергоблока;
- уменьшение вертикального габарита и упрощение конструкции деаэратора;
- обеспечение надежной работы деаэратора при скользящем давлении, в пусковых и переходных режимах;
- повышение экономичности турбоустановки за счет повышения рабочего давления в деаэраторе и работы на скользящих параметрах в зависимости от нагрузки турбины.

Список литературы: 1. Деаэраторы атмосферного и повышенного давления // Каталог-справочник 18-7-71 – М., НИИИНФОРМтяжмаш, 1972. с. 46. **2.** 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. с. 17-21. **3.** ГОСТ 16860-88. Деаэраторы термические. М.: Стандартинформ, 2007. 7 с. **4.** Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. М.: Омега-Л, 2003. 155 с. **5.** Г.В. Григорьев, А.С. Гиммельберг, П.В Егоров, Н.Е. Шилова, В.Г. Михайлов, А.Н. Баева. Укрупненные термические деаэраторы с горизонтальной колонкой для мощных энергоблоков АЭС // Теплоэнергетика. – 2008. № 2 – с.62. **6.** Гиммельберг А.С., Михайлов В.Г., Баева А.Н, Дондер Д.М. Деаэраторы атмосферного давления новой конструкции для крупных систем теплоснабжения. // Тяжелое машиностроение. 2002 г. № 10. С. 40–41. **7.** Гиммельберг А.С., Михайлов В.Е., Михайлов В.Г., Баева А.Н., Егоров П.В., Чупраков М.В., Костюк Р.И., Чугин А.В., Цветков М.С. Деаэраторы атмосферного давления для системы теплоснабжения Юго-Западной ТЭЦ (г. Санкт-Петербург). // Электрические станции. 2013 г. № 12. С. 36–40.

ДИСПЕРСИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ 30Н8Х6М3СТЮ, ПОЛУЧЕННОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А., Пономарев И.А.
(ОмГТУ, г. Омск, Россия)
Тел./Факс: +7 (3812) 652719; E-mail: weld_techn@mail.ru

Abstract: *Investigation of the effect of aging on the structure and properties of economically alloyed 30N8Kh6M3STU steel produced by surfacing cored wire. It has been established that such steel has the best results of durometric properties as a result of aging at a temperature of 550 ºC within 2 hours. In this case, the hardness of the steel reaches 53 HRC. It was shown that steel hardening is due to the formation of complexes of four carbides* $TiD_{0,707}C_{0,5}$, Cr_3C_2, *TiC, SiC,, nine intermetallic compounds* $Cr_{0,92}Mo_{3,08}$, $Fe_{0,875}Mo_{0,125}$, D_2Ti, $Mo_{0,984}Ni_{0,016}$, Ti_3Al, Ni_3Ti, *FeCr, AlFe,* $NiTi_2$ *and nitride* $Fe_{24}N_{10}$. *Sufficiently high values of the hardness of such steel after aging allow us to recommend the flux-cored wire, created on its basis, for surfacing parts operating under conditions of moderate wear.*

Key words*: economically alloyed steel, surfacing, cored wire, aging, dispersion hardening, structure, phase composition, durometric properties.*

Для изготовления деталей ответственного назначения широкое распространение нашли высокопрочные износостойкие стали с эффектом вторичного твердения [1, 2]. Такие стали также используются в качестве наплавочных материалов. При разработке таких сталей важное значение приобретает сочетание высоких характеристик износостойкости при минимальном содержании дорогих и дефицитных легирующих элементов. Такие требования реализуются в экономнолегированных сталях [3].

Основой многих нержавеющих экономнолегированных дисперсионно-твердеющих сталей является система Fe-C-Ni-Cr [1-5]. Для получения мартенситной матрицы такие стали должны содержать 6–12 % Ni, 6–8 % Cr и до 0,3 % C. Для интерметаллидного упрочнения металла такой системы можно использовать молибден, титан, алюминий и кремний [1-3, 5-7]. В связи с этим одной из перспективных дисперсионно-твердеющих композиций может быть сталь 30Н8Х6М3СТЮ, которую можно было бы использовать для наплавки износостойких покрытий порошковой проволокой созданной на её основе. Однако особенности дисперсионного упрочнения такой стали полученной наплавкой не изучены.

В связи с этим целью работы является исследование влияния старения на структуру и свойства литой стали системы Fe-C-Ni-Cr-Mo-Si-Ti-Al.

Объектом исследований являлся металл покрытия на основе стали 30Н8Х6М3СТЮ, наплавленного порошковой проволокой состава: 8,5% Ni; 8,0% FeCr; 3,5% Mo; 2,6% FeSi; 5,2% FeTi; 1,8% FeAl; 0,3% Na_2SiF_6; 16,5% Fe-порошок; Fe-лента – остальное. Для обеспечения содержания углерода в стали 0,3% в состав порошковой проволоки был введен высокоуглеродистый FeCr.

Металл образцов для проведения исследований получали наплавкой валиков покрытий в аргоне на пластины из стали Ст3 размером 200×50×10 мм экспериментальной порошковой проволокой диаметром 2,4 мм в 3 слоя.

Упрочнение термической обработкой проводили на режимах, включающих нагрев наплавленного металла до температуры 550 °С [8] и выдержку в течении 2, 6 и 10 ч.

Металлографические исследования наплавленного металла проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer A1m (Carl Zeiss). Микроструктура выявлялась химическим травлением в реактиве состава: $CuSO_4$ – 4 г; HCl – 20 мл; H_2O – 20 мл.

Анализ влияния режимов термической обработки на упрочнение металла осуществляли по результатам измерения твердости по сечению наплавленного

покрытия.

Дюрометрические исследования проводили на металле после наплавки и старения. Твердость металла измеряли по методу Роквелла на приборе ТК-2. Микротвердость структурных составляющих наплавленного металла определяли по методу Виккерса на микротвердомере Shimadzu HMV-2 при нагрузках 10 г, 25 г и 50 г.

Рентгенофазовый анализ выполнен на многофункциональном рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000.

Распределение твердости по сечению металла покрытия исследуемого состава после наплавки и старения приведено на рисунке 1.

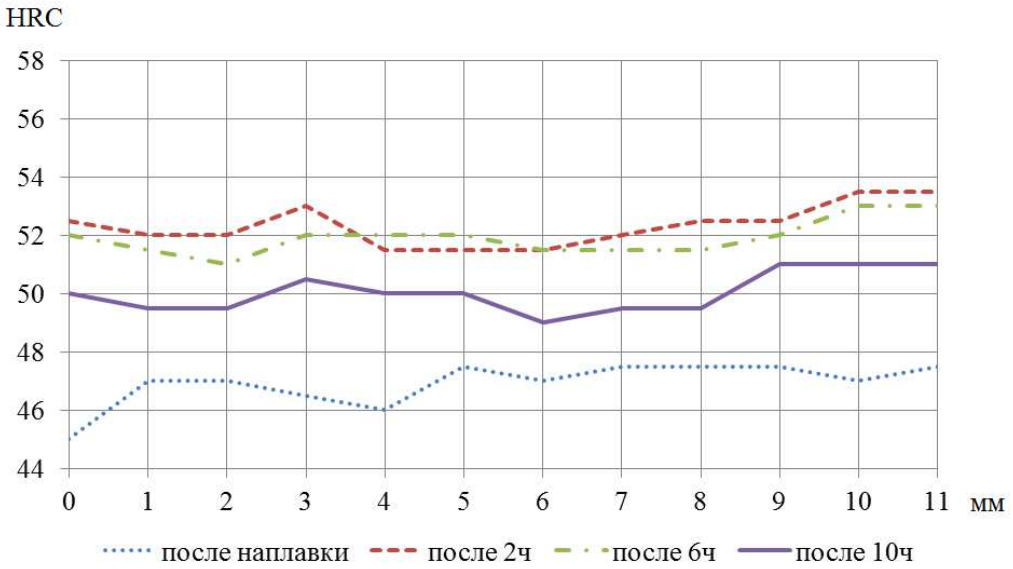


Рис. 1. Распределение твердости по сечению металла покрытия после наплавки и старения

Твердость такого металла после наплавки находится в пределах 45–47 HRC.

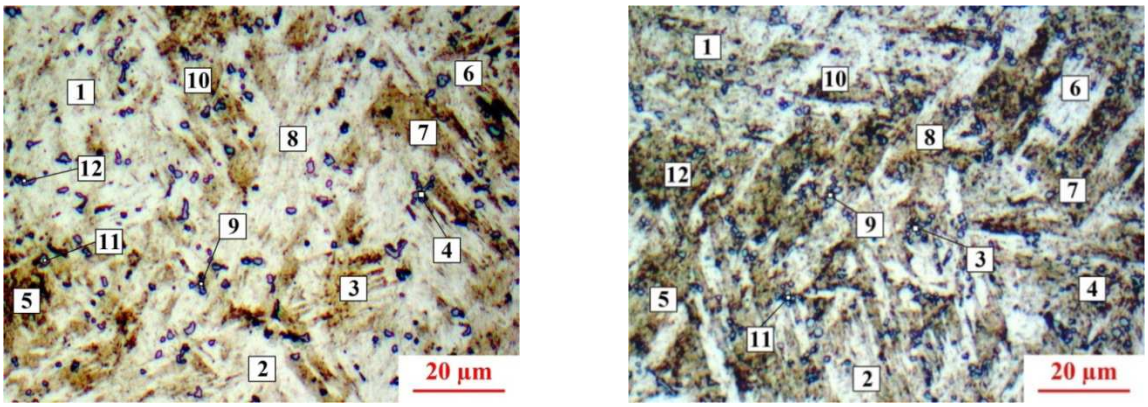
Старение при температуре 550 °С существенно влияет на упрочнение наплавленного металла. Значения твердости металла после старения в течение 2 часов находятся в диапазоне 51,5–53,5 HRC. В результате старения в течение 6 часов средние значения твердости наплавленного металла практически не меняются, и находится в диапазоне 51-53 HRC. После старения в течение 10 часов средние значения твердости очень незначительно снижаются до 49-51 HRC.

Полученные данные обусловили проведение исследований металла после наплавки и металла, прошедшего старение на режиме при температуре 550 °С в течение 2 часов, показавшем наилучшие результаты.

Результаты исследования микротвердости структурных составляющих металла 30Н8Х6М3СТЮ после наплавки сведены в табл. 1, микроструктура которого приведена на рис. 2, а.

Таблица 1. Микротвердость $HV_{0,01}^{*}$ и $HV_{0,05}$ структурных составляющих металла после наплавки

№ укола	**1**	**2**	**3**	**4***	**5**	**6**	**7**	**8**	**9***	**10**	**11***	**12***
Значение микротвердости, HV	492	503	548	732	571	553	526	568	714	527	668	683



а б

Рис. 2. Области замеров микротвердости структурных составляющих металла после наплавки (а) и после старения (б)

Как видно микротвердость матрицы металла после наплавки низка и составляет 492-503 HV, а упрочняющих фаз 668-732 HV. Наблюдается незначительное количество эвтектических выделений с твердостью 526-571 HV.

Результаты исследования микротвердости структурных составляющих металла 30Н8Х6М3СТЮ после старения 550 ºС сведены в табл. 2, микроструктура которого приведена на рис. 2, б.

Таблица 2. Микротвердость $HV_{0,01}^{*}$ и $HV_{0,05}$ структурных составляющих металла после старения

№ укола	1	2	3*	4	5	6	7	8	9*	10	11*	12
Значение микротвердости, HV	683	753	783	668	671	786	650	659	835	699	882	639

После старения микротвердость матрицы по сравнению с металлом после наплавки повысилась в 1,3 раза и находится в пределах 639-683 HV, упрочняющих фаз в 1,2 раза и находится в пределах 783-882 HV. Количество эвтектических выделений возросло, а их микротвердость находится в пределах 650-786 HV, что превышает таковую после наплавки в 1,2-1,4 раза. Таким образом, микротвердость структурных составляющих металла после старения возрастает.

Для выявления механизма упрочнения исследуемого металла были проведены рентгеноструктурные исследования.

Результаты рентгенофазового анализа металла состава 30Н8Х6М3СТЮ после старения приведены на рис. 3.

Установлено, что основой матрицы металла после старения является мартенсит. Структура включает 14 видов соединений фазовых составляющих. В ней присутствуют частицы карбидов большей частью это $TiD_{0,707}C_{0,5}$, а также небольшое количество Cr_3C_2, и очень незначительное количество TiC, SiC. Другую группу соединений составляют интерметаллиды. Это большей частью $Cr_{0,92}Mo_{3,08}$, $Fe_{0,875}Mo_{0,125}$, D_2Ti, а также небольшое количество $Mo_{0,984}Ni_{0,016}$, Ti_3Al, Ni_3Ti, и очень незначительное количество FeCr, AlFe, $NiTi_2$. В структуре наблюдаются выделения небольшого количества нитрида $Fe_{24}N_{10}$.

Полученные результаты показывают, что особенностью трансформации структуры металла 30Н8Х6М3СТЮ в результате старения является появление в структуре четырех карбидов с участием Fe, Cr, Ti, Si, Mo, Ni, девяти интерметаллидных фаз с участием Fe, Cr, Mo, Ti, Ni, Al, и нитрида железа $Fe_{24}N_{10}$.

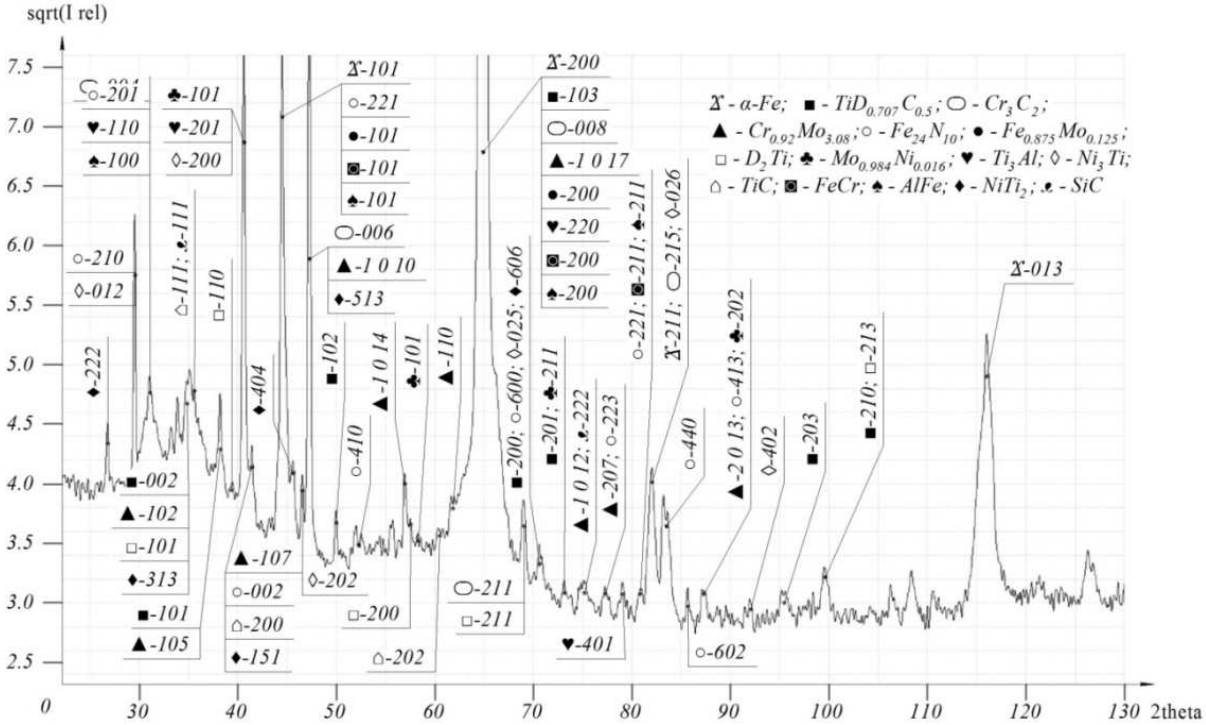


Рис. 3. Дифрактограмма металла покрытия после старения

Таким образом, наилучшие результаты дюрометрических свойств стали 30Н8Х6М3СТЮ достигаются в результате старения при температуре 550 ºС в течение 2 часов. В этом случае микротвердость структурных составляющих повышается в 1,2-1,4 раза, а твердость стали достигает 53 HRC. Дисперсионное упрочнение стали 30Н8Х6М3СТЮ в результате старения обусловлено образованием доминирующих в структуре комплексов из четырех карбидов с различным соотношением шести элементов Fe, Cr, Ti, Si, Mo, Ni, девяти интерметаллидов с различным соотношением шести элементов Fe, Cr, Mo, Ti, Ni, Al и одного нитрида $Fe_{24}N_{10}$. Достаточно высокие значения твердости стали 30Н8Х6М3СТЮ после старения и незначительное влияние длительности воздействия термической обработки на снижение её значений, позволяют рекомендовать порошковую проволоку, созданную на её основе, для наплавки деталей, работающих в условиях умеренного износа.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ №17-19-01224.

Список литературы: 1. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. – М. : Металлургия, 1979. – 208 с. **2.** Портной К.И., Бабич Б.Н. Дисперсноупрочненные материалы. – М.: Металлургия, 1974. – 123 с. **3.** Малинов Л.С., Малинов В. Л. Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007. – 346 с. **4.** Бодяко М.Н., Астанчик С. А., Ярошевич Г. Б. Мартенситно-стареющие стали. – Минск: Наука и техника, 1976. – 246 с. **5.** Бирман С.Р. Экономнолегированные мартенситностареющие стали. – М.: Металлургия, 1974. – 208 с. **6.** Фельдгандлер Э.Г., Савкина Л.Я. Влияние легирования на упрочнение мартенситных нержавеющих сталей системы Fe-Cr-Ni и Fe-Cr-Co // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1975. – № 9. – С. 30–35. **7.** Кардонский В.М. Кремний в мартенситностареющей стали // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1970. – № 7. – С. 2. **8.** Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: МИСИС, 1999. – 408с.

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОДХОДА

Ермишкин В.А., Кириллова В.М., Минина Н.А., Кулагин С.П.
(ИМЕТ РАН, Москва, РоссияТел./факс: +7(499)1359668/+7(499) 1358680
eva@imet.ac.ru; minina1951@rambler.ru

Abstract: *The article analyzes the question of the relationship of the structures and properties of structural materials based on the compositional approach. An analytical description of this relationship has been developed, the disclosure of the dependence of the integral strength characteristics of materials on partial values reflecting the structural components and their valley in samples of the material. The results obtained experimental confirmation when studying the strength of an alloy based on Mo-Re.*

В настоящее время общепринято считать, что свойства конструкционных материалов определяются их химическим составом и структурой, которая сформирована технологическими обработками. О физико-химической природе взаимосвязи состава, структуры и свойств металлов и сплавов, о структурных механизмах и факторах, влияющих на свойства материалов, существуют обширные экспериментальные данные. Однако попытки выразить взаимосвязь параметров структуры и механических характеристик материалов в аналитической форме оставляют желать лучшего. В частности, Орован предложил выражать предел текучести материалов в виде суммы вкладов от отдельных микро механизмов упрочнения [1] в виде:

$$\sigma_т = \sum \sigma_i = \sigma_0 + \Delta\sigma_{т.р.} + \Delta\sigma_д + \Delta\sigma_з + \Delta\sigma_с + \Delta\sigma_{д.у.} \quad (1)$$

где: σ_0 - напряжение трения кристаллической решетки; $\Delta\sigma_{т.р}$ – вклад в сопротивление деформированию за счет твердорастворного упрочнения; $\Delta\sigma_д$ – вклад в сопротивление деформированию за счет дислокационного (деформационного) упрочнения; $\Delta\sigma_з$ – вклад в сопротивление деформированию за счет барьерного эффекта границ ; $\Delta\sigma_с$ – вклад в сопротивление деформированию за счет субструктурного упрочнения; взаимодействия подвижных дислокаций с другими элементами исходной структуры материалов в результате которых их плотность возрастает. Ранее нами [2] было высказано предположение о том, что упругая энергия кристаллических материалов при нагружении запасается в виде энергии динамических дислокаций, которая обратимо связана с остаточной плотностью дислокаций после снятия нагрузки. Прямыми экспериментами по нагружению и разгрузке микро образцов из монокристаллов молибдена в колонне высоковольтного электронного микроскопа это предположение получило подтверждение [3]. Следует отметить, что формула (1) не учитывает объем материала, в котором действует определенный механизм, а некоторые из них проявляются в очень ограниченных объемах. Очевидно, что большинство современных материалов с точки зрения своего строения неоднородны, т.е. композиционны, и вклад в их характеристики прочности зависит не только от прочности отдельных компонентов, но и от их объемных долей в сплаве. Действительно прочность композиционных материалов с армирующей фазой в виде волокон описывается формулой:

$$\sigma_к = \sigma_м \cdot (1 - V_f) + \sigma_f \cdot V_f \quad (2)$$

где: $\sigma_к$ - прочность композиционного материала, $\sigma_м$ –прочность материала матрицы, σ_f - прочность материала армирующих волокон, V_f - объемная доля армирующей фазы композита. Отсюда следует, что оценки прочностных характеристик современных материалов должны определяться аналогичным образом.

1. Материал и методики исследований

Для исследований прочности структурных составляющих сплавов по значениям их интегральных характеристик прочности и значениям долей структурных составляющих сплавов в торцевых поперечных сечениях исследуемых образцов были

выбраны образцы сплавов системы Mo-Re. Молибден с рением образует широкую область твердых растворов замещения в диапазоне концентраций рения [0, 0,47], из которых были приготовлены сплавы: Mo - 2%Re, Mo - 3%Re и Mo - 4%Re. Из сплавов были приготовлены образцы на сжатие в виде цилиндров с ø = 5 мм и высотой 6 мм, по результатам испытаний которых были определены значения пределов прочности. Последние были определены по кривым деформирования растяжением в истинных координатах, полученным пересчетом кривых сжатия по формулам:

$$\sigma_p = \sigma \cdot (1 - \varepsilon_c) \qquad \varepsilon_p = \sqrt{\frac{1}{1-\varepsilon_c}} - 1 \qquad (3)$$

где: σ_p - истинное напряжение растяжения, σ - условные напряжения сжатия, ε_p - истинное напряжение растяжения, ε_c - условные деформации сжатия. Формулы (3) были получены из условия сохранения объема материала в процессе деформирования. На рис. 2 показаны кривые деформирования образца Mo - 2% Re: слева кривая сжатия; справа –расчетная кривая растяжения. Доли поверхности поперечного сечения, принадлежащие определенным структурным составляющим исследуемого сплава, были определены с помощью фотометрического анализа структурных изображений (ФАСИ). [4]. Фотометрический анализ основан на сравнении по дифференциальной схеме эталонного изображения фрагмента структуры исследуемого материала с этим же фрагментом для момента достижения предела прочности. ФАСИ представляет собой программно-аналитический комплекс, позволяющий выделить цветом характерные интервалы спектра яркости отражения видимого света от поверхности исследуемых фрагментов и определить площади поверхности фрагментов, окрашенных в цвета соответствующих интервалов спектра. На рис. 1 показан пример анализа сравнения фрагментов эталона из рения и сплава Mo - 2% Re.

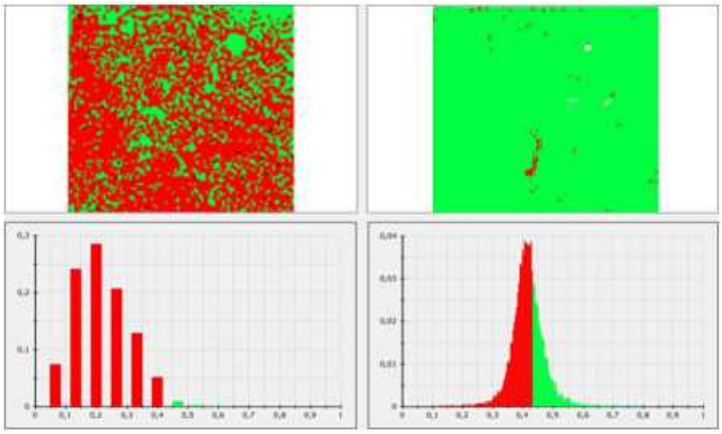


Рис. 1. Результаты анализа методом ФАСИ: слева - эталон Re, справа - сплав Mo-2% Re

Экспериментальных данных по деформированию образцов из нелегированного молибдена и сплавов молибдена с рением, дополненных данными о долях структурных составляющих в торцевом сечении, достаточно для оценки парциальных прочностей структурных составляющих исследуемых сплавов.

2. Результаты исследования и их обсуждения

В результате испытания образцов на сжатие, проведенных на испытательной машине Инстрон-3382 со скоростью 1 мм/мин, были рассчитанными кривые растяжения, по которым были определены механические характеристики исследованных сплавов.

На рис. 2 показаны расчетные кривые растяжения в координатах «истинное

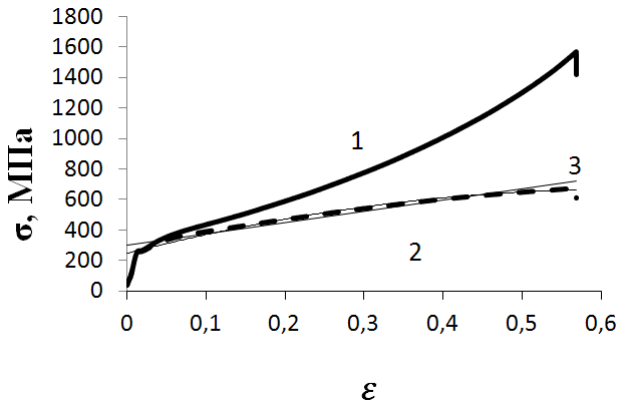


Рис. 2. Расчетная кривая растяжения образца сплава Mo - 3% Re в истинных координатах: 1 - исходная кривая сжатия, (——); 2 - кривая растяжения (— —); 3 - линия тренда (——)

напряжение - истинная деформация».

Расчетные кривые растяжения аппроксимируются полиномами вида:

$$\sigma = a\varepsilon^2 + b\varepsilon + c \qquad (4)$$

В таблице 1 приведены механические свойства сплавов молибдена с рением. Следует отметить, что наилучшая аппроксимация расчетной кривой растяжения образца из молибдена, может быть записана в виде $\sigma = a + ln|\varepsilon| + c$. Значения параметров, в этой формуле, приведены в первой строке таблицы.

Таблица 1. Механические свойства сплавов молибдена с рением и параметры аппроксимации в уравнении (4)

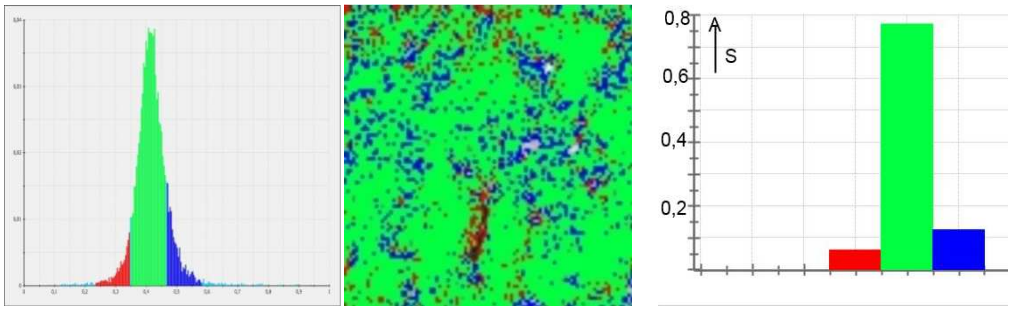
Материал	Параметры формулы (4)			R^2	Механические свойства			
	a	b	c		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b, МПа	δ, %	Ф, %
Mo	121	1	701,6	0,934	142,97	597,16	43	46
Mo + 2% Re	-2362	1772	325,4	0,836,	268,56	798,87	37	47
Mo + 3% Re	0	340	325,4	0,865	2331,41	789,4	26	40
Mo + 4% Re	-3883	2331	263,9	0,908	214,73	604,23	43	67

В основе метода оценки вкладов отдельных структурных составляющих сплавов на основе системы Mo - Re лежит предположение о возможности представления интегрального предела прочности (σ_b) сплава в виде суммы произведений парциальных прочностей структурных составляющих на их доли в площади поперечного сечения испытанных образцов. По своей сути он представляет собой распространение композиционного подхода оценки прочности композитов с волокнистой упрочняющей фазой, направленной в направлении оси образца, на многокомпонентную систему со случайным распределением структурных составляющих. Из этого подхода следует, что для определения парциальных прочностей структурных составляющих сплавов в первом приближении можно написать систему линейных уравнений первого порядка вида:

$$\begin{aligned}
&S_{11}\sigma_1 + S_{12}\sigma_2 + S_{13}\sigma_3 + \ldots\ldots\ldots + S_{1n-1}\sigma_{n-1} + S_{2n}\sigma_n = \sigma_c \\
&S_{21}\sigma_1 + S_{22}\sigma_2 + S_{33}\sigma_3 + \ldots\ldots\ldots + S_{2n-1}\sigma_{n-1} + S_{1n}\sigma_n = \sigma_c \\
&S_{31}\sigma_1 + S_{32}\sigma_2 + S_{33}\sigma_3 + \ldots\ldots\ldots + S_{3n-1}\sigma_{n-1} + S_{3n}\sigma_n = \sigma_c \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&S_{n1}\sigma_1 + S_{12}\sigma_2 + S_{n3}\sigma_3 + \ldots\ldots\ldots + S_{n-1n}\sigma_{n-1} + S_{nn}\sigma_n = \sigma_c
\end{aligned} \qquad (4)$$

где: S_{ij} – доля поверхности поперечного сечения образца j - структурной составляющей в i - том уравнении, σ_j - парциальная прочность j – той структурной составляющей, σ_c – интегральная прочность сплава. В этой системе выполняются соотношения: $\sum_{o=1} S_{ij}=1$ при любом значении i в интервале от 1 до n, n_{max} равно числу структурных составляющих и числу уравнений системы. В уравнениях (4) используется предположение о том, что σ_c = const, подразумевает однородное распределение характеристик прочности по всему сечению. Необходимо иметь в виду, что настоящая работа ориентирована на оценку пределов прочности структурных составляющих, но ее подход можно использовать для любых уровнях напряжений, если в систему (4) подставлять доли структурных

составляющих, соответствующих заданному уровню интегральных напряжений. Для этого нужно использовать измерения методом ФАСИ энергии видимого света аккумулируемой в образце в поперечных сечениях образца после достижения этому уровню напряжений. Для этого нужно использовать измерения методом ФАСИ в сечениях поперечного сечения образца после достижения этого уровню напряжений. Для решения системы (4) составлена программа, которая позволяет найти ее решения при любом n. Значение n» определяется по данным ФАСИ. На рис. 3 показаны спектры яркости отражения от фрагмента сплава Mo - 2% Re.



а б в

Рис. 3. Результаты ФАСИ для сплава Mo -2% Re: а - спектр яркости, б - поверхность фрагмента, в - гистограмма его окраски

Для получения надежных результатов необходимо, чтобы величина выделенных фрагментов была сопоставима по своей величине. Представленный на рис. четвертый фрагмент имеется 4 интервала, окрашенные в цвета: красный, зеленый, синий и площадь, оставшаяся неокрашенной, т.е. n = 4. На рис. 4. показаны зависимости долей площадей, окрашенных в цвета выделенных интервалов (S), от относительных площадей фрагмента в относительных долях.

Из рис. 4. видно, что доля окрашенных площадей исследованных фрагментов сохраняет относительно постоянные значения для сплавов Mo - 3% Re начинается со значения ~ 0,15, а у сплава Mo - 4% Re с 0,05. В пределах размеров исследованных фрагментов области со стабильным значением доли окрашенных площадей для сплава Mo - 2% Re не установлено. За размер фрагмента с относительной площадью равной единице было принято значение 0,4 мм. Для оценки парциальной прочности структурных составляющих были использованы фрагменты всех исследованных сплавов системы Mo -Re (квадраты с размером стороны 0,4 мм). В результате проведенных исследований были получены значения парциальных прочностей всех структурных составляющих этих сплавов и их значения приведены в таблице 2.

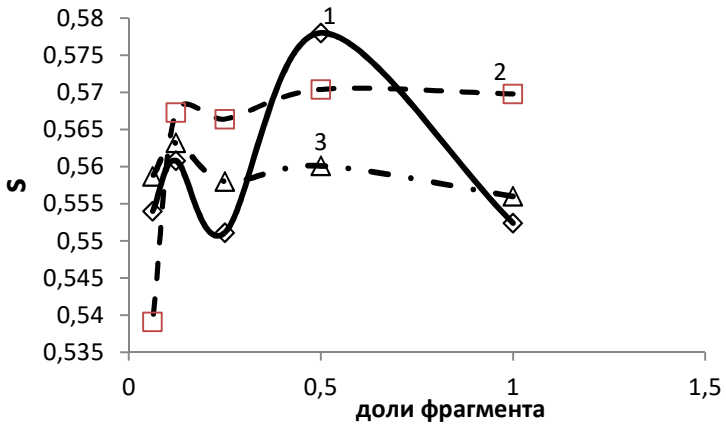


Рис. 4. Зависимости окрашенных площадей исследованных фрагментов от их величины в относительных долях: 1 - сплав Mo - 2% Re, Mo - 3% Re, 3 – Mo - 4% Re

Таблица 2. Прочность структурных составляющих сплавов системы Mo-Re

Материал	Парциальные прочности интервалов			
	Красного	Зеленого	Синего	Остаток
Молибден	-4852	810,71	-436,12	-696,73
Сплав Mo - 2% Re	-3760	1003,2	1,8741	-5076,6
Сплав Mo -3% Re	7753,75	663,75	537,51	278,84
Сплав Mo -3% Re	63,05	757,96	-14,94	-47,24

Из таблицы 2 видно, что парциальный вклад разных структурных составляющих в интегральную прочность сплавов зависит от концентрации легирующего элемента. Характер этой зависимости зависит от того, каким образом рений входит в состав сплава будь то твердый раствор, его соединения с примесными элементами внедрения, включения нерасплавленного рения. Но эти аспекты требуют дополнительного изучения. На рис. 5. приведены зависимости парциальных прочностей структурных составляющих сплавов Mo - Re

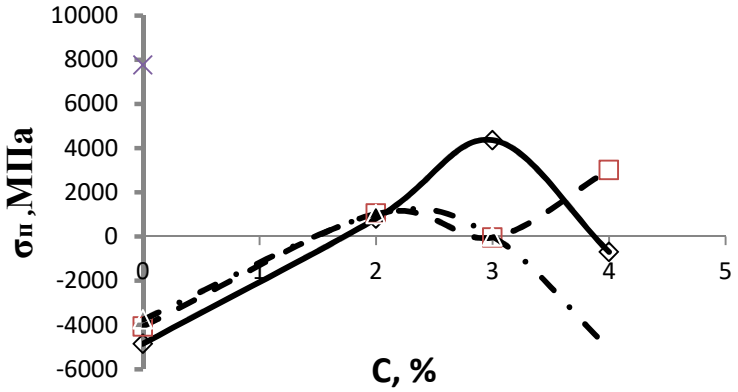


Рис. 5. Концентрационные зависимости парциальных прочностей структурных составляющих сплавов Mo - Re (—) - красный, (— —) - зеленый, (— · —) – синий

Из рис. 5 видно, что концентрационные зависимости парциальных прочностей структурных составляющих сплавов Mo-Re носят немонотонный характер и причины такой зависимости нельзя прояснить без базового состава структурных составляющих этих сплавов и распределения фаз про размерам и объему.

ВЫВОДЫ:

1. На основе данных фотометрического анализа разработан метод оценки парциальных прочностей структурных составляющих сплавов.

2. Метод основан на предположении, что интегральная прочность сплавов является суммой произведений долей структурных состовляющих на их парциальные прочности по типу оценки прочности композитных материалов с волокнистой армирующей фазой.

3. Экспериментальная проверка разработанного метода была осуществлена на примере сплавов молибдена с рением и она показала возможность практического использования метода.

Работа выполнялась по государственному заданию №007-00129-18-00 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-08-00098а).

Список литературы: 1. Orovan E. Dislocations in Metals, New York, AIME, 1954. 104 p. **2.** Иванова В.С., Ермишкин В.А., Прочность и пластичность тугоплавких металлов и монокристаллов М., Металлургия, 1976, 80 с. **3.** Сенаторова О.Г. Высокопрочные трещиностойкие слоистые алюмостеклопластики класса СИАЛ. Перспективный материал для авиационных конструкций. Технология легких сплавов №2, 2009. **4.** Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Информационные технологии фотометрического анализа усталостной повреждаемости материалов. Информационные технологии, 2007. №11, С. 65-70.

КРИОМЕХАНИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В9

Ермишкин В.А., Кулагин С.П., Минина Н.А., Соловьева Ю.Б.
(ИМЕТ РАН, Москва, Россия,)
Тел./факс: +7(499)1359668/+7(499) 1358680 eva@imet.ac.ru; minina1951@rambler.ru

Abstract: *The paper considers the development of laboratory technology for cryomechanical hardening of B95 aluminum alloy based on photometric analysis of structural images of its structural evolution in the process of gradual technological effects on the alloy. Experimental verification of the obtained results confirmed the main technical solutions in the formation of a high strength state of the alloy under investigation by the KMO method.*

Проблема разработки высокопрочных материалов и упрочняющих технологий с особой остротой стоит в авиационно-космической промышленности. Ее практическое решение имеет два аспекта: обеспечение высокого уровня механических характеристик материалов и обеспечение их высокой трещиностойкости. Эффект упрочнения современных конструкционных материалов достигается в результате применения технологий, в которых задействованы одновременно несколько механизмов упрочнения. Под механизмом упрочнения здесь и ниже понимаются элементарные акты взаимодействия относительно неподвижных элементов структуры, играющих роль барьеров для подвижных дислокаций. Наиболее общим проявлением процесса упрочнения является радикальное увеличение плотности дислокаций. Эффективность различных механизмов упрочнения можно оценить по достигнутым значениям плотности дислокаций и скоростей их накопления. Для оценки суммарного эффекта действия этих механизмов Е. Орован [1] предложил принцип аддитивности, согласно которому его можно выразить формулой:

$$\sigma_т = \sigma_{0\,+} \sum_1^n \Delta\sigma_i \qquad (1)$$

где σ_0 - напряжение трения кристаллической решетки металла основы; $\Delta\sigma_i$ - прирост прочностных характеристик материала в результате действия элементарных механизмов упрочнения. Следует отметить, что для корректного учета их эффектов при оценке интегральной прочности материала требуется учитывать не только вклад от дельных механизмов, но и объем материала, в котором они действуют так, как это сделано при оценке прочности композиционных материалов [2]. Криомеханическая обработка (КМО), которая была использованы для упрочнения сплава В95 [3], представляет собой трехступенчатый технологический процесс, включавший закалку с Т = 450^{o}С после выдержки в течение получаса для растворения наиболее легкоплавких фаз сплава, низкотемпературную деформацию (ε =2-15%) при температуре кипения жидкого азота (-196^{o}С) и искусственного старения при Т = 45^{o}С в течение 40 мин. Ранее для малоуглеродистой стали 08КП, обработанной по технологии КМО, были достигнуты значение предела прочности 1372 МПа против 420 МПа для этой стали в нормализованном состоянии. Целью настоящей работы явилась проверка возможностей КМО при упрочнении алюминиевого сплава В95.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использовался промышленный горячекатаный лист из высокопрочного конструкционного сплава системы Al-Zn-Cu-Mg (В95) толщиной 6 мм производства ЗАО «СМЗ». Элементный состав сплава соответствует ГОСТ 4784-97 и представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сплава В95 согласно ГОСТ 4784 - 97

Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примесей
до 0.5	до 0.5	0.2 - 0.6	до 0.1	0.1 - 0.25	до 0.05	86.3 - 91.5	1.4 - 2	1.8 - 2.8	5 - 7	прочие, каждая 0.05; всего 0.1

Для определения механических характеристик образцов, подвергнутых криомеханической обработке были использованы образцы в виде прямоугольных параллелепипедов с квадратным основанием 5×5 мм^2 и высотой 6 мм, которые приготовлены из заготовок, прошедших КМО. Образцы испытывали на испытательной машине Инстрон-3382, подвергая их деформированию сжатием со скоростью 1 мм/мин. Выбор деформирования сжатием обусловлен тем, что в условиях прокатки, которая используется в производстве листового материала, применяется именно эта схема деформирования. Типичная кривая деформирования образцов, упрочненных по схеме КМО в истинных координатах «σ - ε», показана на рис. 1.

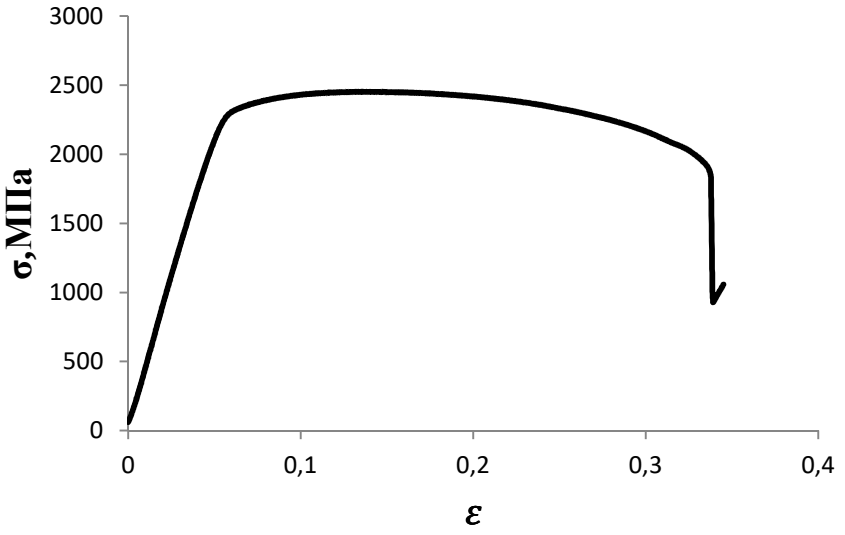


Рис. 1. Типичная кривая деформирования сжатием в истинных координатах «$\boldsymbol{\sigma}$ - ε» образца, упрочненного методом КМО

Эта кривая была построена по данным испытаний на сжатие, но была перестроена в истинных координатах «σ_i - ε_i», которые были вычислены по формулам (2);

$$\sigma_i = \sigma_o \cdot (1-\varepsilon_c) \qquad \varepsilon_i = \ln(1-\varepsilon_c) \tag{2}$$

где: σ_i, ε_i - истинные напряжения и деформация. σ_o, ε_c - условные напряжения и деформация. По машинным кривым деформирования сжатием были рассчитаны кривые растяжения, которые вычислялись по формулам:

$$\sigma_{ir} = \sigma_o.(1-\varepsilon_c) \qquad \varepsilon_{ir} = 1/(1-\varepsilon_c)^{0,5} \text{ -1} \tag{3}$$

где: σ_{ir}, ε_{ir} – истинные напряжения и деформации растяжения. На рис. 2. показана типичная расчетная кривая растяжения образца, упрочненного методом КМО.

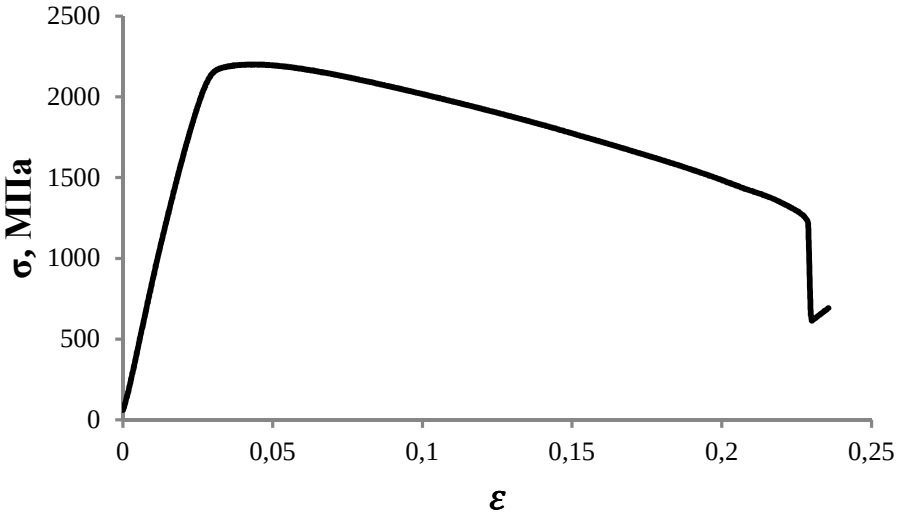
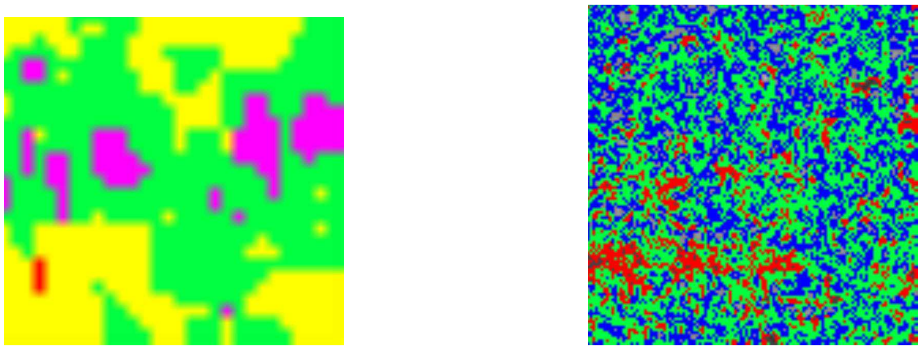


Рис. 2. Расчетная кривая растяжения упрочненного (КМО) образца сплава В95

Изменение структурного состояния исследуемого сплава при криомеханическом упрочнении (КМО) изучалось методом фотометрического анализа структурных изображений (ФАСИ]. Физические основы метода и его возможности для изучения взаимосвязи структуры и свойств материалов рассмотрены ранее [4]. На рис. 3. представлены фрагменты структуры сплава В95 в исходном состоянии (отжиг при 450^{o}С) и после КМО.



а б

Рис. 3. Фрагменты структуры сплава В95 в исходном (а) и упрочненном состоянии (б) х42

Из рис. 3. видно, что основным различием в представленных структурных состояниях сплава 95 состоит в большей фрагментированности состояния, сформированного КМО.

Оно обеспечивает более высокую плотность дислокаций, локализованную в границах фрагментов и резкое уменьшение длин пробега дислокаций, что должно обеспечить повышение трещиностойкости по сравнению с исходным состоянием. Более наглядно структурные различия между обоими состояниями видны при больших увеличениях (рис.4).

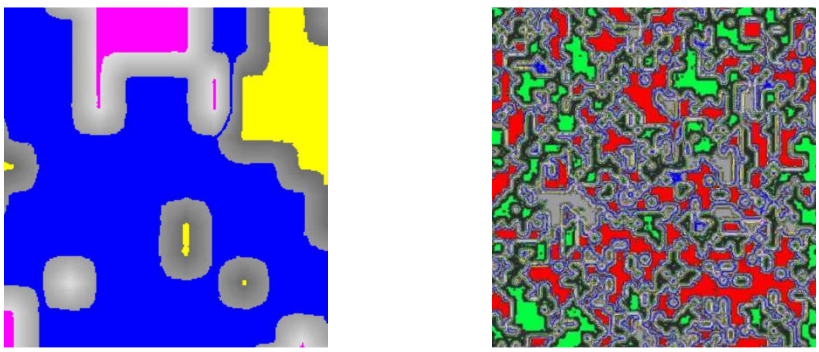


Рис. 4. Фрагменты структуры сплава В95 в анализируемых состояниях (х 270)

Видно, что криомеханическая обработка сплава приводит не только к сильному измельчению всех структурных составляющих сплава, но и к более их равномерному распределению. При этом существенно улучшаются морфологические особенности структурных составляющих. Хорошо известно, что механические характеристики материалов обусловлены особенностями их структурного состояния. При этом условиями формирования высокопрочного состояния являются высокая фрагментированность всех структурных составляющих, равноостность структурных элементов и их равномерное распределение в объеме образца. Были изучены механические свойства сплава

В95в контрастных структурных состояниях. Результаты этих исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2. Механические свойства сплава в контрастных структурных состояниях

Обработка	Режим обработки	Механические свойства		
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b, МПа	δ, %
Отжиг	450°С, 1 час	295,32	312	30,8
КМО	450°С 30 мин; -196 °С; 45°С, 40 мин.	1629,3	2200	18,8

Как видно из таблицы КМО радикально повышает свойства по сравнению с отожженным состоянием, что подтверждает правомерность выбора режима, обеспечивающее радикальное повышение прочностных характеристик. Следует отметить, что механические свойства при сжатии пластичных материалов существенно выше чем при растяжении из-за различий в характере напряженного состояния при этих схемах деформирования трехосного при сжатии и одноосного при растяжении. Однако в производственных процессах получения листовых материалов деформирование осуществляется сжатием.

Выводы.

1. На основе данных ФАСИ структурной эволюции сплава В95 после технологических воздействий при поэтапном выполнении КМО разработана лабораторная технология криомеханического упрочнения алюминиевого сплава В95.
2. Экспериментально подтверждена эффективность разработанной технологии упрочнения алюминиевого сплавав той же мере, в какой КМО ранее оказалась эффективной для упрочнения стали 08КП, 17ГС, ст.20цтркониевого сплава 110, титановых сплавов ВТ-6С, ВТ16.
3.

Работа выполнялась по государственному заданию №007-00129-18-00 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-08-00098а).

Список литературы: 1. Orovan E. Dislocations in Metals, New York, AIME, 1954. 104 p. **2.** Сенаторова О.Г. Высокопрочные трещиностойкие слоистые алюмостеклопластики класса СИАЛ. Перспективный материал для авиационных конструкций. О.Г. Технология легких сплавов №2, 2009. **3.** Иванова В.С., Ермишкин В.А., Прочность и пластичность тугоплавких металлов и монокристаллов М., Металлургия, 1976, 80 с. **4.** Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Информационные технологии фотометрического анализа усталостной повреждаемости материалов. Информационные технологии, 2007. №11, С. 65-70.

ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩАЯ ПАНЕЛЬ ДЛЯ ШУМОЗАЩИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ МАШИН

Заплетников И.Н., Кириченко В.А., Громов С.В. *(ГО ВПО «ДонНУЭТ им. М. Туган-Барановского», г. Донецк, ДНР)*
Тел./Факс: +38 (062) 3045046; *E-mail: obladn@kaf.donnuet.education*

Abstract: *This paper is devoted to the design of a sound-absorbing panel, which has an increased sound absorption coefficient and an extended frequency range for sound absorption, as well as a simplification of its manufacturing technology. The sound-absorbing panel can be used to create sound-absorbing structures used in various industries, including mechanical engineering, construction, etc., to reduce the noise in the rooms, as well as the noise emitted by machines and mechanisms.*
Key words: *Noise, sound absorbing panel, noise protection design.*

Звукопоглощающие устройства обычно имеют однородный звукопоглощающий слой. В качестве материалов, рекомендуемых для изготовления звукопоглощающих панелей, рекомендуются волокнистые и пористые материалы. На практике широкое применение получили соответствующие строительные пеноматериалы с открытыми порами для глушения звука в помещениях, например, в акустических потолках. Известно, что для того, чтобы звукопоглощающая панель шумозащитной конструкции была высокоэффективной, необходимо выполнение двух условий: она должна обладать высоким внутренним поглощением звуковой энергии, и входной импеданс конструкции должен быть согласован с волновым сопротивлением среды. В источниках [1] и [2] описано, как определить входной импеданс пористой звукопоглощающей конструкции, расположенной перед звукоотражающей задней стенкой. Для звукопоглощающих панелей на основе волокнистых звукопоглощающих материалов (ЗПМ) такое согласование обычно достигается либо за счет дистанцирования слоя ЗПМ от жесткой стенки, на которую эта конструкция укрепляется, либо путем построения конструкции из большого количества слоев ЗПМ с плотностью набивки, незначительной для внешнего слоя и равномерно возрастающей по мере приближения к жесткой стенке. Переменная средняя плотность заполнения пространства звукопоглощающим материалом реализуется также при помощи клиньев из звукопоглощающего материала постоянной плотности, и обращенных острыми концами в сторону падающей звуковой волны. Такая конструкция, в частности, общепринята при обработке стен, потолка и пола заглушенных измерительных камер.

Известна звукопоглощающая панель, состоящая из перфорированной и сплошной обшивок и сотового заполнителя, грани которого расположены под углом к обшивкам (Патент США №3821999, МПК G10K 11/172, 1974.07.02). Недостатком такой панели является низкая технологичность изготовления и относительно узкий диапазон звукопоглощения, определяемый высотой сотового блока заполнителя.

Известна звукопоглощающая панель, состоящая из тонколистовых обшивок и разнесенных между ними поясов сотового заполнителя, выполненных из гофрированных лент, между которыми расположены перегородки в виде тонких листов (Патент США №2870857, МПК E04B 9/32, 1959.01.27). Недостатком указанной панели является то, что она достаточно сложна в изготовлении и имеет большой удельный вес.

Наиболее близкой к предлагаемой панели является звукопоглощающая панель по патенту RU №2052604, МПК 6 E04C 2/36, 1996.01.20. В соответствии с описанием патента звукопоглощающая панель выполнена в виде наружного листа с отверстиями, выходящими внутрь резонансных камер, образованных между этим листом и наполнителем и может иметь опорный лист. Наполнитель выполнен в виде

зигзагообразного гофра, вершины которого соединены с этим листом. В зависимости от назначения панели материал листа и наполнителя может быть любым: металл, бумага, пластик и др. Зигзагообразный гофр своими вершинами может склеиваться (свариваться или паяться) с наружным листом. Соединенные друг с другом они устанавливаются на опорной поверхности. В качестве опоры может выступать поверхность самого шумообразующего объекта, (например, корпус), либо самостоятельный, дополнительный лист, образующий сплошную опорную пластину панели, на которой и формируются путём наслаивания звукопоглощающие элементы панели. Таким образом, звукопоглощающая панель, как самостоятельный элемент шумозащитного устройства, состоит из наружной перфорированной и задней глухой пластин, между которыми расположен звукопоглощающий элемент, выполненный в виде зигзагообразного гофра, вершины которого соединены с этими обшивками, образуя, таким образом, камеры Гельмгольца. Панели устанавливают в помещении или в машине. Звуковые волны, проникая через отверстия наружной пластины, гасятся в резонансных объемах, образованных зигзагообразным гофром. Недостатком такой панели является низкий коэффициент звукопоглощения, потому что звукопоглощение обеспечивается только камерами Гельмгольца, образованными между перфорированной наружной пластиной и заполнителем. Камеры, расположенные между нижней опорной пластиной и заполнителем, практически не задействованы в работе как резонирующие объемы, что уменьшает эффективность глушения шума и диапазон частот эффективного звукопоглощения.

Целью данной работы является создание конструкции звукопоглощающей панели, обладающей повышенным коэффициентом звукопоглощения и расширенным частотным диапазоном звукопоглощения, а также упрощением технологии её изготовления.

Поставленная цель была достигнута путём применения в качестве ЗПМ многослойной комбинации из двух пластин мягкого пористого материала и, расположенного между ними, жёсткого гофрированного пористого материала [3].

Технический результат, достигаемый такой конструкцией панели, заключается в расширении частотного диапазона звукопоглощения и повышении коэффициента звукопоглощения. Существенно упрощается технология изготовления, как самой панели, так и всей шумозащитной конструкции на основе подобных панелей, за счёт уменьшения размеров и толщины ЗПМ.

Конструктивно панель может быть выполнена в виде обшивок по стенке или корпусу шумообразующего объекта или как самостоятельный элемент с образованием шумозащитного экрана (конструкции) вокруг объекта.

Звукопоглощающая панель, общий вид которой показан на рис. 1, устроена следующим образом. На опорную пластину (1) послойно накладываются последовательно: пластина или лист из пористого мягкого звукопоглощающего материала (2) (например, из минеральной ваты, стеклянной ваты, вспененного полиуретана и прочего) и, затем лист складчатой гофрированной структуры (3), на который - вторая пластина пористого мягкого звукопоглотителя (2). Набранные таким образом в виде слоёв пластины сверху прижимаются перфорированной пластиной (4) с образованием каркаса панели, содержащего внутри камеры Гельмгольца (5). Скрепление элементов звукопоглощающей панели осуществляется за счет использования узкой резиновой прокладки (6), приклеиваемой по периметру с торцов каркаса панели между опорной пластиной (1) и перфорированной пластиной (4).

Схема сборки составляющих панель пластин показана на рис. 2. Пилообразные линии зигзагообразного гофра расположены в плоскостях, перпендикулярных к отверстиям перфорированной пластины (4). Перфорированная пластина, выполняющая

роль передней стенки собранного каркаса, может быть выполнена из сетки или перфорированного листа с определенной степенью перфорации, обеспечивающей проникновение звуковых волн внутрь. Коэффициент перфорации передней стенки равен или превышает 0,45. Передняя и опорная задняя стенка образованного каркаса выполнены из стали толщиной около 0,7 мм или из алюминиевого листа толщиной около 1 мм.

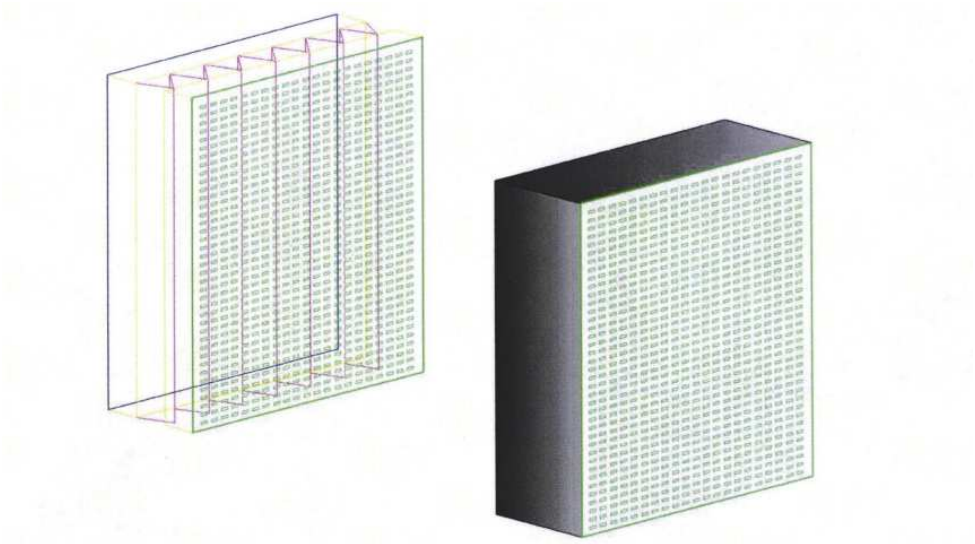


Рис. 1. Общий вид звукопоглощающей панели для шумозащитной конструкции в сборе

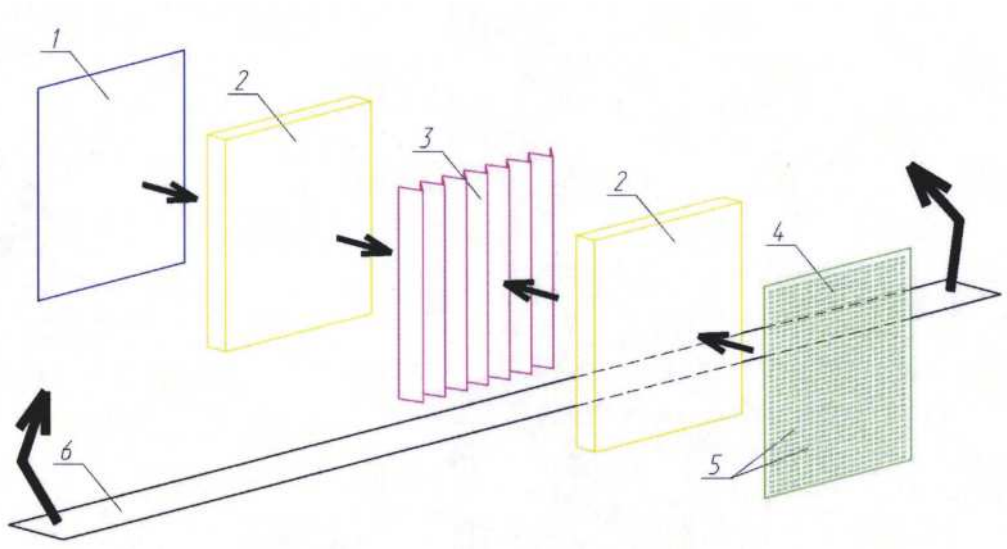


Рис. 2. Звукопоглощающая панель для шумозащитной конструкции в разобранном виде

Гофрированный лист выполнен из звукопоглощающего материала, у которого коэффициент отражения звука больше, чем коэффициент звукопоглощения, (например, из картона, полиэтилентерефталата или других полимеров с аналогичными свойствами). Расстояние между соседними ребрами гофрированного листа 3…5 мм.

Панель работает следующим образом. Воздушный зазор между слоем клиньев складчатой гофрированной структуры (3) и пластиной (2) из мягкого пористого звукопоглощающего материала, прижатого металлической сеткой (перфорированным

листом) (4), на низких частотах работает как резонансный поглотитель и увеличивает звукопоглощение на данных частотах. Нижние граничные частоты в зависимости от толщины материала, из которого изготовлена складчатая гофрированная структура, составляют от 31,5 до 100 Гц. Поглощение акустических волн в области средних и высоких частот, начиная с 500 Гц и выше, происходит преимущественно в каналах, которые образуют звукопоглощающие клинья гофрированной структуры. Отраженные и прошедшие сквозь гофрированную структуру акустические волны поглощаются пористыми звукопоглощающими пластинами.

Эффективное поглощение акустических волн звукопоглощающими пластинами обеспечивается также за счет размещения металлической сетки, имеющей малую площадь относительно звукопоглощающей пластины.

Таким образом, данное техническое решение позволяет осуществить эффективное звукопоглощение и согласование акустических импедансов, в котором происходит плавное нарастание акустического импеданса по мере продвижения звуковой волны от широкой части канала, образуемого гофрированной структурой, к узкой части, с одновременным поглощением звуковой энергии на его стенках, выполненных из тонкого материала (например, картона толщиной около 0,5…1 мм).

Если направление потока звуковой энергии заранее неизвестно, то шумозащитную конструкцию набирают из панелей, ориентируемых в различных направлениях. Меняя ориентацию панелей или рядов, получают максимальный коэффициент звукопоглощения. Такое исполнение шумозащитной конструкции позволяет эффективно гасить шумы в области низких частот при любом направлении потока звуковой энергии.

Преимуществом предлагаемого технического решения является его универсальность применения для различных производственных помещений, имеющих самые разнообразные шумовые характеристики. При этом следует отметить и его экономически обоснованную эффективность (имеется в виду снижение шума до санитарно-гигиенических норм).

Звукопоглощающая панель может применяется для создания звукопоглощающих конструкций, используемых в различных отраслях, включая машиностроение, строительство и др., для снижения шума в помещениях, а также шума, издаваемого машинами и механизмами.

Вывод: применение новой звукопоглощающей панели для шумозащитной конструкции позволяет расширить частотный диапазон звукопоглощения и повысить коэффициент звукопоглощения. Существенно упрощается технология изготовления, как самой панели, так и всей шумозащитной конструкции на основе подобных панелей, за счёт уменьшения размеров и толщины ЗПМ.

Список литературы: 1. Mechel, F.Schallabsorber Band 2, InnereSchallfelder, Strukturen. HirzelVerlag Stuttgart - Leipzig, 1995. **2.** Mechel, F. Schallabsorber Band 3, Anwendungen. HirzelVerlagStuttgart - Leipzig, 1998. **3.** Пат. на пол. модель РФ № 171794, МПК E04B 1/84 (2006.01), МПК E04B 1/86 (2006.01), МПК E04B 2/02 (2006.01), МПК E04C 2/34 (2006.01). Звукопоглощающая панель для шумозащитной конструкции / Шашурин А.Е., Заплетников И.Н., Кириченко В.А., Иванов Н.И., Бужинский К.В., Светлов В.В., Бойко Ю.С.; заявитель и патентообладатель: ООО «Институт акустических конструкций – u 2016141361; заявл. 20.10.2016; опубл. 16.06.2017, Бюл. № 17, 2017. – 4 с.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ХРОМИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Звягинцева А.В. *(Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия)*
E-mail: zvygincevaav@mail.ru

Abstract: *Alternative possibilities of replacing chromium coatings obtained from standard chromium plating electrolytes (based on chromic acid) with low-valent electrolytes are considered. Reasonable the conclusion that low-voltage electrolytes chrome plating more economical, less toxic, but do not allow to completely solve the problem of replacing chrome coatings on the technological and functional properties. The main drawback is the inability to obtain thick coatings.*
Key words: *electrolytic chromium sulfate and a standard electrolyte of chromium plating, the current efficiency, thickness*

Первые сведения о получении электролитического хрома из электролитов на основе соединений Cr(VI) и его свойствах появились еще в 1905 году в работе [1], что положило начало его применению в его промышленности. Наибольшее распространение хромовые покрытия получили в технологиях машиностроении в силу особых характеристик, таких как износостойкость, коррозионная устойчивость, антифрикционная и отражательная способность и ряд других. Три основные особенности характерны для процесса гальванического хромирования: высокая токсичность применяемых стандартных электролитов, малое значение выхода по току металла Cr ≈ 10-15 % в зависимости от режима электролиза, повышенные требования к оборудованию (вентиляция, футеровка ванн, токовые захваты). С полным основанием можно считать что экономически, экологически и по энергопотреблению это один из самых несовершенных процессов, но отказаться от него невозможно в силу объективных причин.

Во-первых, механические свойства хромовых покрытий и сплавов на его основе пока не имеют достойных аналогов. Во-вторых, попытки перехода на электролиты других химических составов пока не нашли промышленного применения [2-5]. В-третьих, работы по использованию других элементов вместо хрома для упорядочения поверхностных слоев требуют серьезных теоретических и экспериментальных исследований по определенным направлениям: временная стабильность состава сплава, наличие миграционных процессов, специфика образования соединений с водородом, кислородом и азотом. Обзор литературных источников последних лет показывает возобновление интереса к технологиям получения хромовых покрытиям на основе соединений Cr(VI) и поиску альтернативных источников, обусловленный определенным подъемом промышленного производства. Здесь можно выделить два основных направления: 1. Замены на низковалентные электролиты основе Cr(III) различного состава. 2. Альтернативные покрытия различного состава. Кроме этого, необходимость снижения экологической опасности технологического процесса хромирования и потерь цветных металлов является важнейшей задачей во всех промышленно-развитых странах. В странах Европейского Союза (ЕС) уже действуют или принимаются новые Европейские экологические директивы. Кратко рассмотрим директивы, которые касаются ограничения вредных веществ:

1. Директива ЕС №2000/53/ЕС**:** направлена на ограничение использования четырех металлов: кадмия, свинца, ртути, шестивалентного хрома в машинах. Согласно Директиве ЕС №2000/53/ЕС допускается использование шестивалентного хрома только для защиты от коррозии и ограничивается его общее содержание на поверхности деталей – не более 2 г/автомобиль, для всех других целей использование шестивалентного хрома не допускается.

2. Директива 2002/95/ЕС: «*Ограничение вредных веществ*» («*Restrictionof Hazardous Substance*») направлена на ограничение вредных веществ в электрических и

электронных устройствах. К ним отнесены: кадмий, ртуть, свинец, шестивалентный хром, PBB (полибромированные дифенилы), PBDE (эфир полибромированного дифенила). Согласно данной директиве, максимальная концентрация в совокупности ртути, свинца, шестивалентного хрома, PBB и PBDE в гомогенных материалах не должна превышать 0,1 масс. %. Учитывая сложный количественный учет соединений Cr(VI) на большом числе деталей, входящих в автомобиль, радикальной мерой по исключению шестивалентного хрома стал его полный запрет для конверсионных покрытий с 01.07.2007, что и было предусмотрено решением ЕС №2002/525/.

Прочностные и другие характеристики свойств хромовых покрытий, полученных из растворов хромовой кислоты, приведены в литературе [2, 5]. Кратко рассмотрим механизм формирования, на катоде хрома. До настоящего времени существуют две концепции восстановления катиона Cr^{6+}:

1. Непосредственное восстановление: $Cr^{6+}+6e\rightarrow Cr^{0}$
2. Ступенчатое восстановление: $Cr^{6+}+3e\rightarrow Cr^{3+}$, $Cr^{3+}+e\rightarrow Cr^{2+}$, $Cr^{2+}+2e\rightarrow Cr^{0}$

Анион хромовой кислоты анионов CrO_4^{2-}, $Cr_2O_7^{2-}$ и катод при электролизе имеют одинаковый отрицательный знак заряда. Поэтому возникает вопрос, каким образом мигрирует ион CrO_4^{2-} к поверхности отрицательного электрода. Помимо этого существует ряд других вопросов, обуславливающих низкий выход металлического хрома по току.

В работе проведен поиск альтернативных покрытий для замены стандартных электролитов хромирования на низковалентные электролиты хромирования [3, 4] или на альтернативные покрытия, например композит Ni-B [5, 6], но информация об их широком применении в промышленном производстве отсутствует.

В работах Фаличевой А.И. и ее сотрудников было установлено, что повышение температуры электролита до 50 °С в течение одного часа выдержки вызывает изменение структуры раствора сульфата хрома, о чем свидетельствует не только изменение кислотности электролита, демаскировка катионами H^+, но и происходящее увеличение плотности электролита [7]. Это свидетельствует о переходе структуры сульфата хрома в другое модификационное состояние.

Попытки замены электролитического хрома, полученного из стандартных электролитов, пока не обеспечили желаемого результата. На данном этапе получены обнадеживающие результаты по некоторым показателям технологического процесса. Например, температура электролита снижена с 45 до 20 °С, плотность тока снижена с 80 А/дм^2 до 35 А/дм^2, выход по току повышен с 12 % до 40 %. Но есть одна отличительная особенность. В стандартных электролитах выход по току с увеличением времени электролиза практически не изменяется, а в сернокислых электролитах постепенно снижается. На рисунке представлены зависимости выхода по току хрома для стандартных и сернокислых электролитов.

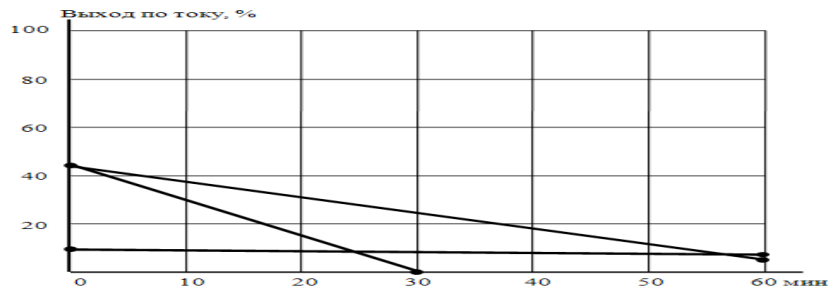


Рис. 1. Временные зависимости выхода по току хрома, полученные в стандартных (1) и сернокислых (2) электролитах

По всей вероятности снижение во времени скорости кристаллизации металла вызвано определенными диффузионными ограничениями. Увеличение времени электролиза для покрытий из электролитов низковалентных составов не дали положительного результата. Максимум толщины покрытия полученного из сернокислого электролита хромирования составил 50 мкм. Объяснить причину снижения скорости образования металлического

хрома с увеличением продолжительности электролиза пока не представляется возможным без проведения дополнительных экспериментальных исследований. Некоторые результаты в этом направлении дают основания высказать вполне обоснованные предположения. Во-первых, при больших временах продолжительности электролиза на всех катодных образцах обнаружена деструкция (разрушение) электролитического покрытия. На процессы деструкции основное влияние оказывает водород. Во-вторых, для целого ряда металлов на катоде возможно протекание параллельных реакций одновременно с восстановлением металла Me^0 и образованием H_2 может образовываться металлогидридная фаза. Образование твердофазного гидрида Me-H по своим физико-механическим свойствам сильно отличается от металлов. Анализ температурных зависимостей $Q^{-1} = f(T)$ для образцов, полученных из сульфатных электролитов хромирования, позволяет констатировать факт активного образования гидридов хрома в структуре гальванопокрытия [8].

Следует несколько в другом аспекте рассмотреть понятие дефекты атомной структуры. В этом случае физико-механические качественные характеристики и коррозионные свойства зависят от дефектов в структуре неявно, поскольку упрочнение покрытия обратно пропорционально условной величине усредненного размером зерна. По этой причине пик внутреннего трения по амплитуде оказался меньше, чем для образцов, полученных в стационарных режимах электролиза, в отличие от импульсных режимов электролиза.

Из альтернативных сплавов или композитов рассматривались следующие варианты: Ni-Cr и Ni-B. Использование низковалентных электролитов на основе Cr(III) для получения электролитического сплава Ni-Cr возможно в любой комбинации компонентов, входящих в состав сплава в диапазоне от 0 до 100 %. К сведению, стандартные ванны на основе Cr(VI) позволяют получать сплавы Ni-Cr при концентрации никеля не выше 12 атомных процентов в составе сплава. Более подробно о функциональных возможностях сплава Ni-Cr и композита Ni-B в следующих публикациях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания № 9.11295.2018/10.11 «Разработка технологий высокоизносостойких покрытий подшипников скольжения со сверхмалым коэффициентом трения на основе соединений Ni-B».

Список литературы: 1. H. R., Mott W. R. Elecrolytic chromium // J. Phys. Chem., 1905. -V.9. - P. 231–256. **2.** Шлугер М.А. Ускорение и усовершенствование хромирования деталей. М.: Машгиз, 1961. 204с. **3.** Protsenko V.S., KitykA. A., Danilov F.I. Kinetics and mechanism of chromium electrode position from methane sulphonate solutions of Cr (III) salts // Surf. Eng. Appl. Electrochem.2014. V.50. P. 384–389. **4.** Kumar U. P., Kennady C. J. Characterization of Chromium Electrodeposits Obtained From Trivalent Electrolytes Containing Formaldehyde as Additive // Int J Thin Films Sci and Tech. 2015. V.4. P.147–153. **5.** Звягинцева А.В., Бурдыкина Р.И. Проблемы хромирования и альтернативные покрытия Ni-B // Гальванотехника и обработка поверхности. М., 2003 – Т.XI.- №2. – С. 24 – 29. **6.** Звягинцева А.В. Возможности применения функциональных композитов никель–бор в машиностроении // Научный журнал «Химия, физика и механика материалов». ФГБОУ ВО «ВГТУ». №2(17), 2018. С. 64-93. **7.** Фаличева А.И., Шалимов Ю.Н., Ионова И.Г. Электротермографические исследования прикатодного слоя при электроосаждении хрома из сернокислых электролитов // Защита металлов. 1972. Т. VIII. №4. С. 499-501. **8.** Звягинцева А.В. Перспективы использования гидридов на основе никеля, алюминия в качестве накопителей водорода для альтернативной энергетики /А.В. Звягинцева //Научный журнал «Химия, физика и механика материалов». – ФГБОУ ВО «ВГТУ», 2018. - №1(16). – С. 85-117.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОГО ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА

Звягинцева А.В. *(Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия)*
E-mail: zvygincevaav@mail.ru

Abstract: *The paper deals with the basic physical and chemical basis for the implementation of safe storage of hydrogen in the form of Nickel and aluminum hydrides. In order to increase the energy capacity of metal systems for storage of hydrogen in the solid-phase state, the mechanism of formation of metal structures of aluminum hydrides is considered. It is concluded that aluminum, according to the Clark index, is the most common material in the earth's crust. The grain boundary peak (the oscillation frequency of the sample is 100 Hz), indicating the possibility of the formation of hydrogen compounds of aluminum and its hydrides,was determined by the internal friction method based on the dependence Q–1 = f(T) for Al foil at a temperature of 300 ° C. The scheme of the technological process of obtaining pores in aluminum foil is presented. A mechanism for the formation of aluminum hydrides based on the interaction of hydrogen cations at the anode with the oxide film Al2O3 on anodic aluminum foil is proposed.*
Keywords: *hydrogen storage, hydride of aluminium and of Nickel, electrode system, the proton of hydrogen, the defect structure of the metal, electrochemical technology*

Водород как уникальное энергетическое топливо, безусловно, имеет преимущества перед углеводородами. Поскольку основные факторы развития отрасли: доступность ресурса, наличие технологий получения, экологическая и техносферная безопасность для водорода беспрецендентны. Вместе с тем следует выделить три основные проблемы: получение водорода, хранение водорода, транспорт водорода. Наиболее актуальные задачи возникают при решении проблемы хранения водорода. С точки зрения эффективности их можно расположить в ряд по степени возрастания баллонное – криостатное – металлгидридное. По энергозатратности на единицу веса характер изменится: металл-гидридное, баллонное, криостатное.

В литературе отмечен повышенный интерес проявляется к такому высокоэнергетическому топливу, как гидрид алюминия AlH_3. Своеобразие структуры гидрида алюминия обусловлено наличием водородных связей в этой молекуле. Аналогия геометрии формы с бензольным кольцом определяет объемный эффект молекулы. В гидриде алюминия AlH_3 относительно малая энергия связи $E_{Al\text{-}H}$ = ~ 0,5 эВ [1], поэтому извлечение - экстракция водорода осуществляется в интервале температур 142-145 ^{0}C.

Анализ содержания металлов в земной коре показывает, что алюминий имеет преимущество в сравнении с другими металлами по критерию доступности. Он, согласно индексу Кларка, является самым распространенным материалом в составе земной коры нашей планеты, его содержание составляет ~8,3 % от общего веса. Другим критерием является возможность взаимодействия алюминия с водородом с образованием гидридов, AlH_3.

По вопросу взаимодействия водорода с алюминием в научных кругах существуют различные мнения по их механизму. Наверное, следует признать правильным утверждение Дж. Бокриса [2] о том, что атомы алюминия взаимодействуют с водным раствором электролита только через оксидную пленку. Главным аргументом такого утверждения является высокое отрицательное значение потенциала алюминиевого электрода, при котором должно происходить активное саморастворение.

В работе [3] исследовано электролитическое наводороживание алюминиевых образцов с целью определения возможности взаимодействия алюминия с водородом. Получены результаты измерения температурной зависимости внутреннего трения алюминиевой фольги толщиной 16 мкм и отожженной при 400 ^{o}C. На кривых зависимости Q^{-1} = f(T) для Al фольги при температуре 300 ^{o}C наблюдается зернограничный пик (частота колебаний образца 100 Гц). Фон внутреннего трения $5\cdot10^{-4}$. На основании полу-

ченных данных можно считать, что их наличие дефектов в структуре металла допустимо до температуры ~+350 ^{o}C, и по этим дефектам возможно образование связи Al-H, что детально рассмотрено в работе [3] и согласуется с данными работы [4]. В этом случае создаются предпосылки для формирования структур металлов, способных аккумулировать значительные объемы водорода.

Для обеспечения технологической возможности аккумулирования и экстракции водорода предполагается использовать хорошо известные технологии электрохимического получения пор, которые уже апробированы в производстве электролитических конденсаторов [5]. Анодная обработка – это получение пор методом анодного растворения, которое осуществляется в водных растворах NaCl с концентрацией 15-18 %, ia = 15-20 А/ дм^2 (ток анодной обработки); $\tau_{эксп}$ = 2 мин (время экспозиции); $t_{эл\text{-}та}$ = 40 ^{0}C.

Технология получения пор может быть представлена следующим образом. На аноде протекают одновременно два сопряженных процесса. Разложение воды по схеме:

$$2H_2O - 4e \rightarrow 4H^+ + O_2 \qquad 1)$$

Окисление алюминия:

$Al - 1ê \rightarrow Al^+$, $E_{ион.}$ = 5,6 эВ

$Al^+ - 1ê \rightarrow Al^{2+}$, $E_{ион.}$ = 18,2 эВ

$Al^{2+} - 1ê \rightarrow Al^{3+}$, $E_{ион.}$ = 24,8 эВ,

где $E_{ион.}$ – энергия ионизации алюминия, эВ [6].

Образующиеся ионы водорода также взаимодействуют с молекулами воды с образованием гидратированного иона гидроксония по схеме:

$$H^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ \qquad 2)$$

На катоде протекает процесс восстановления воды по схеме:

$$2H_2O + 2e \rightarrow H_2 + 2OH^- \qquad 3)$$

В процессе анодной обработки Al фольги формируются поры, диаметр которых колеблется от 3 до 15 мкм [7].

Механизм взаимодействия катионов водорода с оксидом алюминия может быть представлен следующим образом. Дальнейшая обработка алюминиевой фольги осуществляется в электролитах разбавленной серной кислоты с добавкой КАФ (катионноактивных веществ), время образования гидрида алюминия определяется по началу выделения газообразного H_2 на катоде, температура раствора H_2SO_4, t = 20-35 ^{0}C. На катоде в двойном электрическом слое протекает процесс дегидратации катиона гидроксония по схеме:

$$H_3O^+ - H_2O \rightarrow H^+ \qquad 4)$$

$$H^+ + e \rightarrow H^0 \qquad 5)$$

Далее осуществляется взаимодействие атомарного водорода со свободным атомом металла:

$$Al^0 + 3H^0 \rightarrow AlH_3 \qquad (6)$$

с образованием гидрида металла. Свободный протон H^+ имеет весьма ограниченные размеры (10^{-5}Å) [8], поэтому его проникновение через оксидный слой осуществляется беспрепятственно.

Одним из необходимых условий высокой эффективности систем аккумулирования является формирование электродной системы с высокой степенью развития поверхности, обеспечивающей высокую доступность электролита к электроду. Основным способом при этом является электрохимическая технология формирования пор. Главная особенность этой технологии – отсутствие непосредственного контакта металлического алюминия с водным раствором электролита. При определенной плотности анодного тока возникают условия формирования на аноде пористой структуры. При этом профиль образующейся поры главным образом зависит от плотности анодного тока. На рис. 1 представлены возможные геометрические профили пор, получаемые при различных значениях плотности анодного тока. Такое многообразие образующихся типов профилей объясняется сложностью взаимодействия электрода с раствором электролита. Условия протекания гидродинамических теплофизических и концентрационных процессов в объемах ограниченных гео-

метрическими размерами отличаются не только скоростями протекания, но их характером. Велика вероятность возникновения новых фазовых переходов.

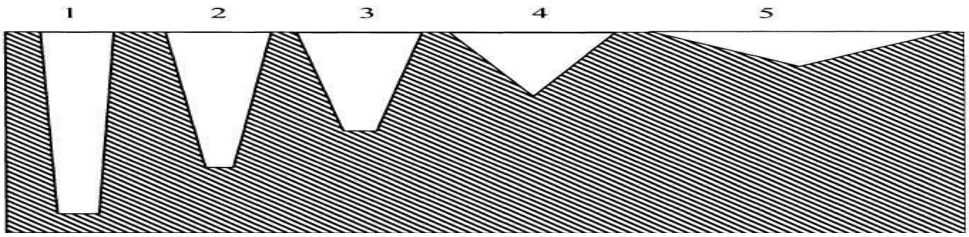


Рис. 1. Влияние плотности анодного тока на морфологию формируемой поры. Плотность тока: 1 - 1 А/дм^2; 2 - 2 А/дм^2; 3 - 3 А/дм^2; 4 - 4 А/дм^2; 5 - 5 А/дм^2

Такой принцип развития поверхности используется в технологиях конденсаторостроения. В реальных техпроцессах увеличение степени развития может составлять до 600 раз, $K_{тр} = S_{общ}/S_{геом}$ ~600 раз, где Sобщ – площадь аноднообработанной фольги, $S_{геом}$ – видимая (геометрическая) поверхность. Развитие поверхности является одним из необходимых условий создания эффективных систем хранения водорода. Вопрос распределения плотности тока в значительной степени определяется состоянием поверхности электродов и сопротивлением электролита в межэлектродном пространстве. Задача определения сопротивления межэлектродного промежутка сложна и не имеет точных решений в силу неопределенности условий протекания процессов в поре во время ее формирования. Общий вид идеализированной электродной системы для гидридного хранения водорода представлен на рис. 2. Отметим, что электрод – накопитель водорода - состоит из трех частей: материк, основание и пора. Наличие в структуре Al фольги - материковой части - обеспечивает прочность ленты при намотке картриджа, а также для обеспечения нагрева при экстракции водорода из материала картриджа. Основание электрода – это пористая часть Al фольги.

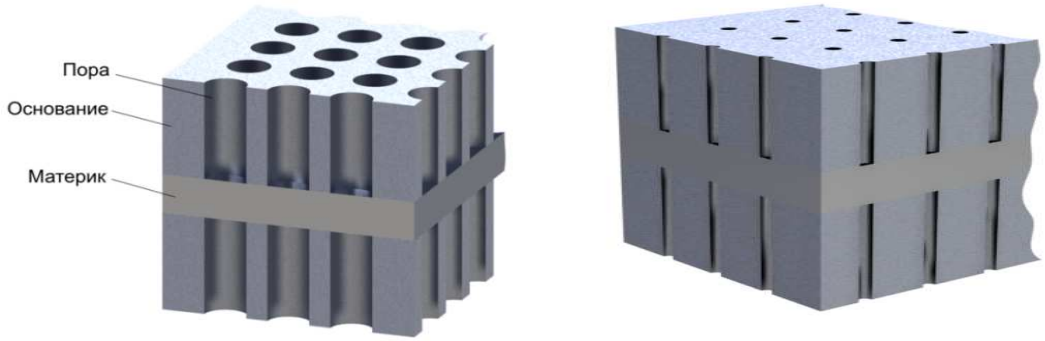


Рис. 2. Элемент конструкции электрода – накопителя водорода

С этих позиций предложено использовать сплав никель-бор и алюминий-бор [9]. Такая инвариантность позволит создать универсальные системы аккумулирования водорода. Такой выбор определился особенностью процессов экстракции водорода из этих сплавов. Повышение концентрации бора в составе Ni-B значительно снижает энергию связи Me-H [9].

Образование гидрида алюминия за счет электрохимического восстановления на катоде протона водорода H^+ не представляется сложной задачей транспорта протона через оксидный слой из Al_2O_3 (диаметр H^+ составляет 10^{-5}Å). Однако, процесс экстракции молекулярного водорода или ассоциатов nH_2 – задача более сложная.

Транспорт молекулярного водорода из электродной структуры алюминия может быть реализован 2 способами. На рис. 3 приведены различные варианты транспорта молекулярного водорода через оксидную пленку алюминия.

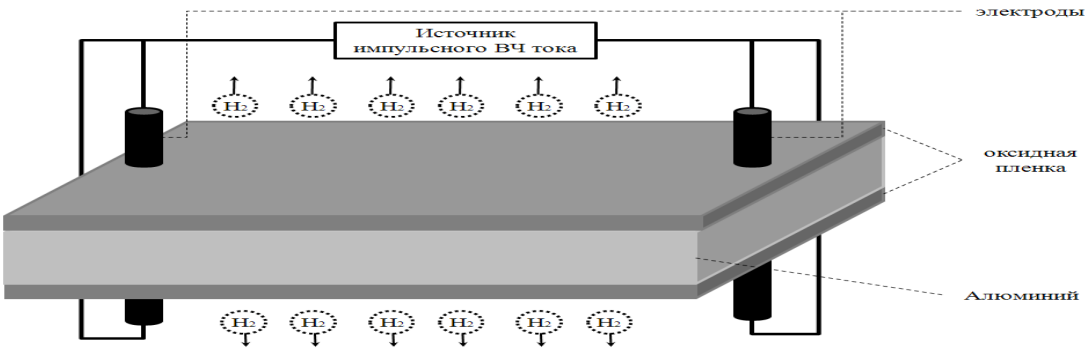


Рис. 3. Транспорт молекулярного водорода через оксидную пленку алюминия.

По варианту 1 – разрушение оксида алюминия при экстракции необходимо осуществить термоудар направленного воздействия на поверхностный слой. Разрушенная пленка на алюминии регенерировать вновь не сможет, поскольку в замкнутом объеме картриджа отсутствует кислород, а экстрагирующий водород для образовавшейся системы в худшем случае исполняет роль инертного газа. Реализация каналов вывода молекулярного водорода по варианту 2 осуществляется гальванотехнологией формирования сетки из микромембран, сформированной на внешней поверхности фольги.

Следует обратить внимание на следующий факт. Многочисленные попытки экспериментального определения механизма реакций анодного окисления алюминия, пока не дали неопровержимых результатов. Однако решение этой проблемы является необходимым условием создания новой технологии аккумулирования водорода на основе гидридов алюминия и к решению этой проблемы вплотную приблизился Шалимов Ю.Н. в своих работах и своих учеников, некоторые результаты которых еще ждут публикации в открытой печати. Однозначно можно прогнозировать, несмотря на существующий у некоторых авторов скептицизм, хранение водорода в форме гидридов алюминия – это технологии будущего.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания № 9.11295.2018/10.11 «Разработка технологий высокоизносостойких покрытий подшипников скольжения со сверхмалым коэффициентом трения на основе соединений Ni-B».

Список литературы: 1. Нефедов В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений. Справочник. М.: Химия, 1984. 256 с. **2.** Бокрис Дж. Новые проблемы современной электрохимии. – М.: Иностранная литература, 1962. – 462 с. **3.** Zvyagintseva A.V., Shalimov Yu.N. On the Stability of Defects in the Structure of Electrochemical Coatings // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2014. Vol. 50. № 6. PP. 466–477. **4.** Mirsaidov U. Synthesis, Properties, and Assimilation Methods of Aluminium Hydride (англ.) // Edited by T. Nejat Veziroğlu, Svetlana Yu Zaginaichenko, Dmitry V. Schur, Bogdan Baranowski, Anatoliy P. Shpak Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials : NATO Science for Peace and Security Series / NATO Science for Peace and Security Series A:. Springer, 2007. P. 77-85. - 384 с. **5.** Закгейм Л.Н. Электролитические конденсаторы. 2-е изд., перераб. и доп. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 284 с. **6.** Тихонов В.Н. Аналитическая химия алюминия. М.: Наука, 1971. 266 с. **7.** Шалимов Ю.Н. Влияние тепловых и электрических полей на электрохимические процессы при импульсном электролизе: дис. … д-ра техн. наук. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2007. 354 с. **8.** Химический энциклопедический словарь / гл. редактор И.Л. Кнунянц. М.: «Советская энциклопедия», 1983. С. 484. 792 с. **9.** Звягинцева А.В. Гибридные функциональные материалы, формирующие металлические структуры с оптимальной дефектностью для хранения водорода в гидридной форме /А.В. Звягинцева //Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – Саров: Изд-во «Научно-технический центр «ТАТА», 2017. – Номер: 16-18. - С. 89-103.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ НЕУРАВНОВЕШЕННЫХ РОТОРОВ

Зиякаев Г. Р., Пашков Е. Н. *(Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия)*
E-mail: zgr@rambler.ru

Рассмотрено влияние трения в подшипнике на точность автоматической балансировки неуравновешенных роторов шаровыми автоматическими балансирующими устройствами. Получена зависимость остаточного удельного дисбаланса системы от параметров АБУ и трения качения в контакте шар-обойма

Ключевые слова: *автоматическая балансировка, автобалансирующие устройства, неуравновешенные роторы, виброзащита, дисбаланс, колебания, собственная частота*

В связи с ростом угловой скорости вращения роторов приборов и машин увеличиваются уровни вибраций, вызываемые ими. Вредная вибрация нарушает планируемые конструктором законы движения машин, приводит к интенсивному износу деталей машин и подшипников, а в некоторых случаях и к авариям. Вибрация может явиться источником ухудшения качества выпускаемой продукции. Также вибрация оказывает непосредственное влияние на человека.

Чаще всего источниками вибрации машин являются неуравновешенные вращающиеся части. Современные методы и средства балансировки вращающихся роторов позволяют уравновешивать их по высокому классу точности. Поэтому для некоторых типов роторных машин вполне достаточно однократной балансировки ротора, которая производится после его изготовления. Это можно видеть на примере роторов различных электродвигателей, карданных валов автомобилей и т. д. Однако есть такие типы машин, у которых вектор дисбаланса в процессе эксплуатации постоянно меняет свою величину и направление. Так, например, для шлифовальных кругов это происходит вследствие неравномерного износа его абразива. В различных центрифугах изменение неуравновешенности происходит очень быстро и причем в каждом пуске. Поэтому для таких типов машин возникает необходимость в автоматической балансировке роторов.

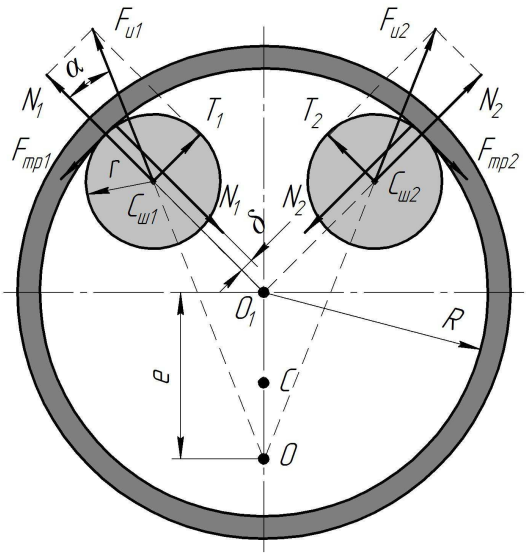


Рис. 1. Механическая модель шарового АБУ

В настоящее время в технике применяются автобалансирующие устройства (АБУ) вращающихся роторов [1-3]. Они позволяют снизить уровни вибраций приборов и машин, уменьшить износ подшипников и других вращающихся частей, что в конечном итоге приводит к увеличению срока службы приборов и машин.

Рассматриваемое шаровое АБУ работает следующим образом: при вращении балансируемого ротора вместе с ним начинают вращаться шарики. В зарезонансной области вращения ротора шарики перемещаются относительно ротора под действием центробежных сил и компенсируют дисбаланс ротора. Но, как показала практика, полной балансировки и гашения колебаний ротора не произойдет – всегда есть остаточный дисбаланс, вызванный несколькими факторами: трение качения, овальность беговой дорожки и эксцентриситет ротора и беговой дорожки шаров [4].

При высоких скоростях вращения, определяющим фактором, влияющим на точность автоматической балансировки будет трение качения. Т.к. с ростом угловой скорости, инерционные нагрузки растут по квадратичному закону. Вместе с нагрузками увеличиваются контактные площадки шариков с АБУ и, соответственно, момент трения качения, действующий на шарики. Это приводит к тому, что шарики не доходят до “легкого места” и АБУ перестает работать.

Рассмотрим механическую модель шарового АБУ (рис. 1). Здесь O_1 – центр ротора, C – центр тяжести системы ротор – шарики, O – центр вращения системы, $C_ш$ – центр шарика, e – величина остаточного эксцентриситета ротора, δ – коэффициент трения качения. $F_и$, N и T – соответственно, силы инерции, действующие на шарики и их нормальные и касательные составляющие.

$F_{ТР}$ – сила трения в контакте шариков с беговой дорожкой, r – радиус шарика, R – радиус беговой дорожки шаров.

Положение шариков, центров масс ротора и системы показаны здесь для случая, когда частота вращения ротора выше собственной частоты системы.

Из рисунка видно, что шарики будут находиться в равновесии тогда, когда момент от касательной составляющей силы инерции T_1 будет уравновешен моментом трения качения:

$$T_1 r = N_1 \delta.$$

Преобразуем и, учитывая что угол α мал, получим

$$\frac{T_1}{N_1} = \frac{\delta}{r} = \mathrm{tg}\alpha \approx \alpha$$

Рассмотрим треугольник, образованный вершинами O,O_1 и $C_ш$ (рис. 1). Учитывая что (R-r) >> e, можно сделать допущение, что этот треугольник прямоугольный. Тогда

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{e}{(R-r)} = \frac{\delta}{r}$$

Решая это уравнение относительно e, находим:

$$e = \frac{\delta(R-r)}{r}.$$

Масса шарика:

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho,$$

где ρ – плотность материала шариков.

Нормальная составляющая силы инерции:

$$N_1 = m\omega^2(R-r) = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \omega^2 (R-r),$$

где ω – угловая скорость шариков вместе с ротором.

Размер контактной площадки при контакте шара с охватывающей сферой [5], мм:

$$\delta = 0{,}0856\left(\frac{N_1}{\frac{1}{r}-\frac{1}{R}}\right)^{1/3}$$

Окончательно получаем:

$$e = 0{,}0856\left(\frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho \omega^2 (R-r)}{\frac{1}{r}-\frac{1}{R}}\right)^{1/3} \frac{(R-r)}{r}$$

$$e = 0{,}0856\left(\frac{\frac{4}{3}\pi \rho \omega^2 (R-r)^4}{\frac{1}{r}-\frac{1}{R}}\right)^{1/3}$$

Данное выражение позволяет определить величину остаточного удельного дисбаланса ротора из-за влияния трения качения в контакте шар-обойма.

Анализируя данное выражение, видим:

– величина остаточного эксцентриситета прямо пропорциональна коэффициенту трения качения и радиусы обоймы АБУ.

– увеличение диаметра шарика приводит к снижению остаточного удельного дисбаланса.

Список литературы: 1. Гусаров А. А. Автобалансирующие устройства прямого действия. М.: Наука, 2002. - 119 с. 2. Блехман И. И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981. - 352 с. 3. Нестеренко В. П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1985. - 84 с. 4. Нестеренко В. П., Зиякаев Г. Р. О точности балансировки маятниковым автобалансирующим устройством. //Автоматизация и современные технологии. 2001. № 3. - С. 17–21. 5. Пинегин С.В. Контактная прочность в машинах/ С. В. Пинегин.- М.:Машиностроение, 1965. – 192 с.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ В БАЗАХ МНОГОМЕРНЫХ КЛАССИФИКАЦИЙ ГОРНЫХ МАШИН

Ибраева Н.Р., Бейсембаев К.М., Нокина Ж.Н. *(КарГТУ, г.Караганда, Казахстан)*
Тел.+7(747)1614745; E-mail: nazira9407@gmail.com

Abstract: *Effective design and modeling of mining machines, information and software components are one of the bases in the database, which further allows you to create a shell combining auto-design, modeling and monitoring of the current state of the machine with a single structurally related component. The cases presented in the article require a significant simplification and universalization of database creation, for the need for greater adaptation of systems to work with automated algorithms and is a very important and necessary component. The questions aimed at the study of multidimensional design, which are implemented in CAD packages, are considered. This is all very simply modeled on simple training systems, followed by a simple perception of the issue of adaptation of the calculation and modeling systems to the automation of machine control.*

Key words: *neuronets, data base, multidimensional classification, design, mining machine, auto design*

Во время разработки, проектирования и моделирования работы горных машин, информация и программные компоненты располагаются в базе данных, которая в дальнейшем позволяет создать единый структурно связанный контент, объединяющий проектный, модельный и регистрирующий модули, обеспечивая управление машиной, и создавая возможности для работы в режиме обратной связи.. В таких случаях к программе предъявляются требования существенного упрощения и универсализации в создании баз, для большей приспособленности к работе с автоматизированными алгоритмами.

Более упрощенно решаются и вопросы о необходимости подключения новых объектов к базе данных, даже если они имеют качественно иное содержание. К одной из отлаженных систем проектирования машин относится SolidWorks-программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия, а для горнопромышленных систем известен K-MINE обеспечивающий глобальный подход к проектированию и моделированию от маркшейдерии, геомеханики и управлению технологиями работ.

Платформы развитых фирм во многом во многом отличны, специфичны по методологии проектирования, а иногда имеют ограниченный доступ к популяризации в технической литературе, а поэтому для их понимания, обучение следует вести за счет раскрытия основ, которые в фундаментальном понимании общи для многомерного проектирования, реализованного в пакетах САПР. При этом используемая схемотехника меню, должна расширять возможности перехода к меню и интерфейсу различных пакетов. Это должно сочетаться с простотой моделирования на обучающих системах с последующим обеспечением интуитивно понятного восприятия вопроса приспособления расчетно-моделирующих систем к автоматизации управления машиной.

Иначе говоря, необходимо улучшить принципы обучения для создания (или эффективного использования) БД единой структуры, которая упрощала бы использование разработок разных производителей, например, для конечно элементных технологий, а также возможности обработки таких баз внешними системами на объектно-ориентированных языках программирования (C++, VBA).

Автоматизация горных машин и управление связано в настоящее время процессами создания машин на основе нейросетей, которые могли бы действовать таким образом, что будут восприниматься человеком как разумные. Наиболее широкое распро-

странение получили многослойные нейросети прямого распространения, или многослойные персептроны, MLP (Multi Layer Perceptron).

Строятся они на основе данных о состоянии машин, учитывая, что эти данные могут быть приспособлены к базам данных на основе многомерных классификаций, когда они за счет сетевой организации данных и использования в узлах – таблицах программных систем проектного, прогнозирующего и управляющего типа по существу представляют собой простую нейросеть,

Обычно сеть состоит из нейронов, логических устройств, соединенных между собой аксонами (по существу программируемыми связями), которые могут изменять структуру связи. В результате в нейросети реализуется распараллеливание процессов и вычислений, повышающих их эффективность, а также его логику.

Поэтому нейросетевое моделирование можно применять в базах многомерных классификаций объектов, также как и нейросети, образующими структуру групп узлов и подузлов.

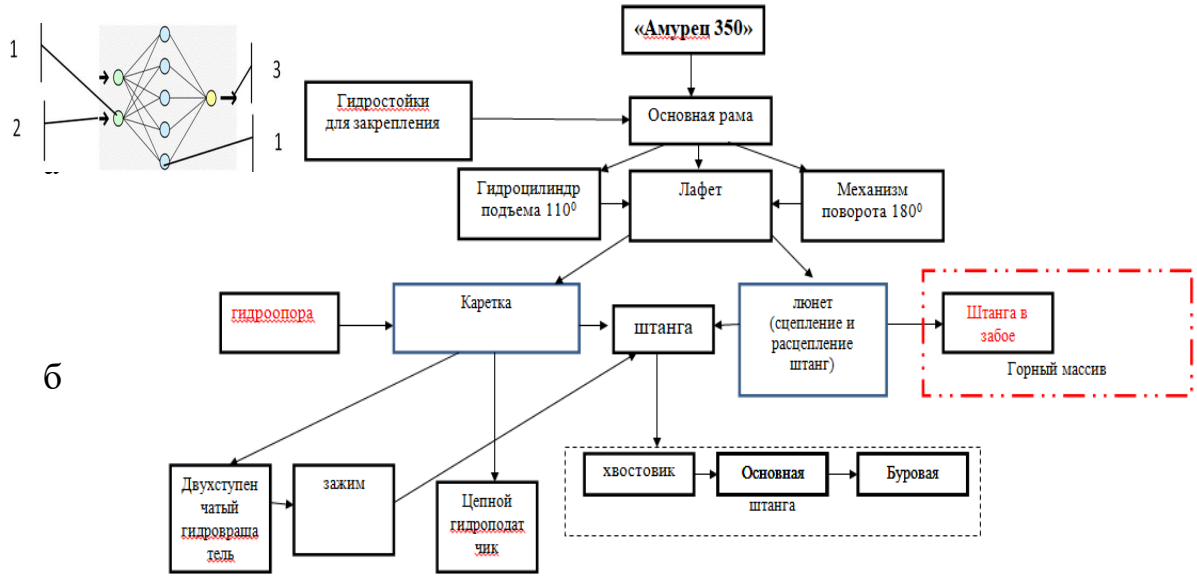


Рис.1. Простая схема нейросети (а) и многомерная классификация бурового: 1-слои - уровни; 2,3 - входы и выход (б)

В узлах – таблицах, с программами обработки (макросы и модули), создается возможность использования комплекса пакетов для моделирования процессов и данных в 3d. В базах поддерживается иерархическая структура, а с учетом мощного программного обеспечения в узлах, соединяемых через гиперссылки с внешним программным обеспечением, и сетевая структура, обеспечивающая взаимодействие не только с соседними сопрягаемыми узлами, но и расположенными за пределом моделируемого объекта, рис. 1, 2, 3 [1]. В ней заложена мощная система объединения пространственных узлов, разных, но работающих в единой логике баз, с образованием нейросети. Схема узла – таблицы может рассматриваться как простой процессор. В системах моделирования машин и механизмов, наряду с применением в узлах программ на основе объектно-ориентированных языков типа VB, C++ через гиперссылки используются пакеты типа Ansys(work bench), Adams, SolidWorks, Comsol multiphysics, в их меню для сложных ходных данных. Это позволяет создавать программы динамического моделирования и анимации. Открываются и перспективные возможности подключения се-

тевых возможностей и использования рассредоточенных серверов специальных приложений.

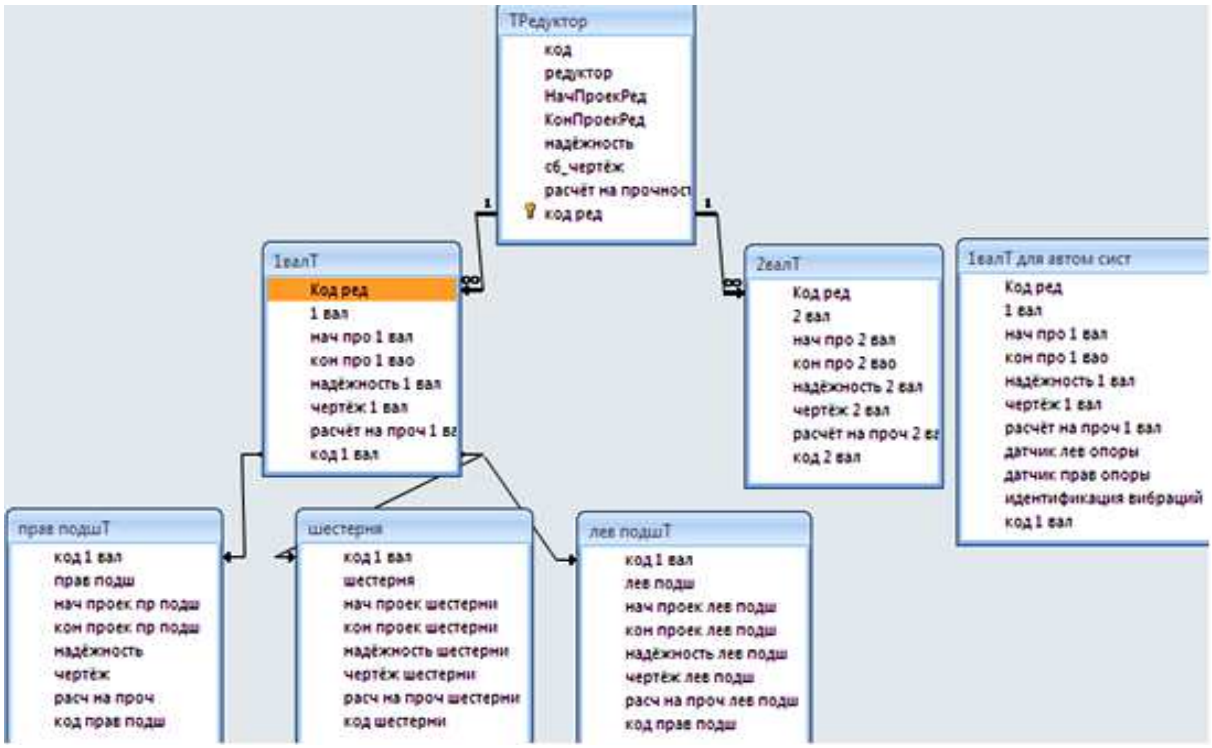


Рис. 2. Окно построения таблиц в программе Microsoft Access

Comsol multiphysics. Если рассматривается, например, конструкция машины, то можно увидеть и улучшенные программные элементы управления или конструктивные схемы. В каждом таком узле машину можно рассматривать в обновленной топологии превышающей 3d, которая продолжает конструкцию в её взаимодействии с рабочей средой и с другими узлами, позволяя рассматривать и управлять статическими и динамическими процессами. Для создания инфологической модели базы (логически и рационально связанной - информационной модели рассматриваемого процесса) необходимо создания таблиц и их, соединений. Таблицы стандартных полей строим методом многомерных классификаций [1], по правилам иерархического подчинения независимых элементов объекта по горизонали (измерения) и по уровням. Соединение таблиц по правилу соединения одинаковых кодовых полей последнего в вышележашего с первым нижележащей таблицы. Заметим, что построение многомерной классификации требует детального знания конструкции машины и особенностей работы, правил и возможностей управления узлами и деталями от узла к узлу, но позволяет организовать и систему её диагностирования, рис. 3. В данном случае таблицы для редуктора уже расширены после создания скелетной части от 5 столбцов до 8 и введены поля: «надёжность», «расчёт на прочность» и «чертёж». Стуктура таблиц уточнена так, что в базе нет таблиц вне логики инфологической модели. Так, при расчёте надёжности «ТРедуктор» будет уточнена и надёжность корпуса редуктора, а в таблицах «1 вал» учтена надёжность вала и установленных на нём левого и правого подшипников и шестерни. Структура базы учитывает, что эти детали установлены на валу 1. Правильно отраженная функциональность узлов и деталей позволяет соответственно, и организовать расчётные части машины. Соответсвенно, в таблицах задействованы пакеты CAD/CAM/CAE. Справа представлена заготовка таблицы «1 вал» для автоматизированной системы. Т.е. обновлённая таблица, где теперь легко и логично ввести поля «датчик левой опоры» и «датчик правой опоры», которые фиксируют амплитуду и частоту давления при

вращении вала. Легко понять, что эти параметры во многом способны идентифицировать возникщий вибропроцесс от неточностей изготовления зубчатого зацепления, выкрошивания зубьев, разбалансировки одного из подшипников и т.п., если перед эксплуатацией редуктора были осуществлены тестовые записи его амплитудно- частотных характеристик под опорами подшипников. Организация записей датчиков в БД - хорошо известная

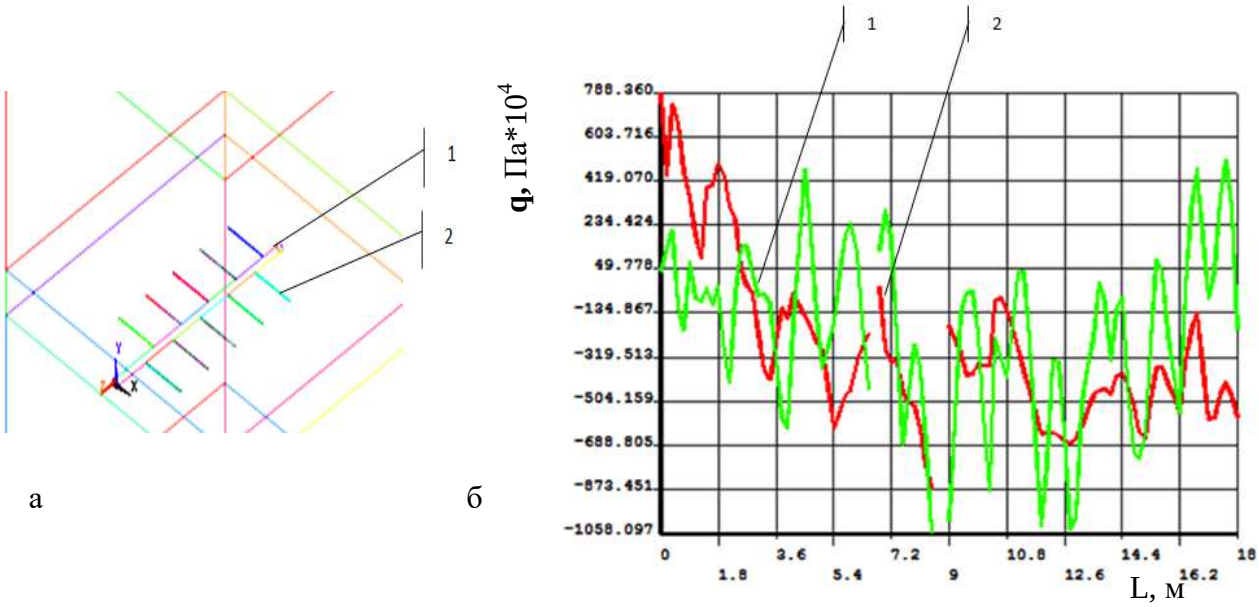


Рис. 3. (а) - Контурная модель: 1 -скважина; 2 – лучи; (б) напряжения вблизи фронта лучей: 1 - σx; 2 – σy

процедура, но затруднения имеются в их идентификации и алгоритмах хранения (какие данные следует сохранить или стереть). Поле «Идентификация вибраций» содержит результаты анализа полученных данных, и, в частности, могут содержать следующие данные, идентификация которых относительно не сложна:нормальный режим; износ на левом подшипнике; отказ на левом подшипнике; выкрошивание зубьев; поломка зубьев.

Идентификация осуществляется в специальной программе обычно встраиваемой в базах в систему запросов, а лучше в блок «модули» (для базы Access). Для этого полученные амплитудно-частотные характеристики с учетом скорости вращения вала сравниваются с табличными. А в случае, если данных для анализа не хватает, процессор базы рассылает срочные сообщения экспертам через Интернет. Заметим, что в лучшем случае данные датчиков должны накапливаться в специальном хранилище, которое периодически просматривают эксперты оборудования без прямых прав их изменения.

Система управления разрабатывается для скважинной обработки пластов с проведением от основной скважины в перпендикулярном направлении инициирующих лучей, например, за счет пескоструйных технологий. Воздействуя на пластовое давлением образованием полостей, дисковых трещин, давлением жидкости или тепла подаваемого в лучи. Модель такой системы разработана в пакете Ansys, и включает все основные элементы МТС и рабочей среды до земной поверхности. Получены картины контурной модели и напряжений вдоль скважины у зон лучей, (рис. 3 а, б).

Список литературы: 1. Бейсембаев К.М., Дёмин В.Ф., Жолдыбаева Г.С., Малыбаев Н.С., Шманов М.Н. Автопроектирование горных машин в 3d: проектно-модельный подход Караганда, 2016, изд-во КарГТУ, 208с.

ОЦЕНКА ВЫЕМОЧНО-ПОГРУЗОЧНЫХ ФУНКЦИЙ КАРЬЕРНЫХ ЭСКАВАТОРОВ

Иванов И. Ю., Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А.
(ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия)
Тел.: 8(343)283-06-71; E-mail: yu.lagunova@mail.ru

Abstract: *It is shown that an increase in the unit capacity of quarry electromechanical excavators (shovel) is realized mainly due to an increase in the capacity of the forge with almost constant dimensions of the working zone of the excavator. This increases the excavation function, determined by the performance of the excavator, and the loading function, depending on the size of both the working area of the excavator and the loading area of the bucket and determined by the development of rock mass from one station, remains unchanged. At the same time, as the bucket capacity increases, the carrying capacity and dimensions of vehicles increase and, as a result of the mismatch between excavation and loading function, can complicate the process of loading vehicles. The article defines the relationship between the excavation and loading functions of mining excavators of domestic and foreign production.*
Keywords*: mining excavator, excavation and loading functions, excavator working area and bucket unloading area.*

Задачи работы

Задачи работы заключаются:

- в выявлении изменения соотношения между выемочной и погрузочной функциями при росте вместимости ковша карьерных экскаваторов;

- в определении рациональных параметров зоны разгрузки экскаватора, обеспечивающих эффективную загрузку автосамосвала.

В настоящее время наблюдается тенденция существенного роста единичной мощности карьерных экскаваторов. Так, отечественными заводами освоен выпуск экскаваторов с вместимостью ковша 32 м^3 (ООО «ИЗ-КАРТЭКС») и 35 м^3 (ПАО «УРАЛМАШЗАВОД»). Американские экскаваторостроительные фирмы выпускают карьерные экскаваторы с вместимостью ковша до 61 м^3 (Caterpillar-Bucyrus) и 76,5 м^3 (P&H). Китайская фирма «TYHI» производит экскаваторы с вместимостью ковша 76 м^3.

В таблице приведены технические характеристики карьерных электромеханических экскаваторов (мехлопат) отечественного и зарубежного производства, а также значения относительной высоты разгрузки $H_{\text{отн}} = \dfrac{H_{\text{разг.max}}}{\sqrt[3]{M}}$ и условий выработки горной массы Q_1 с одного места стояния экскаватора (произведение максимальных значений радиуса и высоты копания) [1-3].

Как следует из таблицы, вместимость основного ковша карьерных экскаваторов, характеризующая выемочную функцию экскаватора, существенно возрастает (в 1,75 – 2,3 раза), а значения $H_{\text{отн}}$ и Q_1, характеризующие погрузочную функцию экскаватора, изменяются незначительно, причем значения $H_{\text{отн}}$ для экскаваторов отечественного производства значительно больше (примерно на 30 – 40 %).

Особенность процесса загрузки кузова автосамосвала заключается в последовательном заполнении кузова. В этом случае при заполнении кузова увеличивается высота разгрузки и, соответственно, уменьшается радиус разгрузки, что приводит к смещению центра тяжести загружаемого объема горной массы и неравномерному нагружению колес автосамосвала (рис. 1).

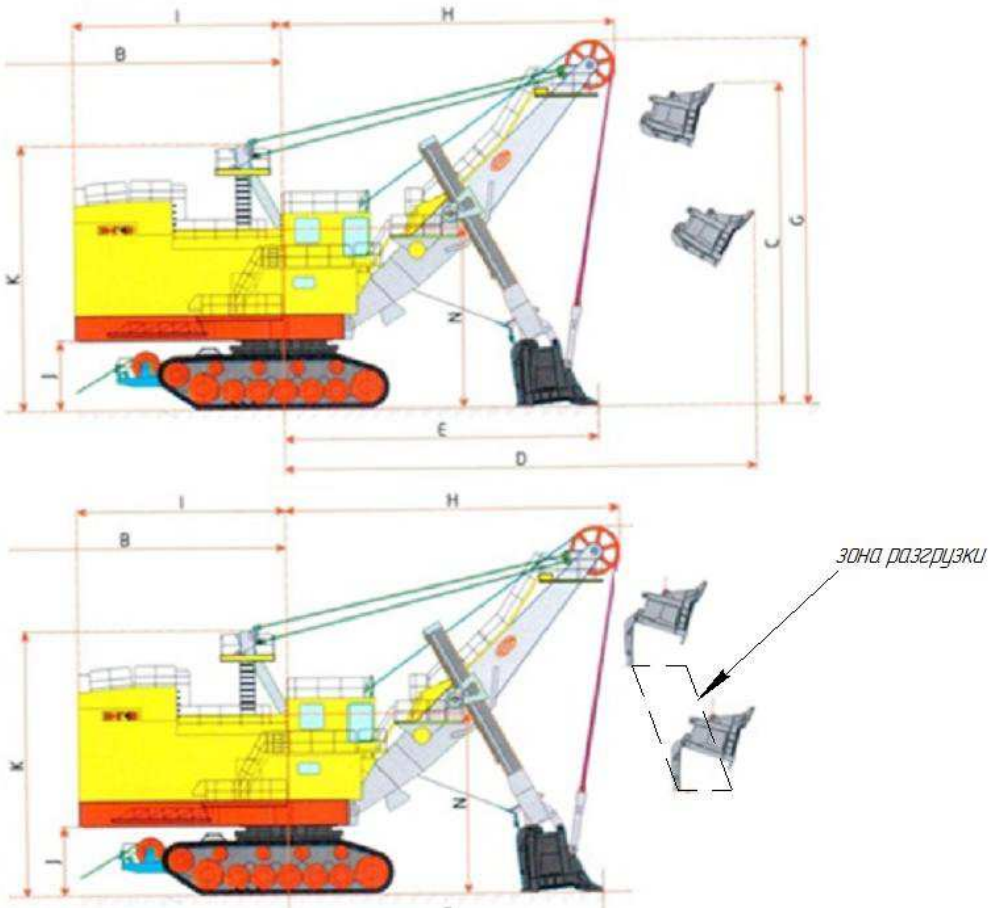


Рис. 1. Рабочая зона экскаватора и зона разгрузки ковша

На рис. 2 показана эффективная загрузка, обеспечивающая равномерное заполнение кузова и одинаковую нагруженность колес.

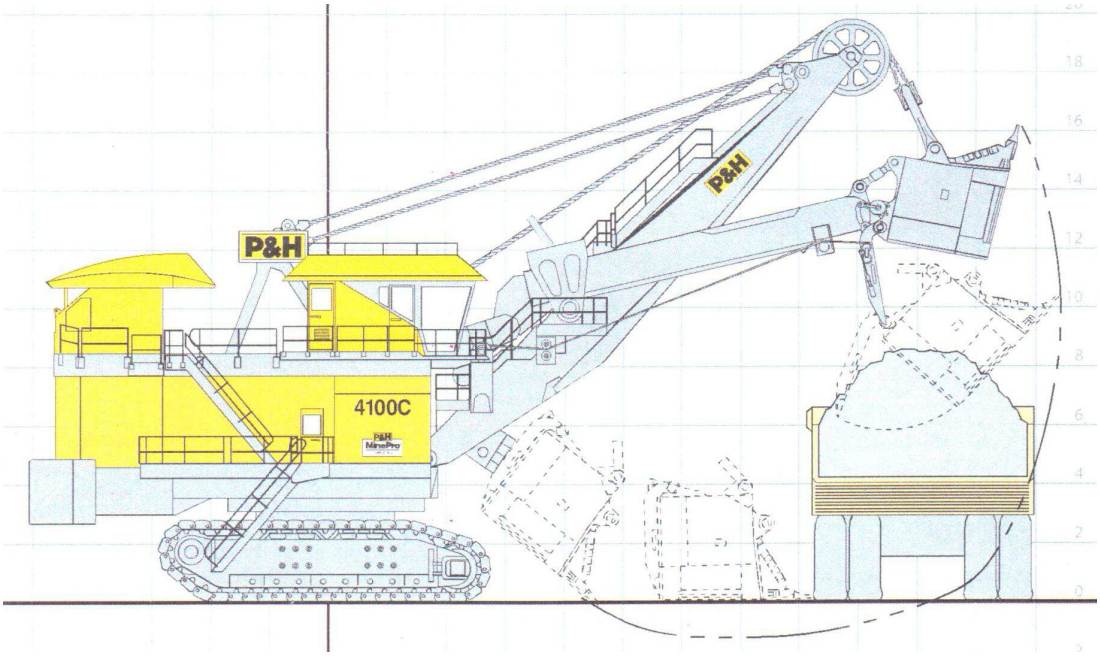


Рис. 2. Равномерная загрузка автосамосвала

Таблица 1. Технические характеристики карьерных экскаваторов

Параметр	УРАЛМАШЗАВОД			ИЗ-КАРТЭКС			P&H (США)		
	ЭКГ-20А	ЭКГ-18	ЭКГ-35	ЭКГ-15	1500 К	ЭКГ-32Р	2300 XPC	2800X PC	4100 XPC
Вместимость основного* ковша, $м^3$	20	20	35	15	20	32	25,5	35,7	58,6
Вместимости сменных ковшей, $м^3$	16-25	18-24	26-40		18-40	20-45			
Радиус копания макс., м	23,4	22,2	24,5	23,4	23,4	24	21,3	24,2	23,9
Радиус разгрузки макс., м	20,9	18,3	21	20,2	20,9	20,6			
Высота копания макс., м	17	16,3	18,5	15,6	17,5	17,3	13,5	16,6	16,8
Высота разгрузки макс., м	11,5	10,7	12,3	10,8	11,8	11	8,5	9,1	9,5
Мощность сетевого двигателя (трансформатора), кВт	2250	1250	2500	1250	2500	2500	2000	2500	3750
Масса, т	1075	800	1200	675		950	910	1310	1650
Относительная высота разгрузки	1,12	1,15	1,15	1,23		1,12	0,88	0,84	0,77
Условная выработка горной массы с одного места стояния	398	362	453	365	410	415	288	402	402

* Вместимость основного ковша определяется в соответствии с принятыми нормами проектирования - SAE, CECE, EH и P

Определены рациональные параметры зоны разгрузки ковша, обеспечивающие эффективную загрузку транспортного средства.

В работе получена аналитическая зависимость для определения рационального значения радиуса разгрузки, при котором обеспечивается эффективная загрузка кузова [1-3].

Заключение

При выборе оборудования экскаваторно-автомобильного комплекса следует определить рациональные зоны разгрузки ковша экскаватора, что позволит повысить степень заполнения кузова и, кроме того, повысить срок эксплуатации колес.

Список литературы: 1. Лагунова Ю. А., Комиссаров А.П., Шестаков В.С. и др. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. Горные машины. Т. IV-24, 2011. 496 с.; **2**. *Гафурьянов Р. Г., Комиссаров А. П., Шестаков В. С.* Моделирование рабочего процесса карьерных экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 10. С. 40-45; **3.** Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Проектирование карьерных экскаваторов. М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 232 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ

Ивченко Т.Г., Лыхманюк Е.О., Андреева А. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)
Тел./Факс: +38 (062) 3050104;E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

Absract: *The results of estimation of efficiency of the technological cutting fluid (TCF) application at fine turning by tools from super hard materials at finish turning by tools from super hard materials are expected. The coefficients of cutting temperature declineat the application of the different TCF are set. The analysis of possibilities of the productivity increase and prime price decline due to the TCF application is executed.*
Key words: *super hard materials, finish turning, cutting temperature, optimization, prime price, productivity.*

Сверхтвердые инструментальные материалы (СТМ) находят широкое применение в современном производстве. Одним из перспективных направлений является использование СТМ при лезвийной обработке деталей машин, в том числе при точении закаленных сталей.

Основным достоинством сверхтвердых материалов является возможность обработки на высоких скоростях резания [1]. Однако, возникающие при этом высокие температуры, ограничивают возможный уровень скоростей резания и обуславливают целесообразность применения смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) [2]. Разработанная в настоящее время методика учета действия СОТС в расчетах тепловых процессов при механической обработке [3] позволяет для любых условий оценивать возможности различных СОТС по снижению температуры резания.

Наиболее широко эта методика апробирована в различных условиях обработки твердосплавными инструментами и, прежде всего, для подачи СОТС в зону резания свободным поливом и высоконапорной струей [4]. Однако, в силу хрупкости и высокой чувствительности СТМ к тепловым ударам, более рациональным вариантом использования СОТС при тонком точении инструментами из СТМ является ее подача в зону резания в распыленном состоянии [5].

В указанных исследованиях основным резервом роста эффективности обработки является интенсификация скорости резания вследствие снятия температурных ограничений при использовании СОТС. Известно, что применение СОТС позволяет не только снижать температуру резания, но и повышать стойкость режущего инструмента, снижать силы резания и шероховатость обработанной поверхности [6]. Представляет интерес дальнейшее развитие методики оценки эффективности для инструментов из СТМ с учетом всей совокупности факторов, улучшающих процесс тонкого точения с применением СОТС.

Цель работы – исследование возможностей повышения производительности и снижения себестоимости точения закаленных сталей инструментами из СТМ за счет использования СОТС.

Для оценки эффективности точения инструментами из СТМ использованы следующие коэффициенты повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C, учитывающие действие СОТС [6]:

$$K_P = \begin{cases} K_\Theta^{-1/n_t} K_{RC}^{(y_t - n_t)/y_r n_t}, при\ \ K_{\Theta oP} \le 1; \\ K_T^m K_{RC}^{(y_V - 1)/y_r}, при\ \ K_{\Theta oP} \ge 1. \end{cases} \quad K_C = \begin{cases} K_\Theta^{1/n_t} K_{RC}^{(n_t - y_t)/y_r n_t}, при\ \ K_{\Theta oC} \le 1; \\ K_T^{-m} K_{RC}^{(1-y_V)/y_r}, при\ \ K_{\Theta oC} \ge 1. \end{cases} \quad (1)$$

$$K_{\Theta oP} = 800 \Big/ C_\Theta \left(C_V K_V T^{-m}\right)^{n_t} \left(C_R K_R t^{x_r} / R_a\right)^{(y_V n_t - yt)/y_r} t^{(x_t - x_V n_t)}.$$

$$K_{\Theta oC} = 800 \Big/ C_\Theta \left(m/(1-m)M\right)^{m n_t} \left(C_R K_R t^{x_r} / R_a\right)^{(y_V n_t - yt)/y_r} t^{x_t}.$$

где K_T, K_R, K_Θ – коэффициенты повышения стойкости инструмента T, снижения шероховатости обработанной поверхности R_a и температуры резания Θ при использовании СОТС; C_V, K_V – коэффициенты и x_v, y_v, m – показатели, характеризующие степень влияния глубины t, подачи S и стойкости T на скорость резания V; C_Θ - коэффициент и n_t, y_t, x_t – показатели степени, учитывающие влияние скорости резания V, подачи S и глубины резания t на температуру резания Θ; C_R - коэффициент и y_r – показатель степени, учитывающий влияние подачи S на шероховатость обработанной поверхности R_a; $K_{\Theta oP}$, $K_{\Theta oC}$ - граничные значения коэффициентов снижения температуры Θ, определяющих необходимость учета температурных ограничений при расчете оптимальной скорости резания V_o по критериям производительности и себестоимости;

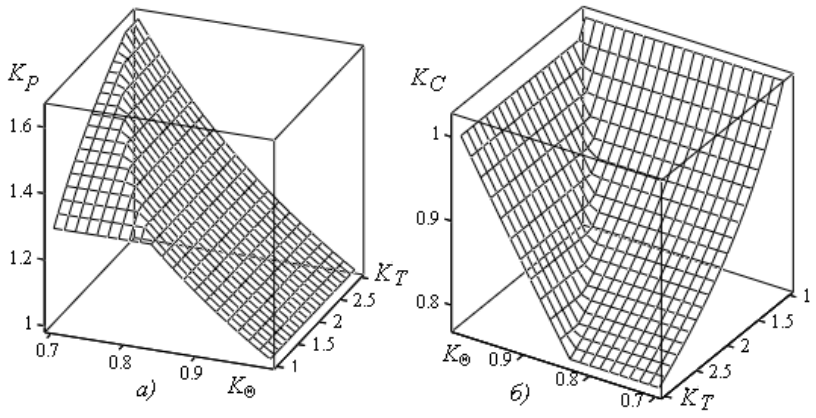


Рис. 1. Графики зависимости коэффициентов изменения производительности K_P – *а)* и себестоимости K_C – *б)* от коэффициентов изменения температуры резания K_Θ и стойкости K_T режущего инструмента из СТМ при тонком точении с СОТС

Общие закономерности изменения коэффициентов повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C от коэффициентов изменения температуры резания K_Θ и стойкости K_T режущего инструмента из СТМ при тонком точении с использованием СОТС представлены на рис. 1.

Коэффициенты повышения стойкости инструмента T и снижения шероховатости обработанной поверхности R_a при использовании СОТС устанавливаются, как правило, на основании экспериментальных исследований [2]. Коэффициенты снижения температуры резания определяются расчетными методами [3].

Расчеты температур выполнены для следующих условий: обрабатываемый материал – сталь 45; инструментальный материал - эльбор - *Р*; геометрические параметры: передний угол γ= 5°, радиус при вершине r = 0,8мм; глубина резания t = 0,5мм, подача S = 0,1мм/об; исследованы СОТС: 5% раствор эмульсола Аквол-2 (с преимущественно охлаждающими свойствами) и СОТС на основе минерального масла МРУ-1 (с преимущественно смазочными свойствами). Способ подачи СОТС в зону резания - распылением жидкости сжатым воздухом при давлении 0,2Мпа со скоростью до 300м/с.

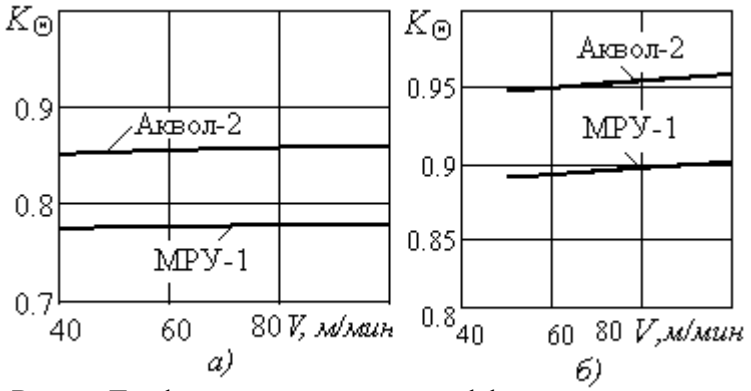


Рис. 2. Графики зависимости коэффициентов снижения температуры от скорости резания при точении стали 45 незакаленной - *а)*, закаленной - *б)*

Снижение температуры резания оценивается коэффициентом K_Θ: = $\Theta_{СОТС}/\Theta_{без\ СОТС}$.

Графики зависимости коэффициентов снижения температуры от скорости резания для различных СОТС при точении стали 45 представлены на рис. 2.

Наибольшее снижение температуры наблюдается при использовании СОТС на основе минерального масла МРУ-1.

Схема определения оптимальных режимов резания для тонкого точения по критерию максимальной производительности методом линейного программирования представлена на рис. 3.

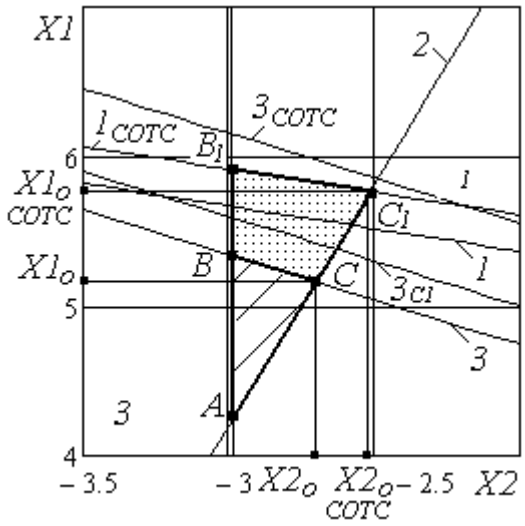


Рис. 3. Схема определения оптимальных режимов резания для тонкого точения закаленной стали 45

Основные ограничения: по режущим возможностям инструмента (1), по шероховатости обработанной поверхности (2), по температуре резания (3) [5].

Основные закономерности протекания процесса резания описываются зависимостями стойкости режущего инструмента *T*, температуры резания Θ и шероховатости обработанной поверхности R_a от скорости резания *V*, подачи *S* и глубины резания *t* [1]:

$$T = \frac{52{,}6 \cdot 10^4 \cdot 0.7 K_T}{V^{1{,}65} t^{0{,}3} S^{0{,}5}};$$

$$R_a = 0{,}68 S^{0{,}77} r^{-0{,}28} V^{-0{,}24} (90+\gamma)^{0{,}56};$$

$$\Theta = 460 K_\Theta S^{0{,}2} V^{0{,}22} t^{0.1}.$$

При обработке без СОТС оптимальные режимы резания определяются координатами точки $C(X1_o, X2_o)$, которая является точкой пересечения ограничений по предельно допустимой шероховатости ($R_{a\ доп}$ = 0,32мкм) обработанной поверхности (2) и допустимой температуре ($\Theta_{доп}$ = 800°С) резания (3). Оптимальные режимы резания: ($X2_o$ = -2,70; $X1_o$ = 5,16); S_o = 0,07мм/об; V_o = 110м/мин.

При использовании в качестве СОТС 5% раствора эмульсола Аквол-2 с коэффициентом снижения температуры резания K_Θ = 0,95 температурное ограничение не снимается ($З_{С1}$). Температурное ограничение полностью снимается ($З_{СОТС}$). при использовании в качестве СОТС минерального масла МРУ-1 с коэффициентом снижения температуры резания K_Θ = 0,9.

При использовании СОТС возрастает так же и стойкость режущего инструмента (K_T = 2). В этом случае область допустимых значений определяется из треугольника AB_1C_1. Точка экстремума целевой функции C_1 является точкой пересечения ограничений по предельно допустимой шероховатости обработанной поверхности (2) и режущим свойствам инструмента ($3_{СОТС}$). Оптимальная подача растет в 1,14 раза: ($X2_{оСОТС}$ = -2,51); S_o = 0,8мм/об. Оптимальная скорость резания существенно (в 1,81 раза) возрастает: ($X1_{оСОТС}$ = 5,77); V_o = 200м/мин.

Возможности повышения эффективности тонкого точения закаленной стали 45 инструментами из СТМ с использованием СОТС в сравнении с незакаленной сталью 45 представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты оценки повышения эффективности точения при использовании СОТС

Обрабатываемый материал	СОТС	Коэффициенты повышения эффективности обработки с использованием СОТС				
		повышения стойкости инструмента K_T	снижения температуры K_Θ	снижения шероховатости K_R	повышения производительности K_P	снижения себестоимости K_C
Сталь 45	Аквол	2	0,85	1	1,4	0,71
	МРУ-1	2	0,78	0,95	1,6	0,63
Сталь 45 HRC 60	Аквол	2	0,95	1	1,7	0,59
	МРУ-1	2	0,90	1	2,0	0,50

На основании выполненных исследований установлены коэффициенты повышения производительности и снижения себестоимости обработки инструментами из СТМ с использованием СОТС. Установлено, что применение СОТС повышает производительность и снижает себестоимости до 2 раз при обработке закаленных сталей и до 1,6 раз при обработке незакаленных сталей.

Список литературы: 1. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: [Справочник] / В.П. Жедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант, Г.М. Ипполитов. - М.: Машиностроение, 1987. - 320с. **2.** Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и. др.; под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544с. **3.** Ивченко Т.Г. Расчет тепловых потоков и температур резания при точении с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей / Т.Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА. 2010. - Вип. 26. - С.90-96. **4.** Івченко Т.Г. Підвищення продуктивності обробки з використанням мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ / Т.Г. Івченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Вып. 45. – С.112-117. **5.** Ивченко Т.Г. Оценка эффективности использования СОТС при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов / Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ, 2016. - Вып. 1 (52). – С.62-68. **6.** Ивченко, Т.Г. Оценка возможностей повышения эффективности обработки при использовании СОТС / Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ, 2018. - Вып. 1 (60). – С.37-43.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОХЛАЖДЕНИЯ

Ивченко Т.Г.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)
Тел./Факс: +38 (062) 3050104;E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

Absract: *In the presented work, the comparative analysis of possibilities of the cutting temperature decline is executed at the turning with the use of different ways of the cutting area cooling, both external and internal. The results of the efficiency estimation for the different ways of the serve technological cutting fluid (TCF) are expected. The coefficients of the cutting temperature decline at the application of thedifferent ways of the serve TCF are set.*
Key words: *turning, technological cutting fluid, cutting temperature, internal cooling, coefficients of temperature decline.*

В процессе механической обработки деталей машин выделяется значительное количество теплоты, в результате чего в зоне резания возникают весьма высокие температуры, ограничивающие производительность и неблагоприятно сказывающиеся на качестве обработанной поверхности. В связи с этим исследования возможностей снижения температур при резании весьма актуальны.

Одним из наиболее эффективных способов снижения температур при различных видах механической обработки является использование смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) [1]. В настоящее время известны методы расчета коэффициентов теплоотдачи от инструмента в охлаждающую среду, что является необходимым условием для анализа теплового состояния режущего инструмента [2]. Достаточно хорошо разработаны и методы расчета тепловых потоков и температур резания при использовании СОТС, подающихся различными способами в зону резания извне – как со стороны передней, так и задней поверхностей лезвия инструмента [3]. Перспективным направлением совершенствования способов применения СОТС является использование режущих инструментов с внутренним охлаждением лезвия, что успешно решает проблемы разбрызгивания, загрязнения и чрезмерного расхода СОТС [4].

При анализе СОТС и способов их подачи в зону резания, прежде всего, рассматриваются критерии снижения температуры резания, которые являются основой и для оценки возможностей повышения эффективности обработки в целом [5].

Однако, в большинстве случаев конкретные способы подачи СОТС рассматривается отдельно друг от друга, что затрудняет сравнительную оценку возможностей снижения температуры каждого из них. Представляет интерес рассмотреть различные способы подачи СОТС в сравнении друг с другом для обоснования выбора наиболее рационального из них в конкретных условиях обработки.

Цель работы – сравнительный анализ возможностей снижения температуры резания при различных способах охлаждения с использованием СОТС.

Эффективность действия СОТС зависит от способов и техники подачи СОТС в рабочее пространство станка и непосредственно в зону обработки. При лезвийной обработке применяются такие основные способы охлаждения: полив свободно падающей струей жидкости; подача жидкости под давлением - струйно-напорная подача СОТС; подача СОТС в распыленном состоянии; внутреннее охлаждение [1]..

Схемы различных способов охлаждения инструментов представлены на рис. 1.

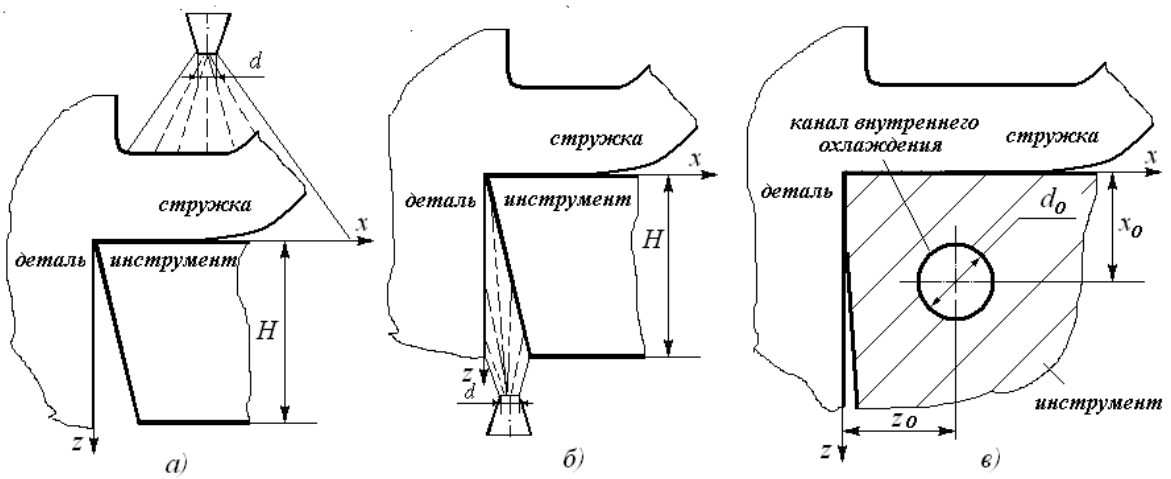


Рис. 1. Схемы различных способов охлаждения инструмента:
свободным поливом – *а)*; напорной струей – *б)*; внутренним охлаждением – *в)*.

Для охлаждения инструмента преимущественно используются СОТС на основе водных растворов, имеющих теплофизические свойства, близкие к свойствам воды. В этом случае коэффициенты теплоотдачи при подаче СОТС свободным поливом α_1, напорной струей α_2 [2] и внутренним охлаждением α_3 [5] могут быть определены как:

$$\alpha_1 = 357\varepsilon \ \ w^{0.6}/l^{0.4}\ ;\ \alpha_2 = 362w^{0.8}/l^{0.2}\ ;\ \alpha_3 = 2{,}6\cdot 10^3 w^{0.8}/l^{0.2}\ , \qquad (1)$$

где l – характерный размер ($l = H$), w – скорость движения среды.

Графики изменения коэффициента теплоотдачи α, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что, коэффициенты теплоотдачи возрастают с повышением скорости подачи жидкости w и уменьшаются с увеличением характерного размера l.

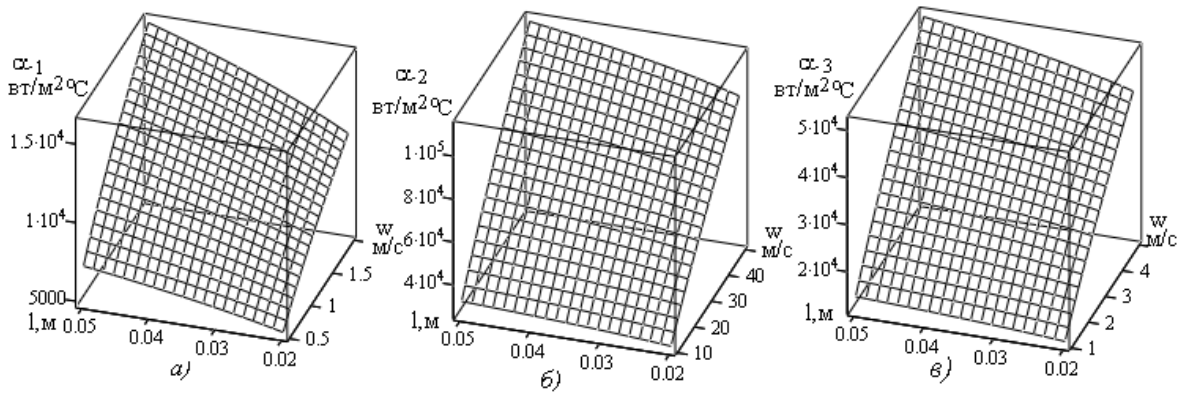


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости среды w и характерного размера l при подаче СОТС в зону резания свободным поливом – *а)*, напорной струей – *б)* и внутренним охлаждением – *в)*

Графики также свидетельствуют о значительном увеличении коэффициента теплоотдачи при струйно-напорной подаче СОТС в сравнении со свободным поливом. Это объясняется более высокими скоростями истечения жидкости из сопла при струйно-напорной подаче СОТС в сравнении со свободным поливом.

Подача распыленной жидкости в зависимости от типа инструмента может осуществляться как со стороны задней, так и со стороны передней поверхности. При подаче СОТС в зону резания в распыленном состоянии имеет место сложный теплообмен поверхности лезвия инструмента с двухфазной воздушно-жидкостной средой.

Приведенный коэффициент теплоотдачи, учитывающий все процессы, происходящие на поверхности контакта струи жидкости с нагретой поверхностью равен [2]:

$$\alpha_{ïð\ \ ðàñï} = 1{,}2K^{2/3}m^2\left(\alpha_{ðàñï} - \alpha_{âîçä}\right) + \alpha_{âîçä}\,, \qquad (2)$$

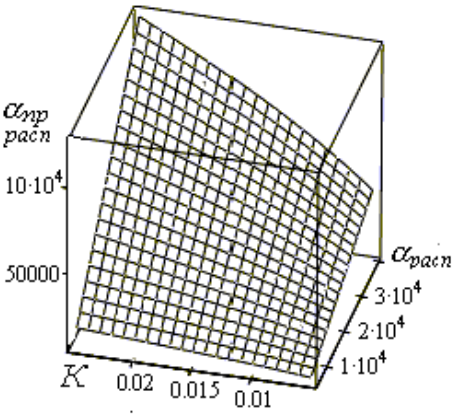


Рис. 3. График зависимости коэффициента теплоотдачи $\alpha_{пр\ расп}$ от концентрации жидкости K и коэффициента теплоотдачи распылением $\alpha_{расп}$

где K – концентрация жидкости в двухфазной воздушно-жидкостной среде; m – коэффициент, характеризующий деформацию капель жидкости при соударении с поверхностью; $\alpha_{возд}$ - коэффициент теплоотдачи в воздух; $\alpha_{расп}$ - средний по времени коэффициент теплоотдачи жидкости в распыленном состоянии в процессе нагревания и испарения капли.

Графики свидетельствуют о том, что по коэффициенту теплоотдачи подача СОТС распылением превосходит подачу свободным поливом и незначительно уступает подаче напорной струей.

С использованием методики расчета тепловых потоков и температур с учетом действия СОТС [3] выполнен анализ влияния коэффициента теплоотдачи на температуру резания для различных способов охлаждения инструмента.

Расчеты выполнялись для следующих условий: обрабатываемый материал - сталь 45; σ = 750МПа; коэффициент усадки k = 2,0; инструментальный материал Т15К6; износ по задней поверхности h = 0,1мм; глубина резания t = 3мм; подача S = 0,3мм/об. В качестве СОТС использован 5-% эмульсол Аквол-2.

Графики зависимости температуры резания от коэффициента теплоотдачи при обработке с применением СОТС свободным поливом - $\Theta_{полив}$, напорной струей - $\Theta_{напор}$, распылением $\Theta_{расп}$ и внутренним охлаждением - $\Theta_{вн\ охл}$ представлены на рис. 4*а*.

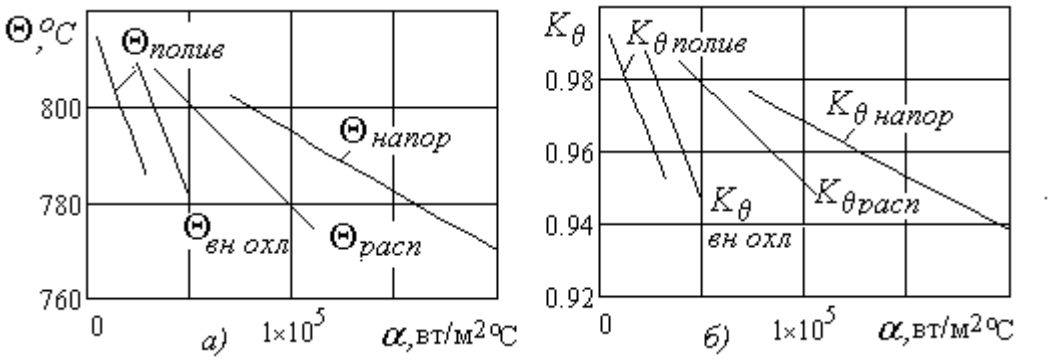


Рис. 4. Графики зависимости температуры резания Θ и коэффициентов снижения температуры резания K_Θ от коэффициента теплоотдачи α для различных способов охлаждения

Для указанных условий при работе без СОТС температура резания $\Theta = 820^{o}C$. Как следует из графиков, с увеличением коэффициента теплоотдачи температура резания снижается, причем для подачи СОТС напорной струей может быть достигнуто большее снижение температуры резания.

Для количественной оценки степени возможного уменьшения температуры предлагаются коэффициенты снижения температуры резания, представленные в зависимости от коэффициента теплоотдачи α_o на рис. 4*б*:

$$K_{\Theta\,\text{ïîëèâ}} = \Theta_{\text{ïîëèâ}} / \Theta;\ K_{\Theta\,\text{íàïð}} = \Theta_{\text{íàïð}} / \Theta;\ K_{\Theta\,\text{ðàñï}} = \Theta_{\text{ðàñï}} / \Theta;\ K_{\Theta_{\text{внохл}}} = \Theta_{\text{внохл}} / \Theta.$$

Рис. 5. Графики зависимости коэффициента снижения температуры резания K_O от скорости V при обработке с различными способами подачи СОТС в зону резания.

Коэффициент снижения температуры резания при различных способах подачи СОТС по сравнению с обработкой без СОТС: $K_O = \Theta_{\text{СОТС}}/\Theta_{без\ \text{СОТС}}$. Графики зависимости коэффициента снижения температуры резания K_O от скорости резания V в условиях обработки конструкционной стали 45 с использованием различных способов подачи СОТС в зону резания представлены на рис. 5.

Наибольшее снижение температуры резания может быть достигнуто при использовании струйно-напорного способа подачи СОТС в зону резания, причем эффективность охлаждения снижается с увеличением скорости резания. Использование каналов внутреннего охлаждения обеспечивает наименьшее снижение температуры, что объясняется отсутствием влияния на процесс резания смазочного эффекта СОТС. При этом коэффициент снижения температуры не зависит от скорости резания.

Таким образом, выполнен сравнительный анализ возможностей снижения температуры резания при различных способах охлаждения с использованием СОТС.

Список литературы: 1. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и.др.; под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544с. **2.** Івченко, Т.Г. Теоретичні основи керування температурою різання з використанням охолоджуючих середовищ / Т.Г. Івченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 2006. - Вип. 18. - С.39-45. **3.** Ивченко, Т.Г. Расчет тепловых потоков и температур резания при точении с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей / Т.Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 2010. - Вип.26. - С.90 -96. **4.** Ивченко, Т.Г. Анализ возможностей снижения температуры в зоне резания при использовании инструмента с внутренним охлаждением / Т.Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 2013. - Вип.31. - С.32-37. **5.** Ивченко, Т.Г. Оценка возможностей повышения эффективности обработки при использовании СОТС / Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2018. - Вып. 1 (60). – С.37-43.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК С МОНОРЕЛЬСОМ ШАХТНОЙ ПОДВЕСНОЙ ДОРОГИ

Игнаткина Е.Л., Гутаревич В.О., Бридун М.В. *(ДонНТУ, г. Донецк)*
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: gztl@fimm.donntu.org

***Abstract**: Values of the adhesion coefficient of contacting surfaces of the monorail and brake pads, which involved in the deceleration of rolling stock, were determined. Moreover, were taken into account the operating conditions of suspended roads in underground conditions, due to dust and watering. For research, an experimental test stand has been developed, which allows establishing the influence conditions of contacting surfaces involved in the braking process on the stopping power of overhead monorails. The highest coefficient of adhesion of brake pads with a monorail equal to 0.56, was obtained for clean and dry contact surfaces. When the contact surfaces are covered with wet dust, the adhesion coefficient takes a minimum value of 0.10*
***Key words:** friction coefficient, experimental stand, monorail, brake shoe.*

Одним из основных элементов подвесной монорельсовой дороги (ПМД), как и любого другого управляемого объекта, является тормозная система. В общем случае тормозная способность ПМД определяется усилием прижатия тормозных колодок к монорельсу и значением коэффициента трения, реализуемого в результате их взаимодействия.

Исследованию процесса торможения посвящено ряд работ. Результаты испытаний различных тормозных систем представлены в работах [1-4]. Полученные данные относятся для транспорта с колодочно-колесными, рельсовыми тормозными устройствами и учитывают особенности торможения тяжелого шарнирно-сочлененного локомотива. При этом авторами обоснован ряд параметров, которые обеспечивают повышение тормозной силы для шахтных локомотивов.

Повышение эффективности тормозных систем горных, строительных и подъемно-транспортных машин с замкнутыми кинематическими контурами исследовано в статьях [5, 6]. Публикации [7, 8] раскрывают новые подходы, призванные для стабилизации коэффициента трения при различных режимах процесса торможения, заключающиеся в выборе фрикционных материалов для высокоскоростного наземного транспорта. Исследования [9, 10] посвящены исследованию математической модели движения вагона по монорельсовой дороге, идентификации ее параметров и фильтрации координат движения.

Проблемы эксплуатации подвесных монорельсовых дорог рассмотрены в работах [11-13]. Авторами определен оптимальный режим торможения, а так же установлено влияние параметров подвижного состава на требуемые тормозные усилия.

Вопросы, связанные с реализацией тормозного усилия для рельсового транспорта, исследованы достаточно глубоко, но существенные отличия подвесного монорельсового транспорта не позволяют в полной мере использовать ранее полученные результаты. Поскольку условия контакта тормозных колодок с подвесным монорельсом имеют свои особенности, то значения коэффициента сцепления подлежат уточнению. При этом важно учесть условия контакта взаимодействующих поверхностей, а именно их увлажненность и запыленность.

Подвесная монорельсовая дорога, эксплуатируемая в подземных условиях, подвержена влияниям соответствующей окружающей среды, связанной с наличием запыленности угольной и породной пыли, повышенной влажности. Кроме этого на поверхности монорельса, по которому перемещается подвижной состав, могут

присутствовать смазочные материалы, используемые при обслуживании ПМД. Следовательно, коэффициент сцепления может менять свои значения от степени загрязнения и увлажненности поверхностей, участвующих в процессе торможения.

Целью данной работы являлось определение коэффициента сцепления тормозных колодок с вертикальной стенкой монорельса с учетом увлажненности и запыленности их контактируемых поверхностей.

Тормозными устройствами, с помощью которых производится торможение подвижного состава, оснащаются тяговые и тормозные тележки подвесных монорельсовых дорог, эксплуатируемых в условиях горных предприятий. Тормозная сила T определяет эффективность торможения за счет приложенной к тормозным колодкам прижимной силы P. Тормозное усилие в данном случае составляет $T = 2\mu P$, где P – усилие прижатия одной колодки к стенке монорельса; μ – коэффициент сцепления колодок с монорельсом.

На рис. 1 представлен стенд, позволяющий определять коэффициент сцепления контактирующих между собой поверхностей тормозных колодок и стенки монорельса.

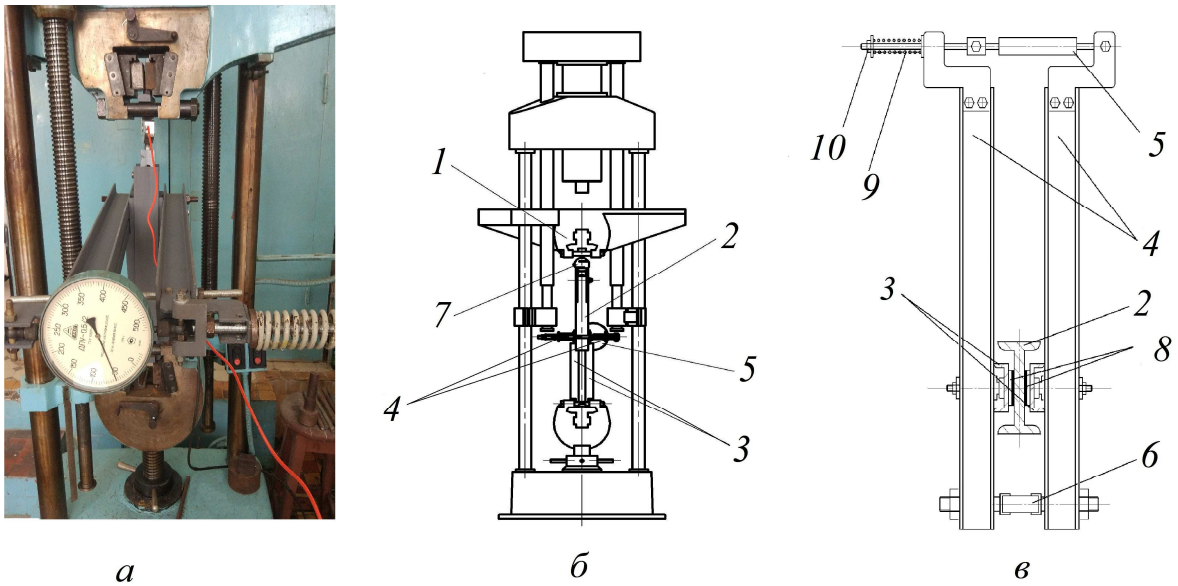


Рис. 1. Стенд для исследования тормозных устройств ПМД: *а* – общий вид; *б* – принципиальная схема стенда; *в* – принципиальная схема модуля тормозного механизма: *1* – испытательная машина ГМС-50; *2* – монорельс; *3* – кронштейны для крепления тормозных колодок; *4* – рычаги; *5* – стрелочный прибор ДПУ-0,5; 6, 7 – тензометрические датчики; 8 – тормозные колодки; 9 – сжимающая пружина; 10 – регулировочная гайка

Как основа, специально спроектированного и изготовленного стенда для исследования процесса торможения ПМД, использовалась универсальная испытательная машина типа ГМС-50. К захватам испытательной машины закреплялись монорельс и кронштейны с тормозными колодками, которые в свою очередь прижимались с обеих сторон к стенке монорельса рычагами. По обе стороны рычагов устанавливались элементы измерительной системы стенда: тензометр и стрелочный прибор ДПУ-0,5, связанный со сжимающей пружиной, которая обеспечивала

требуемое усилие прижатия. В подвесе монорельса у верхнего захвата ГМС-50 закреплялся тензометр для замера реализуемого тормозного усилия.

Регистрация усилий осуществлялась с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП-ЦАП 16/16 Sigma USB и тензометров, связанных с персональным компьютером, оснащенным специальным программным обеспечением ZET Lab и «Тензометр».

Тарировка тензометров позволила определить масштабные коэффициенты регистрируемых напряжений и соответствующих им нагрузок. Так для усилия прижатия 1мВ = 818Н (тензометр на базе тензорезисторов 2ФКПА10-10Б), а для тормозного усилия 1 мВ = 2452 Н (тензометр Keli-PST-A5t). Источником питания, для измерительной системы экспериментального стенда, представленной на рис. 2 в виде схемы, являлись блоки БСП-5 и «Агат».

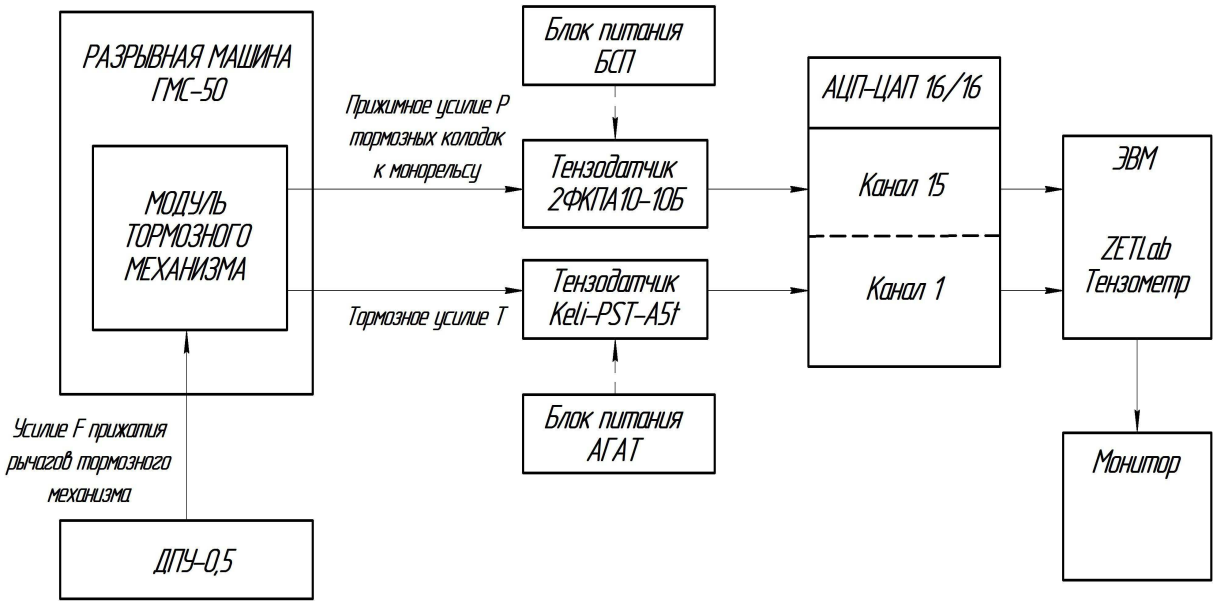


Рис. 2. Схема измерительной системы экспериментального стенда

Опыты проводились согласно алгоритму, представленному на рис. 3, основанному на методике и программе испытаний. Перед запуском испытательной машины тормозным колодкам обеспечивалось прижимное усилие, значение которого составляло на одну тормозную колодку от 5 до 20 кН, что близко к значению в реальных условиях эксплуатации ПМД. После чего включалась машина, верхний захват которой с отрезком монорельса и установленным между ними тензометром, начинал производить перемещение.

Во время перемещения возникали силы сопротивления движению, которые определялись силой трения контактирующих поверхностей тормозных колодок и стенки монорельса. При этом менялась загрязненность и увлажненность контактирующих поверхностей, на которые наносилась вода, породная и угольная пыль.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить значения коэффициента сцепления контактирующих поверхностей тормозных колодок и стенки монорельса с различной степенью их загрязнения. Основные результаты сведены в табл. 1.

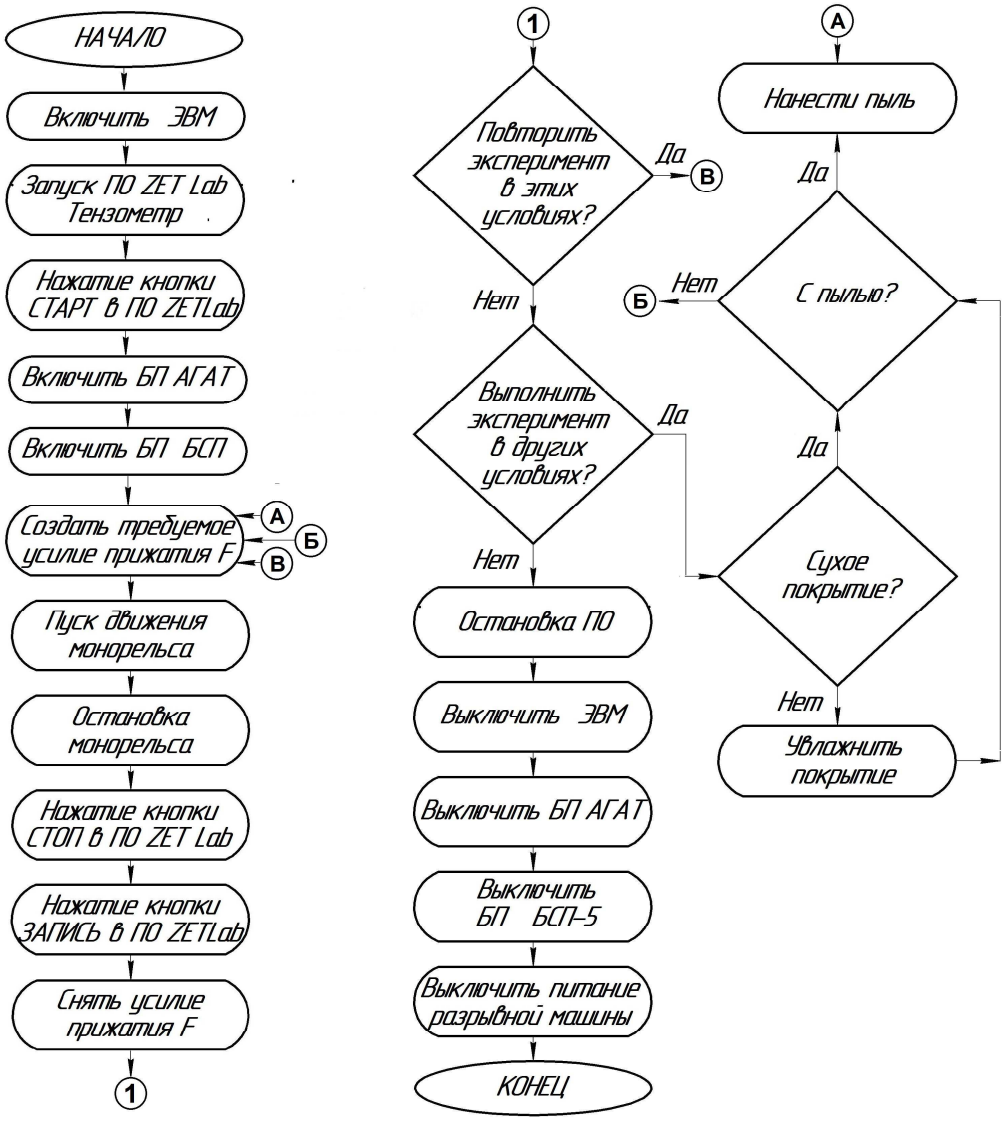


Рис. 3. Алгоритм проведения экспериментального исследования тормозной способности

Таблица 1. Результаты экспериментального определения коэффициента сцепления тормозных колодок с монорельсом

Состояние поверхности стенки монорельса	Тормозное усилие T, кН	Коэффициент сцепления μ
Сухо, пыль отсутствует	3,02	0,45…0,56
Влажно, пыль отсутствует	3,32	0,37…0,44
Сухо, пыль породная	3,23	0,35…0,45
Влажно, пыль породная	1,63	0,17…0,27
Сухо, пыль угольная (уголь марки «Г»)	1,35	0,11…0,19
Влажно, пыль угольная (уголь марки «Г»)	1,29	0,12…0,22
Сухо, пыль угольная (уголь марки «А»)	1,30	0,12…0,22
Влажно, пыль угольная (уголь марки «А»)	1,27	0,10…0,19

Анализ табл. 1 показывает, что для сухих и чистых поверхностей контакта коэффициент сцепления достигает своего наибольшего значения, равного 0,56. Минимальное значение – 0,10 соответствует случаю, когда контактируемые поверхности покрыты влажной пылью. При этом тормозное усилие может изменяться более чем в 5 раз. В зависимости от вида пыли и влаги, покрывающих поверхность монорельса, тормозное усилие принимает следующие значения: для чистой поверхности 3,02 кН; запыленной сухой – 1,35 кН; запыленной влажной – 1,27 кН.

Выводы. Разработанный стенд позволяет установить влияние условий контактирующих поверхностей, участвующих в процессе торможения, на тормозную способность ПМД в условиях шахты. Наибольшее значение коэффициента сцепления тормозных колодок с монорельсом, равное 0,56 получено для чистых и сухих контактируемых поверхностей. Когда контактируемые поверхности покрыты влажной пылью, коэффициент сцепления принимает минимальное значение, равное 0,10. Эти значения следует рекомендовать для тормозных расчетов и проектирования тормозных устройств подвесных монорельсовых дорог.

Список литературы: 1. Коптовец, А.Н. Исследование тормозной эффективности шахтных поездов / А.Н. Коптовец, А.В. Новицкий, С.Ф. Шибалов // Горная электромеханика и автоматика. – 2004. – Вып. 203. – С. 56-61. **2.** Разработка тормозных систем подвижного состава шахтного рельсового транспорта высокого технического уровня / А.Н. Коптовец [и др.] // Молодой ученый. – 2015. – № 5 (20). – Ч.1 – С.43-46. **3**. Процив, В.В. Моделирование торможения шахтного поезда рельсовыми тормозами: монография. – Д.: Национальный горный университет, 2011. – 180 с. **4.** Таран, И.А. Тормозные устройства шахтных локомотивов: монография. – Д.: Нац. горн. ун-т, 2014. – 203 с. **5**. Энергосберегающие и энергонакопительные тормозные системы горных, строительных и подъемно-транспортных машин с использованием замкнутых кинематических контуров / В.С. Исаков [и др.] // Горное оборудование и электромеханика – 2007. – №10. – С. 29-35**. 6**. Исаков, В.С. Повышение эффективности применения энергосберегающих технологий в процессах торможения подъемно-транспортных, строительных и горных машин / В.С. Исаков, А.В. Ерейский // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – №3. – С. 80-88. 7**.** Providing stable friction properties of disc brakes for railway vehicles / Y. Osenin [et al.] // Transport problems. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 1. – P. 63-71. **8.** Ehlers, H.R. Potential and limits of opportunities of the block brake./ H.R. Ehlers [et al.] // Glasers Annalen. – 2002. – No 6/7. – P. 290-300. **9.** Гречишкина, Н.А. Идентификация параметров модели и фильтрация координат движения вагона монорельсовой дороги / Н.А. Гречишкина, Ф.Н. Григорьев, Н.А. Кузнецов // Информационные процессы.– 2015. – №3. – Т.15. – С. 343-350. **10.** Гречишкина, Н.А. Адаптивное управление движением вагона монорельсовой дороги / Н.А. Гречишкина, Ф. Н. Григорьев, Н. А. Кузнецов// Информационные 11. Гутаревич, В.О. Обоснование оптимального режима пуска и торможения шахтной подвесной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич, Е.Л. Игнаткина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 9. – С. 29–36. **12.** Gutarevych, V. Dynamic model of movement of mine suspended monorail / V. Gutarevych // Transport Problems. – 2014. – Iss. 1. Vol. 9. – P.13-18. **13.** Gutarevych, V. Research of Regularities of Suspended Mine Monorail Motion / V. Gutarevych // Mechanical Testing and Diagnosis. – 2014. – Vol.1 (IV). – P. 2-17.

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ АНАЭРОБНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Игнатов А.В., Мозгин С.А. *(МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия)*
E – mail: avi@bmstu.ru, mozgin.stas@gmail.com.

Abstract: *The research relevance in the field of design automation of adhesive joints assembly technological process is shown. The creating methodology of adhesive anaerobic joints assembly technological process is presented. For methodology creating, a set of initial data for the technological process design of adhesive joints was determined, an anaerobic adhesive database was complied, boundary values of the anaerobic adhesive characteristics as a chemical basis were determined, the stages of the technological process in accordance with which the block diagrams of the formation of its components were developed. Combining block diagrams forms a single algorithm that provides automated creation of adhesive anaerobic joints assembly technological process.*
Key words: *assembly adhesive joints, technological process automated designing, diesel engine building.*

В настоящее время в конструкции дизельных двигателей активно используются клеевые соединения. С помощью клеевых составов осуществляется фиксация шестерен, зубчатых колес и венцов, шкивов, звездочек, кулачков, внутренних колец подшипников на валу, а также пробок, заглушек, форсунок, стаканов, втулок, наружных колец подшипников в отверстиях корпусных деталей. Это связано с такими преимуществами клеевых соединений как отсутствие фреттинг-коррозии в клеевом шве, снижение напряжений вследствие отсутствия теплового воздействия при сборке, обеспечение герметичности соединения, уменьшение вибраций. В результате увеличивается долговечность и прочность соединения, возникает потенциал для повышения технологичности соединения по причине упрощения его конструкции и уменьшения габаритов. Возможно формирование комбинированных соединений, например, клеепрессового, которое объединяет в себе преимущества двух видов соединений. Широкое применение клеевых соединений стало возможным благодаря разработке и внедрению таких химических основ как анаэробная, акриловая, силиконовая, характеристики которых полностью соответствуют условиям эксплуатации современной техники, к которым относится воздействие высоких и низких температур, агрессивных сред, высоких нагрузок и вибраций [0].

Внедрение клеевых соединений требует решения ряда важных задач. В ходе технической подготовки производства необходимо осуществить выбор клеевого состава, отвечающего условиям эксплуатации и параметрам конструкции соединения; с учетом особенностей выбранного клеевого состава необходимо определить последовательность, содержание и оборудование для таких операций как подготовка поверхностей, дозирование и нанесение адгезива, сопряжение поверхностей, отверждение клеевого шва. Обеспечение качественного выполнения перечисленных этапов осложняется недостаточным опытом в области технологии сборки, что влечет за собой ограниченность типовых технологических решений и создания отдельного технологического бюро для разработки технологического процесса (ТП). Анализ литературы позволил установить, что требуется разработка методики проектирования технологического процесса сборки соединений с использованием современных клеевых составов, адаптированной для применения в машиностроении. На настоящий момент ввиду отсутствия универсальной методики информационной основой для разработки ТП являются инструкции к клею, рекламные буклеты, каталоги

производителей, научные статьи, описывающие решения частных проблем при сборке. Разрозненность и неполнота информации существенно осложняет процесс внедрения клеевых соединений. Для решения указанных проблем предлагается разработка и применение методики автоматизированного проектирования технологического процесса сборки клеевых соединений с учётом условий эксплуатации, особенностей конструкции и условий производства. Создание методики необходимо для разработки системы автоматизированного проектирования ТП.

Методика проектирования ТП сборки клеевых соединений должна учитывать особенности применения всего спектра клеевых составов, которые применяются в дизельном двигателестроении. Для этого были выделены существующие и перспективные клеевые соединения в конструкции двигателя. Клеевые составы в данных соединениях имеют анаэробную, акриловую, силиконовую химические основы. Настоящая статья посвящена анаэробным клеевым соединениям, которые представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1. Анаэробные клеевые соединения в дизельном двигателе

№	Тип соединения	Клеевой состав
1	Фиксация стакана форсунки в головке блока цилиндров	Loctite 648
2	Фиксация пробки в технологическом отверстии передней крышки блока цилиндров	Loctite 506
3	Фиксация пробки в корпусе топливного насоса	Loctite 506
4	Фиксация заглушек в блоке цилиндров	Loctite 566
5	Фиксация кулачков на распределительном валу	Ан-111
6	Фиксация зубчатого колеса на распределительном валу	Ан-111
7	Фиксация вентилятора на приводном валу	Уг-7
8	Фиксация зубчатого венца на маховике	Ан-111
9	Фиксация втулки клапана в головке блока цилиндров	Уг-7
10	Фиксация шестерни на коленчатом валу	Уг-7
11	Фиксация маховика на коленчатом валу	Ан-112
12	Фиксация и герметизация резьбовых соединений	Loctite 2040

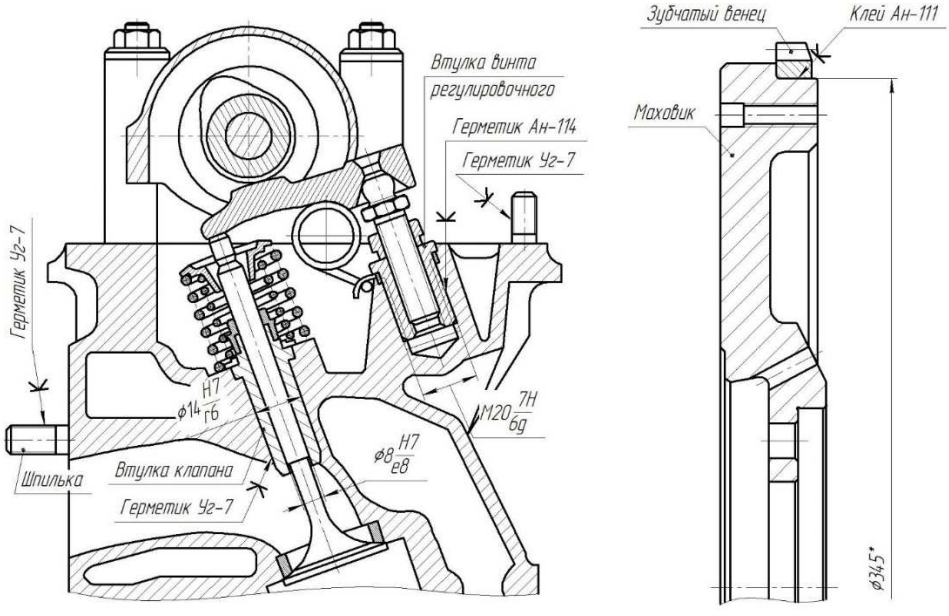


Рис. 1. Эскизы анаэробных клеевых соединений.

Таблица 2. Характеристики анаэробных клеевых составов.

№	Характеристики	Единицы измерения	Граничные значения
1	Прочность на сдвиг	МПа	2,0-32,0
2	Минимальная температура	°C	-60
3	Максимальная температура	°C	175
4	Ресурс стойкости к моторному маслу	ч	100-5000
5	Ресурс стойкости к дизельному топливу	ч	100-5000
6	Ресурс стойкости к воде	ч	168-5000
7	Вязкость (средняя)	Па ∗ с	0,01-300
8	Зазор (радиальный)	мм	0,05-0,5
9	Число компонентов	-	1
10	Жизнеспособность	мин	30
11	Время ручного отверждения	мин	3-80
12	Время полного отверждения	часы	8-48

Для получения актуальных данных о характеристиках анаэробных клеевых составов была составлена база данных. В нее вошли марки таких производителей клеев как НИИ полимеров им. Каргина, Loctite, Permabond. В качестве атрибутов клеевых составов выступали вязкость, диапазон температур эксплуатации, допустимый зазор, число компонентов, жизнеспособность, время ручного и полного отверждения, ресурс стойкости к моторному маслу, топливу, воде и влаге, прочность на сдвиг и отрыв, механизм отверждения т.е. такие характеристики, которые учитываются при выборе клея и влияют на формирование ТП сборки. Всего было рассмотрено 66 анаэробных составов. На основе собранной информации стало возможным сделать обобщение на предмет граничных характеристик современных анаэробных клеевых составов. Граничные значения характеристик требуются для разработки алгоритма по выбору химической основы и марки клеевого состава. Кроме клеевых составов были проанализированы конструкции анаэробных соединений, выделенных в дизельном двигателе, и составлена их классификация, которая представлена на рисунке 2.

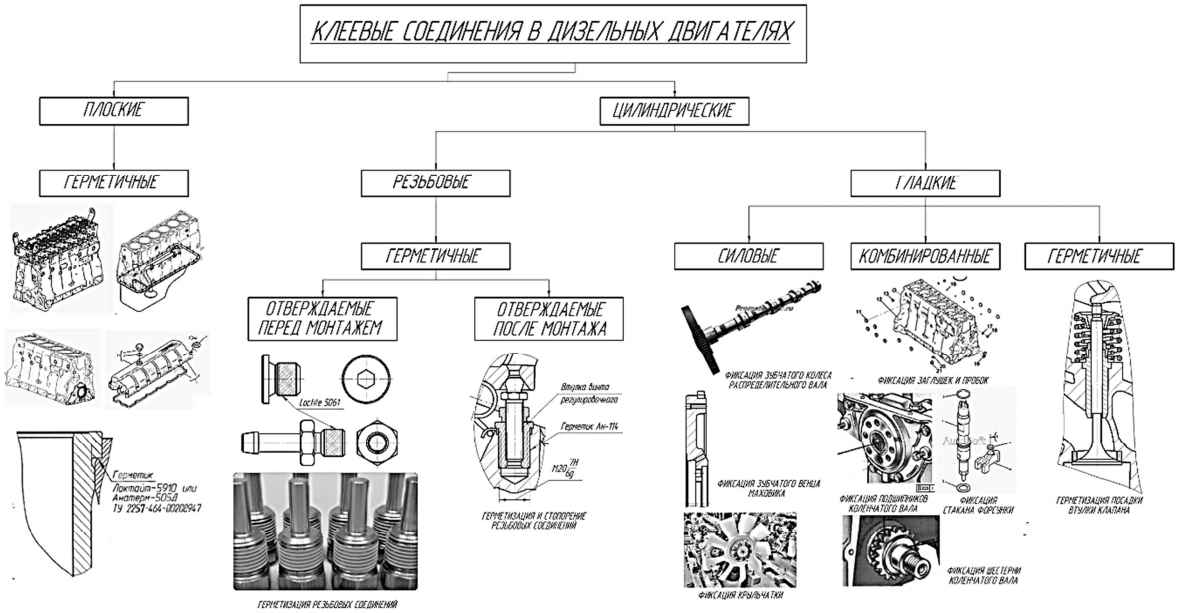


Рис. 2. Классификация конструкции и ТП сборки анаэробных соединений дизельных двигателей

Согласно данной классификации, клеевые соединения в дизельном двигателе подразделяются на плоские и цилиндрические. Цилиндрические могут быть резьбовыми и гладкими. В зависимости от функции клеевого состава гладкое соединение может быть силовым, герметичным и комбинированным. В зависимости от типа герметика резьбовые соединения делятся на отверждаемые перед монтажом и отверждаемые после монтажа. Клеевые плоские соединения в дизельном двигателе могут быть герметичными и силовыми, что также зависит от функции адгезива. Классификация соединений позволила установить некоторые конструктивные особенности, в рамках которых будет использоваться разрабатываемая методика. С учетом конструктивных особенностей были составлены обобщённые технологические процессы, по которым возможна сборка соединений, приведенных в классификации. Как известно, сборка клеевого соединения, в том числе и анаэробного, включает в себя этапы по подготовке поверхностей, приготовлению клея, нанесению клея, монтажу соединения, отверждение клея и контроль соединения [0]. Однако, в зависимости от конструкции и типа клеевого состава указанные этапы могут меняться местами. Обобщенные технологические процессы стали основой для разработки методики автоматизированного проектирования ТП сборки анаэробных клеевых соединений. Таким образом на основе анализа конструкции и клеевых составов соединений в дизельных двигателях, а также рекомендаций по сборке клеевых соединений сформированы исходные данные, которые необходимы для разработки ТП. Исходные данные подразделяются на особенности конструкции, эксплуатационные требования, характеристики клеевого состава и условия производства. К особенностям конструкции относятся геометрическая форма соединения, точность и шероховатость сопрягаемых поверхностей, тип посадки (с зазором, с натягом), величина зазора/натяга в соединении, масса деталей, наличие ориентирующих элементов, наличие фиксирующих элементов, материал деталей, габариты деталей, разъемность соединения, относительное положение деталей, необходимость регулировки, вид посадки (посадка в корпус, посадка на вал). Характеристики клеевого состава приведены в таблице 2. К требованиям эксплуатации относятся значение прочности клея (на сдвиг или на отрыв в зависимости от вида нагрузки), теплостойкость, химическая стойкость (с учётом времени и температуры). К условиям производства относятся тип производства, допустимый расход клеевого состава и метод работы. Как известно, тип производства определяет выбор средств технического оснащения, степень его механизации и автоматизации. В крупносерийном производстве используются дорогостоящие системы автоматизированного дозирования и нанесения клеевого состава с минимальным перерасходом, в мелкосерийном аналогичные операции выполняются вручную в результате чего потери клеевого состава значительно возрастают. Однако, осуществление выбора оборудования исключительно по указанному принципу, было бы не совсем верно т.к. необходимо учитывать влияние конкретных условий производства, что достаточно сложно осуществить при проектировании ТП в автоматизированном режиме. Поэтому авторами предлагается ввести в исходные данные допустимый расход клеевого состава. Логично, что величина допустимого расхода должна быть взаимосвязана с типом производства. Таким образом, пользователь методики в качестве исходного данного на этапе выбора средств дозирования и нанесения может задать тип производства или допустимый расход. Такой подход позволяет перейти от качественного понятия типа производства к количественному и адаптирует ее применение к особенностям конкретного производства.

Для реализации автоматизированного проектирования методика должна быть представлена в формате пригодном для ее дальнейшего оформления в компьютерную программу. Кроме того, возможности данного формата должны соответствовать различным видам задач обработки данных и средств их решения для области технологического проектирования сборки клеевых соединений. С учетом перечисленных обстоятельств было решено оформить методику автоматизированного проектирования в виде блок – схемы по ГОСТ 19.701-90. Для упрощения структуры блок – схема разделена на модули, внутри которых решаются отдельные локальные задачи. При разработке блок-схемы были выделены такие модули как выбор химической основы клеевого состава, выбор марки клеевого состава, подготовка поверхностей под склеивание; приготовление, дозирование, нанесение и распределение клеевого состава; сопряжение поверхностей, регулировка, фиксация, выдержка соединения; контроль клеевого соединения. Для каждого модуля из всего объема были выделены отдельные исходные данные, обозначены задачи и возможные варианты их решения. Задача разработчика заключалось в выявлении взаимосвязей между набором исходных данных конкретного модуля и вариантами его решений с дальнейшим представлением данных взаимосвязей в виде блок-схемы модуля. В настоящий момент ведется разработка подобной блок-схемы для каждой химической основы. Связующим звеном между блок-схемами является модуль по выбору химической основы, в результате чего реализуется единый алгоритм по решению ключевых задач ТП сборки клеевых соединений дизельного двигателестроения. Пример модуля представлен на рисунке 3.

Как известно, результатом работы САПР является ТП, представленный в виде последовательности технологических переходов с указанием необходимых средств технического оснащения. Для этого предлагается сформировать текстовые шаблоны переходов, характерных для операции клеевой сборки, каждый из которых будет содержать постоянную и переменную часть. Переменная часть будет заполняться в зависимости от работы алгоритма. В качестве переменной части могут выступать, марка клеевого состава, средство нанесения и дозирования, средство фиксации соединения т.е. те элементы, которые являются вариантами решений для модулей блок-схемы. Также в зависимости от результатов работы алгоритма некоторые технологические переходы могут быть исключены. В результате формируется технологический процесс сборки клеевого соединения.

Выводы

Сформулированы проблемы, возникающие на этапе технологической подготовки производства в дизельном двигателестроении и препятствующие внедрению клеевых соединений на предприятиях. В качестве решения авторами предложено осуществить автоматизацию проектирования ТП сборки клеевых соединений. Для этого проанализированы конструкции и клеевые составы соединений с анаэробными материалами, составлена база данных анаэробных составов, определены граничные значения их характеристик, разработана классификация соединений дизельных двигателей, сформирован состав исходных данных необходимых для проектирования ТП. На основе этого разработана методика автоматизированного проектирования ТП сборки, которая представлена в виде блок-схемы. Использование данной методики позволит сформировать технологический процесс сборки анаэробного клеевого соединения и обеспечить технолога информационной поддержкой при принятии проектных решений.

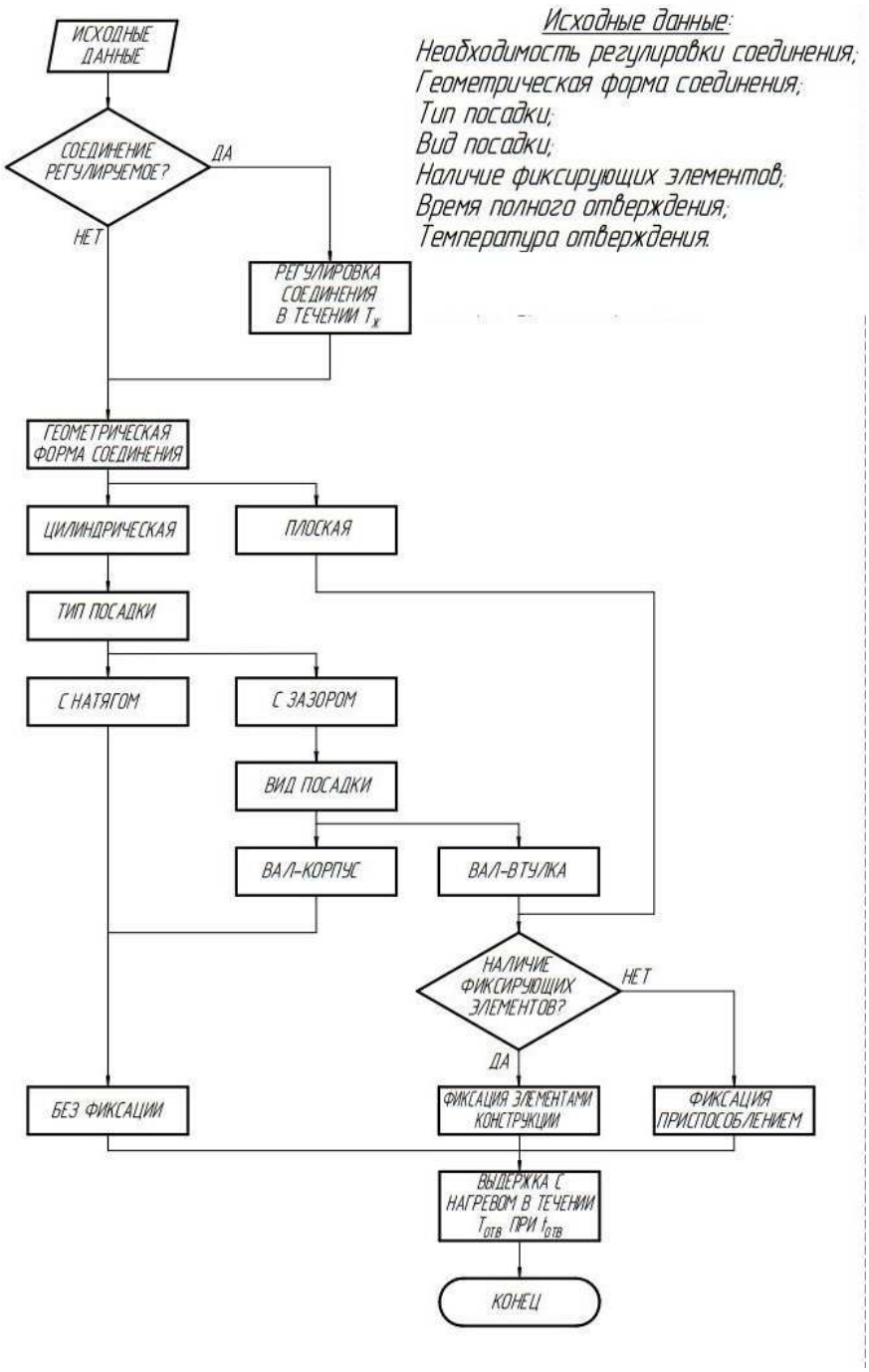


Рис. 3. Регулировка и фиксация соединения

Список литературы: 1. Игнатов А.В., Островский Ю.А., Мозгин С.А. Автоматизация выбора анаэробной композиции при сборке изделий в дизельном двигателестроении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. №10. С.442-450. **2.** Игнатов А.В. Применение клеев при сборке изделий в машиностроении: учеб. пособие. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 43 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ТАРНО ШТУЧНЫХ ГРУЗОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Калинин А.В. *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел/: +38 (062) 345-43-37; E-mail: daatkav@mail.ru

Abstract: *The article presents promising directions of container design in mechanical engineering and their features.*
Key words: *engineering, container, design, construction, technology, resource, methodology, development, direction, production*

Постановка проблемы и анализ последних результатов исследований.

Транспорт является базовой отраслью национальной экономики и основой её транспортной системы, в результате чего обеспечивает более двух третей общего грузооборота. Контейнеризация и пакетирование грузов — важнейшие направления научно-технического прогресса в технологическом процессе транспортировки. Они обеспечивают более качественное удовлетворение потребностей производства и населения в перевозках тарно-штучных грузов, с наименьшими затратами на транспортировку, а также достигается высокий внетранспортный эффект от повышения сохранности грузов, существенно ускоряется их доставка и повышается экологичность транспортной продукции.

В странах СНГ, как и во всем мире, контенерные перевозки занимают все большую часть от общего объема автоперевозок. Это связано, прежде всего, с глобальным процессом контейнерезации грузопотоков. На сегодняшний день контейнерные перевозки являются наиболее эффективным видом транспортировки грузов на большие расстояния в минимальные сроки [1].

Самый большой объем контейнеров перемещается приходится на короткие внутриазиатских дистанции. По данным CTS (Container Trade Statistics Ltd), в течение 2017 года между различными азиатскими портами было перевезено примерно 40,9 млн TEU, что на 4,3% больше, чем в 2016 году. На самых важных «длинных» трейдах CTS насчитала 18,5 млн TEU, перевезенных контейнеров с грузом с Дальнего Востока в Северную Америку (+7,3%) и 15,8 млн TEU на маршрутах с Дальнего Востока в Европу (+3,7%). Вырос спрос и на трейде, связывающем Дальний Восток с африканскими странами, расположенными южнее Сахары. В 2017 году на нем было перевезено 2,8 млн TEU (+5,9%). Самый значительный рост в прошлом году был достигнут на трейде Дальний Восток – Южная и Центральная Америка – 3,6 млн TEU всего, что на 10,7% больше, чем годом ранее [1].

На сегодняшний день спрос на транспортировку с использованием контейнеров постоянно растет, и причиной этого является удобство и универсальность подобной тары. Она не только обеспечивает быстроту проведения погрузо-разгрузочных работ, но и обеспечивает высокую степень защищенности товаров от хищений, природных факторов и механических повреждений во время хранения и транспортировки. Не стоит забывать и о широком разнообразии контейнеров, позволяющем обеспечить перевозку практически любых типов груза.

Цель статьи и изложение основного материала

В соответствии с предложенной и представленной на Рис. 1 общей методологии проектирования контейнера в машиностроении для транспортировки тарно-штучных грузов, в зависимости от приоритета требований к продукции, можно условно выделить следующие основные направления проектирования несущих систем контейнеров:

- конструкционно-ориентированное проектирование;
- технологично-ориентированное проектирование;
- ресурсно-ориентированное проектированное.

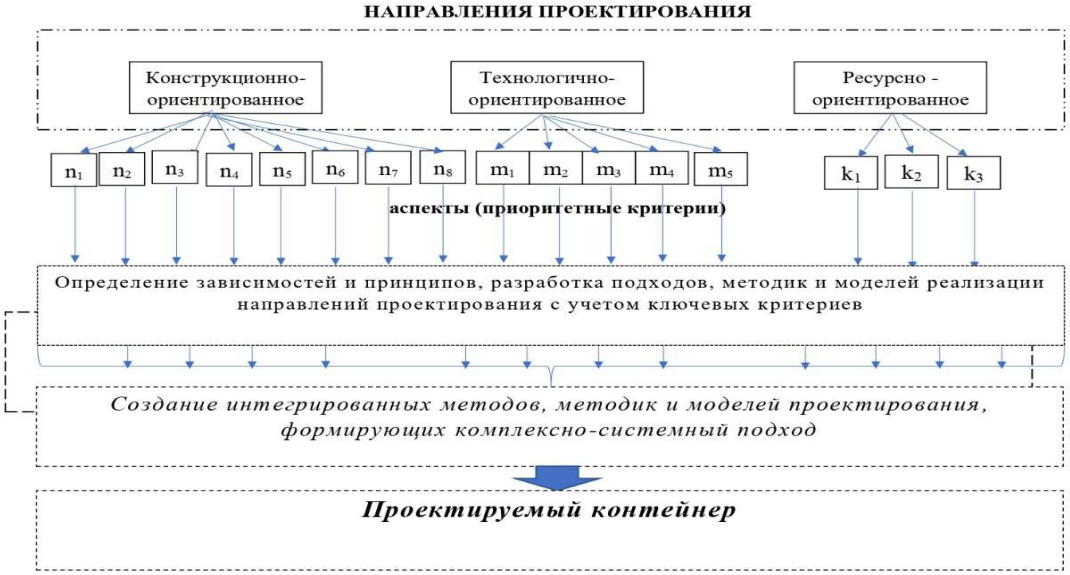


Рис.1. Методология проектирования контейнера в машиностроении

При конструкционно-ориентированном проектировании до проектируемого объекта, приоритетными требованиями являются конкретные конструктивные решения, которые обеспечивают наиболее эффективное выполнение его функций. К приоритетным требованиям такого направления относятся:

- направление на увеличение конструкционной скорости (n_1), что связано с увеличением ускорений и соответственно значений динамических нагрузок на элементы конструкции контейнера;

- направление на уменьшение материалоёмкости (n_2);

- направление на повышение эксплуатационной надёжности конструкции (n_3), который объединяет мероприятия по внедрению как новых технических решений выполнения конструкции в целом и её отдельных составляющих, так и использование материалов с улучшенными свойствами (например сплавов на основе алюминия и вольфрама).

Конструкционно-ориентированное проектирование включает в себя следующие направления:

- увеличение межремонтных пробегов и назначенного срока службы контейнера (n_4), что напрямую связано с качеством используемых материалов и эксплуатационными характеристиками комплектующих составляющих и других (кроме модулей рамы и кузова) модулей конструкции;

- повышение эффективности относительно восприятию нагрузок контейнера в процессе эксплуатации без повреждений (n_5), направленное на увеличение энергоэффективности поглощающих устройств контейнера, и решения которые обеспечивают защиту от повреждений в процессе проведения погрузочно-

разгрузочных работ, действия по усилению наиболее нагруженных при эксплуатации мест контейнера и т.д;

- повышение универсальности несущей системы (n_6), при обеспечении основных функциональных свойств;

- максимальная унификация узлов и составляющих несущих систем (n_7), что существенно влияет на снижение себестоимости изготовления и ремонтов контейнера;

- максимальный учёт особенностей груза, который планируется перевозить (n_8), это и максимальное использование геометрических параметров контейнера с учетом номинальной грузоподъемности, фактической загрузки, эффективного и безопасного размещения и крепления груза, что можно отнести к особенностям специализации контейнера [2-7].

При технологически-ориентированном проектировании контейнера, проектируемого приоритетными требованиями является приспособляемость контейнера к изготовлению, эксплуатации и ремонту с минимальными затратами при заданных значениях показателей качества, и ключевыми критериями этого проектирования является:

- уменьшение количества обработки составляющих (m_1) (токарные-фрезерные работы, другие);

- повышение ритма изготовления и ремонта отдельных составляющих и конструкции в целом (m_2), подсчёт улучшения технологической вооружённости производств – заготовительного (увеличение штамповочного парка, машин плазменной резки и проч.), машиностроительного производства контейнеров (усовершенствование стендов, подъёмно-вращательного и фиксирующего оборудования, увеличение автоматизированных операций и проч.);

- уменьшение энерго- и трудозатрат при изготовлении (m_3);

- уменьшение энерго – и трудозатрат при производстве и ремонте (m_4); - повышение точности и уменьшение сложности робот по сборке и регулировке составляющих контейнера и конструкции в целом (m_5) (монтажно-сварочные работы). При этом реализация направлений технологически ориентированного проектирования контейнера неотъемлемо связана с совершенствованием технологического оснащения машиностроительного производства.

При ресурсо-ориентированном направлении проектирования до проектируемого объекта приоритетными требованиями являются максимально эффективное использование ресурсной базы, и он включает следующие основные аспекты:

- адаптация к производственной базе (k_1), например, учёт территориальных и товарно-хозяйственных возможностей по изготовлению металлопроката или литейного производства;

- максимально безотходное производство (k_2). Учитывая то, что около 90% себестоимости при изготовлении контейнера приходится на стоимость материалов и комплектующих, при этом при переработке материалов (особенно металлопроката) лишь около 85% входит в конструкцию, остальные 15% материалов идут в отходы, это направление для производства контейнера имеет особую актуальность и важность. Одним из примеров достижения такой цели является увеличение состыковочных вариантов выполнения элементов рам, стен боковых и торцевых стен, что приведёт к большему использованию профилей немерной длины (z-образные профили, двутавры, профили верхней и нижней рамы, вертикальной стойки, обшивки и т. д.), которые к сожалению входят в комплект поставки от производителя и составляют примерно от 7% до 15% и в большинстве случаев идут в отходы;

- уменьшение зависимости машиностроителя от поставщика материалов и комплектующих (k_3). Одним из приоритетных направлений развития такого

направления является максимальное использование гнутых и сварных профилей вместо специальных прокатных (например, стоек, поясов, обвязок верхних из гнутых профилей, двутавров в балках позвоночных сварочной конструкции и проч.). Вышеописанное представлено на рис. 1 аспекты (n_1-n_8, m_1-m_5, k_1-k_3) при дальнейшем рассмотрении и проработке требуют определения зависимостей и принципов, разработки подходов, методов, методик и моделей реализации направлений проектирования с учётом ключевых критериев. Безусловно каждое направление и логические их сочетание в некоторой степени уже были проделаны отечественными и зарубежными учёными, но информация о работах, которые бы содержательно описывали их сочетание и взаимосвязь с другими направлениями к сожалению отсутствует, что обосновывает актуальность выполнения работ по реализации такого направления. Создание новых конструкций контейнеров на современном уровне не может осуществляться только на одном из указанных и в дальнейшем комплексно проработанных направлений, без соответствующего учёта требований других. Поэтому дальнейшее развитие проектирования контейнеров в машиностроительном производстве не требует только их отдельного детального анализа с определением основных принципов и аспектов, а и их последующего синтеза в интегрированные проектные системы, результатом чего будет разработка отечественных конкурентоспособных современных контейнеров.

Выводы и рекомендации по дальнейшему использованию. Результаты рассмотренных направлений проектирования в машиностроительном производстве, позволят развивать и усовершенствовать существующие подходы в создании и модернизации различных видов контейнеров согласно технико-экономическим показателям транспортной работы. Дальнейшее развитие перспективных направлений проектирования контейнеров (конструкционное-ориентированное, технологично-ориентированное, ресурсо-ориентированное) в машиностроительном производстве контейнеров требует детальной проработки, которая включает разработку и использование соответствующих научных подходов, методов и методик, определение принципиальных закономерностей, которые будут реализовывать системный подход в создании и исследовании аналитических и математических моделей, с последующим их объединением.

Список литературы: 1. Юркевич, О.В. Морские контейнерные перевозки: практ. пособие / О.В. Юркевич, Д.В. Курочкин. - Минск: Амалфея, 2018. - 360 с. **2.** Ушаков, Дмитрий Васильевич. Организация контейнерных перевозок грузов / Д. В. Ушаков. - Москва : ТрансЛит, 2015. – 206. **3.** Кузова-контейнеры многоцелевого назначения. Общие технические требования: ГОСТ РФ 52047-2003. - Введ. 01.01.04. - М.: Госстандарт России, 2003. - 10 с. **4.** ГОСТ 18477-1979 Контейнеры универсальные. **5.** ГОСТ Р 51.876-2008 Контейнеры общего назначения; ГОСТ 20527-82 Фитинги угловые крупнотоннажных контейнеров. **6.** ГОСТ Р 51876-2008 Контейнеры грузовые серии 1. Технические требования. **7.** Мишута, Д.В. Сравнительный анализ прочностных показателей стального и алюминиевого каркасов кузовов-контейнеров специального назначения / Д.В. Мишута, В.Г. Михайлов // Сборник научных статей ВоеннойАкадемии Республики Беларусь. - 2013. - № 24. - С. 101-106.

РАЗРАБОТКА СКВАЖИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БУРЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ШЕЛЬФА

Каракозов А.А., Парфенюк С.Н., Ткаченко Е.И.
(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР)
Тел.+380623010863, E-mail: karakozov@donntu.org

Abstract: *The results of the development of downhole equipment (hydraulic drilling tools and impact samplers with hydraulic drive) for the implementation of advanced technologies for drilling exploration wells in the development of offshore mineral deposits are presented. Their use allows you to perform drilling operations from both drilling vessels and SCU, as well as from non-specialized vessels (tugs, rescue vessels, etc.) without using drilling and casing pipes. This provides the possibility of marine exploration and geological engineering in the absence of a specialized drilling fleet.*
Keywords: *offshore, development and exploration of mineral deposits, engineering and geological surveys, well drilling, sampling.*

Морской шельф является сосредоточием значительных запасов полезных ископаемых: здесь расположены крупные залежи углеводородов (нефть, газ) и строительных материалов, россыпные месторождения (золото, олово, платина, хромит, минералы титана, железа, циркония и редкоземельных металлов). В настоящее время уже активно осваиваются минеральные ресурсы шельфа Чёрного и Каспийского моря, морей Северного Ледовитого и Тихого океанов. Несмотря на это, геологическая изученность шельфовых областей весьма слаба, а прирост запасов полезных ископаемых требует выполнения не только громадных объёмов геологоразведочных работ, но и инженерно-геологических изысканий для обеспечения эксплуатации самоподъёмных буровых платформ, сооружения морских добычных объектов и трубопроводов. Следует отметить, что для Крыма освоение месторождений шельфа имеет жизненно важное значение: прогнозные запасы углеводородных ресурсов позволяют надеяться на обеспечение ими потребности промышленности и жилищно-коммунального хозяйства полуострова, а залежи строительных материалов могут удовлетворить запросы стремительно развивающейся строительной индустрии.

Многообразие условий проведения работ на морском шельфе и выполняемых задач при отсутствии системного подхода к разработке технологий геологоразведочного бурения обусловило создание множества узкоспециализированных технических средств для проходки скважин и отбора керна, эффективность которых зачастую невелика. В связи с этим проблема создания унифицированного комплекса бурового оборудования, позволяющего качественно выполнять достаточно широкий спектр задач при бурении геологоразведочных и инженерно-геологических скважин, остаётся весьма актуальной.

Учитывая, что большинство геологоразведочных скважин на шельфе приходится на породы песчано-глинистого комплекса (I–IV категории по буримости) при глубинах моря до 60–80 м (реже – до 200 м), то на основании анализа возможных технологических схем бурения были выделены следующие направления разработки необходимого для их реализации скважинного оборудования с гидравлическим приводом, обеспечивающего ударный способ разрушения горных пород [1, 2]:

1. Снаряды и пробоотборники для однорейсового бурения скважин глубиной до 6-8 м (в составе погружных установок без использования бурильных и обсадных труб);
2. Снаряды и пробоотборники для многорейсового бурения скважин глубиной до 20-30 м без применения бурильных и обсадных труб и без использования при

следующих рейсах ранее пробуренного ствола скважины;

3. Снаряды и пробоотборники для многорейсового бурения скважин глубиной до 50 м без применения бурильных и обсадных труб и с использованием при следующих рейсах ранее пробуренного ствола скважины;
4. Снаряды и пробоотборники для многорейсового бурения скважин глубиной до 100 м и более с применением бурильных и обсадных труб по схемам с использованием и без использования (при небольших глубинах скважин) ранее пробуренного ствола при следующих рейсах;
5. Съёмные снаряды и пробоотборники для бурения скважин глубиной до 150–200 м по технологии «Wire line».

Комплекс бурового оборудования, созданный при реализации этих направлений, основан на применении унифицированных устройств с гидравлическим приводом. Особенностью разработанного комплекса является то, что он обеспечивает бурение скважин глубиной до 50 м без использования специализированных буровых судов, т.е. работы могут выполняться с буксирных, спасательных и прочих плавсредств, что значительно расширяет потенциальную базу бурового флота.

Были предложены новые конструкции гидроударных снарядов и забивных пробоотборников, выполненных по схеме, в которую, кроме гидроударника (гидродвигателя и ударного узла), насосного блока (опционально) и колонкового набора, входят два распределительных узла, установленных выше и ниже гидроударника (гидродвигателя с ударным узлом) [3–7]. Распределительные узлы обеспечивают два режима работы снаряда (пробоотборника), необходимых для поинтервальной углубки скважины, сочетающей в одном рейсе следующие этапы (рис. 1):

1. Бескерновое бурение (рис. 1А), при котором жидкость подаётся в полость колонковой (керноприёмной) трубы и далее – на забой скважины, разрушая породу. При этом жидкость может подаваться как в обход гидроударника (гидродвигателя), так и в него (постоянно или периодически). В первом случае ударный механизм отключен, порода на забое разрушается за счёт действия жидкости и дополнительных ударов, периодически наносимых по забою всем снарядом или пробоотборником («клюющий» способ). Во втором случае устройство генерирует удары по колонковому набору, которые используются для интенсификации разрушения забоя (этот способ может использоваться как самостоятельно, так и совместно с «клюющим» способом).
2. Бурение с отбором керна (рис. 1Б), при котором жидкость подаётся в гидроударник (гидродвигатель), а из него – в скважину. При этом выброс жидкости в скважину может производиться непосредственно над башмаком колонкового набора, обеспечивая размыв её стенок, что способствует снижению сил сопротивления при бурении и при извлечении оборудования из скважины.

Создание новых технологий бурения осуществлялось на основании комплекса исследований взаимодействия гидроударного снаряда (забивного пробоотборника) с забоем при колонковом и бескерновом бурении, а также рабочих циклов гидроударника и забивного пробоотборника с гидравлическим приводом. Дополнительно изучалась работа распределительных узлов, обеспечивающих режимы эксплуатации скважинного оборудования, и вопросы очистки ствола скважины на различных этапах рейса.

Разработанное оборудование, в том числе и установки УМБ-130 и УМБ-130М, прошло успешную апробацию в период 2001–20013 гг. в Азовском и Чёрном морях при сотрудничестве с крымскими предприятиями: на объектах работ ОАО «Черноморнефтегаз» при освоении нефтегазовых месторождений и ООО «Суэста» при разведке строительных песков в районе г. Севастополь.

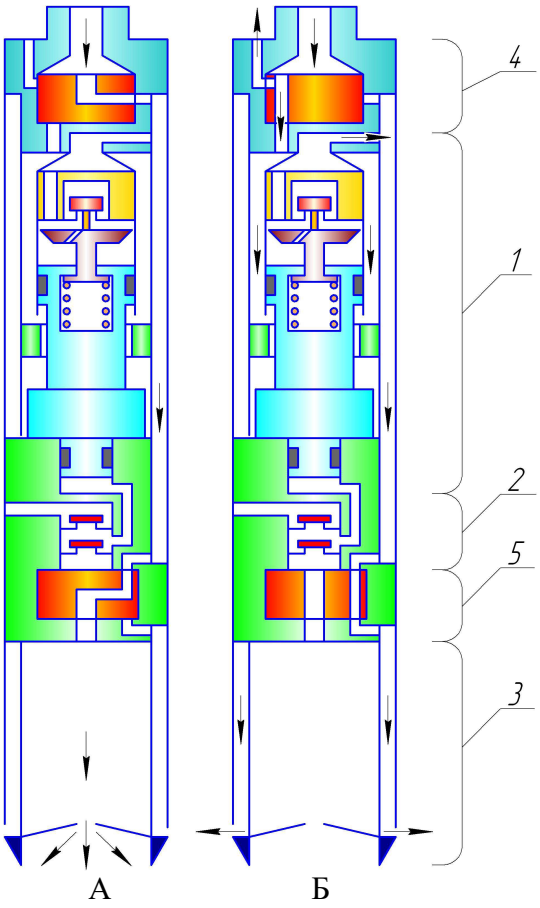


Рис. 1. Режимы работы гидроударного бурового снаряда: 1 – гидроударник; 2 – насосный блок; 3 – колонковый набор; 4, 5 – распределительные узлы

Опыт работ показал, что особое внимание следует уделить разработке более эффективных конструкций распределительных узлов. На практике предпочтение было отдано двухклапанному узлу с одной пружиной [8, 9], как более надёжному с точки зрения переключения в исходное положение за счёт ударного взаимодействия его элементов.

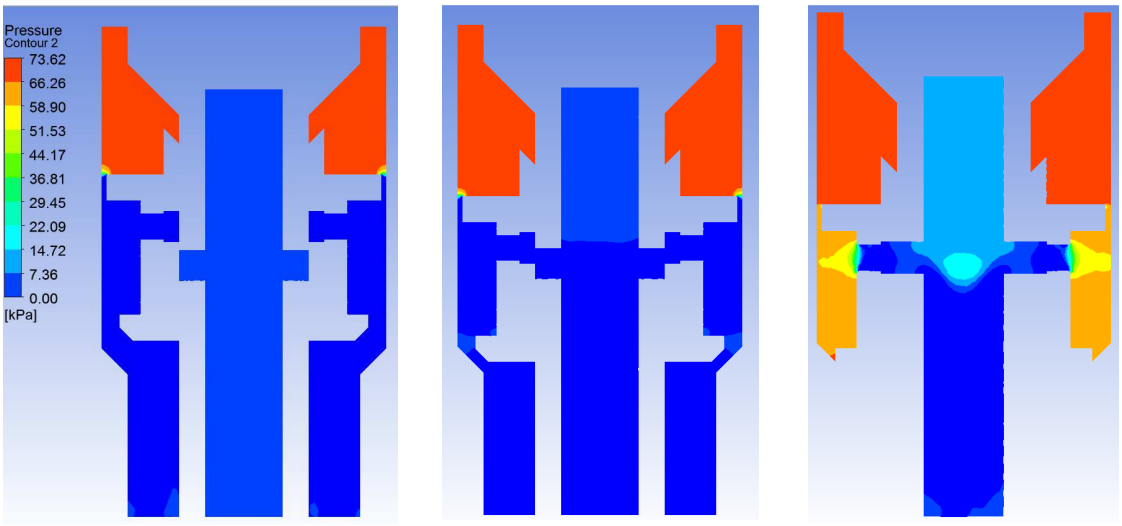
Однако для него характерна сильная зависимость ударного взаимодействия от величины отрицательного перекрытия пропускных окон штока. Это определяет переменное давление перед тарелкой клапана при срабатывании на малых расходах (падение с последующим ростом) и значительный рост давления после переключения, что затрудняет настройку оборудования при использовании гидроударников и насосов с различными характеристиками.

С точки зрения простоты настройки более предпочтительными являются одноклапанные распределительные узлы. Но для ответа на вопрос о возможности замены ими двухклапанных узлов, применяемых в настоящее время, необходимо детальное исследование их работы в составе гидроударного бурового снаряда для определения рациональных конструктивных параметров.

На основании результатов моделирования ранее применявшихся конструкций распределительных узлов было принято решение о совершенствовании конструктивной схемы одноклапанного узла с точки зрения обеспечения постоянства перепада давления на клапане и величины давления над клапаном при срабатывании узла. С этой целью тарелка клапана размещается в его верхней части над пропускными окнами в штоке. Пример моделирования такого узла показан на рис. 2.

Результаты моделирования показали, что для предложенной конструкции одноклапанного распределительного узла характерно постоянное давление над ним, значительно облегчающее его настройку для различных условий эксплуатации. Эта конструкция обеспечивает надёжное срабатывание как при повышении расхода жидкости, так и при его снижении, что позволяет рекомендовать её к испытаниям в производственных условиях для определения возможности замены двухклапанных узлов.

Полученные результаты позволяют модернизировать распределительные узлы установок УМБ-130 и УМБ-130М, реализующих упомянутые выше первые три направления разработки оборудования, охватывающие скважины глубиной до 50 м. Они показывают перспективность одноклапанных распределительных узлов для использования в гидроударных буровых снарядах и забивных пробоотборниках, что даст возможность значительно упростить их конструкцию и эксплуатацию.



а б в

Рис. 2. Пример моделирования усовершенствованного одноклапанного распределительного узла: а – исходное положение; б – момент открытия пропускных окон в штоке; в – положение при закрытом клапане

Список литератур: 1. Каракозов, А. А. Разработка технических средств бурения разведочных скважин на шельфе/ А. А. Каракозов // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. – Екатеринбург: УГГА, 2000. – Вып. 23. – С. 9–17. 2. Каракозов, А. А. Систематизация технологических схем бурения геологоразведочных скважин на шельфе/ А. А. Каракозов // Научные труды ДонНТУ, Серия «Горно-геологическая». Вып. 2(23). – Донецк, ДонНТУ, 2015. – С. 43–48. 3. Калиниченко О. И. Гидроударные буровые снаряды и установки для бурения скважин на шельфе / О. И. Калиниченко, П. В. Зыбинский, А. А. Каракозов. – Донецк: «Вебер», 2007. – 270 с. 4. Гидроударный буровой снаряд: Патент № 2278238 РФ, E21B25/18 / О.И. Калиниченко, А. А. Каракозов, П. В. Зыбинский. – Опубл. 20.06.2006, бюл. №17. 5. Погружная гидроударная установка: Патент № 78588 UA E21B25/00 / А. А. Каракозов, О. И. Калиниченко, П. В. Зыбинский. – Опубл. 10.04.2007, бюл. №4. 6.Колонковый снаряд: Патент №105101 UA E21B 21/00 25/00 / А. А. Каракозов, А. Н. Рязанов, П. В. Зыбинский, С. Н. Парфенюк. – Опубл. 10.04.2014, Бюл. №7. 7. Пробоотборник: Патент №110065 UA E21B 25/18 49/02 / А. А. Каракозов, А. Н. Рязанов, П. В. Зыбинский, С. Н. Парфенюк. – Опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 8. Калиниченко, О.И. Установки для бесколонного бурения скважин на морских акваториях / О.И. Калиниченко, А.В. Хохуля, П.В. Зыбинский, А.А. Каракозов. – Донецк: Донбасс, 2013. – 163 с. 9. Гидроударный буровой снаряд : Патент на полезную модель №77466 UA E21B 25/00, E21B 4/00 / О.И. Калиниченко, А.В. Хохуля, А.А. Каракозов. – Опубл. 11.02.2013, бюл. №3.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА ГАЗОВЫХ ПРОМЫСЛАХ

Кириченко В.В., Костенко А.В. *(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)*
Тел. +7(984)1637436; E-mail: andr13kost@list.ru

Abstract: *The features of gas production in Eastern Siberia and the Far East are given. A technological complication in the gas production and gas transport is considered – the formation of gas hydrates. Practical methods for combating hydrate formation are given.*
Key words: *gas production, hydrate formation, hydrate plug elimination, methanol.*

Основным документом, определяющим стратегию развития газоснабжения и газификации Восточной Сибири и Дальнего Востока, является государственная «Программа создания в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке единой системы добычи, транспортировки газа и газоснабжения с учетом возможного экспорта газа на рынки Китая и других стран АТР».

В настоящее время новые центры газодобычи сформированы в Сахалинской области (шельф о. Сахалин) и Камчатском крае. Идет создание центров газодобычи в Республике Саха (Якутия) и Иркутской области, планируется создать такой центр в Красноярском крае. При этом природный газ будет играть заметную роль в социально-экономическом развитии этих регионов не только за счет газификации населенных пунктов, но и за счет создания современных газоперерабатывающих и газохимических производств.

Начальные суммарные запасы газа на четырех открытых газоконденсатных месторождениях на суше Камчатки: Кшукском, Нижне-Квакчикском, Средне-Кунжинском и Северо-Колпаковском – порядка 16 млрд. м^3.

«Газпром» ведет освоение Кшукского и Нижне-Квакчикского месторождений на западном побережье Камчатского полуострова. Для обеспечения поставок газа потребителям региона в2010 году введен в эксплуатацию магистральный газопровод «Соболево – Петропавловск-Камчатский», по которому природный газ впервые пришел в столицу Камчатского края. Протяженность газопровода составляет около 390 км, производительность – до 750 млн. м^3 газа в год. Газопровод стал основой для дальнейшего развития региональной системы газоснабжения и газификации населенных пунктов.[1]

Одним из серьезных технологических осложнений, возникающих в газопроводах при добыче и транспортировке природного газа, является образование газовых гидратов [2]. Газопромысловые системы, в которых возможно техногенное гидратообразование показаны на рис. 1.

Рис.1. Газопромысловые системы, в которых возможно гидратообразование

Гидраты – это твердые кристаллические соединения, образованные водой и микромолекулами углеводородов. Многие из компонентов, обычно входящих в состав

природного газа, образуют гидраты в соединении с водой. Образование гидратов является одной из проблем, связанных с процессами добычи, переработки и транспортировки природного газа и его производных жидкостей.

Техногенные газовые гидраты в системах добычи, сбора, промысловой подготовки и транспортировки газа являются достаточно типичным технологическим осложнением, особенно для условий северных газовых и газоконденсатных месторождений.

В связи с этим при эксплуатации месторождений необходимо предусматривать мероприятия по борьбе с гидратами.

Один из способов ликвидации гидратной пробки является снижение давления в трубопроводе до атмосферного. Применение этого способа ограничено т.к. его нельзя использовать при температурах ниже 0°С. Вода, образовавшаяся в результате разложения гидратов, может замерзать и образовывать ледяные пробки. Разложение гидратов подогревом системы (паром) применяют для обеспечения работы дроссельных устройств, теплообменников и коротких участков газопроводов. [3]

Для борьбы с гидратообразованием на газовых промыслах вводят в скважины и трубопроводы различные ингибиторы (метиловый спирт, гликоли, 30%-ный раствор хлорида кальция, а также поддерживают температуру потока газа выше температуры гидратообразования с помощью подогревателей, теплоизоляцией трубопроводов и подбором режима эксплуатации, обеспечивающего максимальную температуру газового потока.

На практике, для борьбы с гидратообразованием в стволах скважин и шлейфах газопроводов используют метанол. Метанол применяют для обеспечения безгидратной работы установок низкотемпературной сепарации.

Основные места возникновения гидратообразования при добыче газа – это ствол скважины и выкидных линий при пуске в работу остановленной скважины, шлейфа коллекторы от кустов газовых скважин до установки подготовки газа (УКПГ), непосредственно на УКПГ в теплообменниках и сужающихся трубопроводах, для предупреждения гидратообразования в вышеперечисленные места подаётся метанол.

Ликвидация гидратных пробок в трубопроводах природных и сжиженных газов методом подогрева выше равновесной температуры образования гидратов приводит к их разложению. На практике трубопровод подогревают горячей водой или паром.

Список литературы: **1.**Месторождение Камчатка. Новый центр газодобычи [Электронный ресурс]. – URL: http://www.gazprom.ru/projects/kamchatka/ (дата обращения: 06.06.2019).**2.** Капыш В.В. Предупреждение гидратобразования в газопроводах-отводах и на газораспределительных станциях / В.В. Капыш, Н.В. Кулемин, В.А. Истомин // Вести газовой науки. – 2013. - №4(13). – С. 125-131.**3.**Аспекты технологической надежности и экономической эффективности эксплуатации подземных хранилищ природного газа Западной Сибири / А.Н. Шиповалов, Ю.Д. Земенков, С.Ю. Торопов, С.Ю. Подорожников, М.Ю. Земенкова., И.В. Тырылгин, В.П. Павлов. –Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2012. – 344 с.**4.** Березовский Д.А. Особенности борьбы с гидратами природных газов при разработке месторождений (на примере Северо-ставропольского месторождения) / Д.А. Березовский, О.В. Савенок // Знание. – 2016. - №11-2(4). – С. 29-44.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Климук А.С., Острейко И. А., Янович Д. Л. *(НАН Беларуси ОИМ, Минск, Беларусь)*
Тел./Факс: +375 (17) 284 02 41; E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

Abstract: *The noise of a piston internal combustion engine is a consequence of the flow of a set of working processes in cylinders, mechanisms and systems during the implementation of a sequence of work cycles for converting chemical energy of fuel into thermal energy and then into mechanical work. Part of the energy of the workflow is converted into sound energy - noise. Experimental studies for comparative evaluation of the effectiveness of various designs of silencers are very laborious and time-consuming. In order to reduce these costs at the stage of development of variants of structures can be applied using computer simulation methods. Computer models are easier and more convenient to explore because of their ability to carry out the so-called computational experiments.*

Key words: *Computer simulation, silencer, acoustics, sound pressure, computer model, porosity.*

Натурные испытания глушителей шума выпуска отработавших газов дорогостоящий процесс. Следует отметить также и невысокую достоверность полученных результатов, в первую очередь из-за наложения на шум системы выпуска шумов других узлов и механизмов. Компьютерные модели проще и удобнее исследовать в силу их возможности проводить так называемые вычислительные эксперименты. Логичность и формализованность компьютерных моделей позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта, в частности исследовать отклик моделируемой физической системы на изменение параметров и начальных условий. Сегодня существует ряд программных сред позволяющие моделировать физические процессы, протекающие в глушителях шума, оценивать их конструкции с точки зрения эффективности применения.

Ключевым фактором повышения достоверности результатов для расчетной оценки прямоточных глушителей шума выпуска отработавших газов в среде Ansys оказалось применение в расчетах математической модели Джонсона-Алларда-Шампу и характеристик каменной ваты.

Модель Джонсона-Алларда-Шампу – полуфеноменологическая модель, которая может быть использована для описания диссипативного поведения волокнистых материалов или материалов с произвольной формой пор.

Ниже приведено описание основных параметров для задания данной модели в среде Ansys.

OPEN POROSITY – ОТКРЫТАЯ ПОРИСТОСТЬ

Открытая пористость, обычно сокращаемая до «пористости», относится к отношению объема, занятого непрерывной флюидной фазой, к общему объему пористого материала (рисунок 1).

Открытая пористость обычно обозначается греческой буквой φ. Открытая пористость определяется как доля объема, которая занята жидкостью или газом в соединенной пористой сети. Несвязанные пустоты, запертые в твердой фазе, не являются частью открытой пористости; они являются частью закрытой пористости. Истинная объемная плотность заключается в плотности вакуума пористого заполнителя.

RESISTIVITY - УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Сопротивление статическому воздушному потоку (SAR) выражает фрикционную задержку квазистатического потока (здесь акустическая волна в покое в воздухе) через поры, то есть падение давления, необходимое для принудительного прохождения единичного потока через материал.

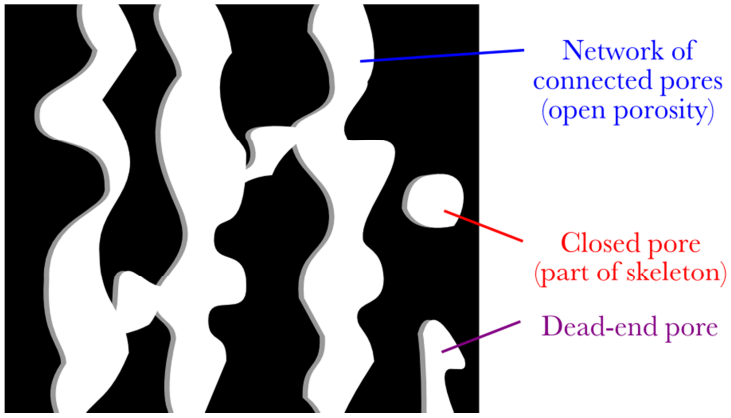


Рис. 1 Иллюстрация открытых и закрытых пор в модели Джонсона-Алларда-Шампу

Статическое сопротивление воздушному потоку выражает замедление трения до квазистатического потока (здесь акустическая волна в состоянии покоя) через поры. Это связано со статическим удельным сопротивлением воздуха σ.

Статическая вязкая проницаемость (СВП) является эффективной поверхностью потока текучей среды. Оба свойства связаны динамической вязкостью μ среды: $k = \mu / \sigma$.

TORTUOSITY – ИЗВИЛИСТОСТЬ

Высокий частотный предел динамической извилистости, термин, уменьшенный до «извилистости», частично характеризует вязкоинерциальные эффекты на высоких частотах (когда вязкий пограничный слой мал по сравнению с характерным размером пор).

Обычно он обозначается символом $\alpha\infty$ и является безразмерной величиной.

Извилистость или тождественно структурный фактор является геометрическим измерением отклонения фактического пути, за которым следует акустическая волна от прямого пути. Для акустических материалов диапазон значений извилистости составляет приблизительно [1,00- 3,00]. Теоретическое более низкое значение для $\alpha\infty$ равно 1.00, так как среднее значение квадратных величин больше или равно квадратному значению их среднего значения. Это меньшее значение соответствует параллельным линиям тока поля скоростей.

Значение $\alpha\infty$, превышающее 3,00, обычно является результатом ошибочной характеристики (например, характеристики многомасштабного материала с использованием модели с одной пористостью).

VISCOUS AND THERMAL CHARACTERISTIC LENGTHS - ВЯЗКАЯ И ТЕПЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ

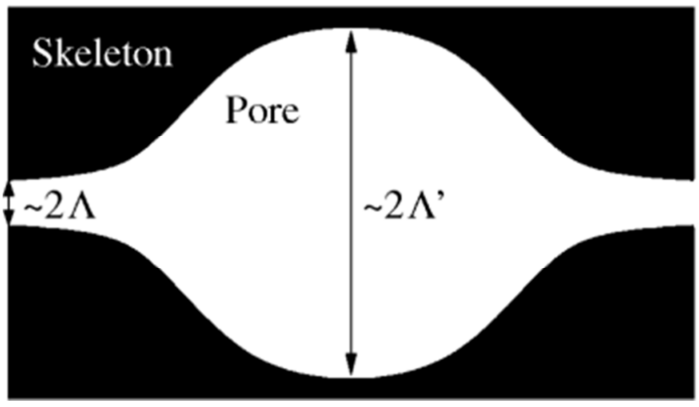


Рис. 2 Иллюстрация вязкой и тепловой характеристик в модели Джонсона-Алларда-Шампу

Вязкая характерная длина, обычно представленная буквой Λ, является параметром, используемым для описания вязких эффектов на средних и высоких акустических частотах. Для обычного пористого материала, состоящего из пор и соединений между этими порами, вязкие эффекты в основном возникают при соединениях (то есть наименьшие области для прохождения звуковой волны). Таким образом, из его определения вязкая характеристическая длина близка к значению радиуса (или гидравлического радиуса) соединений между за исключением малых значений радиуса соединений, поскольку вязкий пограничный слой заметно изменяет скорость потока во взаимосвязи между порами

почти во всем слышимом диапазоне частот. Величина вязкой характерной длины лежит в пределах 11 … 350 микрометров.

Длина тепловой характеристики, обычно представленная буквой Λ', является параметром, используемым для описания тепловых эффектов на средних и высоких акустических частотах. Длина тепловой характеристики может быть оценена по измерениям с помощью трубки стоячей волны или ультразвуковым методом (рисунок 2).

Характерный параметр связан с вязкой и тепловой характеристикой. Если известна одна из характерной длины или одно из их соотношений, то обе характерных длин могут быть определены по характеристическому параметру, из теории Джонсона и др.

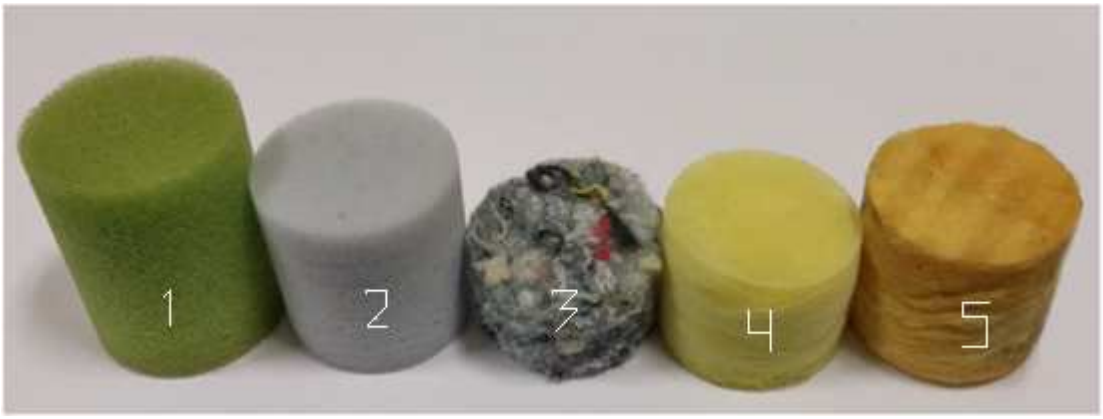


Рис. 3. Образцы шумопоглощающих материалов слева на право:1-полиуретановая губка; 2- меламиновая губка; 3-войлок; 4-стекловата; 5-каменная вата, использующаяся в Сэндвич-панéлях

Характеристики шумопоглощающих материалов, используемых в расчетной модели представлены в таблице 1.

Где SPF - полиуретановая губка; Melamine – меламиновая губка; Felt –войлок; Wool – стекловата; Calibel – каменная вата; σ - сопротивление; σ'- остаточное сопротивление; ϕ - пористость; α∞ - извилистость; Λ - вязкая характерная длина; Λ' - длина тепловой характеристики.

Таблица 1. Характеристики шумопоглащающих материалов

Material L (mm)	Method	ϕ	α_∞	Λ (μm)	Λ' (μm)	σ (Nsm^{-4})	σ' (Nsm^{-4})
	Present	1.00	1.04	275	491	2060	1420
SPF	O&P	-	1.07	329	448	1810	1480
39.8 ± 0.2	Meas	0.98	1.05	289	-	1800	-
	Present	1.00	1.00	137	178	7570	4550
Melamine	O&P	-	0.79	67	166	7480	4070
31.3 ± 0.1	Meas	0.97	1.00	166	-	8600	-
	Present	1.00	1.00	36	110	25500	9570
Felt	O&P	-	0.77	33	118	21500	8770
16.5 ± 0.5	Meas	1.00	1.00	45	-	28000	-
	Present	0.93	1.00	59	140	32400	20200
Wool	O&P	-	1.16	53	190	27000	11900
22.6 ± 0.3	Meas	1.00	1.00	64	-	24000	-
	Present	0.97	1.00	36	120	47800	29400
Calibel	O&P	-	1.38	26	91	38500	16900
28.3 ± 0.3	Meas	0.97	1.01	37	-	57000	-

Для глушителя была построена объёмная модель. Для расчета был использован только сектор глушителя в 10 градусов. Модель сектора представлена на рисунке 4.

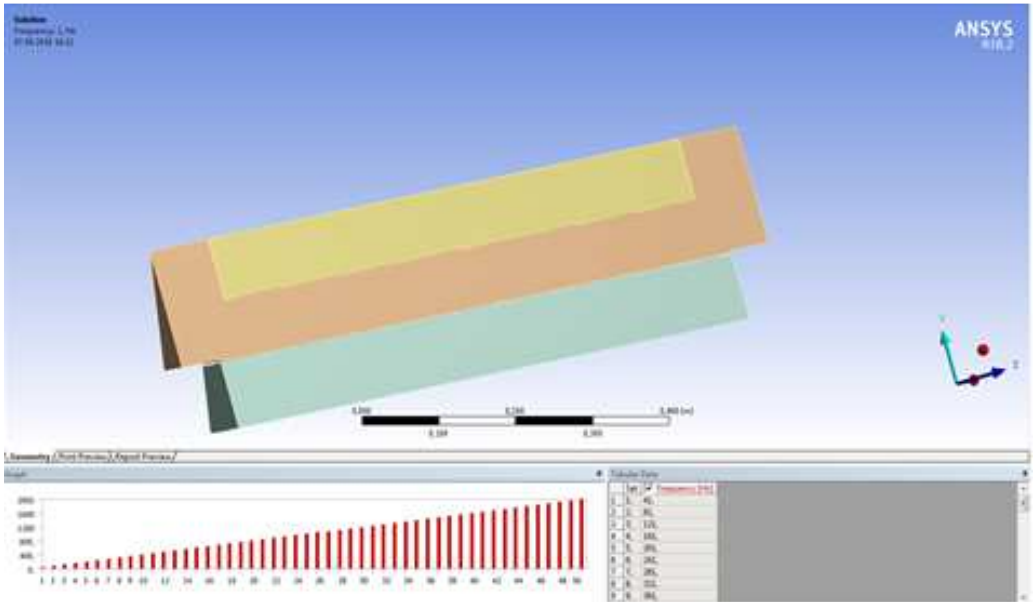


Рис. 4. Расчетная модель глушителя

В процессе моделирования в среде Ansys был рассчитано изменение уровня звукового давления на выходе глушителя (рисунок 5.) для характеристик каменной ваты, представленных в таблице 2.

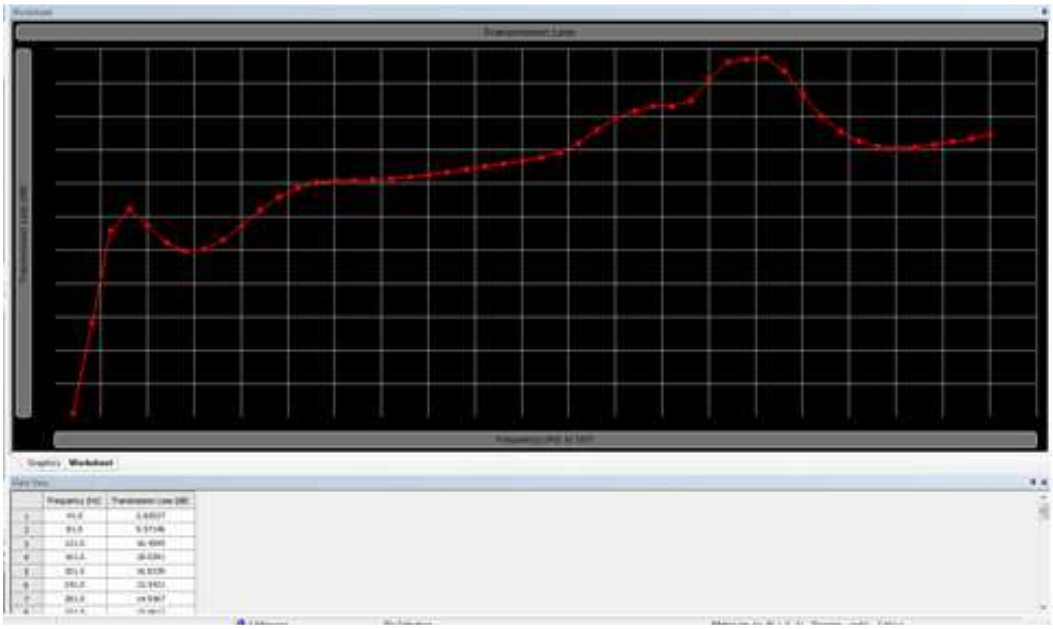


Рис. 5. Изменение уровня звукового давления на выходе глушителя по результатам моделирования

В качестве примера, на рисунке 6 приведено сравнение экспериментальных и расчетных амплитудно-частотных характеристик звукового давления на выходе глушителя полученных с помощью APDL кода и встроенных функций Ansys.

Наиболее близкое совпадение экспериментальных и расчетных значений получено при использовании программной среды Ansys Workbench.

Таблица 2. Характеристики, задающие математическую модель каменной ваты [5]

Definition	
Frequency Dependency	No
Mass Density	1,2041 [kg m^-1 m^-1 m^-1]
Sound Speed	343,24 [m sec^-1]
Dynamic Viscosity	1.783E-05 [Pa sec]
Bulk Viscosity	1.096E-05 [Pa sec]
Thermal Conductivity	0,0257 [W m^-1 C^-1]
Specific Heat Cp	1,005 [J kg^-1 C^-1]
Specific Heat Cv	0,718 [J kg^-1 C^-1]
Equivalent Fluid of Perforated Material	JCA
Fluid Resistivity	32400 [N sec m^-1 m^-1 m^-1 m^-1]
Porosity	0,93
Tortuosity	1
Viscous Characteristic Length	5,9E-06 [m]
Thermal Characteristic Length	1,4E-05 [m]
Low Reduced Frequency Model	No
Reference Pressure	2E-05 [Pa]

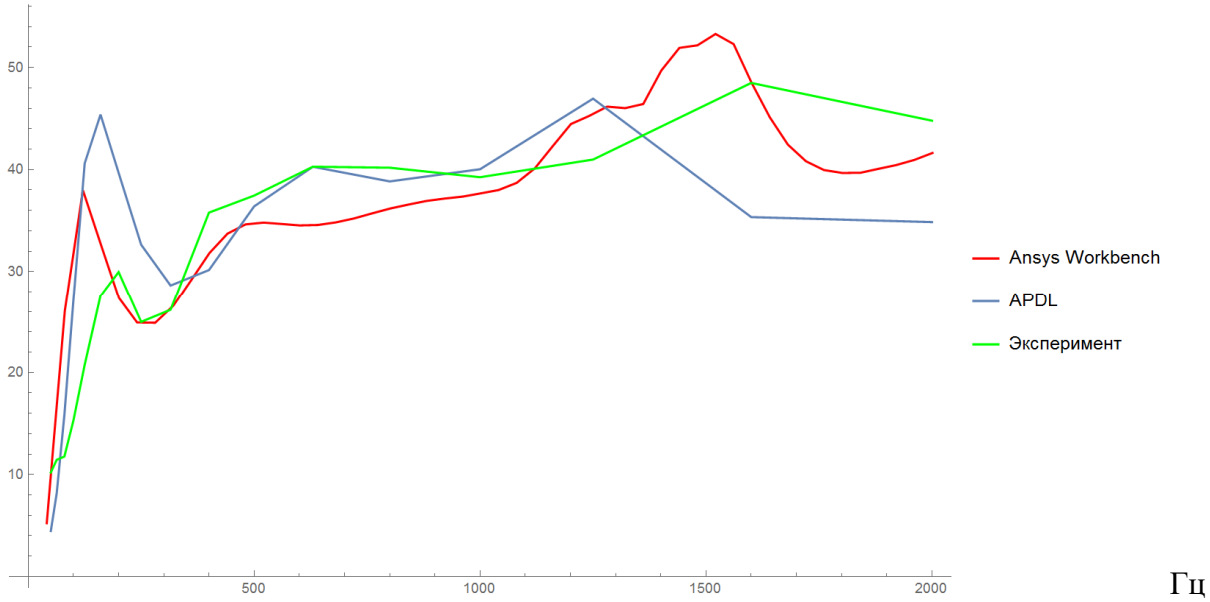


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики звукового давления (эффективности) на выходе глушителя полученные расчетами и экспериментально

Ключевым фактором повышения достоверности результатов в среде Ansys оказалась применение в расчетах математической модели Джонсона-Алларда-Шампу и характеристик каменной ваты. Моделирование показало близкое совпадение экспериментальных и расчетных значений. Данная методика расчета ускорит создание глушителя шума выпуска отработавших газов автомобиля, так как отсутствует необходимость создавать полноразмерные модели глушителей, а так же позволит тратить меньше времени на проведение натурных испытаний.

Список литературы: 1. Акустика среды обитания: сборник трудов Третьей Всероссийской А44 конференции молодых ученых и специалистов (АСО-2018). Москва, 18 мая 2018 г./ под ред. А.И. Комкина. – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2018. **2.** Sound Intensity and Inverse Methods in Acoustics: Paper ICA2016. - Buenos Aires, 2016.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Ковалева А.А., Петрешин Д.И. *(ФГБОУ ВО «БГТУ», г. Брянск, Россия)*
Тел. +7 (953) 2875093; E-mail: KovalevaA.A@yandex.ru

Abstract: *The article discusses the creation of an adaptive control system for a milling machine in order to ensure the quality parameters of the surface layer of parts in which the final stage of machining is finishing or fine milling. The factors affecting the microgeometry of the surface during milling are described, the block diagram of the system is presented, and the principle of adaptive control for a milling machine is described.*
Keywords: *adaptive system, mechanical processing; surface layer quality, automated system.*

Обеспечение качества поверхностного слоя одна из важнейших технико-экономических задач. Технология изготовления должна обеспечивать производство деталей с минимальными затратами труда и материальных средств машиностроительной продукции, надежной и долговечной в эксплуатации, по качеству не уступающей передовым стандартам мировой техники. Однако стремление обеспечить высокую производительность, часто сказывается на качестве получаемой продукции. Нарушение технологической дисциплины, устаревшие справочные данные для расчета режимов резания, влияние систематических и случайных факторов во время обработки часто приводит к получению разброса параметров качества поверхностного слоя. Оснащение фрезерного станка адаптивной системой управления позволит минимизировать влияние различных внешних воздействий, тем самым обеспечивая получение продукции с необходимыми параметрами качества. Особенно необходима такая система для изготовления деталей, у которых последней операцией механической обработки является чистовое или тонкое фрезерование.

Адаптивная система управления — это система, в которой для достижения наилучшего управления объектом целенаправленно изменяются параметры управляющих воздействий или алгоритм управления, причем характеристики объекта или воздействия внешней среды могут изменяться заранее непредвиденным образом. Для достижения высокого качества управления необходимо автоматическое пополнение недостающей информации в процессе работы системы. О степени достижения полноты информации можно судить по некоторому критерию качества. Обычно критерий качества связан с теми характеристиками, по которым происходит адаптация [1].

Источниками информации, необходимой для настройки управляющего устройства, могут быть: контролируемые возмущения V; выходные переменные объекта Y; управляющие воздействия на объект U; настроечные воздействия v. Кроме того, на систему действуют неконтролируемые возмущения F.

На микрогеометрию поверхности при фрезеровании в основном влияют такие факторы как [3,4]:

- режим фрезерования (скорость резания, подача на зуб, глубина резания, род охлаждаемой жидкости);
- вибрации, вследствие недостаточной жесткости станка, приспособления, инструмента и детали;
- геометрия режущей части и износ зуба фрезы (трение задней поверхности зуба об обработанную поверхность);
- колебание механических свойств обрабатываемого материала и материала инструмента.

Для осуществления управления параметрами качества не обходимо установить зависимость между параметрами, характеризующими состояние поверхностного слоя, с условиями их обработки, а также учесть внешние возмущения, влияющие на результат.

Структурная схема системы адаптивного управления имеет вид (рис.1). Адаптивная система управления разрабатывается на базе фрезерного станка модели МС 032 с УЧПУ NC-110. Система состоит из технологической системы (ТС): станок - приспособление - инструмент – заготовка, датчиков (Д), модуля сопряжения (МС), преобразователя уровня (ПУ), и электронно-вычислительной машины (ЭВМ). УЧПУ является управляющей системой и осуществляет управление технологической системой. Датчики снимают информацию о значениях параметров качества обработанной поверхности, а также о текущем состоянии ТС, информация предварительно обрабатывается и передается на ЭВМ при помощи МС. Модуль сопряжения обеспечивает обмен информацией в системе датчик-ЭВМ-УЧПУ. Модуль сопряжения включает в себя усилитель (У), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и микроконтроллер (МК).

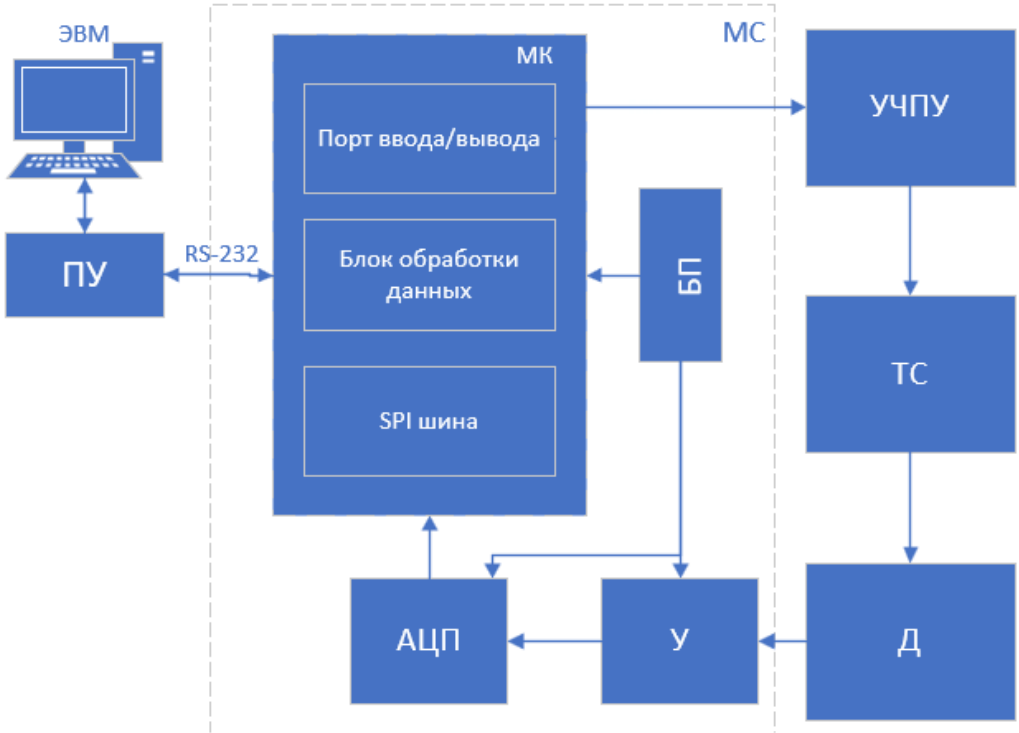


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления

Сигнал от АЦП поступает по стандартному SPI совместимому последовательному интерфейсу в МК, а затем в ЭВМ, где происходит вычисление поправки режимов резания, скорректированные значения передаются от ЭВМ контроллеру, а затем в УЧПУ. Связь ЭВМ с контроллером осуществляется через стандартный интерфейс RS-232, а связь контроллера с системой ЧПУ NC-110 через порты ввода/вывода.

На рисунке 2 представлен принцип адаптивного управления для фрезерного станка с числовым программным управлением.

Сначала в управляющую ЭВМ вводят требуемые показатели качества поверхностного слоя детали. Затем вводятся известные технологические условия обработки: геометрии детали и режущего инструмента, марок обрабатываемого и инструментального материалов, параметров станочного оборудования и

приспособлений и др., которые сохраняются в БД для дальнейшего использования. После ввода всех необходимых данных, для полученных условий обработки, определяется оптимальное значение режимов резания (скорость резания, величина подачи, глубина резания) и пределы их возможных отклонений, зависящие от величин допустимых отклонений параметров качества. Полученные режимы резания передаются в УЧПУ и производится обработка детали.

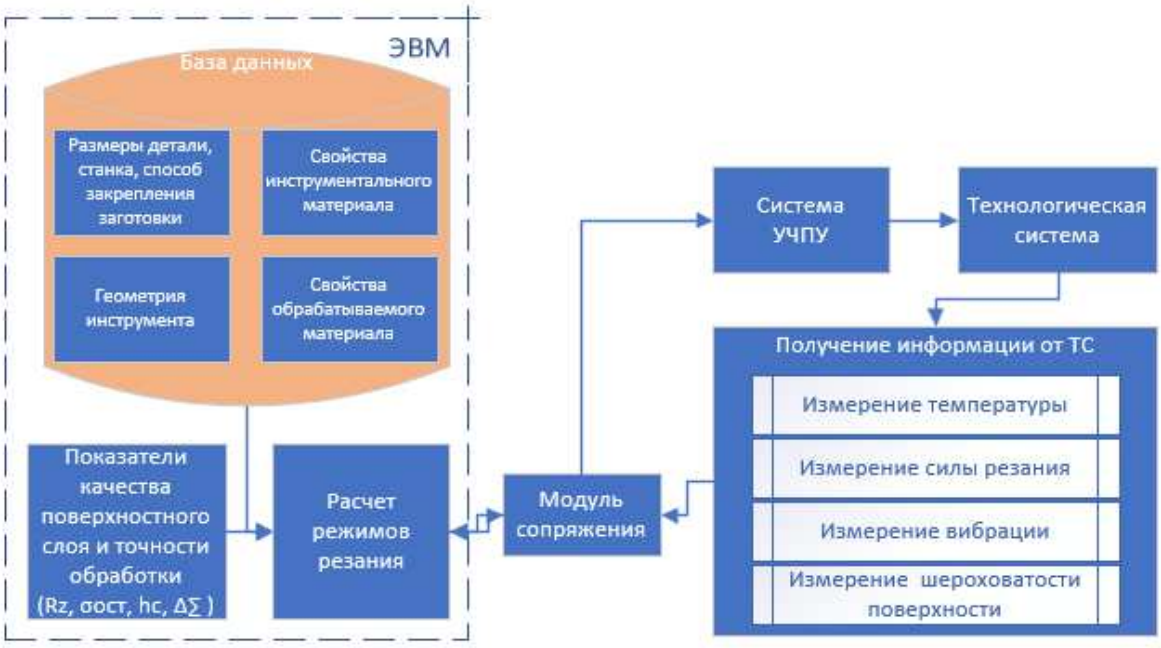


Рис. 2. Адаптивное управление процессом обработки

Во время обработки в технологической системе возникают возмущающие воздействия: изменение температуры в зоне резания, силы резания, вибрации, числовые показатели которых вместе с данными о шероховатости обработанной поверхности поступают в ЭВМ. В ЭВМ определяется выходят ли обеспечиваемые параметры за допустимые значения или нет. Если обеспечиваемые параметры выходят за допустимые значения, то по специальному алгоритму и математической модели происходит расчет необходимой корректировки исходного режима обработки, для обеспечения заданных показателей качества поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Оснащение станка адаптивной системой управления позволит обеспечить требуемые значения параметров качества поверхностного слоя деталей при обработке, несмотря на колебания твердости и припуска заготовки, износа инструмента, изменения жесткости технологической системы, возникновения вибраций и других факторов, влияющих на качество в процессе обработки.

Список литературы: 1. Александровский Н.М. и др. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами. Под общей ред. Н.М Александровского. М., «Энергия», 1973. – с. 272, ил. **2.** Барбашов Ф.А. Фрезерное дело. Учебное пособие для учебных заведений профтехобразование. М., «Высш.школа». 1973. 280 с. Ил. **3.** Инженерия поверхности деталей/ А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. - М.: Машиностроение. – 2008. – 320 с. **4.** Наукоемкие технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ

Коваленко В.И., Луцик М.М. *(ДонНТУ, г. Донецк)*
Тел./Факс: +38 (062) 3010805; E-mail: tm@fimm.donntu.org

***Abstract**: The article discusses the use of thermal cutting. This type of cutting is characterized by the following features: high performance; relatively low energy costs; the possibility of obtaining blanks of complex contour with a large metal thickness. There are three groups of thermal cutting processes: using oxidation, using melting, and using oxidation and melting together. The schemes of five different types of thermal cutting are given.*
***Key word**: cutting, thermal, process groups, types of cutting*

Термическая резка – способ удаления металла с поверхности тела (проката) или разделения металлического предмета на части путем его проплавления по заданной линии или объему. От других видов резки отличается высокой производительностью при относительно малых затратах энергии и возможностях получения заготовок любого сколь угодно сложного контура при большой толщине металла. [1-2]

Выделяют три группы процессов термической резки: окислением, плавлением и плавлением с окислением. [3-4]

При резке **окислением** металл в зоне резки нагревают до температуры его воспламенения в кислороде, затем сжигают его в струе кислорода, используя образующуюся теплоту для подогрева следующих участков металла. Продукты сгорания выдувают из реза струёй кислорода и газов, образующихся при горении металла. К резке окислением относится газопламенная (кислородная) и кислородно-флюсовая резка.

При резке **плавлением** металл в месте резки нагревают мощным концентрированным источником тепла выше температуры его плавления и выдувают расплавленный металл из реза с помощью силы давления дуговой плазмы, реакции паров металла, электродинамических и других сил, возникающих при действии источника тепла, либо специальной струей газа. К способам этой группы относятся дуговая, воздушно-дуговая, сжатой дугой (плазменная), лазерная и термогазоструйная резка.

При резке **плавлением-окислением** применяют одновременно оба процесса, на которых основаны две предыдущие группы способов резки. К способам этой группы относятся кислородно-дуговая, кислородно-плазменная, кислородно-лазерная резка.

Рассмотрим особенности некоторых видов термической резки.

Кислородная резка. Процесс кислородной резки заключается в локальном нагреве металла докрасна и последующем окислении струей технически чистого кислорода. Струя воздуха выделяет расплавленный металл. В качестве горючих газов используют ацетилен, реже газы природные и попутные нефтедобычи (метан), газы нефтепереработки (пропан, пропанобутановые смеси).

Разновидностью кислородной резки является **кислородно-флюсовая** резка. Сущность процесса этого вида резки состоит в том, что в зону реза, подогретую газовым пламенем, вместе со струей режущего кислорода вводят порошок флюса, который сгорает в кислороде, выделяя теплоту, повышающую температуру в зоне реза, - это термическое воздействие флюса. Продукты сгорания флюса образуют с тугоплавкими окислами разрезаемого материала жидкотекучие шлаки, которые удаляются из реза струей режущего кислорода - это химическое действие флюса. И, наконец, частицы порошка флюса сгорают не сразу и, перемещаясь в процессе горения в глубину реза, ударным трением стирают с поверхности кромок тугоплавкие окислы, способствуя их удалению из реза, - это абразивное действие флюса. В качестве флюсов применяют порошки определенного состава. Так, например, для резки хромистых и хромоникелевых сталей могут быть использованы флюсы следующего состава: железный порошок,

кварцевый песок, доломитизированный известняк, двууглекислый натрий, фосфористый кальций.

Схема кислородно-флюсовой резки приведена на рис. 1.

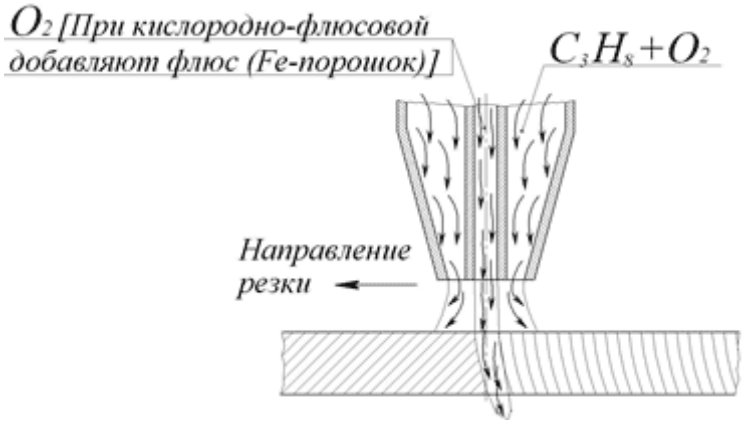


Рис. 1. Схема кислородно-флюсовой резки

Воздушно-дуговая резка. Происходит за счет тепла электрической дуги, горящей между изделием и электродом; металл расплавляется и затем удаляется воздушной струей, которую подают из сопловых отверстий в резаке вдоль образующей электрода.

Схема воздушно-дуговой резки приведена на рис. 2.

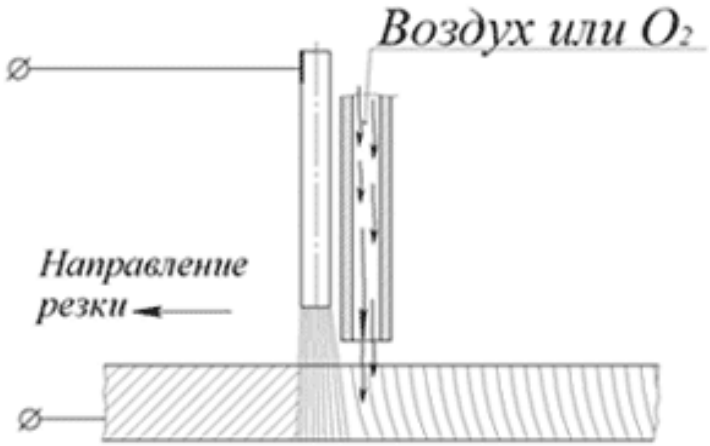


Рис. 2. Схема воздушно-дуговой резки

Плазменная резка – высокопроизводительная технология для резки металла, основанная на использовании сжатой электрической дуги, обдуваемой газом.

Для данного процесса используют электрическую дугу и получаемую в ней струю плазмы рабочего газа, температура которого составляет 4-5 тысяч градусов. Условием плазменной обработки металлов является использование сжатых дуг (плазменные) с интенсивным плазмообразованием, то есть получение высоких температур за несколько секунд.

Сущность процесса плазменной разделительной резки заключается в локальном интенсивном расплавлении металла в объеме полости реза теплотой, генерируемой сжатой дугой, и удалении жидкого металла из зоны реза высокоскоростным плазменным потоком, вытекающим из канала сопла плазмотрона.

Схема воздушно-плазменной резки приведена на рис. 3.

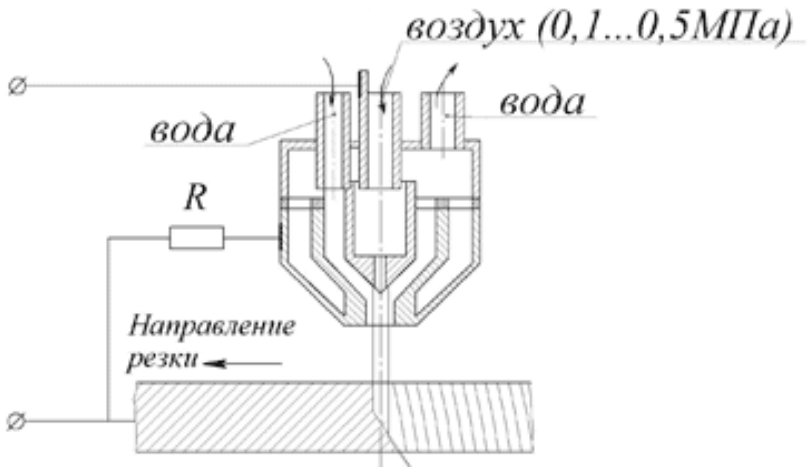


Рис. 3. Схема воздушно-плазменной резки

Лазерная резка. Для резки металлов применяют лазерные установки на основе твердотельных или газовых лазеров, работающих как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Лазерный луч проецируется на материал, фокусируется на расстоянии нескольких сантиметров от поверхности обрабатываемого материала обеспечивая высокую концентрацию энергии.

При воздействии лазерного излучения на металл возможны два механизма резки: плавлением и испарением. На практике резку производят преимущественно плавлением. Чтобы расплавленный металл не заполнял образующийся канал реза за счет действия капиллярных сил и поверхностного натяжения, в зону резки подают струю газа. Это может быть инертный газ, но чаще применяют воздух и даже кислород. Такой процесс называют газолазерной резкой. Струя газа, проникая в полость образующегося реза, выдувает из него жидкий металл. Кроме того, при резке сталей с использованием воздуха или кислорода металл окисляется, выделяется дополнительная теплота, процесс резки ускоряется**.**

Схема лазерной резки приведена на рис. 4.

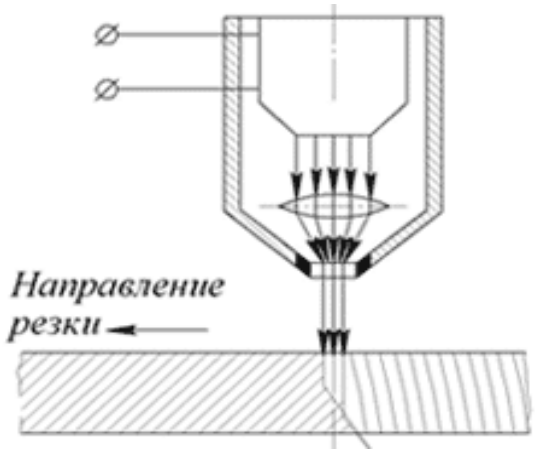


Рис. 4. Схема лазерной резки

Газокислородная резка - способ разделения металла, основанный на использовании для его нагрева до температуры воспламенения теплоты газового пламени и экзотермической реакции окисления металла, а для удаления окислов - кинетической энергии струи режущего кислорода. Подогревающее пламя нагревает поверхностные слои металла, которые затем контактируют со струей чистого кислорода и окисляются.

Выделяющаяся при этом теплота, совместно с теплотой подогревающего пламени, постоянно нагревает за счет теплопроводности металл впереди резака до температуры его воспламенения в кислороде, обеспечивая непрерывность процесса. Под действием кинетической энергии струи кислорода слой окислов, а также частично жидкий металл удаляются из разреза.

При газокислородной резке металлов в качестве горючих газов используют ряд углеводородов и их смесей. По показателям теплоты и температуры горения газокислородного пламени рационально применять ацетилен. Но, исходя из технико-экономических показателей, для газокислородной резки в качестве горючего газа наиболее широко применяют газы - заменители ацетилена.

Схема разделительной газокислородной резки приведена на рис. 5.

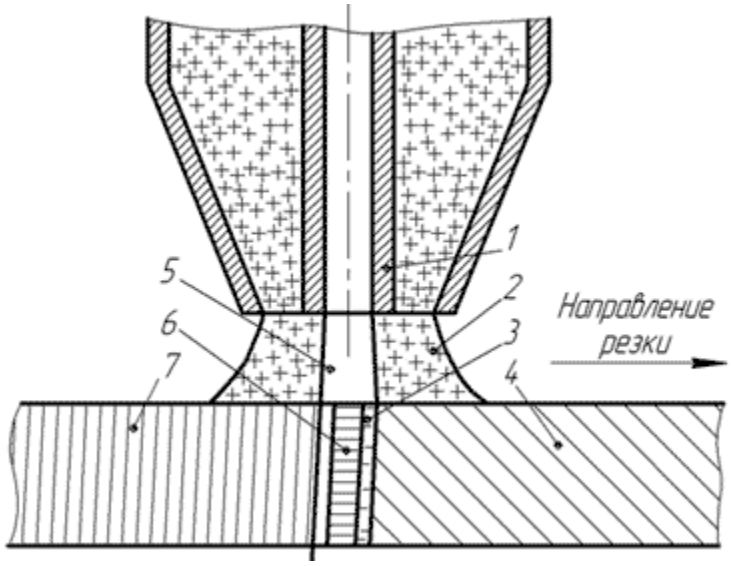


Рис. 5. Схема разделительной газокислородной резки.
1 - Мундштук; 2 - Подогревающее пламя; 3 - Жидкий металл; 4 - Разрезаемый металл; 5 - Режущая струя кислорода; 6 - Слой окислов; 7 - Линии отставания

Выводы. В статье рассмотрены вопросы применения термической резки. Такой вид резки характеризуется следующими особенностями: высокая производительность; относительно малые затраты энергии; возможность получения заготовок сложного контура при большой толщине металла. Выделяют три группы процессов термической резки: с использованием окисления, с использованием плавления и с совместным использованием окисления и плавления. Приведены схемы пяти различных видов термической резки.

Список литературы: 1. Справочник электрогазосварщика и газорезчика: учебное пособие / Г.Г. Чернышов, Г.В. Полевой, А.П. Выборнов [и др]; под ред. Г.Г. Чернышова. − М.: Академия, 2004. − 393 с. **2**. Фетисов Г.П. Материаловедение и технология металлов. М.: Оникс 21 век, 2008. - 620 с. **3**. Основы сварочного производства: учебное пособие для вузов по спец.: «Машиностроительные технологии и оборудование» и «Технологические машины и оборудование» / В. М. Виноградов, А. А. Черепахин, Н. Ф. Шпунькин.; под ред. В.М. Виноградова.. − М.: Академия, 2008. − 270 с. **4**. Сварка и резка материалов: учебное пособие для начального профессионального образования / Ю.В. Казаков, М.Д. Банов, М.Г. Козулин [и др].; под ред. Ю.В. Казакова. − М.: Академия, 2004. − 398 с.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРАХ

Комиссаров А. П.[1,2], Лагунова Ю. А.[1,2], Телиман И. В.[1,3], Шестаков В. С.[1]
([1] *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия*
[2] *Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия,* [3] *Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан)*
Тел.: 8(343)283-06-71; E-mail: yu.lagunova@mail.ru

Abstract: *A distinctive feature of the working equipment of hydraulic excavators is the sequential pairing of elements of the working equipment, which are hydromechanical units, in which the hydraulic motor is part of a lever-hydraulic mechanism. The loading of the working equipment of hydraulic excavators is determined by the reactive loads acting on the hydraulic cylinder rods at the gate of the boom and arm during the digging process. The interdependencies between the force acting on the piston rod of the bucket cylinder and the reactive loads are determined taking into account the transfer functions of the main mechanisms. A reactive load coefficient characterizing the magnitude of the reactive load within the working area of the excavator is proposed.*
Keywords*: working equipment of a hydraulic excavator, reactive loads, transfer functions of the main mechanisms*

Введение. Режимы работы главных рабочих механизмов карьерных экскаваторов характеризуются резкими колебаниями нагрузок и скоростей в течение цикла экскавации. Особенностью нагружения главных механизмов рабочего оборудования гидравлических экскаваторов является значительный рост реактивных нагрузок при экскавации горной массы ввиду последовательного соединения главных механизмов (механизмов поворота стрелы, рукояти и ковша), что определяет существенный рост нагруженности рабочего оборудования и, в целом, экскаватора.

Определение реактивных нагрузок с учетом параметров механизмов поворота стрелы и рукояти позволит выявить резервы повышения надежности и, в целом, эффективности функционирования экскаватора.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – повышение надежности и эффективности функционирования гидравлического экскаватора.

Задачи исследования:

- расчет реактивных нагрузок, действующих на механизмы поворота стрелы рукояти с учетом параметров конструктивных схем механизмов;

- определение коэффициента реактивных нагрузок, т. е. относительной величины (по отношению к силе, действующей на штоке гидроцилиндра, работающего в двигательном режиме) реактивной нагрузки.

Решение задачи исследования. В качестве объекта исследования принято рабочее оборудование гидравлического экскаватора, представляющее собой агрегат, состоящий из двигателей (гидроцилиндров) и последовательно сопряженных рычажно-гидравлических механизмов, в которых гидроцилиндры (собственно цилиндр и поршень со штоком) являются звеньями механизмов (рис. 1).

Предметом исследования является анализ взаимосвязей между силовыми параметрами рабочего оборудования:

- внешними нагрузками – силой сопротивления породы копанию и силами тяжести элементов рабочего оборудования (ковш, рукоять, стрела и др.);

- активными нагрузками – силами, действующими на штоках гидроцилиндров, работающих в двигательном режиме, и движущими силами или вращающими

моментами на ведомых звеньях;

- реактивными нагрузками – силами, действующими на штоках гидроцилиндров поворота стрелы и рукояти в процессе копания.

На начальном этапе определяются передаточные функции рычажно-гидравлических механизмов, т. е. функциональные зависимости между режимными параметрами, реализуемыми на ведомых звеньях (стреле, рукояти и ковше), и рабочими (номинальными) параметрами, реализуемыми на штоках гидроцилиндров.

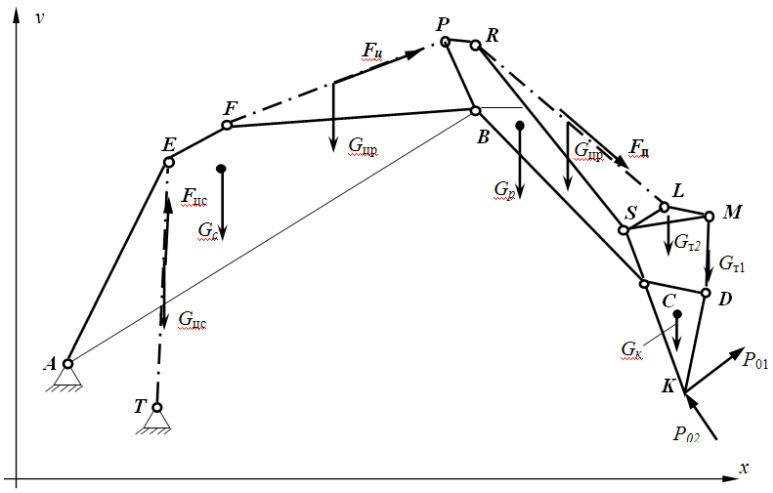


Рис. 1. Схема к определению усилий:

$G_с$, $G_р$, $G_к$, $G_{цс}$, $G_{цр}$, $G_{цк}$, $G_{т1}$, $G_{т2}$ – силы тяжести стрелы, рукояти, ковша, цилиндров стрелу, рукояти, ковша; P_{01}, P_{02} – касательная и нормальная составляющие усилия сопротивления копанию; $F_{цс}$, $F_{цр}$, $F_{цк}$ – усилия на штоках гидроцилиндров

На основе имитационной модели функционирования рабочего оборудования гидравлического экскаватора [1-4] получены аналитические выражения для передаточных функций рычажно-гидравлических механизмов, зависящие от кинематических свойств механизмов (вида кинематических пар, характера относительного движения звеньев механизма и др.).

Передаточные функции в общем виде составят:

кинематические

$$\Phi_V = V_{\text{вых.зв.}} / V_{\text{гц}} = f_1(l_i, \varphi_j); \quad (1)$$

динамические

$$\Phi_F = F_{\text{вых.зв.}} / F_{\text{гц}} = f_2(l_i, \varphi_j), \quad (2)$$

где $V_{\text{вых.зв.}}$ – скорости точек B, C и K (скорость копания); $V_{\text{гц}}$ – скорости перемещения штоков гидроцилиндров; $F_{\text{вых.зв.}}$ – реакции в кинематических парах (шарнирах) B и C и касательная составляющая силы, действующей в точке K; $F_{\text{гц}}$ – номинальные значения усилий, действующих на штоках гидроцилиндров; l_i – геометрические размеры (длины) звеньев; φ_j – углы, определяющие положения звеньев в системе координат.

В таблице приведены значения кинематических и динамических передаточных функций механизмов поворота стрелы, рукояти и ковша экскаватора ЭГО-150 производства ПАО «Уралмашзавод» в зависимости от величины относительного перемещения штока гидроцилиндра.

Из приведенных данных следует, что значения передаточных функций существенно изменяются (в 1,5 – 2 раза) в зависимости от перемещения штока.

Нестабильность активных нагрузок приводит к изменению и реактивных нагрузок.

В общем случае реактивные нагрузки, действующие на штоках гидроцилиндров поворота стрелы и рукояти, зависят от следующих факторов: от расположения ковша в рабочей зоне экскаватора (плеча силы сопротивления породы копанию от осей A и B); от значения силовой передаточной функции механизма поворота ковша, определяемого величиной выдвижения штока гидроцилиндра; от значения силовой передаточной функции механизма поворота стрелы или механизма поворота рукояти; от направления действия внешних нагрузок.

Таблица 1. Передаточные функции главных механизмов

$\Delta L/L$	0	0,25	0,5	0,75	1
Кинематические функции					
ЦС	6,7	5,2	5,2	6,1	9,8
ЦР	4,3	3,0	2,9	3,3	4,7
ЦК	4,8	2,6	2,5	2,75	3,7
Динамические функции					
ЦС	0,15	0,19	0,19	0,16	0,10
ЦР	0,23	0,33	0,34	0,3	0,21
ЦК	0,21	0,38	0,40	0,36	0,27

Максимальные реактивные нагрузки имеют место при неблагоприятном сочетании данных факторов, а именно: при максимальном (или близким к нему) значением плеча силы сопротивления породы копанию от осей *A* или *B*; максимальном (или близким к нему) значением силовой передаточной функции механизма поворота ковша; при минимальном (или близким к нему) значением силовой передаточной функции механизма поворота стрелы или механизма поворота рукояти; при совпадении направлений (или малом отклонении) действия сил тяжести элементов рабочего оборудования и силы сопротивления породы копанию (касательной составляющей).

В конечном счете, реактивная нагрузка определяется величиной момента внешних нагрузок относительно осей *A* или *B* и значением динамической передаточной функции механизмов поворота стрелы и рукояти. Для оценки величины реактивной нагрузки предложен коэффициент реактивной нагрузки:

$$K_{\text{рс}} = \frac{M_{\text{вн.с}}}{F_{\text{цс}} L_{AB}}; \tag{3}$$

$$K_{\text{рр}} = \frac{M_{\text{вн.р}}}{F_{\text{цр}} L_{BC}}, \tag{4}$$

где $M_{\text{вн.с}}$, $M_{\text{вн.р}}$ – момент внешних нагрузок относительно оси *A* и *B* соответственно; L_{AB}, L_{BC} –длина стрелы и рукояти соответственно.

Таким образом, силовые параметры (активные и реактивные нагрузки) рабочего оборудования гидравлических экскаваторов как системы рычажно-гидравлических механизмов определяются посредством динамических передаточных функций механизмов.

Выводы. Предлагаемая методика оценки нагруженности главных механизмов гидравлических экскаваторов на основе передаточных функций механизмов позволяет учесть кинематические свойства рычажно-гидравлических механизмов как при определении активных, так и реактивных нагрузок.

Список литературы: 1. Иванов И. Ю., Комиссаров А. П. Оценка энергоемкости рабочего процесса гидравлического экскаватора с замыканием рабочих нагрузок // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 9. С. 45-47. **2.** Лагунова Ю. А., Комисаров А. П., Шестаков В. С. и др. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. Горные машины. Т. IV-24. 2011. 496 с. **3.** Комиссаров А. П., Шестаков В. С. Имитационная модель функционирования рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 8. С. 20-24. **4.** Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Шестаков В. С. Проектирование карьерных экскаваторов. М.: Инновационное машиностроение. 2017. 232 с.

ПРИМЕНЕНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКОГО МЕТОДА В.В.БОЛОТИНА К ИССЛЕДОВАНИЮ СПЕКТРОВ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Комиссарова Т.Н., Хроматов В.Е., Дуйшеналиев Т.Б., Каплун В.О. *(НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия)*

Abstract:*The oscillations of thin orthotropic plates made of a material with finite electrical conductivity and perfectly conducting plates in a transverse magnetic field are considered. A summary of transcendental equations and integration constants for different types of orthotropic plates fixations in a transverse magnetic field is obtained.*
Keywords:*natural frequency of the plate, oscillations, transcendental equations, magnetic field, orthotropic plate.*

Пусть упругая ортотропная пластина постоянной толщины $2h$ отнесена к декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$ так, что срединная плоскость недеформированной пластины совпадает с координатной плоскостью Ox_1x_2. Пластина изготовлена из материала с конечной электропроводностью и не обладает свойством самопроизвольной поляризации и намагничиваемости. Тело колеблется во внешнем постоянном поперечном магнитном поле с заданным вектором магнитной индукции $\vec{B}(0;0;B_3)$. Сторонние токи и сторонние заряды отсутствуют.

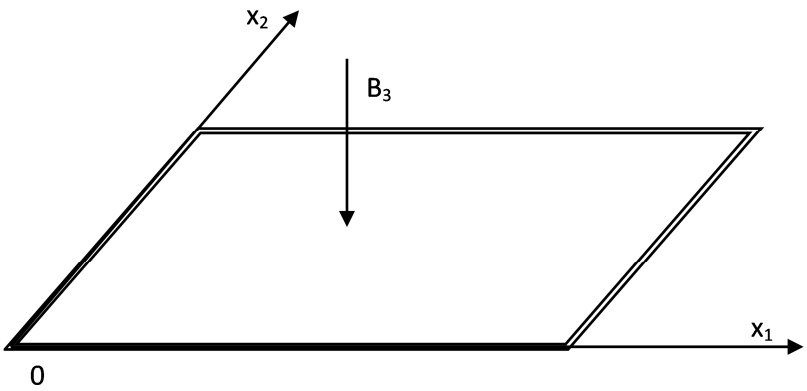


Рис. 1 Пластина в поперечном магнитном поле

Упругие и электромагнитные свойства материала пластины характеризуются модулем упругости E_1, E_2, коэффициентом Пуассона ν_1, ν_2, плотностью ρ, магнитной проницаемостью μ, диэлектрической проницаемостью ε, коэффициент электропроводности пластины σ. Считается, что все выше приведенные величины не зависят от координат, времени и электромагнитного поля.

Примем следующие предположения: гипотеза Кирхгофа о недеформируемых нормалях; магнитные и диэлектрические проницаемости окружающей пластину непроводящей среды считаются равными единице; влияние токов смещения на характеристики магнитоупругих колебаний не учитываются.

В силу принятых предположений имеем следующее уравнение колебаний пластины в поперечном магнитном поле [1]:

$$\nabla_D^4 w + 2\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{2h(\mu-1)}{4\pi\mu} B_3{}^2 \Delta w - \frac{2\sigma h^3}{3c^2} B_3{}^2 \frac{\partial \Delta w}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

,

где$\nabla_D^4 = D_{11}\frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + 2D_{12}\frac{\partial^4}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + D_{22}\frac{\partial^4}{\partial x_2^4}$, B_3 - нормальная составляющая вектора магнитной индукции в вакууме, численно равная напряженности магнитного поля ($B_3 = H$); Δ - оператор Лапласа на срединной поверхности,w – функция нормального прогиба, h – толщина пластины, c – электродинамическая постоянная численно равная скорости света в пустоте ($c = 3 \cdot 10^{10}$ *см / с*),$D_{11} = \frac{E_1 h^3}{12(1-\nu_1\nu_2)}$, $D_{22} = \frac{E_2 h^3}{12(1-\nu_1\nu_2)}$- изгибные жесткости пластины по главным направлениям; $D_{12} = 2D_k + \nu_2 D_{11}$, $D_k = \frac{Gh^3}{12}$- крутильная и приведенная жесткости; $E_1, E_2, G, \nu_1, \nu_2$ – упругие постоянные.

Получим выражение для собственной частоты магнитоупругих колебаний шарнирноопертой прямоугольной ортотропной пластины из уравнения (1). Подставим в уравнение (1) решение в виде:

$$w(x_1, x_2, t) = \varphi(x_1, x_2,)e^{i\omega t} \tag{2}$$

где ω - частота магнитоупругих колебаний.

К уравнению (1) в каждой конкретной задаче необходимо присоединить условия закрепления краев пластины. Рассмотрим шарнирно опертую пластину, граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} x_1 = 0, a_1 \quad & \begin{cases} \varphi = 0 \\ \dfrac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^{\,2}} + \nu \dfrac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^{\,2}} \end{cases} \\ x_2 = 0, a_2 \quad & \begin{cases} \varphi = 0 \\ \dfrac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^{\,2}} + \nu \dfrac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^{\,2}} \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

Решение ищем в виде:

$$\varphi(x_1, x_2) = sink_1(x_1 - \xi_1)sink_2(x_2 - \xi_2) \tag{4}$$

где k_1 и k_2 - волновые числа, которые для шарнирно опертой пластины определяются по формулам $k_1 = m_1\pi / a_1$, $k_2 = m_2\pi / a_2$ (m_1, m_2=1,2,…).

Подставляя решение (4), (2) в уравнение (1), получим выражение для собственных частот колебаний пластины в поперечном магнитном поле:

$$\omega = -\frac{\sigma h^3}{3c^2 2\rho h} B_3^{\,2} i(k_1^{\,2} + k_2^{\,2}) + \sqrt{-\frac{\sigma^2 h^4}{36c^4 \rho^2} B_3^{\,4}(k_1^{\,2} + k_2^{\,2})^2 + \left(\frac{D_{11}k_1^4 + 2D_{12}k_1^2k_2^2 + D_{22}k_2^4}{2\rho h} - \frac{(\mu - 1)}{4\pi\mu\rho} B_3^{\,2}(k_1^{\,2} + k_2^{\,2})\right)} \tag{5}$$

Действительная часть выражения (5) – это собственная частота упругих колебаний:

$$\mathrm{Re}\,\omega = \sqrt{-\frac{\sigma^2 h^4}{36c^4 \rho^2} B_3^{\,4}(k_1^{\,2} + k_2^{\,2})^2 + \left(\frac{D_{11}k_1^4 + 2D_{12}k_1^2k_2^2 + D_{22}k_2^4}{2\rho h} - \frac{(\mu - 1)}{4\pi\mu\rho} B_3^{\,2}(k_1^{\,2} + k_2^{\,2})\right)} \tag{6}$$

Мнимая часть выражения (5) – коэффициент затухания упругих колебаний:

$$\mathrm{Im}\,\omega = -\frac{\sigma h^3}{3c^2 2\rho h} B_3^{\,2}(k_1^{\,2} + k_2^{\,2}) \tag{7}$$

Для идеально проводящей пластины затухающее влияние магнитного поля исчезает ($\sigma \to \infty$), и частота упругих колебаний пластинки определяется по формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{D_{11}k_1^4 + 2D_{12}k_1^2k_2^2 + D_{22}k_2^4}{2\rho h} - \frac{(\mu - 1)}{4\pi\mu\rho} B_3^{\,2}(k_1^{\,2} + k_2^{\,2})} \tag{8}$$

Рассмотрим жестко защемленный край пластины, которая находится в поперечном магнитном поле. Граничные условия имеют вид:

$$x_1 = 0 \begin{cases} \varphi = 0 \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial x_1} = 0 \end{cases} \tag{9}$$

Решение вблизи границы $x_1 = 0$ ищем в виде

$$\varphi(x_1, x_2) = \Phi(x_1)\sin[k_2(x_2 - \xi_2)] \tag{10}$$

Подставляем решение (10) и выражение для собственной частоты (8) в уравнение (1), получим дифференциальное уравнение

$$\Phi^{IV} - (2\frac{D_{12}}{D_{11}}k_2^{\,2} - \frac{2h(\mu-1)}{4\pi\mu D_{11}}B_3^{\,2})\Phi^{II} - [\frac{2D_{12}k_1^2k_2^2}{D_{11}} + k_1^4 - \frac{2h(\mu-1)}{4\pi\mu D_{11}}B_3^{\,2}k_1^{\,2})]\Phi = 0 \tag{11}$$

Подставим в уравнение (11) решение вида $\Phi(x_1) = Ce^{\lambda x_1}$

Получим характеристическое уравнение:

$$\lambda^4 - (2k_2^{\,2}\frac{D_{12}}{D_{11}} - \frac{2h(\mu-1)}{4\pi\mu D_{11}}B_3^{\,2})\lambda^2 - [k_1^{\,4} + 2\frac{D_{12}k_1^2k_2^2}{D_{11}} - \frac{2h(\mu-1)}{4\pi\mu D_{11}}B_3^{\,2}k_1^{\,2})] = 0 \tag{12}$$

Решение этого уравнения будет иметь вид:

$$\lambda_1^{\,2} = (2k_2^{\,2}\frac{D_{12}}{D_{11}} + k_1^{\,2} - \frac{2h(\mu-1)}{4\pi\mu D_{11}}B_3^{\,2})$$

$$\lambda_2^{\,2} = -k_1^{\,2}$$

Обозначим

$$r = \sqrt{2k_2^{\,2}\frac{D_{12}}{D_{11}} + k_1^{\,2} - \frac{2h(\mu-1)}{4\pi\mu D_{11}}B_3^{\,2}} \tag{13}$$

Получим корни характеристического уравнения

$$\lambda_{1,2} = \pm ik_1, \lambda_{3,4} = \pm r \tag{14}$$

Мнимые корни соответствуют порождающему решению, действительные корни – корректирующим решениям. Общее решение уравнения (11) имеет вид:

$$\Phi(x_1) = C_1 \sin k_1(x_1 - \xi_1) + C_2 e^{-x_1 r} + C_3 e^{x_1 r} \tag{15}$$

Если рассматривается граница $x_1 = 0$, то последний член в выражении (15) отбрасывается, так как корректирующее решение вдали от границы должно затухать. Среди оставшихся членов первое полностью соответствует порождающему решению (4), а первые два члена, взятые вместе

$$\Phi(x_1) = C_1 \sin k_1(x_1 - \xi_1) + C_2 e^{-x_1 r} \tag{16}$$

Описывают динамический краевой эффект.

Подставим решение (16) в граничные условия (9) при $x_1 = 0$, получим систему уравнений

$$\begin{cases} \varphi = 0 \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial x_1} = 0 \end{cases} \begin{cases} C_2 - C_1 \sin(k_1\xi_1) = 0 \\ -rC_2 + k_1 C_1 \cos(k_1\xi_1) = 0 \end{cases}$$

Данная система имеет нетривиальное решение, если определитель системы уравнений равен нулю. Раскроем данный определитель и получим:

$$k_1\xi_1 = arctg\frac{k_1}{r} + m_1\pi \tag{17}$$

Примем $C_1 = 1$ и из граничных условий найдем константу C_2:

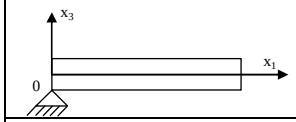
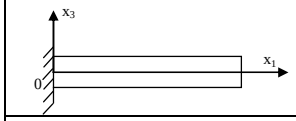
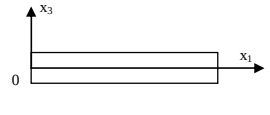
$$C_2 = \frac{k_1}{\sqrt{r^2 + k_1^{\,2}}}$$

В таблице 1 приведена сводка трансцендентных уравнений для нахождения волновых чисел и константы интегрирования для различных видов закрепления ортотропных пластин изготовленных из материала с конечной электропроводностью, находящихся в поперечном магнитном поле.

Разработанная методика расчета спектров частот колебаний ортотропных прямоугольных пластин изготовленныъ из материала с конечной электропроводностью.находящихся в поперечном магнитном поле при различных условиях закрепления краев позволяет производить проектирование тонкостенных элементов конструкций электротехнического оборудования.

Список литературы: **1.**Амбарцумян С.А., Багдасарян Г.Е., Белубекян М.В. Магнитоупругость тонких оболочек и пластин. М.: Наука. 1977. 272 с. **2.** Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т.1: Колебания линейных систем/ под. ред. В.В. Болотина.-2-е изд. М.: Машиностроение 1999. **3.** Хроматов В. Е., Самогин Ю.Н., Красова Н. С., Комиссарова Т. Н. О влиянии продольного магнитного поля на спектры частот колебаний круговых цилиндрических оболочек // Сборник трудов XIV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь, Донецкий гос. техн. ун-т. 2007. Т. 4. с. 116-119. **4.** Комиссарова Т. Н., Хроматов В. Е., Самогин Ю. Н. Распределение собственных частот магнитоупругих колебаний пологих оболочек в поперечном магнитном поле // Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI век», г. Севастополь, Донецкий гос. техн. ун-т. 2008. Т. 2. с. 122-129. **5.** Геча В. Я., Голубева Т. Н. Хроматов В. Е. Колебание электропроводящей пластины в магнитном поле // Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь, Донецкий гос. техн. ун-т. 2009. Т. 1. с. 134-139. **6.** Голубева Т. Н., Хроматов В. Е. Влияние магнитного поля на колебания и устойчивость токонесущих пластин // Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь, Донецкий гос. техн. ун-т. 2010. Т. 1. с. 186-190. **7.** Голубева Т. Н., Хроматов В. Е. Влияние магнитного поля на колебания ферромагнитных пластин // Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь, Донецкий гос. техн. ун-т. 2011. Т. 1. с. 179-183.**8.** Хроматов В.Е., Щугорев В.Н., Серков С,А. Развитие научных направлений Московского энергетического института на конференциях Донецкого национального технического университета в г. Севастополе/ Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Донецк, 2018. Т. 2. с. 204-209. **9**.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.

Таблица 1. Трансцендентные уравнения для нахождения волновых чисел и константы интегрирования для различных видов закрепления ортотропных пластин в поперечном магнитном поле

Типзакрепления	Граничныеусловия	Выражения для нахождения волновых чисел $F(k_1, k_2)$	Константаинтегрирования C
Шарнирноеопирание 	$x_1 = 0 \quad \begin{cases} \phi = 0 \\ \dfrac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^{\,2}} + \nu \dfrac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^{\,2}} = 0 \end{cases}$	$k_1 = \dfrac{m_1 \pi}{a_1};\ k_2 = \dfrac{m_2 \pi}{a_2}$	0
Заделка 	$x_1 = 0 \quad \begin{cases} \varphi = 0 \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial x_1} = 0 \end{cases}$	$k_1 \xi_1 = arctg \dfrac{k_1}{r} + m_1 \pi$	$C_2 = \dfrac{k_1}{\sqrt{r^2 + k_1^{\,2}}}$
Свободныйкрай 	$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^{\,2}} + \nu \dfrac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^{\,2}} = 0 \\ \dfrac{\partial^3 \varphi}{\partial x_1^{\,3}} + (2 - \nu) \dfrac{\partial^3 \varphi}{\partial x_1 \partial x_2^{\,2}} = 0 \end{cases}$	$k_1 \xi_1 = arctg \dfrac{k_1 (k_1^{\,2} + (2 - \nu) k_2^{\,2})(r^2 - \nu k_2^{\,2})}{r (r^2 - (2 - \nu) k_2^{\,2})(k_1^{\,2} + \nu k_2^{\,2})} + m_1 \pi$	$C_2 = -\dfrac{tg(k_1 \xi_1)}{\sqrt{1 + tg^2 (k_1 \xi_1)}} \dfrac{(k_1^{\,2} + \nu k_2^{\,2})}{r^2 - \nu k_2^{\,2}}$

где $r = \sqrt{2 k_2^{\,2} \dfrac{D_{12}}{D_{11}} + k_1^{\,2} - \dfrac{2h(\mu - 1)}{4 \pi \mu D_{11}} B_3^{\,2}}$

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ: ПРОГНОЗЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

Кругликов П.А., Кондуров Е.П., Смолкин Ю.В., Сухорукова Е.А. *(ОАО «НПО ЦКТИ» им. И.И. Ползунова, г. Санкт-Петербург, Россия)*
Тел./Факс 88127107335, E-mail: pak47@mail.ru

Abstract: *The main stages of the development of nuclear energy in the world and in Russia are considered. Analyzed the advantages and problems inherent in this subgroup of power generation. The programs for building up the implementation capacities and the stages of their implementation in Russia are considered. The ways of development of a new nuclear technology are indicated - a closed fuel cycle.*
Key words: *Nuclear power plant, safety issues, installed capacity, closed fuel cycle, capital investment, construction time*

27 июня 1954 в мировой энергетике возникло новое направление в генерации электроэнергии. На территории СССР (г.Обнинск) была возведена первая в мире АЭС с реактором АМ-1, предельная мощность которого составляла 5МВт. В 1956 г. была запущена АЭС в Британии (Колдер-Холл) мощностью 46 МВт. На территории США первая АЭС начала работать в 1957 г. мощностью 60 МВт (Шиппингпорт).

История становления мировой и отечественной атомной энергетики показывает, что ни одна из подотраслей электроэнергетики не имела столь масштабных планов своего развития, которые на разных этапах и по различным причинам существенно корректировались. Можно выделить три исторических момента существенно отразившихся на планах развития и надеждах возлагаемых на атомную энергетику. В 1979г. произошла глобальная авария на АЭС Три-Майл-Айленд (США). Крупнейшая авария в 1986г. на АЭС в Чернобыле (СССР) заставила пересмотреть планы развития и начать решать проблемы обеспечения максимальной безопасности АЭС. 11 марта 2011г. произошла катастрофа на АЭС Фокусима-1 (Япония). Это событие заставило пересмотреть политику многих стран по сохранению в работе собственных АЭС и строительству новых. АЭС, как генератор электроэнергии имеет ряд неоспоримых преимуществ: высокая энергоемкость топлива – урана; возможность перехода на замкнутый цикл, т.е. вторичного применения ресурса после переработки; практическое отсутствие эмиссии углекислого газа; независимость от местонахождения источников топлива; относительно невысокая стоимость выработки электрической энергии.

Несмотря на указанные плюсы существуют и проблемы. Основная – это тяжелые последствия аварийных ситуаций, для предотвращения которых требуются сложные и дорогостоящие системы безопасности. Кроме того, проблемами являются консервация АЭС после выработки ресурса (обеспечение «зеленой лужайки») и функционирование в режиме суточного графика нагрузки.

Развитие атомной генерации электрической энергии в мире в настоящее время имеет противоположные тенденции и происходит крайне неравномерно по регионам. Отказ от атомной энергетики или приостановка программ ее развития провозглашены в ряде стран: Германия, Италия, Испания, Швейцария, Бельгия, Австрия, Швеция, Литва, Польша. Наибольшие темпы развития атомной энергетики сохраняются в Китае (с 1992 по 2012г.г. рост в ~ 43 раза), Индии и Пакистане. Пятерка стран лидеров по установленной мощности АЭС на конец 2017г. показана в таблице 1.

В 2018 г. 31 страна эксплуатировала АЭС. На долю 5 стран пришлось 70% всей атомной генерации в мире: США, Франция, Китай, Россия, Южная Корея (по убывающей) [1]. На рис. 1 показан рост мощности АЭС (МВт) в мире. Количество действующих энергоблоков АЭС в мире, с учетом выводимых из эксплуатации, практически по-

стоянно (~450 блоков). В табл. 2 приведены доли АЭС в производстве электроэнергии в мире по годам.

Таблица 1. Страны лидеры по установленной мощности АЭС

Страна	США	Франция	Япония	Китай	Россия
Установленная мощность АЭС, ГВт	99,5	63,1	40,5*	31,6**	26,9
% генерации эл. энергии в стране	19,5	76,3		4	19

* - После аварии на Фукусиме большая часть АЭС остановлена

** - кроме этого в разной стадии достройки в Китае находится еще 24,2 ГВт мощностей АЭС

Таблица 2. Доли АЭС в производстве электроэнергии в мире по годам

Год	1992	2005	2009	2016
%	11,7	16	17	10,9

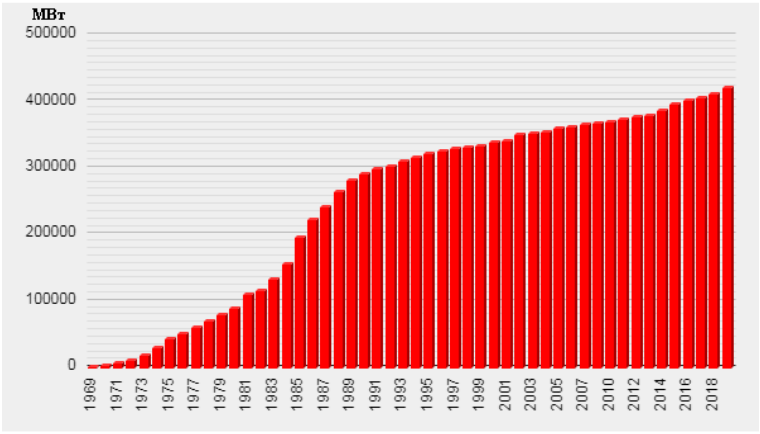


Рис. 1. Рост мощности АЭС (МВт) в мире

Говоря о сложностях и неоднозначности перспектив развития ядерной энергетики в мире, необходимо коснуться еще одного проекта – Международного экспериментального ядерного реактора ИТЭР (ITER). Целью его создания являлась демонстрация его энергетического использования и решение физических и технологических проблем на пути создания термоядерной станции. Проект был завершен и выбрано место его строительства – Кадараш на юге Франции. Подготовка площадки и практическая реализация проекта начались в январе 2007г. Страны участники проекта: страны ЕС (как единый участник), Индия, Китай, Россия, Республика Корея, США, Япония. Стройку, стоимость работ которой оценивалась в 5 млрд. евро, планировалось закончить в 2016г. В феврале 2010г. срок был сдвинут на 2019г., а в ноябре 2015г. срок окончания постройки ИТЭР сдвинут на 2025г., а предполагаемая сумма расходов выросла до 19 млрд. евро.

К сожалению, нужно констатировать, что развитие отечественной атомной промышленности, в частности электроэнергетической, также не обошлось без невыполнения завышенных планов и программ, стагнации и завышенных расходов. На январь 2019 в РФ функционировало 35 энергоблоков в составе 10 АЭС, суммарной мощностью 29 ГВт, что составляет ~ 12% от общей установленной мощности электрических станций. Вместе с тем АЭС России в 2018г. выработки 204,3 млрд. кВт·ч, что составляет 19% общей выработки электроэнергии в стране. (1070 млрд. кВт·ч) Дореформенный уровень (1991г.) производства электроэнергии составлял 1100 млрд. кВт·ч. Выработка электроэнергии на АЭС России в млрд. кВт·ч представлена в табл. 3.

Представленная в 2006г. в Правительство РФ Программа «25+25», цифры которой означали достижение на АЭС 25% производства электроэнергии от общего объема ее выработки в стране к 2025 году, предусматривала ежегодный ввод мощностей с 2008

г. не менее 2ГВт, и по ~ 3 ГВт начиная с 2010 года [2]. Реально за период 2008-2019г.г. в РФ было введено 8,5 ГВт мощностей АЭС.

Таблица 3. Выработка электроэнергии на АЭС России

Годы	2007	2010	2013	2016	2017	2018
Выработка эл. энергии, млрд. кВт·ч	158,3	171,1	172,2	196,4	202,9	204,3

Болезнь «долгостроев» и «недостроев» остается хронической для отечественной атомной энергетики. В 2007г. началось строительство первой плавучей АЭС (ПАЭС) мощностью 70МВт. Срок ввода в эксплуатацию неоднократно переносится. Строительство продолжается уже двенадцатый год.

В 1979 г. было начато строительство Костромской АЭС, которое прекратилось в 1986г. В 2000г. Костромская областная дума наложила вето на строительство АЭС, которое в 2007г. было снято. В 2008г. госкорпорация Росатом приняла решение возобновить строительство и ожидалось, что АЭС под названием Центральная будет построена к 2017-2019 гг. с реакторами ВВЭР-1200. В 2011г. Росатом получил лицензию Ростехнадзора и было заявлено, что в карте развития с 2020 по 2030 гг. есть ряд АЭС, в том числе Центральная.

В 1980г. были начаты подготовительные работы на стройплощадке Татарской АЭС. Запуск 1 блока планировался на 1992г. В апреле 1990 строительство было прекращено. К моменту остановки строительства было начато возведение реакторных отделений и машинных залов 1 и 2 блоков, подготовлены котлованы под 3 и 4 блоки. Планируется возобновление строительства и объект включен в Схему территориального планирования РФ в области энергетики до 2030 г.

Начало строительства Балтийской АЭС состоялось в 2010г. Планировалась установка двух реакторов ВВЭР мощностью 1200 МВт. Пуск 1 блока планировался в 2017 г., 2-го в 2018г. Первоначальная причина остановки строительства в 2014г. была экономической. Не удалось привлечь европейских инвесторов для планируемого покрытия половины стоимости АЭС, а Литва пригрозила отключить Калининградскую область от общей энергосистемы, что потребовало бы новых линий электропередач и дополнительных вложений в несколько миллиардов долларов. Рассматривался вариант размещения на площадке нескольких энергоблоков малой мощности на случай работы Калининградской области в изолированном режиме, что требовало разработки совершенно нового проекта. Появился политический фактор приостановки проекта, т.к. страны Балтии заявили, что будут отсинхронизироваться от Северо-Запада России [3]. Сроки возобновления строительства остаются неопределенными.

Первые проектные изыскания по Крымской АЭС проводились в 1968 г., в 1975г. начато строительство. Планировалась проектная мощность 2000 МВт с возможностью последующего увеличения до 4000 МВт. В 1987 г. после Чернобыльской катастрофы строительство было приостановлено, а в 1989 г. принято решение отказаться от пуска станции. Сейчас по мнению экспертов восстановление станции невозможно и в планах мероприятий по энергоснабжению Крыма этой станции не значится.

Кроме того, было отменено строительство находившихся в высокой степени готовности атомных станций теплоснабжения и атомных теплоэлектроцентралей: Воронежская АСТ, Горьковская АСТ, Минская АТЭЦ (осталась в Белоруссии), Одесская и Харьковская АТЭЦ (остались на Украине). За рубежом по разным причинам не были достроены еще ряд АЭС отечественных проектов: АЭС Белене (Болгария) строительство остановлено в 1990г., АЭС Жарновец (Польша) остановка строительства в 1990г., АЭС Штендаль (Германия), АЭС Хурагуа (Куба) строительство прекращено в 1992г., АЭС Синпхо (КНДР). Приостановки строительства были вызваны политическими либо экономическими причинами.

Возможно определенной корректировки потребуют и современные планы по зарубежному строительству АЭС. В июне 2018 г. руководство Росатома объявило, что в качестве контрактов и межправительственных соглашений ожидается строительство 35 энергоблоков, что составляет 2/3 мирового рынка строительства АЭС. На 2019 ждет строительство 9 энергоблоков за рубежом (Турция-1, Беларусь-2, Индия-2, Бангладеш-2), еще 8 блоков только планируются к началу строительства (Аргентина, Казахстан, Узбекистан, Вьетнам, Египет, Венгрия, Финляндия). В то же время в «Программе инновационного развития …» Госкорпорации в августе 2016 г. отмечалось, что к 2030 г. не менее 28 энергоблоков будет введено в эксплуатацию за рубежом [4]. Необходимо отметить, что строительство современного блока АЭС как правило растягивается на срок не менее 10 лет. Невыполнение плановых сроков при создании новых энергоблоков происходит не только в России. Разработанный в США энергоблок с реактором АР-1000 в Китае начал строиться с 2008 г. с плановым пуском в 2013г., однако физический пуск этого блока мощностью 1120 МВт состоялся только в 2018г.

Можно указать некоторые причины торможения развития атомной энергетики в РФ, приводящие к корректировке или даже отмене ряда плановых установок. Остается настороженным отношение общества к созданию новых площадок АЭС, несмотря на то, что крупные аварии носят единичный характер даже по мировым меркам. Важной остается проблема захоронения ОЯТ и полной консервации отработавших свой срок АЭС. По экспертным оценкам стоимость такой консервации составляет не менее 30% стоимости строительства новой АЭС, а весь процесс вывода энергоблока из эксплуатации занимает до 30 лет. Существенным ограничением в развитии атомной энергетики может стать ситуация с топливообеспечением. Потребление урана на АЭС РФ превосходило его добычу и обогащение (~ 8,5 тыс. т. в год против ~ 4 тыс. т.) [5]. Используется значительная часть урана из складских запасов, сделанных во времена СССР. Возможности отечественного энергомашиностроения также не соответствуют масштабу поставленных задач. Использование импортного оборудования по ряду причин неприемлемо, а в этом случае необходимо расширение и обновление технологической базы энергомашиностроения РФ, опирающееся на гарантированность будущих серийных заказов. Резерв технологических мощностей отечественного энергомашиностроения способен увеличить рост производства на десятки процентов, но не в разы как это может потребоваться в перспективе. Важным ограничением в развитии могут оказаться инвестиционные возможности. Создание новых технологических установок с учетом резко возросших после 2011г. требований к системам безопасности, привел практически к скачкообразному росту стоимости капитальных вложений в АЭС. Стоимость установленного кВт мощности не может быть оценена ниже 5 тыс. долл/кВт, что приводит к затратам на создание современного энергоблока АЭС не ниже 6 млрд. долл.

Перечисленные причины торможения отечественной ядерной энергетики отчасти проявились в диверсификации работ «Росатома». В частности, Госкорпорация разрабатывает проект по строительству ветропарков на территории России. В Росатоме создано «АО ВетроОГК», что рассматривается для Госкорпорации, как одна из перспективных точек роста. Производство компонентов для ВЭУ намечено локализовать на «Атоммаше» в г.Волгодонск.

В то же время очевидно, что развитие электроэнергетики и, в частности, атомной энергетики является фактором необходимым для экономического процветания страны и ее безопасности, как энергетической, так и политической. Реальное осознание этого факта фиксируется в проектах новых энергетических программ и решениях правительства РФ. «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» существует пока только, как проект внесенный на рассмотрение. Однако в июне 2017 г. Правительством РФ утверждена «Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года». [6] По этой схеме утвержден план расширения ряда и строительство новых

АЭС, в частности: ЛАЭС-2 с реакторами ВВЭР-1200; Кольская АЭС-2 с реактором ВВЭР-600; Нововоронежская АЭС-2 с реактором ВВЭР-1200; Центральная (Костромская) АЭС с реакторами ВВЭР-ТОИ 1255; Курская АЭС-2 с реакторами ВВЭР-ТОИ 1255; Смоленская АЭС-2 с реакторами ВВЭР-ТОИ 1255; Нижегородская АЭС с реактором ВВЭР-ТОИ 1255; Белоярская АЭС с реактором БН-1200.

Указаны АЭС с реакторами новых типов, ввод которых запланирован и осуществляется на период 2016-2035гг., т.е. менее 20 лет. По новой Генеральной схеме объем ввода новых блоков АЭС до 2035г. прогнозируется на уровне 21,4МВт (базовый вариант). В табл. 4 приведена планируемая установленная мощность АЭС на конец года, с учетом выводимых из эксплуатации блоков, в МВт и в % от общей мощности эл. станций РФ.

Таблица 4. Планируемая установленная мощность АЭС на конец года

	Годы	2020	2025	2030	2035
Мощность АЭС	МВт	29,5	29,8	30,7	35,3
	%	11,7	12,1	12,1	13,4

При этом достаточно реалистичном плане приоритет отдается строительству и апробации в РФ новых типов реакторов (ВВЭР-1200; ВВЭР-600; ВВЭР-ТОИ; БН-1200), что может расширить и экспортные возможности. Предусматривается развитие малых модульных АЭС с шагом 50-100 МВт для труднодоступных районов.

Россия остается единственной страной в мире развивающей и успешно эксплуатирующей новую ядерную технологию – реакторы на быстрых нейтронах. Наряду с выведенным на полную мощность реактором БН-800 Белоярской АЭС (2016г.), эксплуатируется блок с реактором БН-600 (с 1980г.). Идут разработки блоков с реакторами БН-1200, БРЕСТ-300, БР-1200. Эти блоки закладывают основу для перехода атомной энергетики на новую технологическую платформу – замкнутый топливный цикл. На этих реакторах за счет расширенного воспроизводства ядерного топлива многократно возрастает энергетический потенциал природного урана. Т.е. практически снимается ограничение для АЭС со стороны топливных ресурсов. Эти реакторы нарабатывают плутоний обеспечивая себя и другие реакторы новым топливом. В итоге количество энергии, которое можно получить от природного урана увеличивается примерно в 100 раз. Кроме того, после переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) остается относительно малое количество радиоактивных отходов подлежащих захоронению.

Выводы:

1. Несмотря на существование серьезных проблем и ограничений в развитии атомной энергетики, она остается перспективной для наращивания генерирующих мощностей и занимает существенный сектор в мировом и отечественном производстве электроэнергии.
2. Новые отечественные программы развития атомной энергетики требуют реальной поддержки, включая государственную, в части создания новых объектов АЭС, обновления основных фондов отрасли энергомашиностроения, участия в зарубежных проектах.
3. Требуют поддержки перспективные направления развития и создания нового поколения энергоблоков АЭС, позволяющие существенно повысить эффективность, безопасность и конкурентоспособность отечественных объектов ядерной энергетики.

Список литературы: 1. Отчет WNISP, BP, IAEA-PRIS, 2018; **2.** Электроэнергетика и промышленность России 17.07.2006г.; **3.** Bigpower New от 07.02.2019; **4.** Паспорт программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030г., М.2016; **5.** Электроэнергетика России (обзор недели), вып. 5 от 01.12.2008г.; **6.** Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 г., М.2017.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКОСТЕЙ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Курбанов Х.К., Керимов Б.М., Гурбанова М.Х., Ходжаев Дж.Н.
(ТГАСИ, г. Ашхабад, Туркменистан)
Тел/Факс: 8-0012 46-46-10; 8-0012 21-19-35; +993 64-02-40-10; E-mail: hojatpi@mail.ru

***Abstract**: The issue of studying the heat transfer of liquids in cramped conditions.*
***Key words:** Slot channel, athanol, heat transfer coefficient, steam volume.*

Одним из путей интенсификации теплообмена при кипении различных жидкостей, является организация этих процессов в узких плоскопараллельных щелевых каналах.

В настоящее время большое внимание привлекают новые методы интенсификации теплообмена в энерготехнологическом оборудовании, в частности теплообмена при кипении. Существенно повысить интенсивность теплообмена при кипении позволяет организация этого процесса в щелевых каналах, эффективные диаметры парового пузыря. Подавляющее большинство известных данных по кипению в узких щелях относится к кипении воды. Недостаточно изучено влияние схемы питания канала жидкостью на характеристики теплообмена. Кипение других жидкостей в этих условиях практически не изучалось. Известные экспериментальные данные по теплообмену при кипении воды в щелевых каналах , по-видимому ,не могут быть непосредственно использованы при расчете теплообмена при кипении в узких щелях других жидкостей. В испарительных зонах высокоэффективных тепловых труб термосифонов в качестве рабочего тела с успехом могут быть использованы и другие жидкости, а в частности водные растворы этанола.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании и расчетах испарительных зон термосифонов ,тепловых труб , испарительных теплообменников при кипении воды и водных растворов этанола в щелевых каналах открытой схемы питание в условиях естественной конвекции. Результаты работы могут быть применены во многих отраслях промышленности, в частности, в гелиотехнике при отводе тепла от зеркальных поверхностей солнечных концентратов, в испарительных зонах гелиоопреснителей, при охлаждении фотоэлементов, преобразователей солнечной энергии в электрическую [1].

Анализ работ по исследованию кипения различных жидкостей анализируется состоянием вопроса исследования. Кроме того рассматриваются исследование по кипению в кольцевых и плоскопараллельных щелевых каналах. Показано, что влияние физических свойств рабочей жидкости на теплообмен и гидродинамику при кипении в узких щелях практически не изучалось. Недостаточно уделялось внимание влиянию схемы питания щелевого зазора жидкостью. Сравнительно мало работ по исследованию кипения в щелях в условиях естественной конвекции.

Теоретическое исследование гидродинамики и теплообмена при кипении в щелевых каналах открытой схемы питания посвящены на выявление факторов, влияющих на гидродинамику и теплообмен при кипении в узких щелях. Обоснован выбор проведения исследования открытой схемы питания канала [2].

Изучение процесса кипения в исследуемых щелях представляет собой интерес в связи с тем, что при открытой схеме питания критическая плотность теплового потока существенно выше, чем для тупиковых каналов.

При теоретическом описании процесса рассматривается канал, образованный двумя вертикальными плоскопараллельными стенками. Плотность теплового потока (q) от стенок канала постоянна. При подводе тепла к стенкам щелевого зазора в нем образуются паровые пузыри, которые в процессе роста сплющиваются между стенками и отделены от них тонкой пленкой жидкости. Пузыри под действием подъемной силы всплывают вверх и увлекают за собой жидкость, заключенную в канале.

Образуется течение типа эрлифтового. Через нижний торец в канал поступает рабочая жидкость при температуре насыщения через верхний торец из канала выходит парожидкостная смесь.

Часть исследования посвящена определению истинного объемного паросодержания в щелевом канале. Допущение о том, что все тепло подводимое в канал идет на парообразование, а разность скоростей фаз мала по сравнению с абсолютными значениями их скоростей позволило получить формулу для средней по горизонтальному сечению канала скорости жидкости.

$$U=U_o+\frac{2qx}{rp_{\text{п}}b} \qquad (1)$$

где U_o-скорость жидкости на входе, м/сек.; q- плотность теплового потока от стенок, Вт/м ; x- высота сечения от нижнего среза канала, м.; r- теплота парообразования.; $P_{\text{п}}$-плотность пара.; b-величина щелевого зазора.

Экспериментальная установка для исследования кипения водных растворов этанола в щелевых каналах и методика эксперимента состоит из описания экспериментальной установки и основных требований к ней предъявляемых, методики исследования и оценка погрешностей определяемых параметров. Экспериментальная установка для исследования кипения в щелевых каналах открытой схемы питания состоит из рабочего сосуда ,контрольно-измерительной аппаратуры, аппаратуры фото и кинорегистрации и системы питания. Конструкция рабочего сосуда позволяет получать плоскопараллельные вертикальные щелевые зазоры различной величины. Обеспечивается постоянство тепловой нагрузки по площади греющий стенок и возможность замера локальных характеристик теплообмена в различных сечениях по высоте канала. Предусмотрена система термостатирования компенсирующая утечки тепла и обеспечивающая поступления в щелевые каналы рабочей жидкости при температуре насыщения. Стенки, образующие щелевой зазор, выполнены из нержавеющей стали и препарированы по толщине и высоте термопарами. Имеется возможность замены одной или обоих стенок оптическими стеклами с напыленными светопрозрачным токопроводящим слоем. Применение стекол позволило выполнить фото и киносъемку кипения в щелевом канале при сохранении симметрии подвода тепла от его стенок. В качестве рабочей жидкости выбраны водные растворы этанола, позволившие обеспечить изменение основных физических свойств рабочей жидкости достаточно в широких пределах. Все опыты проводились при атмосферном давлении. Для проверки достоверности получаемых результатов была проведена серия предварительных тарировочных опытов.

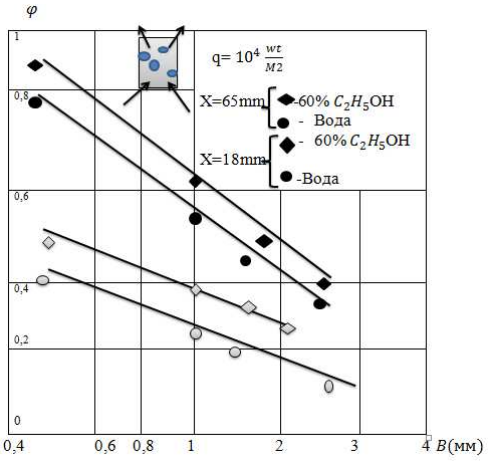


Рис. 1. Зависимость паросодержания от величины щелевого зазора

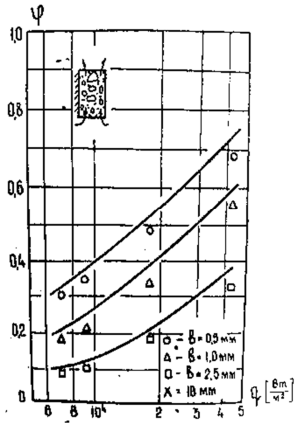


Рис. 2. Зависимость паросодержания от тепловой нагрузки

На первом этапе экспериментальной работы проводилось определение истинного объемного паросодержания в различных сечения по высоте канала открытой схемы питания при различных сечениях по высоте канала открытой схемы питания при различных значениях величины щелевого зазора ,тепловой нагрузке и различных концентрациях рабочей жидкости.(рис.1)

Истинное объемное паросодержание в узких щелях существенно зависит от величины щелевого зазора и тепловой нагрузки на стенках, образующих канал. На рисунке 1 представлены экспериментальные и расчетные зависимости истинного объемного паросодержания, построенные в соответствии с формулой, от величины щелевого зазора при различных расстояниях от нижнего среза канала и различных концентрациях раствора этанола. Как следует из представленных данных ,с уменьшением щелевого зазора паросодержание в канале возрастает. Большей высоте от нижнего среза канала соответствует большие значения паросодержания. На рис 2 представлены экспериментальные и расчетные зависимости паросодержания от тепловой нагрузки при различных величинах щелевого зазора. Увеличение тепловой нагрузки приводит к возрастанию паросодержания в канале. Данные характеризующие влияние концентрации раствора этанола на величину истинного объемного паросодержания приведены на рис.3. Как следует из представленных данных, кипение воды характеризуется наименьшими значениями паросодержания по сравнению с другими концентрациями раствора. Кроме того, при определенных значениях концентрации имеет место максимум паросодержания в щелевом канале. В работе приводится анализ влияния различных физических свойств рабочей жидкости паросодержание при кипении в щелевом канале. Обобщение экспериментальных и расчетных данных по паросодержанию при кипении водных растворов этанола в щелевых каналах открытой схемой питания приведено на рис.4.

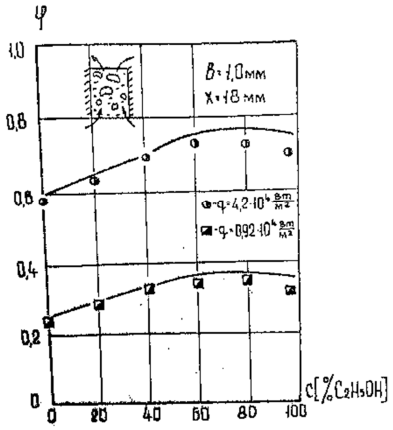


Рис.3. Зависимость паросодержания от концентрации жидкости

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1.Получены аналитические выражения для расчета паросодержания и характеристик теплообмена при кипении в щелевых каналах открытой схемой питания в условиях естественной конвекции, учитывающие влияние физических свойств рабочей жидкости.

2.Выполнена экспериментальная проверка полученных расчетных соотношений. В качестве рабочей жидкости использованы водные растворы этанола различных концентрации, что позволило изменять физические свойства рабочей жидкости.

3.Выявлено влияние схемы питания канала жидкостью на характеристики теплообмена. Показано, что открытая схема питания канала характеризуется меньшими значениями коэффициента теплоотдачи по сравнению с тупиковыми каналами. Зато она позволяет существенно увеличить критическую тепловую нагрузку и тем самым расширить область применения щелевых каналов.

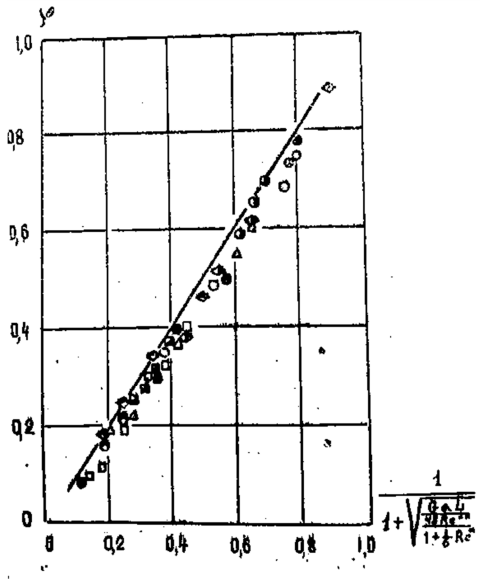


Рис. 4. Обобщение данных по паросодержанию

Список литературы: 1. «Общая теплотехника». М. 1980 год. **2.** «Теория тепломассообмена»/Под ред. А.И. Леонтьева. Москва; Высшая школа 1979 год.

РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ В СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Ладоша Е.Н., Фомич М. В., Цымбалов Д.С. (*Донской государственный технический университет)*
E-mail: oleg v yatcenko@mail.ru

Abstract: *Typical defects of guitars and its tuning faults which tend to musical pitch destroy are considered in detail. Original mathematical models and algorithms to solve the reverse problem "tone pitch faults – possible physical defects" are developed. Procedure elaborated is successfully tested for accordance with opinion of professional musicians. The base of comparison performed is three guitars of different age and quality. Results obtained are interesting for automated quality control at real musical manufactures as well as for educative purposes.*
Keywords: *string, musical instrument, guitar, defecting, tuning, tone spectrum, musical pitch, inverse problem, mathematical analysis, automation.*

Важнейшими качествами музыкального инструмента (МИ) являются пригодность к настройке и способность длительно сохранять настроенное состояние. Однако в силу различного принципа звукоизвлечения и конструкции достижение одинаковой степени настроенности инструмента требует существенно отличающихся объемов высококвалифицированной работы. Для сокращения объема и упрощения настроечной работы в настоящее время широко используются вспомогательные электронно-измерительные средства (частотомеры, анализаторы спектра, генераторы эталонных сигналов и пр.), а также и разнообразные информационные технологии. Основу последних составляют реалистичные математические модели звукоизвлечения и высокоэффективные средства их анализа. Такой инструментарий не только повышает качество настройки при сокращении объема работы, но также позволяет увеличить межнастроечные интервалы и выявлять существенные дефекты инструмента, требующие ремонта или даже утилизации инструмента.

Наибольшей популярностью в молодежной среде пользуются гитары различных видов. Настройка этого инструмента трудоемка, а ее результат – недолговечен. По этой причине гитары относят к условно строящим инструментам.

Таким образом, разработка математических моделей для анализа технического состояния и настроенности гитарной продукции райне актуальна.

Имеющиеся в свободном доступе программные продукты для настройки МИ ориентированы на практикующих музыкантов, а не на профессиональных настройщиков и, тем более, не на фабричные системы и процедуры. Они, реализованные в большинстве на мобильных платформах (IOS, ANDROID, WINDOWS), по существу являются частотомерами со встроенной шкалой эталонных музыкальных звуков: их применение в производстве и массовой настройке МИ проблематично. Однако такой инструментарий полезен при разработке многофункционального продукта – информационно-аналитического комплекса для массовой технической диагностики и настройки.

Основная идея данной работы состоит в диагностировании существенных, требующих устранения конструктивных дефектов гитары, которые препятствуют ее должной настройке, по тоновому спектру инструмента. К таковым относятся: нарушенные длина и/или геометрия грифа, смещение подставки, положение ладов, а также неприемлемо низкое качество струн.

Новизна подхода, использованных методов и полученных результатов состоит в отработке научно-методического задела, востребованного при проектировании аппаратно-программных комплексов для массовой технической диагностики гитар в усло-

виях производства и предпродажной подготовки. Его основу составляют математические модели, реализующие алгоритмы и программы, отражающие связи между спектром и критичными техническими параметрами гитары. Существенным элементом этих моделей является нацеленность на решение т.н. обратной задачи, что требует надлежащей регуляризации.

Практическое применение разработки видится в создании автоматизированного макета (стенда) для массовой дефектовки и настройки акустических гитар.

Предысторией, вызвавшей интерес авторов к проблеме, служит следующий эпизод. Знакомый профессиональный гитарист уверенно заявил, что настроить наличную китайскую гитару за 3000 рублей в принципе не возможно, в то время как древний брежневских времен отечественный инструмент (современной ценой 1000 рублей) его почти удовлетворил. Когда в распоряжении авторов появилась третья гитара – «Аккорд», г. Бобров со сломанным и затем кустарно склеенным грифом оказалось, что несколько гитаристов разного уровня вполне успешно на ней играли, выражая при этом полное удовлетворение инструментом.

Отсюда возникла следующая постановка задачи: какие объективные критерии можно использовать для оценки качества гитары с выходными показателями: хорошее, удовлетворительное, неприемлемое? Логично к гитаре предъявить следующее основополагающее техническое требование – возможность быть настроенной хотя бы на некоторый промежуток времени. Чтобы переформулировать его в математических терминах, обратимся к теории музыки и физическим основам звукоизвлечения на струнах.

Под музыкой будем понимать совокупность параллельно-последовательных звуков, различной частоты и длительности, вызывающих целостное образное восприятие с положительными эмоциями. Это определение вполне согласуется с «Искусство сочетания вокальных или инструментальных звуков (или обоих) для создания красоты формы, гармонии и выражения эмоций» [1], однако по сравнению с ним содержит важные в математике числовые характеристики звука – частоту и длительность.

В восприятии музыки ключевую роль играет не абсолютная частота отдельных звуков в комбинации, а отношения комбинирующих частот в каждый момент времени. Отсюда построение системы (систем) допустимых комбинаций частоты звука в одновременном и последовательном исполнении.

Первым в музыке возник т.н. натуральный строй – музыкальный строй, использующий интервалы, построенные на основе обертонов [2]. Октава (1:2), квинта (2:3), кварта (3:4), большая терция (4:5), малая терция (5:6), большой целый тон (8:9), малый целый тон (9:10), и диатонический полутон (15:16). Так получается гамма гармоничная начальному тону, но лишь в пределах этой тональности. Однако даже в пределах такой семиступенной гаммы есть фальшивые интервалы (волчья квинта).

Расширенный натуральный строй (двенадцатитоновая шкала) получается путём вычисления недостающих пяти тонов. Если использовать диатонический полутон (15:16), можно получить исключительно рациональные соотношения частот интервалов, сведенные [2]. Расстояния между соседними ступенями (полутон) в этой нотной системе неодинаковы: их величины и названия приведены в работе [2].

В настоящее время натуральный строй практически полностью вытеснен т.н. равномерно темперированным музыкальным строем (И.С. Бах, XVIII век), в котором каждая октава делится на математически равные интервалы, в наиболее типичном случае – на двенадцать полутонов, каждый из которых равен $2^{1/12}$ [3]. Сопоставление нот натурального и равномерно темперированного строев приведено в работе [3].

Центом называется 1/100 частотного интервала между соседними нотами равномерно темперированного строя.

Максимальное отличие натурального и равномерно темперированного строев в

пределах октавы достигает ± 15,64 центов [3]. В ранней классической музыке (до И.С. Баха с его новым строем) подобные отклонения считались недопустимыми – музыка писалась под конкретную тональность и не подлежала транспонированию на не кратное октаве число «полутонов». Вообще, понятие полутон не имело смысла, а инструменты типа клавесина, клавикорда, спинета подстраивались непосредственно под тональность исполняемого произведения. Исполнить же произведения тех лет, например, эпохи Барокко на современно настроенном инструменте невозможно.

Базовой частотой при настройке музыкальных инструментов считается нота Ля первой октавы (обозначается как А4), которой соответствует частота f_{A4} = 440 Гц [4].

Согласно [5] допустимая погрешность ноты для профессиональных инструментов составляет два-три цента в среднем регистре (220 – 880 Гц); к краям звукового диапазона допускается ее повышение в 1.5 – 2 раза. Любительский уровень допускает погрешность 10 центов в среднем регистре, куда укладывается спектр гитары. В оркестре допускается несовпадение отдельных нот различных инструментов до 8 центов [5]. Расстройка инструмента на 10 и более центов обычно считается неприемлемой.

В любительской настройке МИ измеряются и устраняются лишь отклонения отдельных тонов от теоретических значений. Согласно [5] точность настройки МИ может быть характеризована обратной величиной – погрешностью настройки, которая проявляется в четырех показателях: 1) отклонении общей высоты строя от стандартной высоты, определяемой тоном Ля-1 (А4) с частотой 440 Гц; 2) отклонении частот тонов средней октавы от расчетных значений (для равномерно-темперированного или чистого строя); 3) отклонении в настройке унисонов; 4) отклонении в настройке октав.

Здесь первый параметр относится к одному тону, второй – к тонам средней октавы, а третий и четвертый параметры – ко всему диапазону инструмента.

По экспертной оценке [5] с помощью классического камертона настроить базовую ноту А4 можно с точностью не выше, чем ± 0,4 ÷ 0.8 цента. Если бы настройщики реализовали такую точность, не было бы заметной разницы в высоте строя разных инструментов. В действительности разброс настройки оркестровых инструментов достигает нескольких центов. Это связано как с отличием эталонных механических камертонов, используемых при настройке отдельных МИ, так и с присущей самим МИ нестабильностью частоты. Частота нот МИ зависит от условий возбуждения звука, а также температуры и влажности окружающей среды. Соответствующий разброс частоты может достигать нескольких центов (1 цент – клавишные инструменты, до 10 центов – язычковые).

Таким образом, введение в измерительную практику электронных частотомеров (тюнеров) решает проблему настройки лишь некоторых выбранных эталонными звуков отдельных МИ и оркестра. В то же время обеспечение стабильности звучания во всем игровом диапазоне МИ возлагается на исполнителя.

Для измерения частоты нот мы использовали гитарный тюнер gStrings [6], реализованный на платформе ANDROID, а в качестве эталона музыкального строя – клавишный синтезатор Casio CT-400.

Спектральный анализ эталонного МИ – синтезатора Casio CT-400 сводится к следующему. Отклонение общей высоты строя от стандартной f_{A4} = 440 Гц составило 1.61 цента, при отклонении центральной ноты А4 на 1.97 цента от идеала. Максимальное отклонение тонов «идеального» МИ не превышает 5 центов.

Производной погрешности индивидуальных тонов является погрешность интервалов между соседними нотами $\ln f_i - \ln f_{i+1}$. Для выбранного эталонным МИ она отображена на рис. 1 в зависимости от погрешности индивидуальных полутонов $\ln f_i - \ln f_{i+1}$ — $\ln f_i - \ln f_{i\,\text{теор.}}$.

Статистическими параметрами для погрешности минимального интервала слу-

жат средняя погрешность –0.034 цента и среднеквадратичное отклонение 1.61 цента. Вторая из приведенных величин близка к среднеквадратичному отклонению идеальных нот, а коэффициент корреляции между $\ln f_i - \ln f_{i+1}$ и $\ln f_i - \ln f_{i\,\text{теор.}}$ не существенен (R = 0.53). Это свидетельствует о случайном характере неточности настройки.

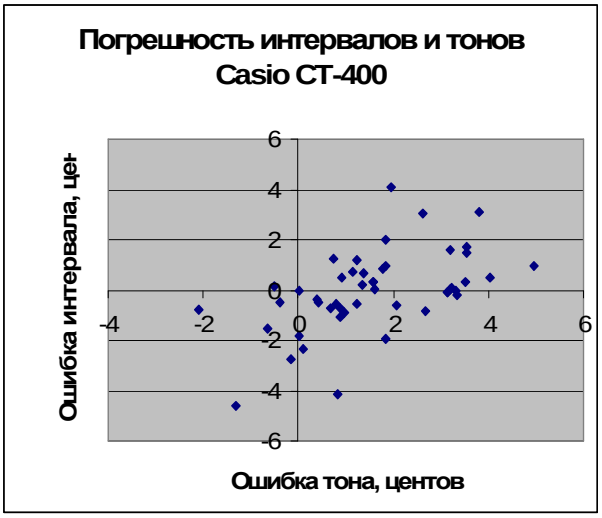


Рис. 1. Отклонение интервала (полутона) синтезатора Casio CT-400 от идеальной величины

Интегральными показателями, характеризующими распределение в погрешности индивидуальных тонов Casio CT-400, служат центральные нормированные моменты третьего и четвертого порядка – асимметрия и эксцесс. Распределение погрешности тонов Casio CT-400 характеризуется асимметрией и эксцессом –0.08 и 2.61 соответственно, что означает похожесть изучаемого распределения на нормальное.

При анализе отклонения от идеала в настройке октав использовался следующий алгоритм. Рассматривалась отстройка всех нот, начиная со второй октавы по отношению к удвоенному и одновременно сдвинутому на октаву вниз строю МИ. Т.е. изучалась статистика погрешностей для интервалов $\ln f_i - \ln (f_i + 12/2)$. Получены следующие результаты: среднее отклонение в октавных интервалах не превышает 1 цента при вероятном разбросе около двух центов. Для нас здесь важна величина разброса, которая примерно в полтора раза превышает разброс соседних тонов. Физически объяснимым здесь представляется коэффициент, равный $\ln 12 / (2 \ln 2) \approx 1.79$. Это обстоятельство в принципе позволяет отказаться от октавного анализа строя МИ.

Таким образом, можно уверенно квалифицировать наши инструментальные и алгоритмические средства как вполне удовлетворяющие целям их применения. Оценочный уровень измерительной погрешности составляет доли цента, что обеспечивает возможность упростить процедуру измерений, например, исключив из нее анализ спектра МИ в октавных интервалах.

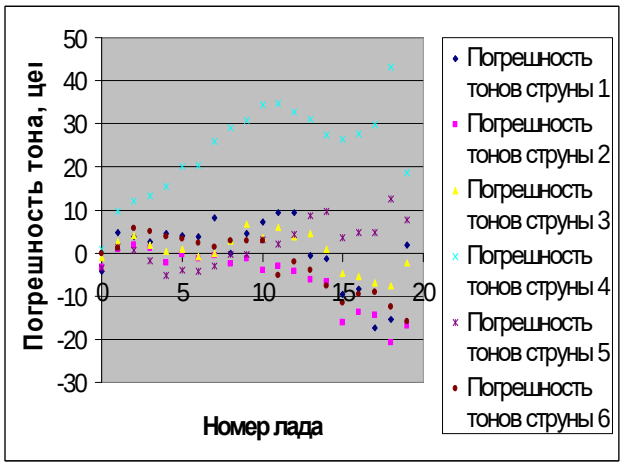


Рис. 2. Отличие спектра средних тонов гитары «Аккорд» от идеального

Исследовательскую часть работы целесообразно начать с хорошего инструмента, поэтому проанализируем исходный тоновый спектр советской гитары «Аккорд».

Практически установлено, что в пределах наиболее употребительных при игре ладов погрешность воспроизводства тона, связанная с не идентичностью щипков и зажимов струны близка по величине к отличию «среднего» тона струны от соответствующего идеального, отличаясь от нее не более, чем на 10 центов. Это обстоятельство проиллюстрировано на рис. 2 и 3.

Данные рис. 2 свидетельствуют, что «слабым местом» данного МИ является чет-

вертая струна, вносящая заметный диссонанс во всем диапазоне ее использования. Таким образом, важнейшим элементом инструментально-информационного комплекса по автоматизированной дефектовке и настройке гитар должна быть подсистема визуализации данных.

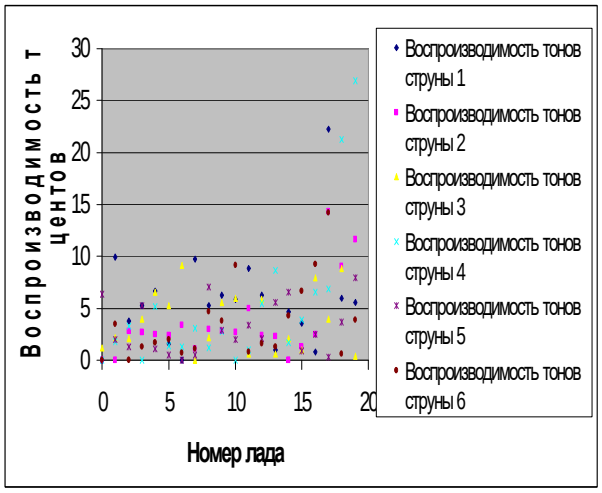


Рис. 3. Отличие воспроизводимости тонов гитары «Аккорд» от идеальной

Во-вторых, установлено отсутствие прямой связи между неточностью размещения ладов и погрешностью строя гитары: соответствующие коэффициенты корреляции для различных струн принимают значения: 0,398, -0,379, -0,157, 0,016, 0,233 и 0,045, причем меньшее по модулю для самой плохой струны. Это означает строгую выдержанность размеров мензуры, расположения ладов и степени коррекции тона с учетом изгибной жесткости применяемых струн.

Связь погрешности соседних тонов струны, отображенная для данного МИ на рис. 4 также может указывать на определенные дефекты гитары или ее настройки. Визуально близкая к линейной (см. рис. 4) при детальном рассмотрении таковой не является, что позволяет в данном случае отвергнуть гипотезу о связи неточности соседних средних тонов.

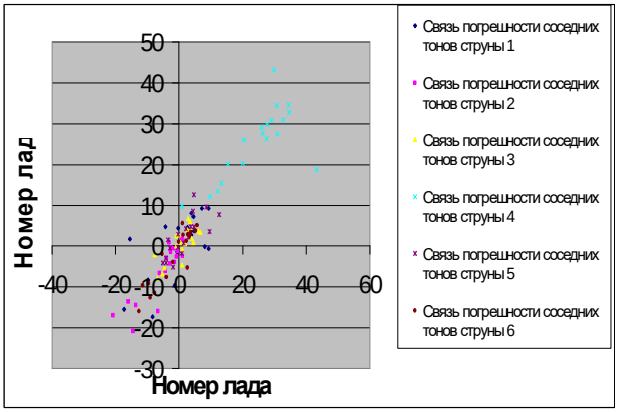


Рис. 4. Связь неточности соседних тонов гитары «Аккорд»

В физических приложениях имеет смысл предполагать линейную связь между изучаемыми факторами, если они коррелируют с коэффициентом, как, минимум 0.93-0.94. Величины, полученные для данного МИ (рис. 5), имеют заметно меньшие значения.

Microsoft Excel - Гитара 3 - Обработка

	S	T	U	V	W	X	Y
264		Струна 1	Струна 2	Струна 3	Струна 4	Струна 5	Струна 6
265		соседние	соседние	соседние	соседние	соседние	соседние
266		лады	лады	лады	лады	лады	лады
267	Коррел	0,660285	0,883819	0,763349	0,724342	0,771285	0,904711

Рис. 5. Корреляция неточности соседних тонов гитары «Аккорд» для всех струн

Такую корреляцию рассматриваемый МИ демонстрирует для векторов погрешности тонов на всех струнах, относящихся к *i*–му и *i* + *k*-му ладам. Результат соответствующих вычислений подтверждает качественное расположение ладов и верную тонкомпенсацию на нижнем порожке. Кроме того, он свидетельствует о низком качестве верхнего порожка и влиянии неоднородности используемых струн, заметной на длине в несколько (3-4 для верхних) ладов.

Существенно, что плохая 4-я струна не портит системной статистики этого МИ, отображенной на рис. 3-5. Это означает, что улучшить звучание инструмента можно, заменив ее более качественной.

Наконец, важной характеристикой МИ, средний коэффициент повышения частоты при переходе к следующему тону. Его погрешность для данного МИ не превышает одного цента для всех струн.

В завершение анализа рассмотрим функцию распределения для погрешности тона самой плохой струны (4-й). Анализ показал, что функция распределения погрешности тонов плохой (4-й) струны существенно отличается от гауссовой (асимметрия -0,45 и эксцесс 2,77). Кроме того, слишком велики как разброс, так и средняя погрешность тона. Аналогично слишком широким, и вдобавок неправильным (асимметрия 0,75, эксцесс – 6,9) является распределение стабильности тонов для этой струны. Отмеченное обстоятельство диктует необходимость ее замены.

Таким образом, формальный математический анализ тонового спектра гитары выявил ее главные дефекты – некачественные (4-я) струна и верхний порожек. Их устранение не сложно.

Решением обратной задачи о колебаниях неоднородной толстой струны, установлено, что отклонение плотности 4-й струны от однородного имеет на верхних ладах систематический характер и достигает –10 центов/лад. Эта неприемлемая величина соответствует физической неоднородности примерно в 0.002/см длины струны.

Таким образом, предлагаемые методы математического анализа строя гитар позволяют успешно дефектовать как инструменты, так и используемые струны. Практическая программная реализация оригинальных вычислительных алгоритмов (отрабатывались в MS Excel) позволит внедрить разработку в состав информационно-диагностического комплекса по отбраковке, дефектовке и настройке гитар в условиях реального производства. Определенным (социального плана) недостатком разработки видится возможность сократить рабочие места для высококвалифицированных работников с профессионально хорошим или даже абсолютным слухом – настройщиков и мастеров по ремонту МИ.

Список литературы: 1. The Concise Oxford Dictionary. Allen, R.E., ed. 1992. Clarendon Press. Oxford: 781. **2.** Натуральный строй: https://ru.wikipedia.org/ wiki/ Натуральный строй. **3.** Равномерно темперированный строй: https://ru.wikipedia.org/wiki/Равномерно темперированный строй. **4.** Благая А. «Правильное» Ля // http:// blagaya.ru/ skripka/ violin_azbuka/la. **5.** Порвенков В.Г. Акустика и настройка музыкальных инструментов. М.: Музыка, 1990. **6.** gStrings – хроматический тюнер и камертон для Android: http://android4all.ru/soft/instruments/64-gstrings-android. **7.** Устройство акустической гитары: http://dreamguitars.ru/stati/stati-o-gitare/ustrojstvo-akusticheskoj-gitary.html. **8.** Компенсация строя гитар по Rauli Parkkali: http://www.lute.ru/guitar /article_compensacia.html.

РЕГУЛЯРНЫЙ И БИОИНСТИРИРОВАННЫЙ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ В РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗАХ

Ладоша Е.Н., Холодова С.Н., Цымбалов Д.С., Яценко О.В. *(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)*
Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

Abstract: *An original computer program for calculations of chemical equilibrium in reacting gases is developed. It combines two different algorithms to minimize chemical potentials. The first one is based on gradient down-shift, the second on stochastic Monte-Carlo testing. Both algorithms are compared successfully with the reliable known analog. The elaboration enables to reproduce chemical composition of complex multi-component gases, which are interesting in different applications.*

Вследствие сложности взаимодействия техносферных объектов с окружающими и контактными газовыми средами соответствующие информационные модели остро нуждаются в повышении разрешающей способности. К новым тенденциям в проблемном *вычислительном эксперименте* (ВЭ) следует отнести широкое внедрение генераторов *предметных моделей повышенной подробности БАНКОН, АВОГАДРО, КИНКАТ, NERCHEM, FLUID, EFD.LAB, MACRON, KIVA II, CHEMKIN* в расчеты химического состава газообразных сред. Перечисленные информационные средства кардинально расширяют возможности ВЭ в части прогнозирования и оптимизации взаимодействия технических объектов с химически активными контактными газами. Поэтому целью данной работы ставилось *создание эффективных информационных средств для расчета равновесного состава многокомпонентных активных газов*.

В созданном авторами программном продукте реализованы два альтернативных алгоритма. Первый представляет собой вариант градиентного спуска, а второй» является генетической» разновидностью эволюционных.

Модельным объектом исследования разработанных вычислительных алгоритмов служит смесь углеводородов CH_4, C_2H_2 и образующих веществ C, H и H_2. Выбранная химическая система, с одной стороны, достаточно проста, а, с другой, представляет интерес для технической экологии и нефтехимии.

В диапазоне практически интересных параметров (температура, давление) физической моделью объекта служит идеальный газ (внутренняя энергия определяется исключительно кинетической энергией частиц), а химической – равновесие.

Химический потенциал j-го компонента идеального газа определяется формулой:

$$G_j = g_j + R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P \cdot v_j}{\sigma}\right), \qquad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; P – общее давление смеси; $v = (v_1,..,v_n)$ и σ – соответственно число молей j-го компонента и смеси в целом. Формула (1) справедлива для идеальных термодинамических систем.

Поскольку устойчивые равновесные состояния характеризуются, как правило, минимальной энергией, то получаем известную модель *Гиббса – Гельмгольца*, состоящую в минимизации термохимического функционала:

$$G = \sum_j \left[g_j + RT\left(\ln\left(\frac{P v_j}{\sigma}\right)\right)\right] \to \min \qquad (2)$$

при ограничениях, отражающих (поэлементное) сохранение вещества:

$$A \cdot \boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_a = 0\ , \qquad (3)$$

где $A = \{a_{i,j}\}$ – матрица размера $m \times n$, определяющая содержание элементов в компонентах системы; $\boldsymbol{v}_a = (v_{a1},..., v_{am})$ – вектор числа молей *i*-го элемента, $\boldsymbol{v} = (v_1,...,v_n)$ – вектор числа молей *j*-го компонента смеси.

Особенность модели (2)-(3) в том, что исходными данными служит вектор параметров, характеризующий физико-химические свойства всех веществ в системе. Это вектор $\boldsymbol{v}_a$ и характеристики вещества α_j и g_j. Выбор ведущих веществ и реакций важен для сходимости вычислений. Он не слишком сложен для изученных процессов, но проблематичен для систем, исследуемых впервые. Однако именно такие процессы актуальны для термодинамического анализа. Поэтому в модели часто включают компоненты с некоторой избыточностью, что повышает размерность подлежащей минимизации функции (2)-(3).

Отметим также, что наряду с методами прямой условной минимизации термохимического потенциала системы (2)-(3), существует *метод констант равновесия*, основанный на составлении системы уравнений частичного равновесия – между отдельными веществами. Этот метод, однако, более чувствителен к выбору химического базиса и начального приближения, поэтому его практическое применение для многокомпонентных систем ограничено.

Запишем модель в удобной для минимизации постановке, зафиксировав температуру *T,* давление *P* и начальный состав системы:

$$G = \sum_j \frac{m_j}{\mu_j} \cdot \left[g_j + RT\left(\ln(M \cdot P) + \ln\left(\frac{m_j}{\mu_j} \right) \right) \right] \to \min, \tag{4}$$

$$\alpha \cdot \boldsymbol{m} - \boldsymbol{m}_a = 0, \tag{5}$$

$$m_j \geq m_{\min_j}, \tag{6}$$

где $\alpha = \{\alpha_{i,j}\}$ – массовая доля атомов *i*-го сорта в компоненте *j*; $\boldsymbol{m} = \{m_j\}$ – вектор масс компонентов; $m_{\min_j} \geq 0$ – минимальная масса *j*-ого компонента; $\boldsymbol{m}_a = \{m_{a_i}\}$ – вектор масс атомов сорта; μ_j и g_j – соответственно молярная масса *j*-ого компонента и его химический потенциал; *M* и *P* – общие масса и давление соответственно.

В первом приближении

$$g_j(T) = H_j + C_{p_j}(T - 298) - T(S_j + C_{p_j} \ln T / 298), \tag{7}$$

где H_j, C_{p_j}, S_j – соответственно энтальпия образования, теплоемкость при постоянном давлении и энтропия *j*-ого компонента при T = 298 K.

Для решения задачи (4)-(7) применяются как *регулярные* (линеаризация, линейное программирование, квадратичная аппроксимация) [1], так и *стохастические* [2] методы. Описанные в следующем разделе эти методы обладают как несомненными достоинствами, так и серьезными недостатками. Повысить *робастность* вычислительных алгоритмов применительно к задаче (11)-(14) позволяет комбинирование регулярного и стохастического подходов, реализованное в генетическом и прочих эволюционных алгоритмах [3].

Авторами отработаны два алгоритма решения задачи (4)-(6) для системы газифицированных веществ C – H – H_2 – CH_4 – C_2H_2. Математическая модель термодинамического равновесия для этой системы конкретизуется следующим образом:

$$G(P,T)=\sum_j e^{c_j}[g_j(T)+RT\ln(\frac{e^{c_j}}{\sum_j e^{c_j}}\cdot P)]\to \min, \quad (8)$$

$$g_j(T)=H_j(T_0)+C_{Pj}(T-T_0)-C_{Pj}\ln\frac{T}{T_0}-S_j(T-T_0)\ , \quad (9)$$

$$n_j=e^{c_j}, \qquad \sum_j n_j=\sum_j e^{c_j}=n\ , \qquad j=\{C,\ H,\ H_2,\ CH_4,\ C_2H_2\}, \quad (10)$$

$$\alpha \boldsymbol{n}=\beta\ . \quad (11)$$

В формулах (8)-(11) $g_j(T)$ – термохимический потенциал компонента, $H_j(T_0)$ – энтальпия образования компонента в стандартных условиях (при 298 К); C_{Pj} и S_j – молярные теплоемкость и энтропия компонента; n_j – молярная концентрация компонента; c_i – новая переменная, призванная исключить отрицательные концентрации в смеси α – матрица содержания составляющих вещества элементов (углерода С и водорода Н) в компонентах смеси; β – общее количество элементов. Использованные числовые параметры модели приведены в табл. 1-2.

Таблица 1. Термохимические параметры составляющих систему веществ

Вещество / Параметр	C	H	H_2	CH_4	C_2H_2
$H_j(T_0)$, ккал/моль	171.7	52.1	0	–17.86	54.2
C_{Pj}, кал/моль·К	4.98	4.97	7.0	8.37	10.5
S_j, кал/моль·К	37.8	27.4	31.2	44.44	48.0

Таблица 2. Содержание элементов в веществах, выраженное числом атомов, – матрица α в (11)

Вещество / Элемент	C	H	H_2	CH_4	C_2H_2
C	1	0	0	1	2
H	0	1	2	4	2

Система С – Н – H_2 – CH_4 – C_2H_2 моделировалась при различных температурах и давлении. Эта система актуальна при анализе содержания углеводородов в отработавших газах автотранспорта. В ней критичным компонентом является ацетилен C_2H_2 – источник крайне канцерогенного бенз(а)пирена $C_{20}H_{12}$.

В качестве тестовых вычислительных систем использовалась онлайн-программа «Chemical Equilibrium Calculation», (http://navier.engr.colostate.edu/ tools/ equil.html) и генетический алгоритм, разработанный в Донском государственном техническом университете.

Рассматривались два варианта термодинамических параметров: в первом температура смеси С – Н – H_2 – CH_4 – C_2H_2 составляет 300 °С, давление – 1 атмосферу, во втором – температура 3000 °С, давление – 1 атм. Результаты расчетов приведены на рис. и в табл. 3.

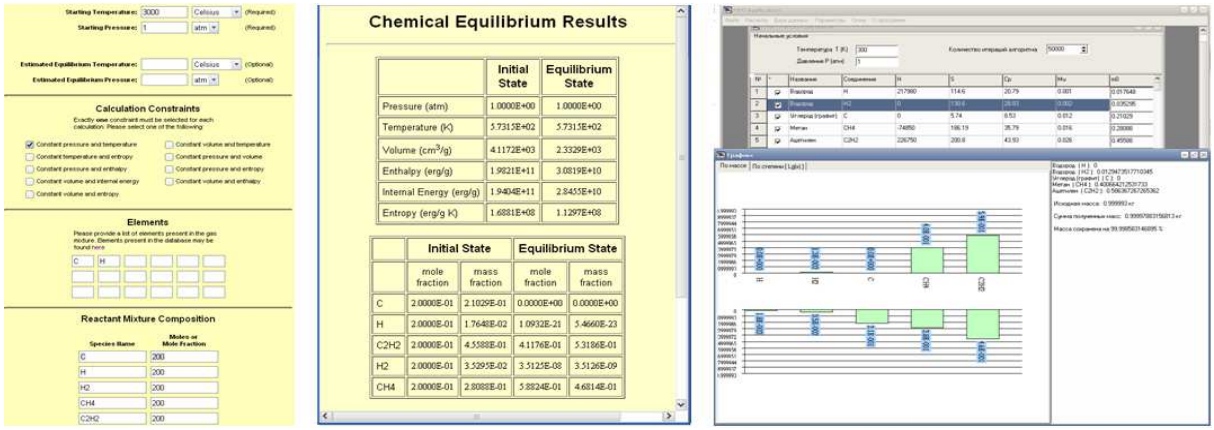


Рис. 1. Задача о химическом равновесии в пакете ChemicalEquilibriumCalculations (слева) и согласно оригинальному генетическому алгоритму (справа): температура 300 °C, давление 1 атм

Таблица 3. Сопоставление результатов моделирования химического равновесия в системе $C – H – H_2 – CH_4 – C_2H_2$

Компонент	Данная разработка		CEC		Генетический алгоритм	
	T = 300 °C, P = 1 атм	T = 3000 °C, P = 1 атм	T = 300 °C, P = 1 атм	T = 3000 °C, P = 1 атм	T = 300 °C, P = 1 атм	T = 3000 °C, P = 1 атм
C	$1.74\cdot10^{-12}$	$2.24\cdot10^{-4}$	0	$1.42\cdot10^{-3}$	0	0
H	$2.52\cdot10^{-12}$	0.028	$1.1\cdot10^{-21}$	0.212	0	$0.101\cdot10^{-2}$
H_2	$1.1\cdot10^{-11}$	0.498	$3.51\cdot10^{-8}$	0.391	$1.29\cdot10^{-2}$	$7.64\cdot10^{-2}$
CH_4	0.588	0.038	0.588	$1.81\cdot10^{-5}$	$4.01\cdot10^{-1}$	$5.64\cdot10^{-2}$
C_2H_2	0.412	0.436	0.412	0.396	$5.86\cdot10^{-1}$	$8.66\cdot10^{-1}$

Сопоставление разработки с функциональными аналогами позволяет заключить, что реализованная авторами вычислительная модель позволяет оценивать химический состав равновесного многокомпонентного газа с точностью, превышающей точность разработанного ранее в ДГТУ генетического алгоритма.

Результаты выполненных авторами исследований сводятся к следующему:

- с использованием методов прикладной математики разработаны математический аппарат и программные средства моделирования химического равновесия в многокомпонентных реагирующих газах;
- разработка верифицирована путем сопоставления с зарубежным аналогом;
- как возможные технические приложения результатов работы указано моделирование физико-химического воздействия технических систем на окружающую среду
- перспективным направлением совершенствования разработки видится существенное повышение «химического разрешения».

Список литературы: 1. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Математическое программирование. Теория, алгоритмы, программы. – Самара: РИЦ «Гольфстрим», 2007. – 222 с. **2.** Методы оптимизации (базовый курс): http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/base.cou. **3.** Панченко, Т. В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / под ред. Ю. Ю. Тарасевича. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.

НЕОБХОДИМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Лапаева И.В., Горобец И.А.
(ГОУ ВПО «ДонНТУ», г. Донецк)
E-mail: iren.vit@mail.ru

Abstract: *The article deals with employers' wishes for the future specialists' skills. The analysis of changes in the employers' demands for the required specialists' skills is carried out. An analysis over of the required skills of specialists is brought.*
Key words: *skills, competenses, specialist, abilities, employer, analysis.*

Основными источниками роста экономических показателей государства являются: «новые частные компании», занятость в малом и среднем бизнесе, международные компании, а также рост участия государственных компаний и компаний с государственным участием [1]. Исследованиями акцентируется доля сегмента малого и среднего бизнеса: для РФ - 16% занятых в основном в базовых, некапиталоёмких отраслях (торговля, частный извоз и т. п.), в Индии она составляет 40%, Бразилии – 52%, Китае – 80%, Германии – 63%, США – 46%. При этом отмечается, что от 9 до 50% всех ныне существующих профессий могут исчезнуть в ближайшее десятилетие по причине цифровизации экономики, а 19% всех рабочих могут быть замещены роботами на 81% [1].

Тренд развития экономики к 2025 году обусловил беспокойства работодателей. В 2013 году в Европе 40% работодателей сообщили, что им трудно найти людей с необходимыми компетенциями. Этот дефицит был наиболее распространен в производственном секторе. Работодатели активно обсуждают набор компетенций квалифицированных специалистов. Большинство работодателей отмечают важность подготовки специалистов с определенным перечнем навыков, так называемыми гибкими навыками (англ.soft skills). Таким образом, «гибкие навыки» — это комплекс неспециализированных надпрофессиональных навыков, которые отвечают за успешное участие в рабочем процессе и высокую производительность. Это многоцелевые навыки, которые важны вне зависимости от профессии и сферы.

Отчет Форума «Будущее рабочих мест» [2] прогнозирует тенденцию изменений более трети навыков, которые будут считаться важными в современной квалифицированной силе к 2020 году. Среди этих навыков важными будут те, которые дают специалистам преимущества над машинами. К ним относятся критическое мышление и способность к творчеству.

Анализ существующих навыков и прогнозируемых к востребованию в 2020 году подчеркивает изменение вектора бизнес модели, связанной с изменениями в условиях глобализации промышленного сектора из-за отсутствия необходимой динамики экономического развития. Анализ работы Форума показывает, что модель, принятая с введением глобализации и требующая в приоритете управленческие и коммуникативные навыки, не показала достаточного экономического прироста в бизнесе. Более того, такая модель привела к некоторому застою развития бизнеса и к увеличению популизма в обществе и бизнесе. В результате такого популизма увеличивается вербальная составляющая, не приводящая к приросту продуктивных идей.

В связи с этим современные идеи руководителей бизнеса сложились в новую концепцию иерархии топ-10 навыков специалистов, которые будут к 2020 году наиболее необходимы (см.табл.1) [5]. К таким навыкам относятся: креативность (+ 7 позиций прироста в десятке приоритетных навыков) и умение критически мыслить (+ 2 позиции). Именно такие навыки станут наиболее привлекательными для работодателей, в сравнении с умением управлять персоналом (4 место, -1 позиция) и умением работать

в команде (5 место, -3 позиции). Работодателей также будет интересовать наличие у специалистов новых навыков, таких как эмоциональный интеллект (6 место в рейтинге) и когнитивная гибкость (10 место в рейтинге). Вместе с тем, приоритет умения вести переговоры сместился на 4 позиции (с 5 на 9 место в рейтинге).

Таблица 1. Ранжирование приоритетных навыков специалистов [5]

№	НАВЫКИ	Место в рейтинге	
		2015 год	**2020 год**
1	Умение решать сложные проблемы	1	1
2	Умение работать в команде	2	5
3	Умение управления персоналом	3	4
4	Критическое мышление	4	2
5	Умение вести переговоры	5	9
6	Умение контролировать качество товаров или услуг	6	-
7	Ориентирование на сервисное обслуживание	7	8
8	Умение рассуждать и принимать решения	8	7
9	Обладание техникой «активного слушания»	9	-
10	Креативность	10	3
11	Эмоциональный интеллект	-	6
12	Когнитивная гибкость	-	10

Навык активного слушания сменяется необходимостью обладания эмоциональным интеллектом, и этот навык будет наиболее актуален (6 позиция). Активное слушание (эмпатическое слушание) - это техника, позволяющая точнее понимать психологические состояния, мысли и чувства собеседника с помощью особых приемов участия в беседе, подразумевающих активное выражение собственных переживаний и соображений. Под эмоциональным интеллектом (англ. emotional intelligence) понимается способность человека распознавать эмоции, понимать намерения, мотивацию и желания других людей и свои собственные, а также способность управлять своими эмоциями и эмоциями других людей в целях решения практических задач [3]. Успешные люди способны к эффективному взаимодействию с другими людьми, основанному на эмоциональных связях, и к эффективному управлению своими собственными эмоциями. По определению С. Дж. Стейна и Говарда Бука, эмоциональный интеллект «является способностью правильно истолковывать обстановку и оказывать на неё влияние, интуитивно улавливать то, чего хотят и в чём нуждаются другие люди, знать их сильные и слабые стороны, не поддаваться стрессу и быть обаятельным» [5]. Когнитивная гибкость (англ. cognitive flexibility) – это умственная способность переключаться с одной мысли на другую, а также обдумывать несколько вещей одновременно, также будет востребована в условиях четвертой промышленной революции [4].

Международная компания The Boston Consulting Group, специализирующаяся на управленческом консалтинге, провела опрос российских работодателей, ставивший целью сбор мнений о приоритетах и задачах компании в перспективе до 2025 года, планах и барьерах для развития, изменениях в штатной численности и категориях занятых,

ожиданиях от сотрудников и требованиях к ним. Опрос позволил сформировать видение влияния глобальных трендов и текущих реалий на образ будущего рынка труда в России. Для дальнейшего успешного развития бизнеса России требуется не столько денежный, сколько качественный человеческий капитал. В производстве человеческого капитала, принципиальным становится акцент на «гибкие» навыки [1].

Современные требования зарубежного и отечественного бизнеса к умениям и навыкам будущих инженеров вызывают необходимость реформирования современного процесса обучения в образовательных учреждениях. Именно эти факторы побудили авторов статьи рассмотреть новые варианты процесса обучения, позволяющие формировать запрашиваемые бизнесом умения и навыки студентов.

Список литературы: 1. Россия 2025: от кадров к талантам/ Доклад международной компании The Boston Consulting Group – М.: 2017 – 70с. http://worldskills.ru/assets/docs/media/Skills_Outline_web_tcm27-175469.pdf. **2.** Будущее рабочих мест. Глобальный отчет о проделанной работе [Электронный ресурс] // World economic forum: Всемирный экономический форум. - Режим доступа: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs.pdf (дата обращения: 30.04.2017). **3.** Гоулман, Д. Эмоциональный интеллект / Дэниел Гоулман [перев. с англ. А.П. Исаевой]. - М.: АСТ МОСКВА; Владимир: ВКТ, 2009. - 478 с. **4.** These countries are facing the greatest skills shortages. The World Ecoonomic Forum (сайт). [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.weforum.org/agenda/2016/07/countries-facing-greatest-skills-shortages?utm_content (дата обращения 30.09.2017). **5.** Лапаева, И.В. Исследование изменений необходимых навыков современных высококвалифицированных специалистов / И.В. Лапаева, О.Г. Каверина, И.А.Горобец // Актуальные проблемы экономики и управления: теоретические и прикладные аспекты [Электронный ресурс]: материалы Третьей международной научно-практической конференции, г. Горловка, 30 марта 2018 г. / отв. ред. Е.П. Мельникова / Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «ДонНТУ». – Горловка: АДИ ДонНТУ, 2018 – с.522-528.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ

Лахин А.М., Михедова Н.В., Дьяченко Е.А. *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
E-mail:lelax@mail.ru

Abstract: *In the work, a planetary table was designed to place the blanks in a vacuum chamber, which allows to increase the performance of the coating by increasing the load on the vacuum chamber.*

Keyword: *Gear, coating, productiveness, quality*

Одним из сдерживающих факторов, ограничивающих производительность нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на различные изделия, является конструкция устройства для размещения заготовок в вакуумной камере, в которой заготовки размещаются на планетарном столе, сосредотачиваясь на наружной части стола [1]. Так, например, установка ННВ 6.6-И1 в исходном состоянии имеет такую конструкцию планетарного стола (рис.1), в которой заготовки размещаются в один ряд, при этом середина стола остается пустой, что ограничивает производительность нанесения покрытия.

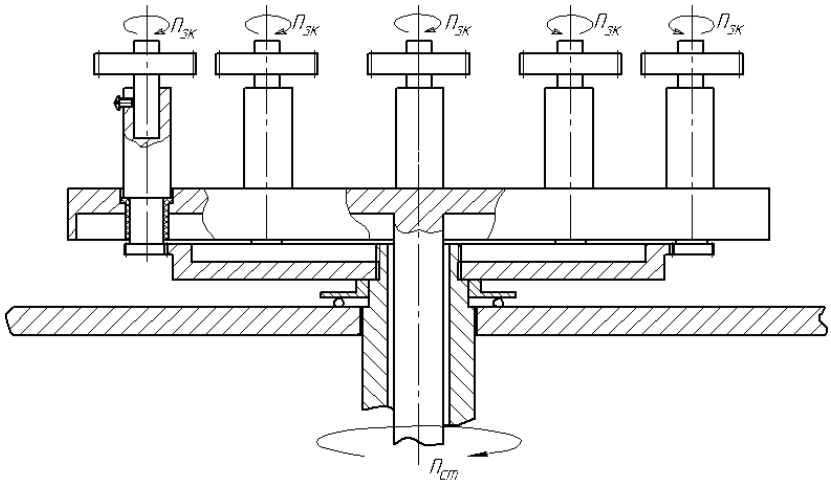


Рис.1. Конструкция планетарного стола установки ННВ 6.6-И1

Кроме того для заготовок деталей типа зубчатых колес, имеющих зубчатые венцы значительно большего диаметра чем отверстие или шейки валов-шестерен, часть позиций для размещения заготовок на столе будет заблокировано, так как они будут находиться под зубчатыми венцами.

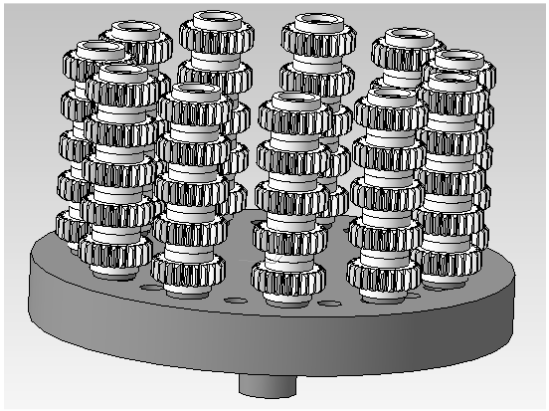


Рис.2. Размещение зубчатых колес на оправках пакетами

Повышения вместимости планетарного стола можно достичь за счет размещения зубчатых колес с отверстиями на оправках пакетами по несколько штук, на сколько позволяет высота рабочего пространства вакуумной камеры (рис. 2).

Однако такой вариант применим для ограниченной номенклатуры и типов зубчатых колес, и не позволяет устанавливать, к примеру, валы-шестерни.

Рациональным вариантом является модернизация конструкции планетарного стола, и установка заготовок в несколько рядов. Рассмотрим следующие варианты размещения зубчатых колес [2] (рис.3).

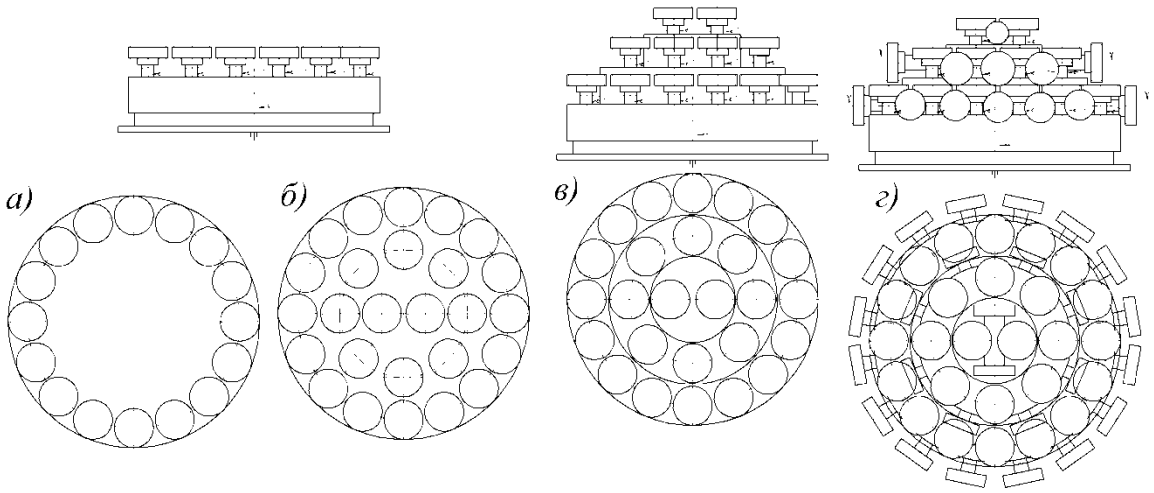


Рис. 3 - Варианты размещения заготовок в процессе нанесения покрытий

На этом рисунке представлены следующие способы размещения заготовок:

- одноуровневое с заполнением заготовок либо только по периферии в один ряд (рис. 3, а). Данный вариант обеспечивает наименьшую производительность нанесения покрытия;
- одноуровневое многорядное, с размещением заготовок по всей площади окружности (рис. 3, б). В этом случае более рационально используется рабочее пространство вакуумной камеры, однако во внутренних рядах возможно возникновение теневых зон;
- многоуровневое, с размещением заготовок на каждом уровне, и параллельным положением осей заготовок (рис. 3, в). В этом случае заготовки располагаются более рационально по отношению к плазменным потокам;
- многоуровневое, со скрещивающимися осями дополнительных заготовок, расположенных в промежутках между заготовками с вертикальной осью вращения (рис. 3, г). Представляет наибольшее заполнение вакуумной камеры.

Из представленных вариантов наиболее простым в реализации, в то же время увеличивающим производительность нанесения покрытия является второй вариант (рис.3,в). Причем возникновение теневых зон можно исключить за счет установки заготовок разной высоты соседние ряды. Для заготовок одного типоразмера можно использовать переходные оправки, увеличивающие высоту заготовки относительно плоскости стола.

В данной работе предложена конструкция такого планетарного стола (рис. 4).

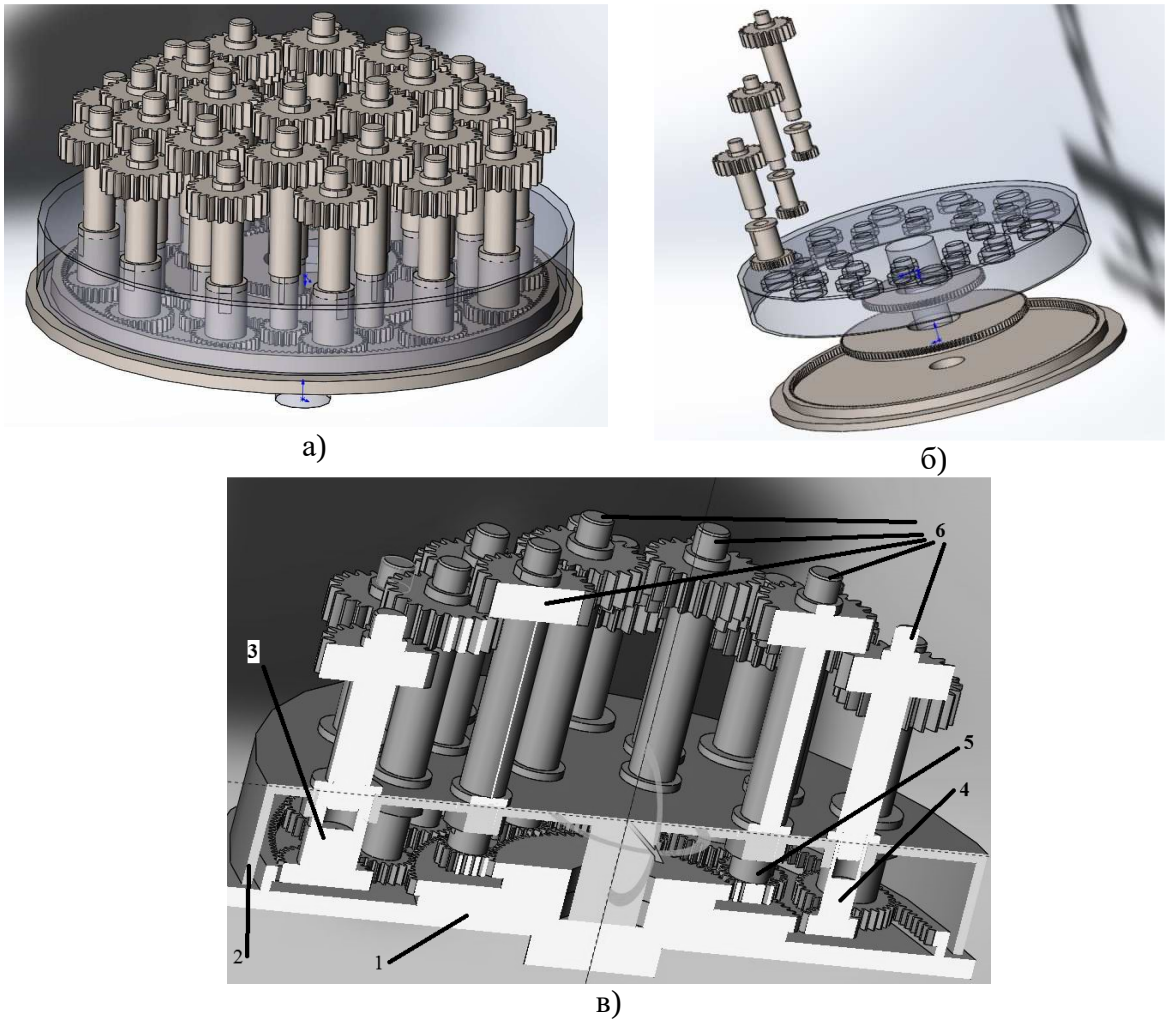


Рис. 4. Конструкция трехрядного планетарного стола

Устройство планетарного стола (рис. 4, в) представляет собой корпус 1, соединенный с колесом внутреннего зацепления, и двух зубчатых колес привода второго и третьего рядов. Сверху на корпусе установлен кожух-водило 2 выполненный заодно с центральным валом. В кожухе выполнено 3 ряда отверстий: 2 ряда по 12 отверстий и один ряд 8 отверстий. В отверстия кожуха запрессованы подшипники скольжения, на которые опираются приводные шестерни сателлиты привода наружного 3, среднего 4, и внутреннего рядов заготовок 5. Для удержания шестерен сателлитов в осевом направлении предусмотрены гайки, которые не позволяют шестерням-сателлитам 6 упасть вниз, и которые застопорены от вывинчивания в процессе работы механизма. Центральный вал кожуха с помощью муфты связан с приводом планетарного стола и при передаче движения на данный вал, кожух начинает вращаться. Шестерни-сателлиты, входящие в зацепление с неподвижными зубчатыми колесами корпуса, начинают свободно вращаться вокруг своей оси, одновременно с круговым движением относительно центральной оси кожуха. Размещение заготовок соседних рядов на разной высоте обеспечивает открытость их зубчатых венцов к плазменным потокам а постоянное вращение заготовок препятствует образованию теневых зон.

Производительность нанесения покрытий для исходной конструкции планетарного стола:

$$П_ц = \frac{12}{t_p + t_x}$$

Для разработанного варианта конструкции планетарного стола производительность составляет:

$$П_ц = \frac{32}{t_p + t_x},$$

где t_p – время рабочих ходов, мин;
t_x – время холостых ходов, мин.

Таким образом, разработанная конструкция, даже с учетом увеличения времени рабочих и холостых ходов вследствие увеличения массы заготовок и площади нанесения покрытий, обеспечивает более чем двукратный прирост производительности нанесения покрытия. Варьируя числом зубьев приводных шестерен можно задавать требуемые кинематические характеристики движения зубчатых колес в процессе нанесения покрытий.

Список литературы: 1. Внуков Ю.Н., Марков А.А., Лаврова Л.В., Бердышев Н.Ю. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент. – Киев, Тэхника, 1992. – 143 с. **2.** Лахин А.М., Михайлов А.Н., Недашковский А.П., Астапенков С.Г. Синтез структуры технологического преобразования элементов зубчатых колес на базе функционально-ориентированного подхода / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15-20 сентября 2008 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2008. Т. 2., С.35-39.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН НА ПОРШНЕ АВТОМОБИЛЯ

Лихачева Т.Е., Малахов А.Ю., Перекрестова В.А., Гагиев Х.В. *(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Россия, 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64)*
E-mail: t5329022@yandex.ru, malahov-alex@yandex.ru, laromadi@yandex.ru

Abstract. *The article shows the research of the piston material of a gasoline engine of a modern automobile. The piston received thermal cracks during exploitation. The material of the piston complies with current standards and requirements established in GOST R 53558-2009 "Automobile vehicles. Pistons aluminum engines. General technical requirements and test methods". Detected piston defects are operational in exploitation. Defects of the investigated piston are not related to the quality of the material from which it is made.*

Введение.

Двигатель внутреннего сгорания, предназначен для преобразования тепловой энергии сгорания топлива в механическую энергию. Различают следующие основные типы ДВС:

- поршневой двигатель внутреннего сгорания;
- роторно-поршневой двигатель внутреннего сгорания;
- газотурбинный двигатель внутреннего сгорания.

Из представленных типов двигателей самым распространенным является поршневой двигатель внутреннего сгорания.

В зависимости от способа воспламенения топливовоздушной смеси двигатели делятся на бензиновые с принудительным воспламенением и дизельные с воспламенением от сжатия.

Основное назначение системы смазывания современного поршневого двигателя внутреннего сгорания - смазывание трущихся поверхностей с целью уменьшения сил трения.

Кроме этого система смазывания также выполняет следующие функции:

- охлаждает трущиеся поверхности;
- удаляет продукты износа и нагара с трущихся поверхностей;
- обеспечивает защиту трущихся поверхностей от износа;
- обеспечивает работу дополнительных гидравлических исполнительных механизмов, установленных в двигателе.

Смазывание трущихся поверхностей осуществляется одним из следующих способов:

- смазка под давлением;
- смазка разбрызгиванием;
- смазка масляным туманом.

При разбрызгивании масла наряду с каплями создается мелкодисперсная фракция масла в виде масляного тумана, который оседает на детали двигателя, смазывая их и защищая от коррозии.

Так как одной из функций системы смазывания является охлаждение трущихся поверхностей, то в некоторых двигателях устанавливается масляный радиатор, который препятствует перегреву масла. В остальных случаях роль охладителя масла выполняет поддон картера двигателя.

Снижение уровня моторного масла в поддоне картера двигателя ниже допустимого уровня приводит к нарушению процесса смазывания трущихся деталей и возникновению механического трения, поэтому необходимо контролировать количество моторного масла в двигателе.

Во время работы двигателя внутреннего сгорания происходит большое выделение тепла (температура газов в камере сгорания в момент воспламенения смеси доходит до 2500^{o} С). При этом на нагрев деталей двигателя расходуется около 20-35 % энергии, выделяющейся при сгорании топлива, что увеличивает их температуру. Однако двигатель рассчитывается на рабочую температуру 80-95^{o} С, при которой достигаются оптимальные тепловые зазоры между деталями двигателя. Превышение рабочей температуры вызывает уменьшение тепловых зазоров вплоть до заклинивания деталей. Работа двигателя при пониженной рабочей температуре ухудшает топливную экономичность двигателя и уменьшает ресурс работы двигателя. С целью исключения указанных явлений двигатель оснащается системой охлаждения.

Система охлаждения предназначена для поддержания оптимального теплового режима двигателя путем регулируемого отвода теплоты от наиболее нагревающихся деталей.

На современных автомобилях система охлаждения, помимо основной функции, выполняет ряд других функций, в том числе:

• нагрев воздуха в системе отопления, вентиляции и кондиционирования;
• охлаждение масла в системе смазки;
• охлаждение отработавших газов в системе рециркуляции отработавших газов;
• охлаждение воздуха в системе турбонаддува;
• охлаждение рабочей жидкости в автоматической коробке передач.

В зависимости от способа охлаждения различают следующие виды систем охлаждения:

• жидкостная;
• воздушная.

Процесс воспламенения может быть нарушен различными воздействиями, что можно обобщить, в основном, в виде двух совершенно разных случаев нарушений режима сгорания:

1. Калильное зажигание (преждевременное воспламенение): оно приводит к термической перегрузке поршня.

2. Детонационное зажигание: оно приводит к эрозионному съему материала и к механической перегрузке на поршне и на кривошипно-шатунном механизме.

При калильном зажигании воспламенение начинается раскаленной деталью в камере сгорания уже до самого момента зажигания. Это может быть горячий выпускной клапан, свеча зажигания, детали уплотнения и отложения на названных деталях и поверхностях, находящихся вокруг камеры сгорания. У дизельных двигателей причиной калильного зажигания может являться утечка топлива из топливных форсунок. При калильном зажигании пламя воздействует на конструктивные элементы неконтролируемо, в результате чего температура в днище поршня очень сильно повышается, достигая при продолжающемся калильном зажигании уже в течение нескольких секунд точки плавления материала поршня.

При детонационном воспламенении зажигание обычно начинается искрой свечи зажигания или впрыскиванием топлива. Распространяющееся от свечи зажигания пламя создает волну давления, вызывающую в несгоревшем газе критические реакции. В связи с этим в рабочей смеси во многих местах одновременно возникает самовоспламенение. Скорость сгорания возрастает в 10 – 15 раз. Рост давления на градус угла поворота коленчатого вала и пиковые значения давления существенно повышаются. Кроме того, в ходе расширения образуются высокочастотные колебания давления.

Детали в камере сгорания (например, свеча зажигания) могут при этом настолько сильно нагреться, что это приводит к калильному зажиганию (преждевременное воспламенение) с термической перегрузкой поршня.

Исследование.

Проводилось исследование поршня четвертого цилиндра с трещинами по краям камеры сгорания.

На исследуемом двигателе установлена система подачи топлива «common rail», в которой дозирование подаваемого в цилиндры двигателя топлива осуществляется по командам электронного блока управления.

Проверка топливных форсунок на специализированном стенде для проверки элементов топливной системы «common rail» показала, что топливные форсунки третьего и четвертого цилиндров неисправны, имеют пониженное время отклика на управляющий сигнал при работе двигателя на средних нагрузках. Наличие заниженного отклика на управляющий сигнал приводит к нарушению цикловой подачи в эти цилиндры. Нарушение цикловой подачи приводит к нарушению процесса сгорания в цилиндрах двигателя, что приводит к уменьшению количества отработанных газов и снижению эффективности турбонаддува. Снижение эффективности турбонаддува приводит к уменьшению количества подаваемого в цилиндры двигателя воздуха, что еще больше нарушает процесс смесеобразования и сгорания топлива. В конечном счете, это приводит к возникновению в цилиндрах двигателя температур, превышающих допустимые. Наличие температур, превышающих допустимые, приводит к термической перегрузке поршней и головки блока цилиндров в первую очередь.

Неисправности системы охлаждения двигателя не выявлено. Кроме того, характер выявленных дефектов деталей не характерен для перегрева двигателя при неисправной системе охлаждения двигателя.

Поэтому перегрев двигателя из-за неисправности системы охлаждения можно исключить.

Осмотр форсунок подачи масла на днище поршня для его охлаждения показал, что форсунки исправны.

Наличие термической перегрузки приводит к растрескиванию поршней, образованию задиров по краю юбки поршня, деформации плоскости прилегания головки блока цилиндров.

Пониженное время отклика топливных форсунок при длительных пробегах автомобиля возникает под воздействием некачественного топлива, что имеет эксплуатационную причину. При осмотре деталей двигателя были выявлены только незначительные механические повреждения трущихся поверхностей, смазываемых под давлением: коренные и шатунные вкладыши коленчатого вала, опоры шеек распределительных валов, опорные шейки распределительных валов, при этом характер повреждений свидетельствует о работе двигателя с недостаточным количеством моторного масла. Причиной повреждения поршня четвертого цилиндра является термическая перегрузка в результате нарушения процесса смесеобразования и сгорания топливовоздушной смеси.

Рис. 1. Трещины на днище исследуемого поршня

В исследовательской части стояла задача определить соответствует ли материал, из которого изготовлен поршень, действующим нормам и требованиям, установленных для изготовления запасных частей (компонентов)

автотранспортных средств.

Было произведено лабораторное исследование поршня 4-го цилиндра ДВС автомобиля Ford Transit. На днище и жаровом поясе исследуемого поршня присутствует большое количество углеводородных отложений. На юбке поршня имеются задиры, свидетельствующие о перегреве поршня. На днище поршня имеются три трещины, (рис.1). Трещины на днище поршня распространяются от камеры сгорания в сторону наружного диаметра поршня, и каждая из трех трещин располагается на границе следа от распыла топлива топливной форсункой. Стоит отметить, что все три трещины сосредоточены в зоне с наименьшим количеством углеводородных отложений на днище поршня. Локальное отсутствие большого количества отложений на днище поршня объясняется локальным повышением температуры в данной зоне.

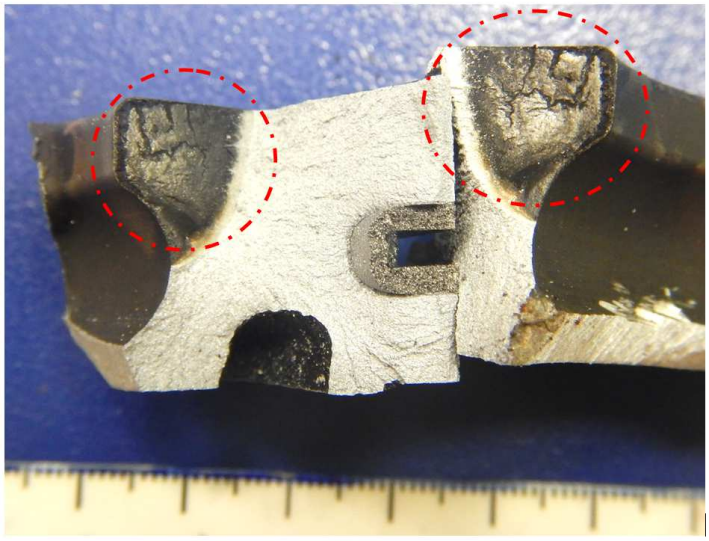


Рис. 2. Поверхность излома после раскрытия трещин в исследуемом поршне. Темная зона – поверхность излома термической трещины. Светлая зона – поверхность излома, образовавшаяся в процессе раскрытия трещины (зона долома)

С целью исследования поверхности излома, было произведено раскрытие трещин. В процессе исследования поверхности излома было установлено, что очаг разрушения находится на днище поршня со стороны камеры сгорания, по характеру возникновения трещина является термической (рис. 2). Термические трещины в поршнях ДВС образуются из-за локального или общего перегрева днища поршня. В процессе исследования поверхности излома при помощи бинокулярного микроскопа МБС-10, до и после очистки поверхности из-

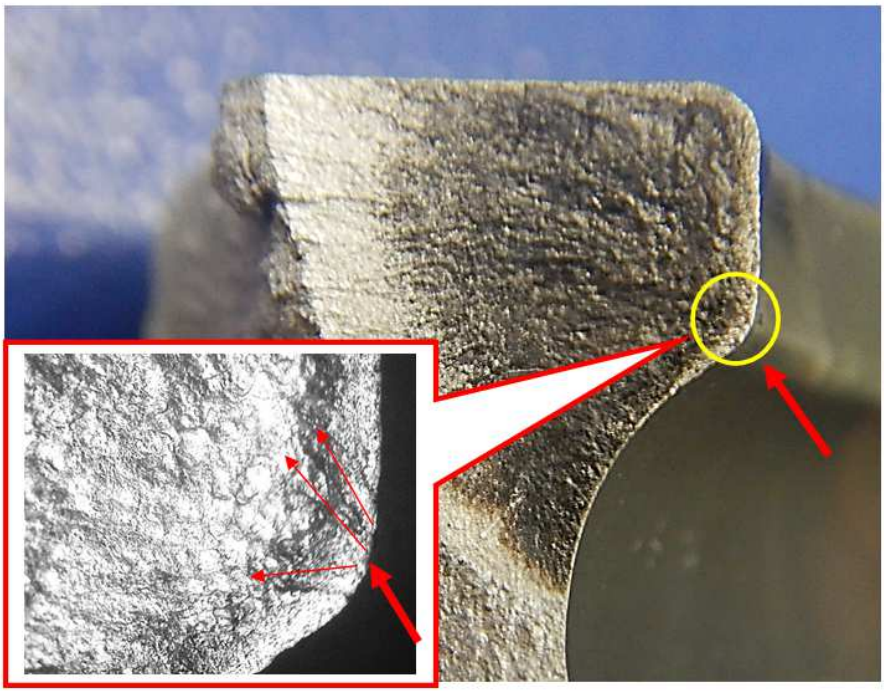


Рис. 3. Поверхность излома после раскрытия трещин в исследуемом поршне. Стрелкой указан очаг разрушения

лома, металлургических дефектов в виде пор, раковин, крупных неметаллических включений установлено не было.

С целью микроструктурного анализа и определения химического состава материала исследуемых поршней от них были отрезаны фрагменты для анализа и изготовления микрошлифов.

Химический состав **%** материала поршня представлен в Таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав, [%].

Mg	**Si**	**Mn**	**Fe**	**Zn**	**Cr**	**Ni**
0,70	12,05	0,07	0,48	0,014	<0,01	2,6
Cu	**Sn**	**Ti**	**V**	**Pb**	**Zr**	**Al**
3,9	<0,01	0,04	0,055	<0,01	0,055	основа

Поршень по химическому составу близок к отечественному сплаву марки АК12М2МгН ГОСТ 1583-93 системы Al-Si-Cu с повышенным содержанием кремния, легированный никелем и медью для повышения жаропрочности.

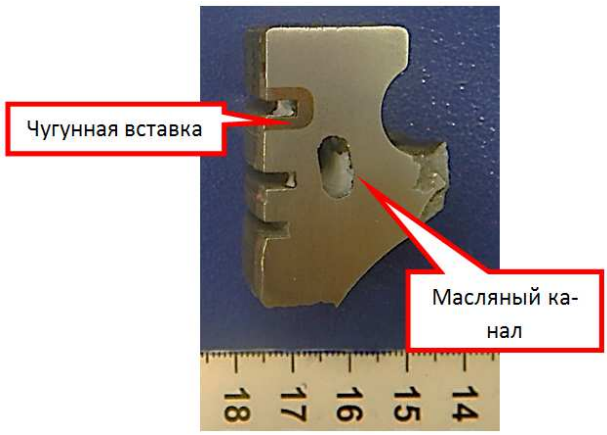


Рис. 4. Изготовленные микрошлифы из фрагментов исследуемого поршня

Содержание железа (вредная примесь, образующая хрупкие игольчатой формы соединения) находится в допуске в соответствии с ГОСТ 1583-93.

Изготовленные микрошлифы из фрагментов поршня показаны на рис. 4.

Микроструктура сплава поршня представляет собой жаропрочный не модифицированный алюминиевый сплав системы Al – Si - Cu, и состоит из эвтектики и кристаллов кремния. Структура плотная, беспористая, (рис. 5). Из этих сплавов изготавливают поршни, головки цилиндров и другие детали.

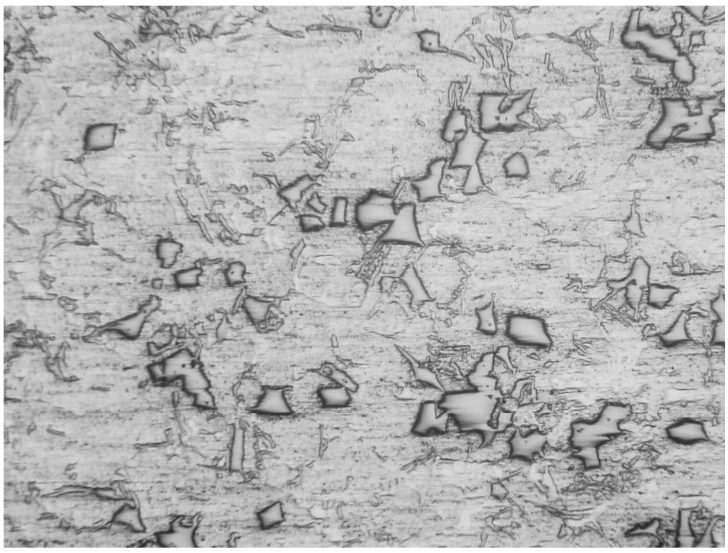


Рис. 5. Микроструктура исследуемого поршня. Увеличение х 250 раз

Микроструктура чугунной вставки поршня до травления представляет собой чугун с пластинчатой формой графита (рис. 6). Металлическая основа чугунной вставки – аустенит.

Металлургических дефектов в материале поршня в виде пор, крупных неметаллических включений, усадочных раковин и других не установлено.

Измерение твердости на твердомере типа ТК-2М установило значения 108…110 НВ (60…62 HRB), что соответствует требованиям ГОСТ Р 53558-2009.

Разрушение поршня произошло от приложения термических перегрузок, превышающих предел прочности материала поршня.

Рис. 6. Микроструктура чугунной вставки поршня до травления
Увеличение х 250 раз

Из результатов исследования следует, что материал исследуемого поршня соответствует требованиям, установленным в ГОСТ Р 53558-2009 «Автомобильные транспортные средства. Поршни алюминиевые двигателей. Общие технические требования и методы испытаний».

По отношению к исследуемому поршню выявленные дефекты носят эксплуатационный характер. Дефекты исследуемого поршня не связаны с качеством материала, из которого он изготовлен.

Заключение.

Причина повреждений (трещины на днище) исследуемого поршня двигателя внутреннего сгорания носит эксплуатационный характер. Материал, из которого изготовлен поршень соответствует действующим нормам и требованиям, установленным в ГОСТ Р 53558-2009 «Автомобильные транспортные средства. Поршни алюминиевые двигателей. Общие технические требования и методы испытаний». Дефекты исследуемого поршня не связаны с качеством материала, из которого он изготовлен.

Список литературы: 1. Арзамасова Б.Н. Материаловедение / под общей редакцией Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. -М.: МГТУ им. Баумана, 2001. **2.** Бернд Вальдхауэр Повреждения поршней. Как выявить и устранить их. / Бернд Вальдхауэр, Уве Шиллинг и др. - Издатель: © MSI Motor Service International GmbH Untere Neckarsulm, Германия. **3.** Петрова Л.Г. Исследовательский комплекс для мониторинга структурного состояния конструкционных материалов и его применение при анализе разрушений стальных деталей автомобилей / Л.Г. Петрова, Т.Е. Лихачёва, А.Ю. Малахов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2013. – № 2. – с. 11-17. **4.** Шестопалова Л.П. Методы исследования материалов и деталей машин при проведении автотехнической экспертизы / Л.П. Шестопалова, Т.Е. Лихачев. - М.: МАДИ (ГТУ), 2017. **5.** Бернштейн М.Л. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник. М.Л. Бернштейн, Москва ”Металлургия”, 1982. **6.** ГОСТ 1583-93 «Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия». **7.** ГОСТ 30620-98 «Сплавы алюминиевые для производства поршней. Технические условия». **8.** Садоха М.А. Особенности алитирования нирезистовой вставки при производстве отливок поршней из алюминиевых сплавов / М. А. Садоха // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 (57). – С. 9 - 12. **9.** Майоров А.Л. Контроль качества сцепления нирезистовой вставки в отливках поршней дизельных двигателей. Литейное производство. / А.Л. Майоров, Н.Н. Гиль - Минск: ГНУ «ИПФ НАН Беларуси», 2005. -№2 (34). - с. 135-138. **10.** Белов Н.А. Фазовый состав и структура силуминов / Н.А. Белов, С.В. Савченко, А.В. Хван. -М.: «МИСИС», 2008.

К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗНОСА ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ

Лукичев А.В., Матвиенко С.А., Стрельник Ю.Н. *(ДонНТУ, ДАТ, г. Донецк, ДНР)*
Тел. +38 (071) 3690510; E-mail:a_lukichov@mail.ru

Abstract: *In the article, based on the functional-oriented approach (FOA) to the development of the technology of manufacturing ball joints, the equations of the trajectory of the contact point and the work of the friction force of the friction conjugation of a ball-bearing insert are derived. A mathematical model is proposed for calculating the wear of a spherical surface of a ball joint on the basis of which the technological influences are designed for finishing and hardening treatment (FHT).*

Keywords: *wear, technological impacts, ball pin, motion path, contact area, work, friction force.*

Постановка проблемы. Анализ последних исследований и публикаций.

Надежность изделия в целом и его составных элементов обеспечивается современными средствами изготовления, которые определяются уровнем развития технологии. Одним из основных направлений развития технологии машиностроения является ФОП к финишным операциям, а особенно к ОУО. Безопасность движения транспортных средств (ТС) во многом определяется органами управления движением, к которым относится рулевое управление – одна из основных систем автомобиля. Конструкция привода рулевого управления включает рулевые тяги, предназначенные для обеспечения подвижности составных частей системы. Пространственная подвижность, позволяющая поворачивать управляемые колеса на нужный угол, обеспечивается наконечником рулевой тяги. Чаще всего эта подвижность создается за счет шарового соединения, которое позволяет выполнять свою функцию наконечнику тяги. В результате возможна передача двигательного усилия в кинематической цепи «рулевая колонка - управляемые колеса», так как между деталями постоянно изменяется угол контакта.

Конструкция сферических шарнирных узлов предполагает сложную контактную задачу, часто точечный и линейный контакт, что приводит к неравномерному нагружению элементов шарнира и вкладыша, причем эти силовые элементы подвески автомобилей являются одними из наиболее нагруженных, что подтверждается их реальным ресурсом и возможностью внезапных отказов. Основной причиной отказа при длительной эксплуатации сферических шарниров ТС является массовый износ [1, 2, 3]. Критерием ресурса для сферических шарниров служит заданная нормативом предельная величина линейного зазора между шаровым пальцем и корпусом, который определяет увеличение ударной нагрузки при динамическом нагружении. Неравномерность распределения нагрузки по сферической поверхности и случайный характер относительных перемещений контактирующих зон наконечника рулевой тяги друг относительно друга в трибосопряжении возникает неравномерный износ рабочей поверхности шарового пальца. Эта проблема может быть решена при обеспечении на участках и зонах поверхности шаровых шарниров их функционально-ориентированных свойств (ФОС). Это задача может быть решена современными методами ОУО технологии машиностроения, в частности зональным распределением толщины покрытия по поверхности шарнира при изготовлении. Этот же подход может быть применен при восстановлении шарниров, когда есть возможность увидеть реальный износ.

Однако на этапе проектирования режимов ОУО необходимо предварительно задать предполагаемый износ. Решение этой задачи возможно при моделировании износа в шаровых соединениях, процесс которого является достаточно сложной задачей, в связи со сложностью определения механизма изнашивания пространственных контактных пар. В основу рассмотренных моделей износа шаровых соединений при концептуальном подходе (классические задачи изнашивания), положены следующие предположе-

ния: износ пропорционален пути трения; износ пропорционален работе силы трения; износ определяется физическими параметрами процесса и механическими свойствами материалов [4, 5, 6, 7, 8]. Исследованиями интенсивности изнашивания занимались многие отечественные и зарубежные ученые: В.Д. Кузнецов, Ю.Н. Дроздов, Б.И. Костецкий, А.В Чичинадзе, К. Чаллен, Л. Коффин, В. Менсон, А. Боувер и др. Однако чаще всего используется подход к разработке расчетных методик изнашивания узлов трения, предложенный И.В. Крагельским: износ пропорционален объему взаимного внедрения шероховатостей $V_{вв}$ [4].

Цель исследования. Целью данной работы является разработка исходных данных для проектирования технологических воздействий на основе ФОП к эксплуатации шаровых шарниров, математическому описанию процесса движения шарнира для моделирования его износа.

Материалы и результаты исследований.

Для разработки модели износа используется известное положение: износ прямо пропорционален удельному давлению на поверхность трения, т.е. выполненной силой трения работе, и обратно пропорционален твердости поверхностного слоя поверхностей трения. (где скорость относит. Движ.)

В данной работе авторами предлагается подход к определению величины и характера износа не в результате расчетов упруго-пластической деформации объекта исследования, что является достаточно сложной задачей, а путем определения работы, которую выполняют силы трения в процессе смещения сферической поверхности шарового пальца относительно контактирующих поверхностей вкладыша. (Как без решения контактной задачи можно решить вопросы износа в заданной точке, даже работа – нужно знать удельную силу)

Так как, не вся работа расходуется на износ, нужно найти её часть непосредственно связанную с износом рабочей поверхности детали. Механическая работа, совершаемая силами трения, расходуется на разрушение материала контактирующих поверхностей, изменение температуры и т.д. Поэтому процентная часть работы, определяющая износ может быть найдена из общей работы сил трения введением поправочного коэффициента определяемого экспериментальным путем.

Структура эксперимента по определению поправочного коэффициента заключается в следующем: поворачивается шаровый палец, определяется реальный износ по сферической поверхности и сравнивается с теоретическим по формулам, нахождению которых посвящена данная статья. Совершенная работа при перемещении пальца прямо пропорциональна приложенной силе и длине пройденного пути.

Свяжем с корпусом шарнира неподвижную декартову систему координат $OXYZ$, центр которой расположен в центре условной сферической полости в которой находится сферическая часть пальца. Ось OY направлена вдоль оси рулевой тяги. Усилие, передаваемое от рулевой тяги к шарниру, будем считать сосредоточенной в точке силой P и направленной в противоположенном оси OY направлении (рис. 1).

В системе координат $OXYZ$ корпус шарового шарнира неподвижен, а значит и распределение усилий в зоне контакта со стороны корпуса (вкладышей) не изменяется.

Со сферической частью пальца свяжем локальную декартову систему координат $O\xi\eta\zeta$, центр которой расположен в центре сферической части пальца, ось ζ которой направлена вдоль оси симметрии пальца.

В системе координат $O\xi\eta\zeta$, связанной с пальцем, положение точек пальца не изменяется и значит не зависимо от угла прецессии не изменяется траектория движения точки сферической поверхности пальца при его повороте вокруг продольной оси.

Будем считать вкладыши шарового шарнира абсолютно жесткими телами, а зону контакта связной (сплошной), что обеспечивается наличием смазки в зоне контакта.

Пластические деформации мы не учитываем.

В начале перемещения пальца, при постоянном усилии в данной точке возникает сила трения равная произведению на коэффициент трения. Выполненные работы в разных точках будут разные. А распределение удельн. контактны давлений

Чтобы вычислить работу сил трения на поверхности контакта необходимо определить траекторию движения каждой конкретной точки сферической поверхности шарового пальца через зону контакта с вкладышами, а также закон распределения сил трения вдоль этой траектории. Общеизвестно, что распределение давления в зоне контакта с вкладышами соответствует косиносуидальному закону. (нет в этом случае не так) Сила трения находится в прямой зависимости от контактного давления, возникающего в зонах контакта. В каждой точке зоны трения действует сила трения, непосредственно совершающая работу.

В случае сферического шарнира, существенной трудностью является весьма сложный вид подынтегральных функций в рассматриваемых интегралах при произвольной взаимной ориентации векторов равнодействующей нормальных сил в области контакта. Для получения качественного представления о расположении зон износа рассматриваются характерные частные случаи распределения контактного давления на границе контакта сферической поверхности шарового пальца и вкладышей, когда возможно точное или приближенное аналитическое вычисление соответствующих интегралов. В дальнейшем будем считать, что:

1. Реализация силового взаимодействия происходит через область контакта *S* поверхностей шарнира. Размеры *S* в общем случае сравнимы с размерами шарнира, поэтому невозможно заменить распределенное по ней силовое взаимодействие сосредоточенной силой реакции.

2. Рулевая тяга совершает только возвратно-поступательное движение в координатной плоскости *OXY*, при этом продольная ось рулевой тяги остаётся параллельной координатной оси *OY*.

Составляем уравнение любой точки сферической поверхности при повороте шарового пальца. При помощи матриц поворота описываем движение одной единственной точки. Рассмотрим систему координат *OXYZ* (рис. 1).

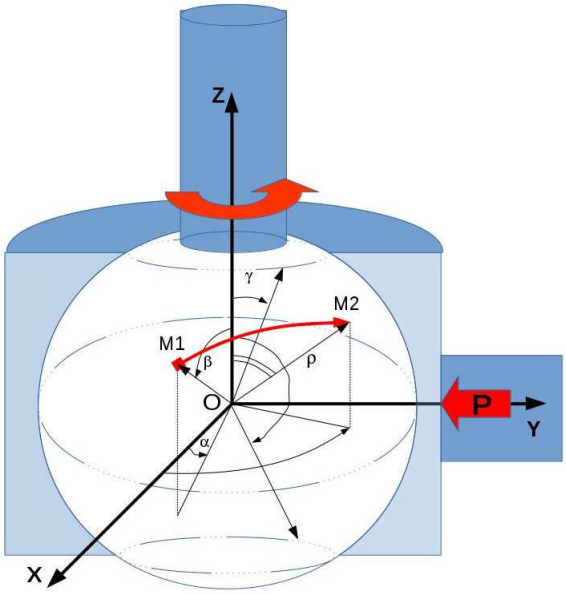


Рис. 1. Схема движения сферической части пальца в шарнире наконечника поперечной рулевой тяги

Примем, что ось *X* неподвижна, а система координат вокруг её вращается.

Выполним прямое преобразование при переходе в повернутую систему. В начальном положении ось $O\xi$ совпадает с осью *OX*, ось $O\eta$ с *OУ*, ось $O\zeta$ с *OX*. Очевидно, что во время вращения шарнира вращение вокруг оси *OУ* отсутствует. Любое положение пальца в шарнире может быть описана как суперпозиция поворотов относительно осей *OX* и *OZ*. Координаты точек в двух системах координат (подвижной и неподвижной) взаимосвязаны.

Рассмотрим поворот подвижной системы вокруг неподвижной оси на произвольный угол α . Получаем следующие матрицы вращения, соответственно вокруг оси *X* или Z.

$$R_x(\alpha) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{vmatrix} \tag{1}$$

Полагая, что при движении подвижная система поворачивается на угол φ вокруг *OZ* и на угол ϑ вокруг *OX* получаем преобразование координат ξ, η, ζ в *x, y, z*.

$$\begin{aligned} X &= \rho \cdot (\cos(\alpha + \varphi) \cdot \sin(\beta)) \\ Y &= -\rho \cdot (\cos(\beta)\sin(\theta) + \cos(\theta)\sin(\beta)\sin(\alpha + \varphi)) \\ Z &= \rho \cdot (\cos(\beta)\cos(\theta) + \sin(\beta)\sin(\theta)\sin(\alpha + \varphi)) \end{aligned} \tag{2}$$

Таким образом, при фиксированном ρ, равном радиусу сферической части пальца, получаем трехмерное уравнение кривой *L(x, y, z)* по которой движется точка имеющая координаты в начальный момент (ρ , α , β) в системе координат *OXYZ*.

Предполагается, что координаты точек в сферической системе связаны с подвижной системой. Следовательно, можно исключить координату *r*, так как она *const* (рис.1).

Чтобы определить координаты точки, если бы система не была повернута, выполним обратное преобразование из повернутой системы координат.

Обратная матрица возвращает точку в начальное состояние:

$$(R_x(\alpha))^{-1} \xrightarrow{simplify} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{vmatrix}$$

$$(R_z(\alpha))^{-1} \xrightarrow{simplify} = \begin{vmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \tag{3}$$

Смещения шарнира при повороте вокруг осей *OX* и *OZ* происходят в плоскости *OZY*. Примем координаты точки в сферической системе координат: α - широта точки; β -долгота точки; ρ -расстояние до точки:

Координаты любой точки трехмерного пространства в сферической системе координат имеют вид:

$$r(\rho,\alpha,\beta)=\rho\cdot\begin{vmatrix}\cos(\alpha) & \sin(\beta)\\ \sin(\alpha) & \sin(\beta)\\ & \cos(\beta)\end{vmatrix} \tag{4}$$

где *r* это радиус вектор, а ρ , α , β его координаты.

Строим оператор, где координаты точки при переходе в другую внешнюю систему координат: φ - долгота (поворот вокруг оси *OZ*), а ϑ - широта (показывает насколько продольная ось отклонилась от оси *OZ*, т.е. от вертикали).

$$A_1(\varphi,\vartheta)=R_x(\vartheta)*R_z(\varphi)\rightarrow\begin{vmatrix}\cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0\\ \cos(\vartheta)\cdot\sin(\varphi) & \cos(\varphi)\cdot\cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta)\\ \sin(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) & \cos(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta)\end{vmatrix} \tag{5}$$

Данный оператор является суперпозицией двух поворотов, вокруг вертикальной оси *OZ* на угол φ и на угол ϑ вокруг оси *OX*. Это и есть уравнение движения точки.

Ниже выполнена проверка свойств матриц поворота, а также правильности построения оператора A_1 в системе *Mathcad. Simplify* – обозначает упрощение уравнения.

$$R_x(\vartheta)\cdot R_z(\varphi)\cdot r(\rho,\alpha,\beta)\xrightarrow{simplify}$$

$$\xrightarrow{simplify}\begin{vmatrix}\rho\cdot\cos(\varphi+\alpha)+\sin(\beta)\\ \rho\cdot\cos(\varphi)\cdot\cos(\vartheta)\cdot\sin(\alpha)\cdot\sin(\beta)-\rho\cdot\cos(\beta)\cdot\sin(\vartheta)+\rho\cdot\cos(\alpha)\cdot\cos(\vartheta)\cdot\sin(\varphi)\cdot\sin(\beta)\\ \rho\cdot\cos(\beta)\cdot\cos(\vartheta)+\rho\cdot\cos(\varphi)\cdot\sin(\alpha)\cdot\sin(\beta)\cdot\sin(\vartheta)+\rho\cdot\cos(\alpha)\cdot\sin(\varphi)\cdot\sin(\beta)\cdot\sin(\vartheta)\end{vmatrix};$$

$$(R_x(\vartheta)\cdot R_z(\varphi))\cdot r(\rho,\alpha,\beta)\xrightarrow{simplify}$$

$$\xrightarrow{simplify}\begin{vmatrix}\rho\cdot\cos(\varphi+\alpha)+\sin(\beta)\\ \rho\cdot\cos(\varphi)\cdot\cos(\vartheta)\cdot\sin(\alpha)\cdot\sin(\beta)-\rho\cdot\cos(\beta)\cdot\sin(\vartheta)+\rho\cdot\cos(\alpha)\cdot\cos(\vartheta)\cdot\sin(\varphi)\cdot\sin(\beta)\\ \rho\cdot\cos(\beta)\cdot\cos(\vartheta)+\rho\cdot\cos(\varphi)\cdot\sin(\alpha)\cdot\sin(\beta)\cdot\sin(\vartheta)+\rho\cdot\cos(\alpha)\cdot\sin(\varphi)\cdot\sin(\beta)\cdot\sin(\vartheta)\end{vmatrix};$$

$$A_1(\varphi,\vartheta)\cdot r(\rho,\alpha,\beta)\xrightarrow{simplify}$$

$$\xrightarrow{simplify}\begin{vmatrix}\rho\cdot\cos(\varphi+\alpha)+\sin(\beta)\\ \rho\cdot\cos(\varphi)\cdot\cos(\vartheta)\cdot\sin(\alpha)\cdot\sin(\beta)-\rho\cdot\cos(\beta)\cdot\sin(\vartheta)+\rho\cdot\cos(\alpha)\cdot\cos(\vartheta)\cdot\sin(\varphi)\cdot\sin(\beta)\\ \rho\cdot\cos(\beta)\cdot\cos(\vartheta)+\rho\cdot\cos(\varphi)\cdot\sin(\alpha)\cdot\sin(\beta)\cdot\sin(\vartheta)+\rho\cdot\cos(\alpha)\cdot\sin(\varphi)\cdot\sin(\beta)\cdot\sin(\vartheta)\end{vmatrix};$$

$$A_1(-\varphi,-\vartheta)=\rightarrow\begin{vmatrix}\cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0\\ -(\cos(\vartheta)\cdot\sin(\varphi)) & \cos(\varphi)\cdot\cos(\vartheta) & \sin(\vartheta)\\ \sin(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) & -(\cos(\varphi)\cdot\sin(\vartheta)) & \cos(\vartheta)\end{vmatrix} \tag{6}$$

Обратная матрица:

$$A_2(\varphi,\vartheta) = (A_1(\varphi\vartheta))^{-1} \xrightarrow{simplify}$$

$$\xrightarrow{simplify} \begin{vmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\vartheta)\cdot\sin(\varphi) & \sin(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi)\cdot\cos(\vartheta) & \cos(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) \\ 0 & -\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) \end{vmatrix}$$

$$A_2(\varphi,\vartheta) = (A_1(\varphi\vartheta))^{-1} \xrightarrow{simplify}$$

$$\xrightarrow{simplify} \begin{vmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\vartheta)\cdot\sin(\varphi) & \sin(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi)\cdot\cos(\vartheta) & \cos(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) \\ 0 & -\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) \end{vmatrix}$$

$$R_z(-\varphi)\cdot R_x(-\vartheta) \rightarrow \begin{vmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\vartheta)\cdot\sin(\varphi) & \sin(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi)\cdot\cos(\vartheta) & \cos(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) \\ 0 & -\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$R_z(\varphi)^{-1}\cdot R_x(\vartheta)^{-1} \xrightarrow{simplifu} \begin{vmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\vartheta)\cdot\sin(\varphi) & \sin(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi)\cdot\cos(\vartheta) & \cos(\varphi)\cdot\sin(\vartheta) \\ 0 & -\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) \end{vmatrix}$$

$$A_1(a,b)\cdot A_2(a,b) \xrightarrow{simplifu} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Для расчета расположения зон износа в шарнирных узлах рулевой тяги получены общие формулы в виде поверхностных интегралов. Целью настоящего исследования является получение достаточно полного качественного и количественного представления об износе в шарнирных узлах наконечников рулевых тяг автобуса МАЗ на основе вычисления указанных интегралов. Основная трудность обусловлена тем, что необходимая для этого информация о распределении сил нормального давления по области контакта должна быть получена путем решения соответствующих контактных задач теории упругости. Предлагается использовать простые зависимости для сил нормального давления в области контакта, аппроксимирующие соответствующие точные зависимости.

Силовое взаимодействие в каждой точке контактной поверхности шарнира эквивалентно сосредоточенной силе:

$$Fn(M)\ Fn = \iint sp(M)\ dS \quad (8)$$

Где обозначения?

Где описание?

1. Используем кулоновскую модель трения, когда сила трения пропорциональна нормальной силе и вектор силы трения направлен в сторону, противоположную вектору движению.

2. Износ: а) пропорционален совершенной работе сил трения и характеризуется, как локальное изменение объема; б) обратно пропорционален поверхностной твёрдости материала на поверхности трения.

Авторами разработана программа для расчета износа в точках шарового шарнира при рассмотренных выше взаимных перемещениях и принятых допущениях по силовому распределению и функции износа.

При отсутствии поворота системы $O\xi\eta\zeta$ вокруг оси OX и при повороте её на угол $\pi/4$ вокруг оси OZ получаем физическую модель износа, для ¼ верхней полусферы шарового пальца рассчитанную по разработанной программе (рис. 2).

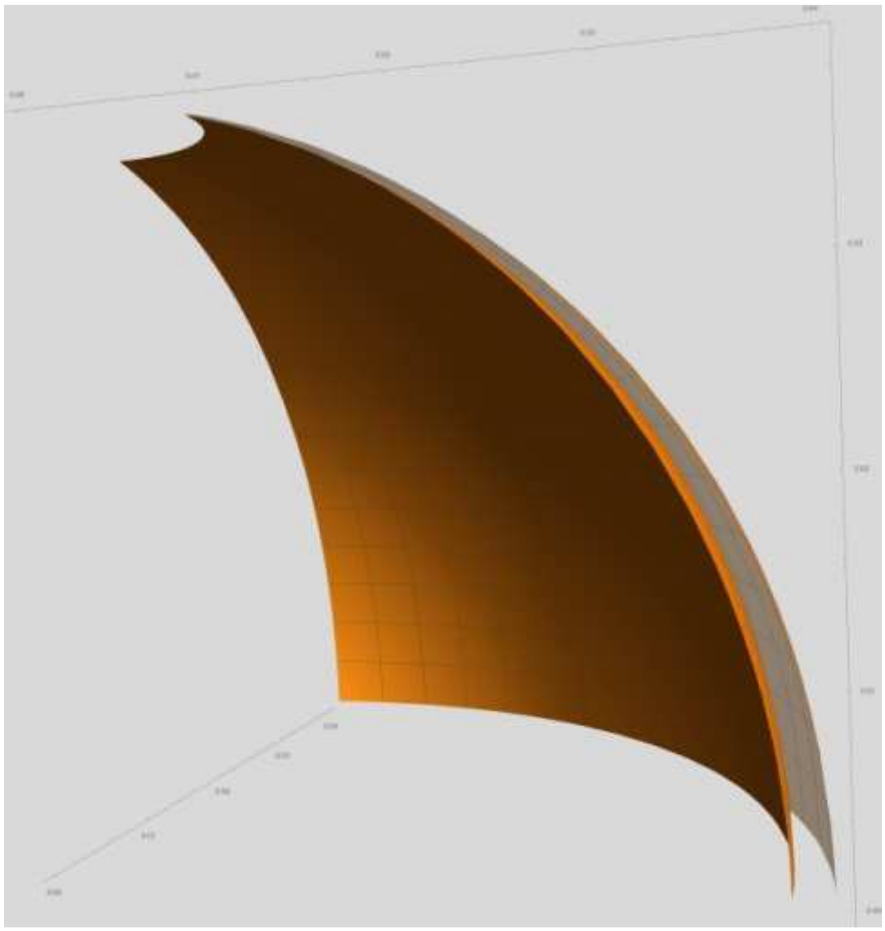


Рис. 2. Физическая модель износа шарового пальца

Расчет с учетом соотношений (1), (2) и нормированной нагрузки выполнен в программе *Wolfram Mathematica*. Результаты расчета представлены на рисунке 3.

Таким образом, получена физическая модель износа шарового пальца на основе математического моделирования: относительных перемещений в шаровом шарнире, работы сил трения, зон контакта в паре трения. Такой ФОП к особенностям работы шарнира позволил определить зоны максимального износа, что в свою очередь позволяет определять вид, интенсивность, режимы технологических воздействий на наиболее изнашиваемые зоны при ОУО шарового пальца.

В работе [9] определены зоны корпуса шарнира, наиболее опасные с точки зрения разрушения. На наружной поверхности корпуса такой зоной является середина переходной поверхности от кольцевой части корпуса к резьбовому хвостовику.

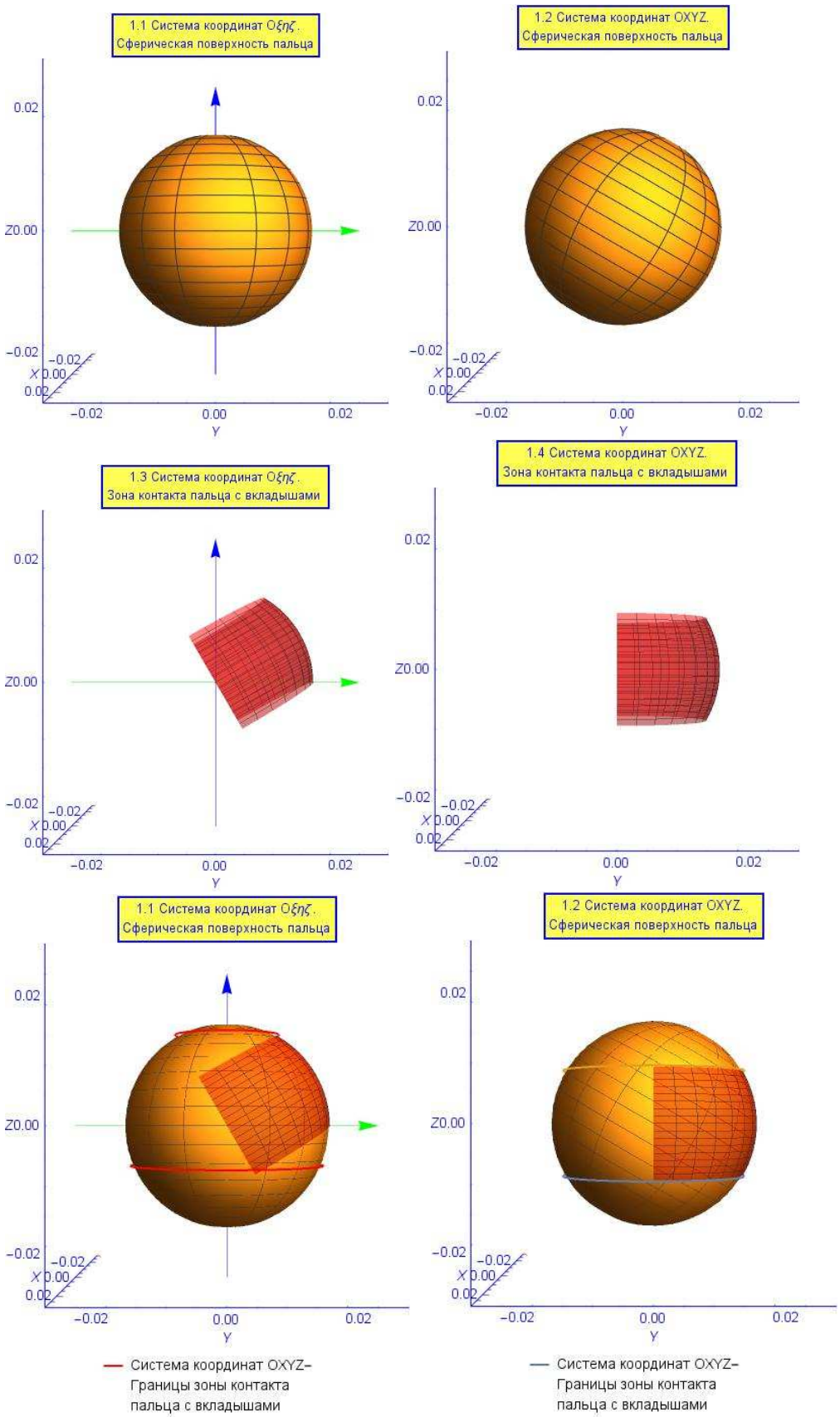


Рис. 3. Сферические поверхности шарового пальца и зоны его контакта с вкладышами в разных системах координат

Максимальное растягивающее напряжение в этой точке достигает σ_1=627 МПа, а эквивалентное по Мизесу $\sigma_{экв}$=580 МПа ($\sigma_{0,2}$=800 МПа).

Аналогичные результаты показывает и разработанная математическая модель шарового шарнира.

Статический анализ модели, выполненный в *Solidworks*, подтвердил, что зоны максимальных деформаций и напряжений совпадают с зонами максимальных перемещений и реакций в математической модели.

Выводы: В результате применения матриц поворота выведены уравнения описывающие траекторию точки зоны контакта при смещении шарового пальца, на основании которых выведена математическая модель работы сил трения. Используя алгоритм расчета зоны и интенсивности износа, определены зоны контакта поверхностей пары трения. Это является исходными данными для создания функционально-ориентированных технологий, обеспечивающих повышение надежности шаровых шарниров.

Список литературы: 1. Михайлов, А. Н. Расчет относительных перемещений в системе втулка-палец шаровой опоры / А. Н. Михайлов, А. Н. Голубов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. - № 4(55). - С. 10-17. 2. Михайлов, А. Н. Реализация функционально-ориентированного подхода к финишной обработке шаровых опор на основе направленной виброрезонансной обработки / А. Н Михайлов, А. В. Лукичев, С. А. Матвиенко, Ю. Н. Стрельник // XVII Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция "МЕХАНИКИ XXI ВЕКУ" , 2018. – С. 215-220. 3. Тебекин, М. Д. Повышение эффективности определения технического состояния шаровых шарниров подвески легкового автомобиля: дис. ... канд. техн. наук. 05.22.10. – Орел, 2015.- 158 с. 4. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/ И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский; Под ред. Д. Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. 268 с. 5. Лапчинский, В. В. Определение закономерности изменения технического состояния шаровых пальцев передней подвески автомобилей: дис. … канд. техн. наук. 05.22.10. – Магнитогорск, 2005. – 118 с. 6. Махнович, С. В. Исследование прочности шарового шарнира / С. В. Махнович, А. М. Овчинников // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – С. 107–110. 7. Сальников, В. В. Моделирование процесса разрушения шарового шарнира передней подвески автомобиля при осевом нагружении / В. В. Сальников, И. А. Михайловский, И. Г. Гун // Журнал автомобильных инженеров. - 2011. - № 2 (67). - С. 51-53. 8. Разработка, моделирование и совершенствование процессов производства шаровых шарниров автомобилей / И. Г. Гун, И. А. Михайловский, Д. С. Осипов, В.И. Куцепендик, В. В. Сальников, Е. И. Гун, А. В. Смирнов, А. В. Смирнов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. - 2014. - № 1 (45). - С. 52-57. 9. Овчинников, А. М. Оценка возможности разрушения шарового шарнира / А. М. Овчинников, П. Н. Усков // Научный поиск: материалы второй науч. конф. аспирантов и докторантов. Технические науки. – 2009. – Т. 1. – С. 107–110.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИС «АРХИВАРИУС» НА ОСНОВЕ МЕТОДА TVO (общая ценность возможностей)

Лысенкова С.Н., Кубрак Я.А., Добровольский Г.И. (*БГАУ, г. Брянск, Россия*)
Тел. +7(952)964-00-56; E-mail: lsn.76@mail.ru

Annotation. *The article describes a method for evaluating the effectiveness of the information system "Total Value of Opportunities". Based on this method, the evaluation of the information system "Archivist" was carried out. This system was created on the platform "1C".*
Keywords. *Method for evaluating the effectiveness of information systems, Total Value of Opportunities (TVO), IT-project, system "Archivist"*

Ведение кадрового учета позволяет документально оформить трудовые отношения, создать слаженную систему управления персоналом, регламентировать взаимоотношения работника и работодателя, создать организационно-правовые основы трудовых отношений, разрешить трудовые споры и др.

Внимательное и грамотное ведение кадрового делопроизводства является важнейшей обязанностью кадровых служб, так как напрямую касается людей – работников организации.

В настоящее время использование информационно-коммуникационных технологий происходит повсеместно. Бизнеса не существует, если он не использует средства информационных технологий. Особого внимания требует автоматизация с использованием информационной системы. Зачастую покупка, адаптация, внедрение и обучение персонала стоит немалых денежных вложений. Возникает вопрос: будут ли оправданы затраты приобретенной выгодой от внедрения данной информационной системой?

Не существует одного определенного метода, который бы наиболее точно отразил соотношение затрат и выгоды. Такая неопределенность обусловлена приобретаемой выгодой при использовании информационной системы. Даже если затраты на покупку и внедрение программного обеспечения, адаптацию информационной системы и обучение персонала можно выразить в денежном объеме, то вот выгоду от использования информационной системы посчитать в некоторых случаях не представляется возможным. Так происходит из-за ее качественного характера.

Существуют самые разнообразные методы оценки эффективности информационных систем. Они применяются для того, чтобы организации потратили минимальное количество средств и при этом обеспечили себе максимальную выгоду от их использования. Методы оценки эффективности информационных систем можно представить в виде схемы (рис. 1).

Качественные методы применяются, когда отсутствует описание закономерности систем в виде аналитических зависимостей.

К методам качественного анализа относятся анализ жизненного цикла систем (SLCA), система показателей информационных технологий (ITS), система сбалансированных показателей (BSC), анализ проведения затрат (CBA), общая оценка возможностей (TVO).

Общая оценка возможностей или метод расчета совокупной ценности возможностей (Total Value of Opportunities – TVO) был разработан 2002–2003 годах компанией Gartner Group в развитие метода TCO (метод совокупной стоимости владения) для большей полноты отражения экономических результатов использования ИС. Преимуществом метода TVO является высокая гибкость, позволяющая приспособить ее к различным уровням управления компанией и показателям относительной значимости финансовых и нефинансовых факторов [2].

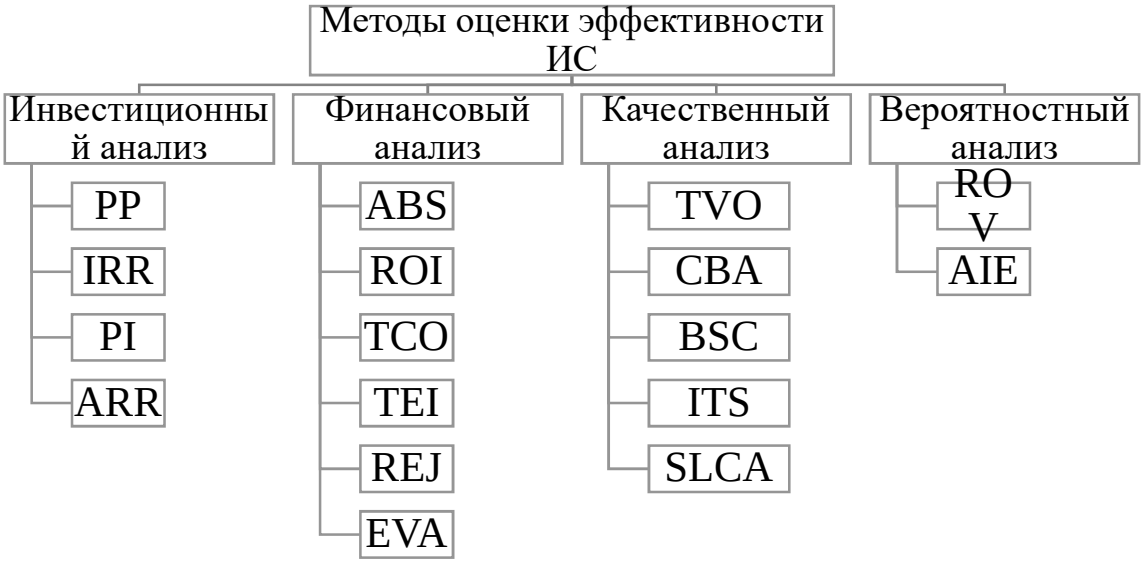


Рис. 1. Методы оценки эффективности информационных систем

В данной модели оценка эффективности информационных систем и использования информационных технологий ведется по пяти направлениям:

1) соответствие стратегии бизнеса;
2) воздействие на бизнес-процессы;
3) непосредственная окупаемость;
4) архитектура;
5) степень риска [3].

Данный подход позволяет повысить степень понимания бизнес-руководителями эффекта от ИТ-инициатив. В рамках данного подхода необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Что представляет собой инициатива?
2. Как измеряется ценность для бизнеса?
3. Что делает данная технология?
4. Какую выгоду можно получить?
5. Сколько будет стоить проект?
6. Как учесть будущие возможности?
7. Может ли предприятие использовать данные возможности?

Формирование системы показателей, оценивающих ИТ-инициативы на основе методологии TVO, и дальнейший их контроль позволят организации решить проблему ранжирования ИТ-проектов по их пользе и стоимости с целью определения приоритетных проектов (рис. 2).

Наиболее выгодными (обладатели наибольшей бизнес-ценности) будут считаться дешевые проекты с большими возможностями. К таким относятся проекты A и G. На пересмотр будут направлены проекты C и F, т.к. они дорогие и имеют мало возможностей (вероятно, их не все учли), но имеют большую бизнес-ценность. Недорогие проекты с большими возможностями, но не представляющие большой бизнес ценности, принято считать проблемными. Их не следует устранять, необходимо лишь найти причину их небольшой ценности для бизнеса. Проекты с ограниченными возможностями, большой стоимостью и незначительной бизнес-ценностью необходимо устранять.

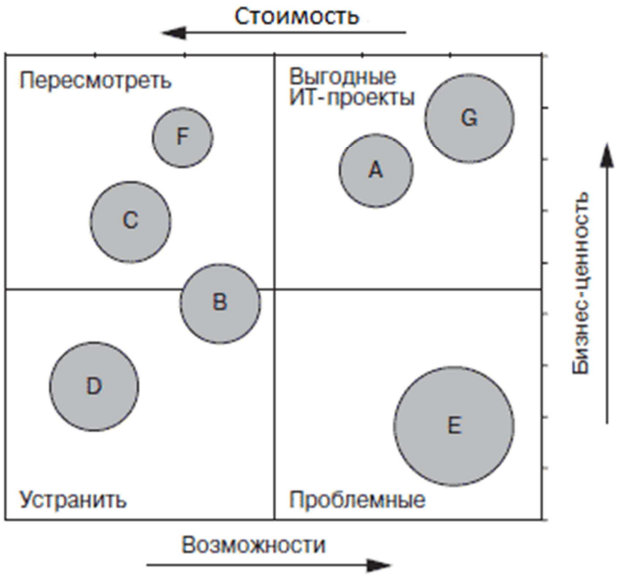


Рис. 2. Ранжирование ИТ-проектов

В результате в организации устанавливается подход к определению и сбору параметров TVO, формированию показателей деятельности ИТ-службы, учитывающих и влияние информационных технологий на бизнес, и развитие инфраструктуры ИТ [1].

ИС «Архивариус» - программа на платформе «1С», предназначенная для автоматизации деятельности архивариуса вуза. Интерфейс программы представлен на рис. 3.

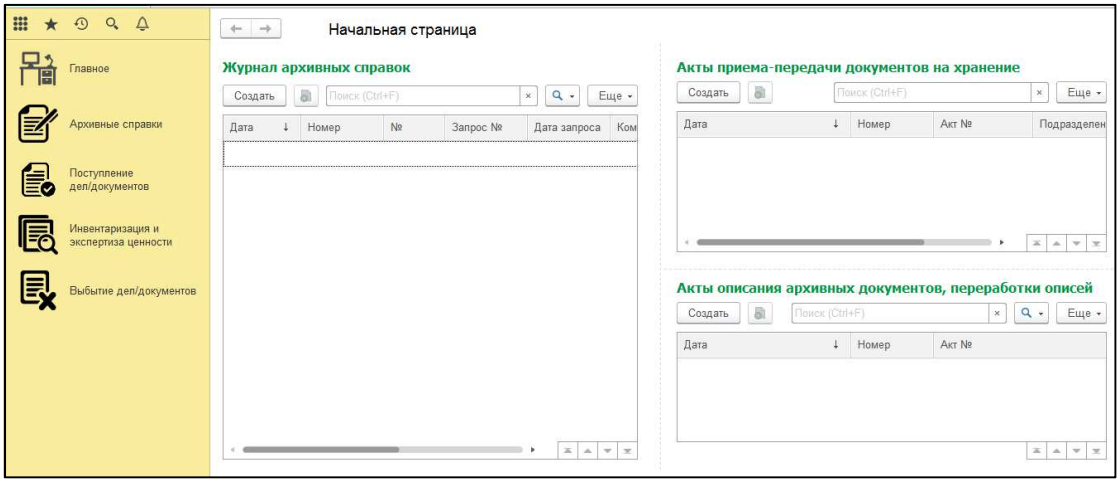


Рис. 3. Интерфейс программы «Архивариус»

С помощью данного программного обеспечения учет архивных документов не только ведется в электронном виде, но и может быть распечатан для соответствующих описей или актов. Бизнес-процессы деятельности архивариуса не пострадают от внедрения ИС, а наоборот, улучшится логика процессов и учет архивных документов.

Об окупаемости системы не стоит вопрос, потому что система не дает количественных показателей, кроме повышения производительности труда. Возможно получение эффекта от качественных показателей (улучшение учета, снижение вероятности человеческих ошибок, упрощение оформления сопровождающей документации, учет выдачи дел во времени и др.).

Архитектура системы может быть представлена с 2 сторон: со стороны пользователя (4 раздела и содержащиеся в них документы и справочники), со стороны адми-

нистратора/программиста (количество объектов конфигурации 1С). На сегодняшний день к основным объектам конфигурации относятся: справочники (7), документы (10), перечисления (3), регистры накопления (3), подсистемы (4), константы (14).

Система является автономной, риск хищения данных такой же, как и при обычном делопроизводстве в архиве (объясняется доступом к компьютеру архивариуса). Увеличивается надежность системы при учете архивных документов, уменьшаются риски потери документов или их неумышленного не возврата (учет не позволит забыть о выданном деле).

В перспективе развитие системы представляется в доработке архивной справки: написание запроса к базе данных или другой системе, в которой будут храниться необходимые данные для справки. На сегодняшний момент такой базы (более пятилетней давности) нет в университете.

По ранжированию ИТ-проектов система «Архивариус» является выгодным проектом, т.к. имеет небольшую стоимость и много возможностей, что в свою очередь обеспечивает высокую бизнес-ценность.

Существуют самые разнообразные методы оценки эффективности информационных систем. Они применяются для того, чтобы организации потратили минимальное количество средств и при этом обеспечили себе максимальную выгоду от их использования.

Общая оценка возможностей или метод расчета совокупной ценности возможностей (Total Value of Opportunities – TVO) позволяет оценить, как инвестиции в конкретную технологию отразятся на успешности бизнеса. Результаты в равной степени зависят как от эффективности самого предприятия и используемой системы отчетности, так и от самой технологии. TVO дает более полное представление о последствиях бизнес-инициатив в сфере информационных технологий и устраняет своего рода языковый барьер между управленцами и специалистами в области информационных технологий, позволяя более четко демонстрировать, как технологическая инициатива отразится на бизнесе.

Согласно стратегии развития и внедрения информационных систем в вузах автоматизация деятельности архивариуса (ИС «Архивариус») является актуальной, т.к. частично автоматизирует рутинные процессы архива.

По ранжированию ИТ-проектов система «Архивариус» является выгодным проектом, т.к. имеет небольшую стоимость и много возможностей, что в свою очередь обеспечивает высокую бизнес-ценность.

Список литературы: 1.Баронов В.В. Информационные технологии и управление предприятием [Электронный ресурс]: Анализ TVO – Электрон. текст. дан. – Режим доступа: https://econ.wikireading.ru/44129/. **2.**Великсар Д., Коваль В.А., Власов И.А., Лысенкова С.Н. Обеспечение безопасности обработки информации в информационной системе// Сборник Инновационные направления разработки и использования информационных систем и технологий, 2016. - С. 503-505. **3.** Данилин А., Слюсаренко А. НОУ Интуит [Электронный ресурс]: Эффективность инвестиций в ИТ – Электрон. текст. дан. – Режим доступа: https://www.intuit.ru/ studies/ courses/ 2189/ 162/ lecture/ 4479?page=4/. **4.** Ульянова Н.Д., Войтова Н.А., Милютина Е.М Информационные технологии в ценовой политике предприятия// Сборник статей I Всероссийской научно-практической конференции «Вызовы цифровой экономики: условия, ключевые институты, инфраструктура». 2018. С. 267-274. **5.** Якубович М. Блог по управлению проектами [Электронный ресурс]: Оценка эффективности отдачи инвестиций в автоматизацию бизнеса – Электрон. текст. дан. – Режим доступа: http://project-management.zis.by/ ocenka-proekta/jeffektivnosti-otdachi-investicij-v-avtomatizaciju--bizn.html/.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СКОРОСТНОМ ПРОТЯГИВАНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Макаров В.Ф., Волковский А.А., Горев П.В., Поликарпова К.Н.
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия)
Тел./Факс: 7(342)2198236; E-mail: makarovv@pstu.ru

Abstract: *In work it is defined influences of speed of cutting in a range from 2 to 30 m/min and givings on a tooth from 0,02 to 0,1 mm/tooth at hard cutting heat resisting alloys on size of plastic deformation on change a shaving and a shift corner. The increase in speed of cutting and giving at a tooth at broaching leads to decrease in plastic deformation in a zone of cutting, that is the favorable factor for increase of productivity, quality and durability of details gas turbine engines.*
Key words: *gas turbine engines, high speed broaching, a shift corner, velocity of cutting, givings on a tooth.*

В условиях острой конкурентной борьбы за рынки сбыта авиационной техники как внутри страны, так и за рубежом, интенсификация производства ГТД означает внедрение мероприятий по значительному сокращению трудозатрат, снижению себестоимости обработки, сокращению сроков освоения новых изделий при одновременном повышении качества и стабильности обработки, надёжности и ресурса работы деталей в условиях эксплуатации. Повышенные эксплуатационные требования к деталям ГТД обусловлены особыми требованиями к безопасности воздушных перевозок людей и грузов. Одним из путей повышения эффективности финишной механической обработки деталей ГТД является разработка, исследование и внедрение такого высокопроизводительного процесса, как скоростное протягивание твердосплавными протяжками [1].

Протягивание - это наиболее высокопроизводительный процесс окончательной лезвийной обработки, обеспечивающий выполнение повышенных требований по точности, шероховатости и физико-химическим свойствам поверхностного слоя. Поэтому протягивание относится к числу наиболее ответственных директивных операций обработки деталей ГТД, влияющих на эксплуатационную долговечность и надёжность работы. В то же время трудоемкость операций протягивания достаточно велика и часто составляет более 50 % от общей трудоемкости обработки деталей.

При протягивании снижение усилий резания с увеличением скорости резания объясняется снижением прочности и пластичности труднообрабатываемых материалов с ростом температуры резания, уменьшением работы пластической деформации стружки и поверхностного слоя деталей, уменьшением времени контактирования детали и инструмента, необходимого для завершения полной пластической деформации[2].

Изучению процессов пластической деформации в зоне стружкообразования посвящено много научных работ [3, 4, 5, 6, 7]. Это связано с значительным влиянием деформационных процессов в зоне стружкообразования на износ и стойкость режущих инструментов, на изменение составляющих силы резания, температуры резания, на изменение параметров качества поверхностного слоя обработанных деталей.

Деформацию простого сдвига при протягивании обычно рассматривают на примере перехода срезаемого слоя в стружку в процессе ортогонального резания металла (рис.1), так как при ширине среза $b >> a$ практически все перемещения срезаемого слоя происходят в одной плоскости. Частица срезаемого слоя, находящаяся далеко от режу-

щего инструмента, свободна от напряжений и движется по направлению к инструменту с постоянной скоростью. По мере приближения к режущему инструменту напряжения в рассматриваемой частице возрастают и, когда они превзойдут предел упругости обрабатываемого материала, частица получает пластическое смещение и изменяет направление своего движения.

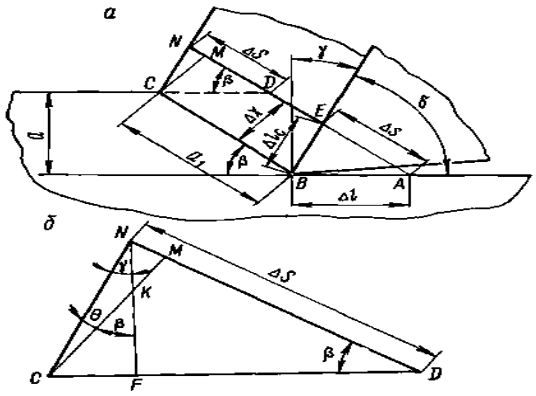


Рис. 1. Типичная схема процесса стружкообразованияк для определения относительного сдвига элемента стружки ε

Эти изменения происходят за время пребывания частицы в некоторой переходной пластически деформированной зоне *ABCD* (рис. 1, а). В результате отделения слоя металла толщиной *a* и превращения его в стружку часть единого тела движется параллельно передней поверхности лезвия инструмента, а оставшаяся — продолжает движение в прежнем направлении. В точке, соответствующей сопряжению передней и задней поверхностей инструмента, под углом β_1 к направлению движения, называемого углом сдвига, произойдет разделение тела на стружку и обработанную поверхность детали. В теории пластических деформаций для характеристики интенсивности сдвига пользуются величиной ε, называемой ***относительным сдвигом*** [3, 4, 5]. Он равен отношению абсолютного сдвига Δs к толщине слоя, претерпевшего этот сдвиг, т. е. ε = Δs/Δx. е. ε = Δs/Δx. Определение относительного сдвига и угла сдвига выполняют теоретически и экспериментально.

Определить относительный сдвиг можно путем геометрических построений по следующей зависимости:

$$\varepsilon = \operatorname{ctg}\beta_1 + \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma)$$

Из формулы следует, что при известном переднем угле инструмента γ для определения относительного сдвига необходимо знать величину угла сдвига β_1. Угол сдвига расчетным методом можно определить по усадке стружки. При перемещении инструмента на расстояние ΔL длина образовавшейся стружки будет равна ΔL_c. Из геометрических построений имеем

$$\frac{\Delta L_c}{\sin\beta} = \frac{\Delta L}{\sin\delta} = \frac{\Delta L}{\cos(\beta-\gamma)} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta L}{\Delta L_C} = \frac{\cos(\beta-\gamma)}{\sin\gamma}$$

Отношение $\frac{\Delta L}{\Delta L_C} = K_L$ получило название коэффициента усадки или укорочения стружки, а выражение $K_L = \frac{\cos(\beta - \gamma)}{\sin \beta}$ называют формулой Тиме. Используя формулу Тиме, выразим угол сдвига β_1 через коэффициент усадки стружки:

$$K_L = \frac{\cos\beta\cos\gamma + \sin\beta\sin\gamma}{\sin\beta} = ctg\beta\cos\gamma + \sin\gamma$$

Отсюда:

$$tg\beta = \frac{\cos\gamma}{K_L - \sin\gamma}$$

Угол β_1 можно определить также по коэффициенту утолщения стружки, зная толщину среза a и толщину образовавшейся стружки a_c.

Несмотря на значительную идеализацию процесса превращения срезаемого слоя в стружку при замене зоны первичной деформации единственной плоскостью сдвига, формула Тиме совершенно точно выражает связь между коэффициентом усадки стружки и углом сдвига, так как отражает условие сплошности материала сливной стружки..

При увеличении угла действия ω угол сдвига β_1 уменьшается, что свидетельствует об увеличении степени пластической деформации срезаемого слоя и работы стружкообразования. При увеличении угла действия ω вектор $\overline{P}$ силы стружкообразования поворачивается против часовой стрелки, что приводит к повороту в том же направлении осей главных напряжений и соответствующему уменьшению угла сдвига β_1.

Известно, что непосредственное влияние скорости резания на процесс стружкообразования выражается в изменении угла сдвига [6]. Угол сдвига растет при увеличении скорости резания, что связано с запаздыванием процесса пластической деформации. Кроме того, косвенное влияние скорости резания на процесс стружкообразования проявляется в ее влиянии на угол действия ω за счет изменения среднего коэффициента трения.

Толщина срезаемого слоя на процесс стружкообразования влияет только косвенно. Если нарост отсутствует, то влияние толщины срезаемого слоя связано с изменением среднего коэффициента трения, который из-за увеличения средних нормальных контактных напряжений на передней поверхности падает при увеличении толщины срезаемого слоя. Поэтому чем толще срезаемый слой, тем меньше относительный сдвиг и удельная работа стружкообразования..

Эти теоретические исследования нуждаются в экспериментальной проверке, например, при внедрении новых процессов резания, связанных с изменением режима резания, марки инструментального материала и геометрии инструментов.

Поэтому при внедрении нового процесса скоростного протягивания деталей газотурбинных двигателей для авиации и наземных установок требуется изучить влияние повышения скоростей протягивания с 2 м/мин до 30м/мин и изменение подачи на зубьях твердосплавных протяжек с 0,02 до 0,1 мм/зуб на изменение деформационных процессов в зоне стружкообразования и в обработанной поверхности деталей ГТД. Известно, что эти деформационные процессы существенно влияют на износ и стойкость протяжек, а также на такие параметры качества поверхностного слоя, как шероховатость, глубина и степень наклепа, остаточные напряжения, структурные превращения и, наконец, сопротивление усталости деталей.

В работе проведено определение влияния скорости резания и подачи на величину пластической деформации по изменению усадки стружки и по изменению угла сдвига.

Для выполнения исследований использовался горизонтально-протяжной модифицированный станок 7А540 с диапазоном скоростей до 30м/мин, скоростная установка протягивания УСП-1, призматические образцы 60х40х5 мм из жаропрочных сплавов на никелевой основе ЭИ787ВД и ЭИ437БУВД, модифицированные протяжки с механическим креплением пластинок из твердого сплава ВК8 с передним и задним углами 5^{o} . В качестве СОЖ применялась 3% эмульсия ВЭЛС-1.

Изучение пластической деформации проводилось визуально с помощью микроскопа на корнях стружки. Получение корней стружки проводилось путем мгновенной остановки протяжки в процессе протягивания. Участки поверхности с корнями стружки вырезались электроэрозионным методом. Предварительно корни стружек заполировали, что позволило получить достоверную картину пластических деформации в зоне стружкообразования при различных скоростях резания и подачах.

Сравнительные исследования проводились со скоростью резания 2 и 30 м/мин и с подачами 0,02мм/зуб, 0,06мм/зуб и 0,1мм/зуб. В ходе экспериментальных исследований проводилось по 3 замера на каждом образце в зависимости в зависимости от скорости и подачи. Общий вид полученных образцов корней стружек и схема измерений углов сдвига представлена на рис.2.

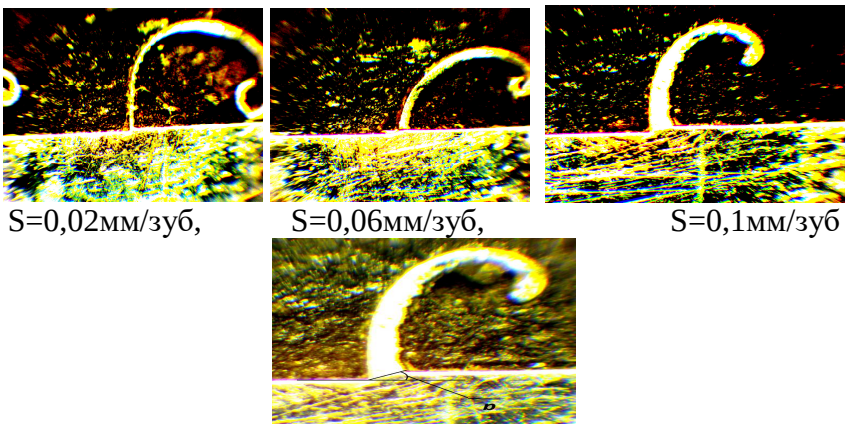


Рис. 2. Общий вид корней стружки и схема определения угла сдвига β_1 при протягивании образцов из сплава ЭИ437БУВД на скорости 2м/мин

По результатам исследования построены графики зависимости угла сдвига β_1 от скорости резания V и подачи Sz (рис. 3 и 4).

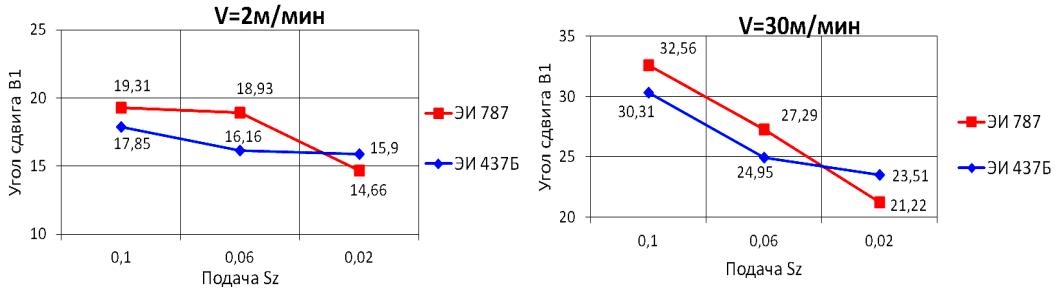


Рис. 3. Изменение угла сдвига β_1 в зависимости от подачи Sz при протягивании сплавов ЭИ 787ВД и ЭИ437БУВД на скоростях резания 2 и 30 м/мин

Анализ графиков на рис.3 показал, что при низких скоростях резания V=2м/мин угол сдвига β_1 в пределах 14-19 градусов в 1,5-2 раза меньше (21-33градуса), чем при скоростном протягивании на скорости V=30м/мин. Это свидетельствует о значительно меньшей пластической деформации в зоне стружкообразования при скоростном протягивании жаропрочных сплавов, что является весьма благоприятным фактором с позиции снижения износа протяжек и повышения качества поверхностного слоя.

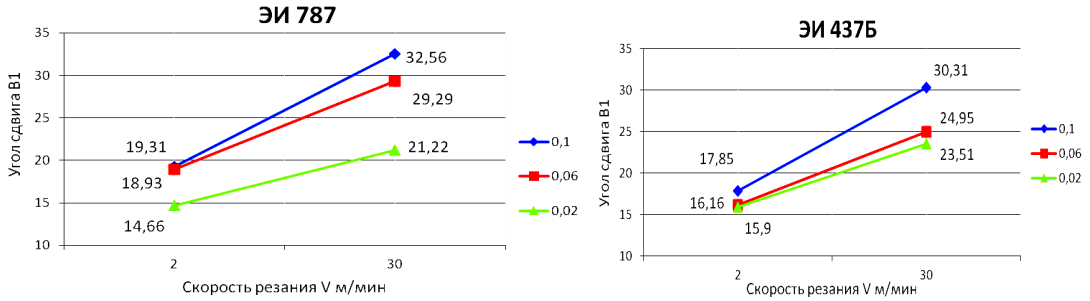


Рис.4. Изменение угла сдвига β_1 в зависимости от скорости резания V при протягивании сплавов ЭИ 787ВД и ЭИ437БУВД для различных подач на зуб S_z

В результате анализа графиков на рис. 3 и 4 установлено, что с увеличением подачи на зуб Sz с 0,02 до 0,1мм/зуб угол сдвига β_1 увеличивается в среднем с 15 до 19 градусов при скорости 2м/мин (26%) и с 22 до 32 градусов при скорости резания 30м/мин (40%), что свидетельствует о значительном благоприятном уменьшении пластической деформации при предварительной черновой обработке на повышенных скоростях протягивания.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод, что применение скоростного протягивания вместо обычно применяемых методов низкоскоростного протягивания является более благоприятным процессом с позиции значительного снижения деформационных явлений в зоне стружкообразования, повышения стойкости протяжек, производительности и качества поверхностного слоя деталей.

Результаты исследований использованы на предприятии «ОДК-ПМ» (г. Пермь) при внедрении скоростного протягивания замков лопаток компрессора нового перспективного газотурбинного двигателя ПД14 для современного российского магистрального самолета МС-21.

Список литературы: **1.** Макаров В. Ф. Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография/ В. Ф. Макаров. - Старый Оскол: ТНТ, 2014. -437 с. **2.** Макаров В.Ф. Резание материалов: учеб. пособие /В. Ф. Макаров. - Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл. политехн. ун-та, 2019.- 563 с. **3.** Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. - М.: Машгиз, 1956. - 368 с. **4.** Кривоухов В. А., Беспахотный П. Д. Исследование работы деформации при резании металлов //Известия вузов СССР, Машиностроение,1958, № 1. - С. 94-105. **5.** Лоладзе Т. Н. Стружкообразование при резании металлов. - М.: Машгиз, 1952, - 200 с. **6.** Развитие науки о резании металлов /Под ред. Н. Н. Зорева, Г. И. Грановского, М. Н. Ларина, И. П. Третьякова. - М.: Машиностроение,1967. - 416 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗУБЧАТОГО ВЕНЦА ПОСЛЕ СУПЕРФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННЫМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ

Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А., Горбунов А.С. *(ПНИПУ, Редуктор-ПМ, г. Пермь, Россия)*
Тел. +7 (912) 980-59-22; e-mail: vorozhtsova-natalya@yandex.ru

Abstract: *The article is devoted to the study of the quality of the surface layer of the gear rim of aircraft cylindrical gears, processed with various finishing operations: 1) grinding and honing; 2) grinding with the combined worm grinding wheel having grinding and polishing parts. The comparative results of the study of roughness, microstructure, microhardness, residual stresses are given. It is concluded that the method of rolling grinding with the combined worm grinding wheel can be an alternative to the laborious honing process.*
Keywords: *toothing, the quality of the surface layer, grinding, honing, polishing.*

1. Введение

При ремонте авиационных изделий из общего количества бракуемых зубчатых колес до 85% бракуют из-за контактных разрушений зубьев. Основными причинами контактных разрушений являются: концентрация нагрузки по длине и профилю зубьев, наличие остаточных растягивающих напряжений на рабочих поверхностях зубьев, неблагоприятные эксплуатационные условия [1]. Поэтому кроме выдерживания жестких конструкторских требований к точности зубчатого венца, необходимо технологическими методами обеспечить качество поверхностного слоя, так как именно с него начинается разрушение. Качество поверхностного слоя определяется такими параметрами, как шероховатость, остаточные напряжения, микротвердость, микроструктура. Эти параметры формируются на протяжении всего технологического процесса и зависят от финишных операций.

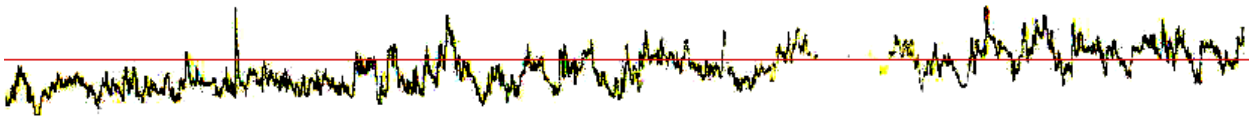
Рассмотрим результаты исследований качества поверхностного слоя профиля зуба двух цилиндрических шестерен. Первая шестерня выполнена с финишными операциями шлифования и хонингования. Операция шлифования позволяет обеспечить 3-3-3 степень точности зубчатого венца. Для достижения шероховатости профиля зуба выполняют операцию хонингования алмазным зубчатым хоном. Операция хонингования как финишная операция цилиндрических зубчатых колес применяется в авиационной промышленности достаточно давно и подробно описана во многих работах, например, в работе [2]. Вторую шестерню обработали с финишной операцией шлифования комбинированным червячным кругом. Второй метод обработки зубчатого венца заключается в шлифовании комбинированным червячным кругом, состоящим из шлифовальной и полировальной частей. Это недостаточно изученный метод обработки. В ходе литературного поиска найдена одна работа, посвященная испытаниям комбинированного червячного круга [3]. Это статья опубликована в 2016 году сотрудником Walter Graf фирмы Reishauer. Так экспериментальные работы центра исследования шестерен Мюнхенского технического университета подтвердил, что уменьшение шероховатости поверхности зубьев с Ra 0.4 мкм до Ra 0,15 мкм увеличивает нагрузочную способность зацепления примерно на 14%. Также приведены данные, что шестерни обработанные червячным кругом с полировальной частью имеют в трансмиссии снижение потерь мощности на 15%, по сравнению с шестернями обработанными только шлифовальной частью. Приведены профилограммы шероховатости поверхности после зубошлифования Ra 0.46 мкм и после зубополирования Ra 0.08 мкм. Однако метод шлифования с последующим полированием рассмотрен в качестве замены вибрационного суперфиниширования для

снижения негативных воздействий на геометрию и характеристики поверхностной зоны зубьев автомобильных трансмиссий. Сведений об замене трудоемкого процесса хонингования авиационных цилиндрических шестерен и исследовании качества поверхностного слоя после различных финишных операций нигде в научной литературе не встречается.

Принцип работы червячного комбинированного круга заключается в снятии основного припуска шлифовальной частью, при обеспечении заданной точности. А полировальная часть комбинированного круга срезает вершины оставшихся микронеровностей, обеспечивая заданную шероховатость. Шлифование зубчатого венца осуществлялось путем ступенчатого снятия припуска и постепенного смещения зоны контакта детали с кругом от шлифовальной к полировальной части. Верно назначенные характеристики круга и параметры обработки обеспечивают конструкторские требования к шероховатости профиля зуба без дополнительной операции хонингования. Экспериментальные данные для обработки цилиндрических шестерен - сведения об оборудовании, инструменте, режимах резания и результатах измерения параметров точности приведены в работе [4]. В настоящей работе основное внимание уделено исследованию шероховатости, микротвердости, микроструктуре и остаточным напряжениям.

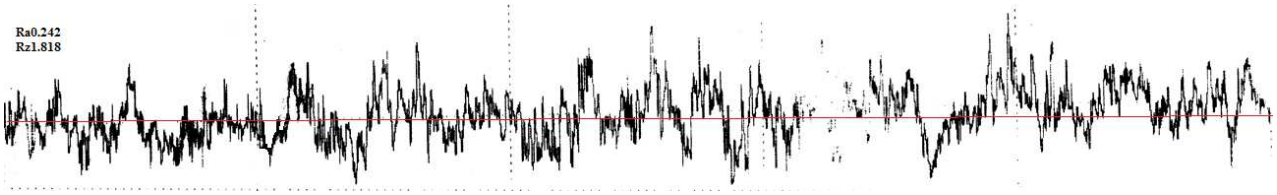
2. Основное содержание и результаты работы

Исследование шероховатости профиля зубьев проводили на профилометре MAHR Surf M300C после шлифования, хонингования и шлифования, полирования (рис.1). Шероховатость перед шлифованием - после выполнения химико-термической обработки на обеих шестернях составляла Ra 3.1±0.5мкм.

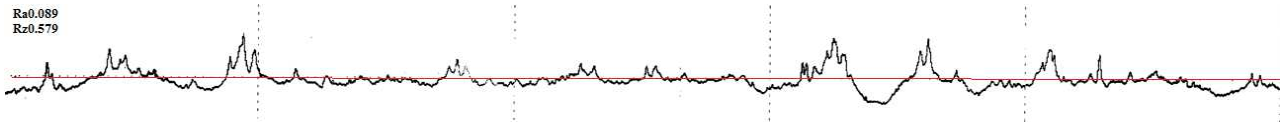


а) после шлифования: Ra 0.346 мкм, Rz 2.785 мкм, Rmax 3.339 мкм

б) после хонингования: Ra 0.083 мкм, Rz=0.526 мкм, Rmax 0.684 мкм



в) после шлифования комбинированным кругом: Ra 0.242 мкм, Rz 1.818 мкм, Rmax 2.609 мкм



г) после полирования комбинированным кругом Ra 0.089 мкм Rz=0.579 Rmax 0.721

Рис. 1. Шероховатость поверхности профиля зуба

Для получения шероховатости поверхности Ra 0.1…0.08 мкм необходимо обеспечить зернистость 14-10 мкм [5]. На сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA3 получены изображения структуры (рис. 2) полировальной части круга, сделан вывод, что размеры зерен соответствуют установленным требованиям.

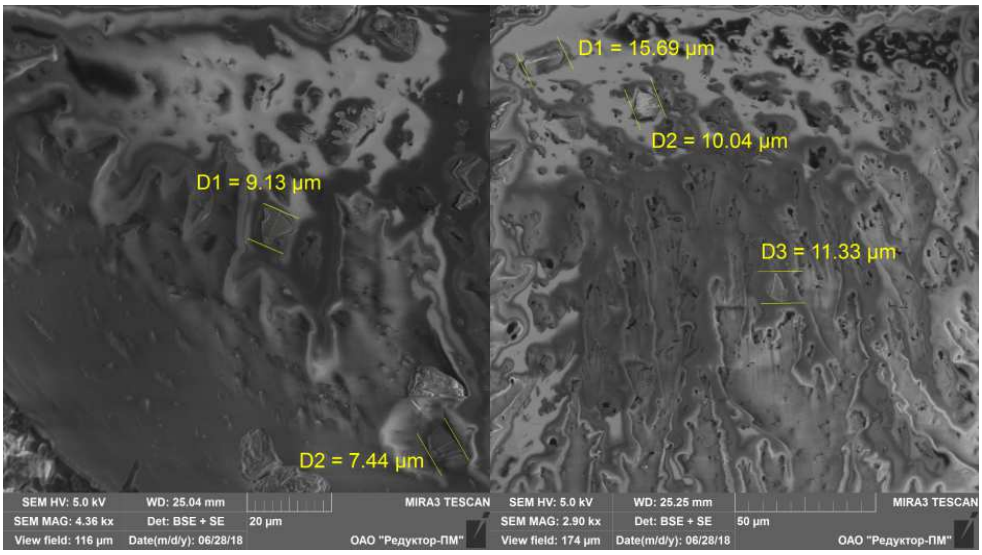


Рис. 2. Микроструктура полировальной части комбинированного круга

После выполнения операции шлифования обязателен к выполнению контроль на шлифовочные прижоги травлением. Первую шестерню проверяли после шлифования (до хонингования) зубчатого венца. Вторую шестерню проверяли после операции шлифования - полного цикла работы червячного шлифовально-полировального круга. Дефектов на обоих шестернях не обнаружено.

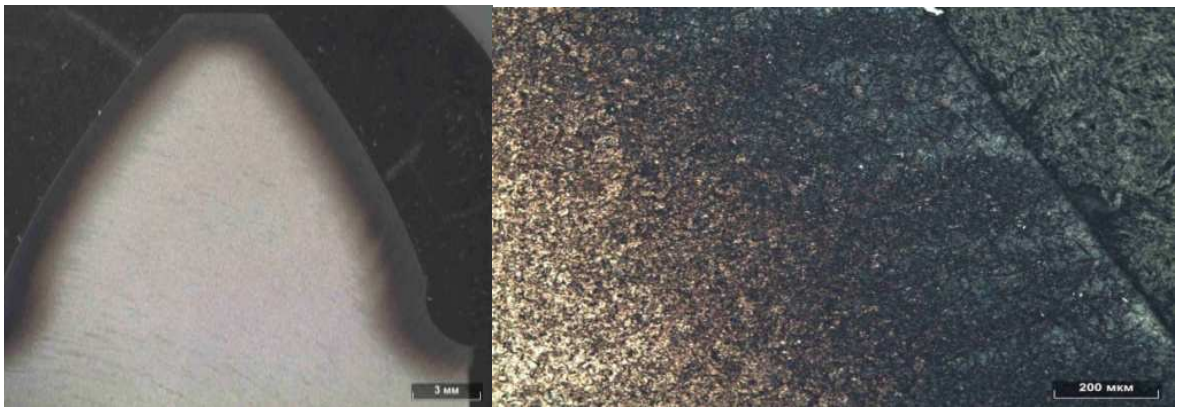
Для исследований микроструктуры зубчатого венца изготовлены образцы в виде одного зуба (рис. 3), образцы вырезаны на электроэрозионном станке с ЧПУ Sodick. Внешний вид образцов исследован с помощью стереомикроскопа Stemi 2000-C. Металлографические исследования микрошлифов, осуществлены на оптическом инвертированном микроскопе Axivert 40 MAT.

а) общий вид шестерни; б) общий вид образца

Рис. 3. Схема вырезки образцов для контроля микроструктуры

Микроструктура цементированного слоя после шлифования, полирования и хонингования не изменяется, состоит из высокоуглеродистого мелкоигольчатого мартенсита. Микроструктура сердцевины 18Х2Н4АШ состоит из низкоуглеродистого мелкоигольчатого мартенсита (рис. 4).

Для исследования микротвердости изготовлены образцы по схеме, изображенной на рис. 4. Образцы вырезаны из боковых эвольвентных поверхностей зубьев на электроэрозионном станке с ЧПУ Sodick.



а) общий вид б) микроструктура пограничной зоны

Рис. 4. Микроструктура образцов

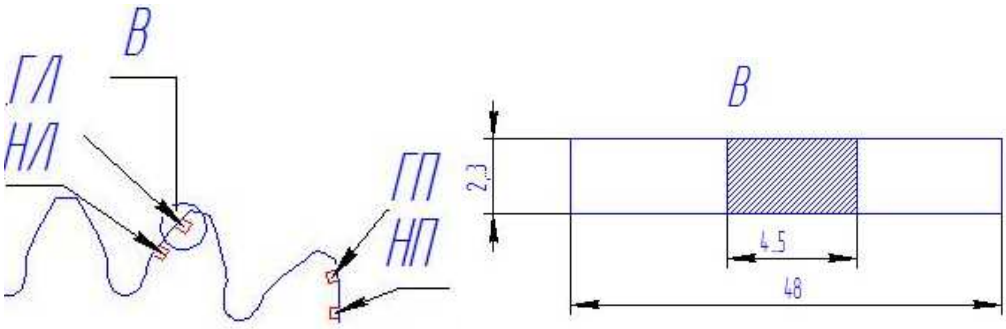


Рис. 5. Схема вырезки образцов для измерения микротвердости
(Г-головка, Н-ножка, Л-левая, П-правая сторона)

Оценка микротвердости проведена методом восстановленного отпечатка по шкале Виккерса с помощью микротвердомера MICROMET 5104. На рис. 6 приведен график распределения микротвердости образцов после газовой цементации и последующей механической обработки - хонингования и полирования. В результате исследования микротвердости цементированной поверхности зубчатого венца, установлено, что требование HRC≥61 выполнено для двух вариантов обработки. Минимальное значение по шкале Виккерса не менее HV≥715. Твердость после хонингования приближается к минимальному значению на расстоянии 395 мкм от поверхности. Микротвердость образцов после хонингования - головки правой и головки левой - на расстоянии 20 мкм от поверхности отличается на 40 единиц. Микротвердость правой и левой ножки на этом же расстоянии от поверхности отличается на 5 единиц. Если сравнить микротвердость на правых головках после хонингования и полирования, то после полирования микротвердость на больше 55 единиц. При этом левая головка после хонингования на 40 единиц больше чем после полирования. Разброс значений на одном образце обусловлен неоднородностью нанесения покрытия и погрешностью измерения. Перепад значений, обработанных с различной финишной операцией, ожидаем, так как шестерни были выбраны не из одной партии по химико-термической обработке и размер припуска на финишные операции отличался.

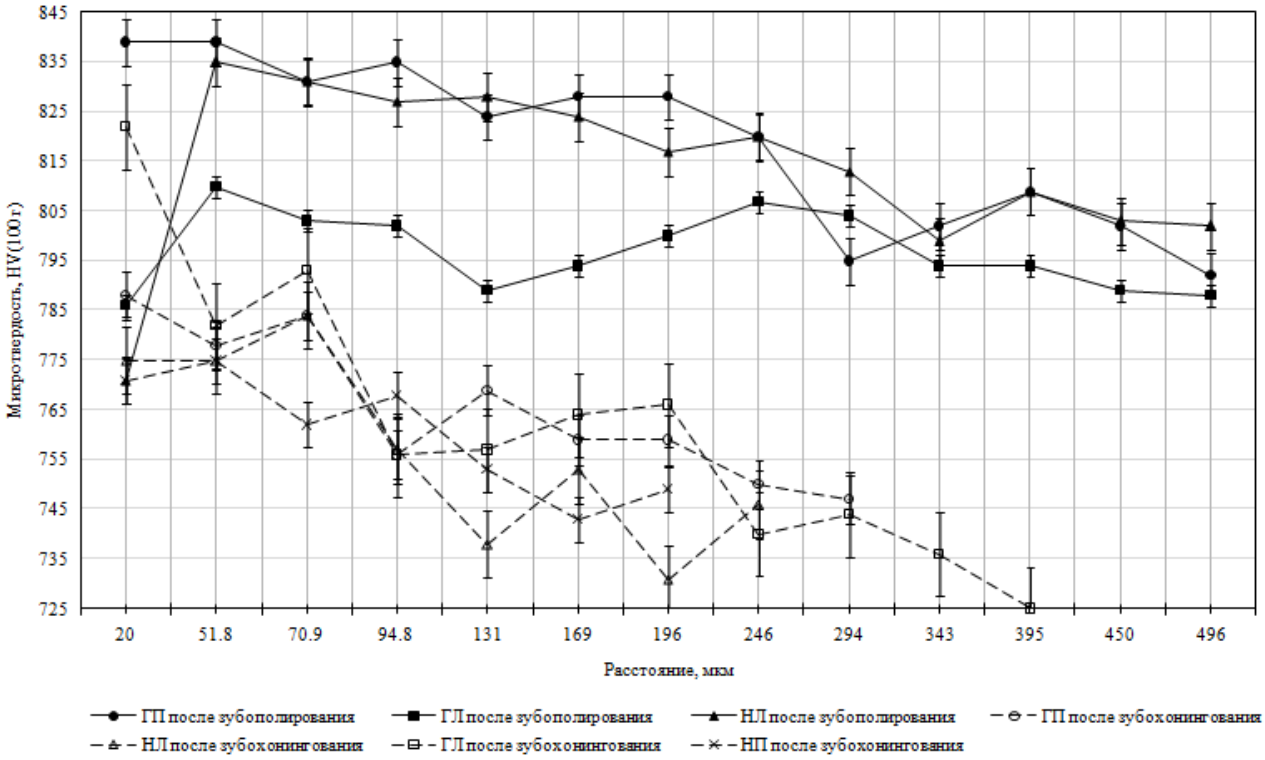


Рис. 6. График распределения микротвердости цементированной поверхности зуба

Для исследования остаточных напряжений разрушающим методом Н.Н. Давиденкова на установке ПИОН-2 по методике ПИ 1.4.804-84 (НИАТ-1985 г.) вырезались образцы из боковых эвольвентных поверхностей зубьев электроэрозионным методом согласно схеме, изображенной на рисунке 4. Результаты измерений приведены на рис.7.

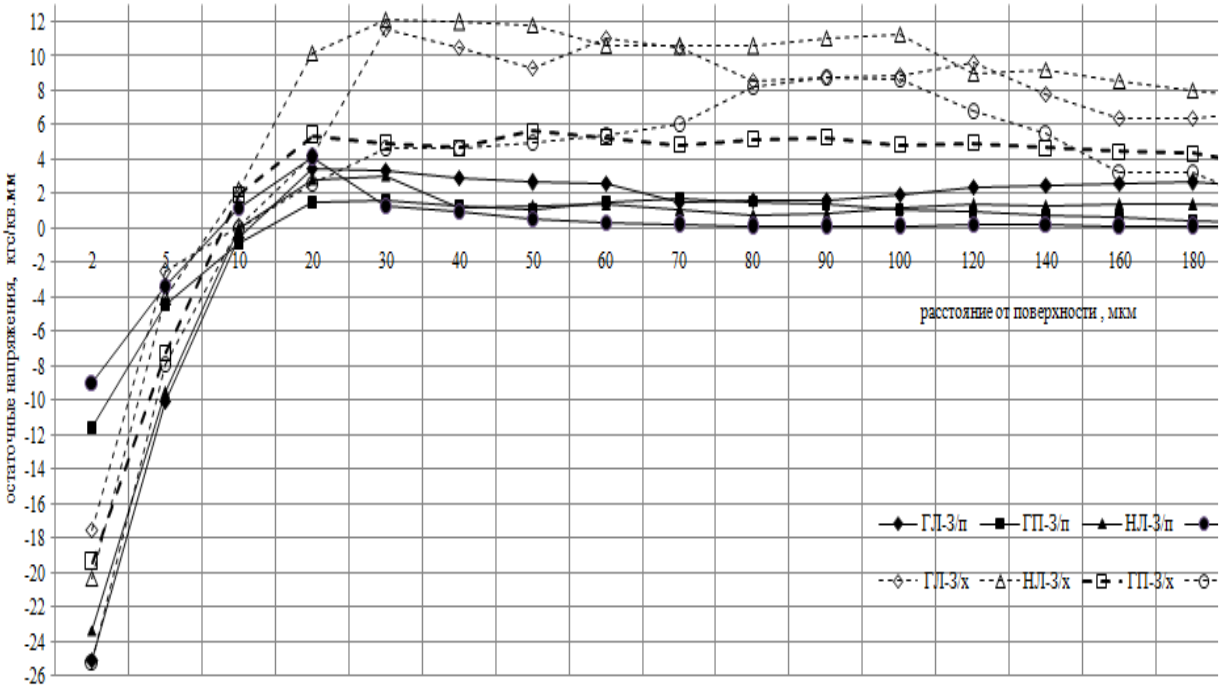


Рис. 7. Эпюры распределения остаточных напряжений на образцах

В поверхностном слое зубьев образуются сжимающие напряжения, не зависимо от финишной операции. Существенной разницы по величине и характеру распределению остаточных напряжений по глубине между образцами на головке и ножке зубьев с левой и правой стороны не выявлено. Наибольшие сжимающие напряжения обнаружены левой ножке после полирования и на правой ножке после хонингования, а наименьшие – при операции шлифования. Наибольшие растягивающие напряжения обнаружены левой ножке после хонингования. В целом распределения остаточных напряжений на образцах с одного зуба после полирования наиболее благоприятны, так как имеют минимальные растягивающие напряжения на большем расстоянии от поверхности.

3. Заключение

Можно сделать вывод, что операция обкатного шлифования комбинированным червячным шлифовально-полировальным кругом является альтернативным методом хонингованию для обработки авиационных зубчатых колес. Полученные результаты исследования качества поверхностного слоя свидетельствуют о сопоставимых качественных и количественных характеристиках. Наибольшую важность представляют собой результаты измерения шероховатости, при полировании Ra 0.089 мкм, а при хонинговании Ra 0.083 мкм. При чем шероховатость при хонинговании взята наиболее удачной из всей выборки. Наиболее часто получаемые результаты измерения шероховатости после хонингования Ra 0.13±0,03 мкм. И в большей степени зависят от качества предварительной правки зубчатого алмазного хона. Тогда как при полировании правка круга осуществляется автоматически на станке и получение шероховатости обеспечивается с большим попаданием в диапазон Ra≤0.1 мкм без значительных усилий. Исследования микроструктуры и контроля на отсутствие на шлифовочных прижогов подтверждает возможность использования полирования: прижоги не обнаружены, а микроструктура образцов не отличается. Исследования микротвердости образцов не имеют значительных отличий. Микротвердость в большей степени зависит от параметров химико-термической обработки и режимов шлифования, которое присутствует как до хонингования, так и до полирования. Поэтому если не нарушены условия проведения химико-термической обработки и параметры шлифования, твердость будет обеспечена вне зависимости от доводочной операции, при которых снимается припуск в десятки микрон. После операций хонингования и полирования в поверхностном слое обнаружены сживающие остаточные напряжения. Величина сжимающих остаточных напряжений и глубина их залегания также в большей степени зависит от условий шлифования, так как именно при шлифовании снимается наибольший припуск после химико-термической обработки и возможна сильная тепловая нагрузка, которая способствует наведению неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений. А так как условия шлифования одинаковые, то и большой разницы в величине остаточных напряжений не обнаружено.

Список литературы: **1.** Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справочник/Под ред. Э.Б. Вулгакова. - М.: Машиностроение, 1981. – 374 с., ил. **2.** Калашников А.С. Технология изготовления зубчатых колес. М.:Машиностроение, 2004. 480 с ил. **3.** https://ritm-magazine.ru/ru/public/shlifovanie-i-polirovanie-zubchatyh-koles. **4.** 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. **5.** Зубарев Ю.М., Юрьев В.Г. Абразивные инструменты. Разработка операций шлифования: учебное пособие. СПб.: Изд-во "Лань", 2018. - 360 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОВИХРЕВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Макаров В. Н., Макаров Н. В., Бельских А.М., Арсланов А.А., Пешкова И.Д.
(ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», ул. Куйбышева 30, 620144, Екатеринбург, Россия)
Тел/Факс: +7 (963) 0499432; E-mail: mnikolay84@mail.ru

Abstract: *The introduction of recycling of technogenic wastes is limited by demanding fractional composition and dispersion of particles. Insufficient perfection of equipment and technology of their classification is a limiting factor of the efficiency increase of utilization of fine waste. Quite strict requirements of the classification by dispersion of median size of thin dispersed wastes proves the necessarily of funds for their realization. To ensure high-quality raw materials in the production of materials with unique properties, we need a technology in which the classification according to the dispersion of the median particle size will be independent of their physical and mechanical characteristics.*

Key words: Утилизация, классификация, гидровихревая инерционная кинематическая коагуляция, труба Вентури.

Цель исследований. Математическое моделирование и построение уравнений инерционной гидровихревой кинематической классификации в кипящем слое частиц для создания устройства ее реализации в виде гидровихревого классификатора Вентури.

Методы исследований. Основаны на подтвержденной гипотезе об определяющем влиянии на траекторию движения частиц сил инерционного неустановившегося гидровихревого процесса их взаимодействия, с вращающимися каплями жидкости в плоскости кипящего слоя по отношению к силам, обеспечивающим движение кипящего слоя.

Результаты исследований. Построена математическая модель гидровихревой инерционной кинематической классификации микрочастиц техногенных отходов. Получены уравнения движения мелкодисперсной системы, содержащей капли жидкости с интегрированными в них частицами в условиях неустановившегося гидродинамического инерционного движения в процессе классификации. Подтверждена зависимость диаметра поглощаемых частиц от угловой скорости вращения капель жидкости в процессе гидровихревой классификации. Установлена зависимость времени релаксации капель жидкости с интегрированными в них микрочастицами в процессе гидровихревой классификации от их медианного размера. Проведены испытания опытно-промышленного образца гидровихревого классификатора Вентури ГКВ-160.

Введение. Утилизация, т. е. использования техногенных минеральных образований в производстве высокотехнологичной продукции способствует повышению конкурентоспособности экономики России. Однако утилизация мелкодисперсных отходов ограничена несовершенством техники и технологии и их классификации [1].

Возвратная микросодержащая глиноземная пыль, будучи оборотным балластом, массовая доля которого достигает 8 – 15 млн. т/год от получаемого глинозема представляет собой высококачественный легирующий элемент в производстве материалов для электронной промышленности [2].

Не менее важным является рынок композитных материалов и сплавов, для производства которых требуются легирующие материалы, их качество напрямую

зависит от совершенства технологических переделов подготовки, классификации исходного сырья [3].

Требования классификации по дисперсии отходов обусловливается необходимостью поиска способов и технических средств, которые в условиях распределения физико-механических, геометрических, кинематических параметров микрочастиц могут эффективно их достигать.

Методология и объект исследования. Гидровихревая инерционная классификация – процесс выделения частиц заданного медианного размера и дисперсии из отходов, находящихся в состоянии «кипящего слоя» путем формирования траекторий их движения к приемному бункеру под действием инерционных сил неустановившегося процесса гидровихревого взаимодействия с вращающимися каплями жидкости за период менее времени релаксации.

На базе известной модели кинетической гетерокоагуляции, частицы пыли каплей жидкости при $\omega_ж = 0$ в статье [4] предложена графоаналитическая модель гидровихревой ортокинетической гетерокоагуляции.

Полученные в статье [5] уравнения использованы для расчета коэффициента вариаций медианного диаметра в виде:

$$K_\omega^d = 48\frac{\delta_{ж\text{-}г}}{(\rho_ч - \rho_г)V_ж^2}\cdot K_\omega^2\cos\theta\left(\omega_ж^3 - K_\omega^2\cdot\omega_ж^7\right) - K_\omega\cdot\sin\theta\cdot\omega_ж ., \qquad (1)$$

где $d_{ч\,min}$ – минимальный диаметр поглощаемой твердой частицы в условиях классической коагуляции при $\omega_ж = 0$, м; $\rho_ч$, $\rho_г$ – плотность частицы и газа соответственно, кг/м^3; $V_ж$, $V_г = V_ч$ – скорость капли жидкости и скорость газа, равная скорости частицы, м/с; $\delta_{ж\text{-}г}$ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред «жидкость-газ», Дж/м^2; θ – краевой угол смачивания на границе «жидкость-газ», рад; $K_\omega = \dfrac{\pi\rho_ж d_{ч\,min}^3\sin^4\theta}{8\delta_{ж\text{-}г}\cos\theta}$; $\rho_ж$ – плотность капли жидкости, кг/м^3.

Из уравнения (1) следует, что угловая скорость вращения капель жидкости может быть эффективным управляющим параметром в процессе гидровихревой классификации гидрофобных частиц отходов. Отличительной особенностью гидровихревой классификации является ее высокая чувствительность к дисперсии медианного размера микрочастиц, т. к. разделение их основано на гидровихревой коагуляции, при том, что размер капель жидкости существенно больше поглощаемых ими микрочастиц.

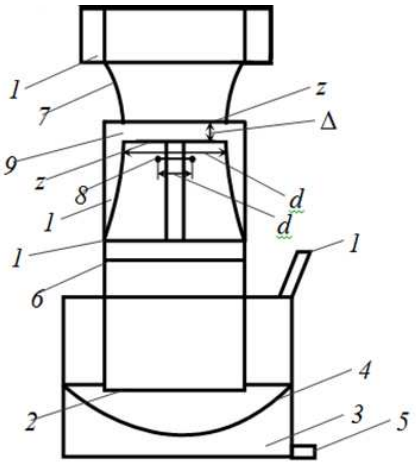


Рис. 1. Принципиальная схема гидровихревого классификатора Вентури

Для утилизации микрочастиц техногенных отходов предложен гидровихревой классификатор Вентури (рис. 1).

Конструктивно гидровихревой классификатор Вентури включает в себя пневмотранспортный трубопровод для вертикального перемещения частиц сыпучих материалов и устройство для гидровихревого разделения частиц по фракциям за счет инерционной гетерокоагуляции их вращающимися каплями жидкости, состоящая из трубы Вентури по оси которой в критическом сечении установлен аэратор с вихревыми форсунками, а по периметру установлен приемный кольцевой бункер.

Кинетическая энергия и скорость вращения капель жидкости, обеспечивают гарантированную коагуляцию частиц отходов с заданным минимальным диаметром.

Результаты исследований. Для построения системы уравнений движения введем понятия аэродинамического диаметра и плотности микрочастиц и представим:

$$d_{\Sigma} = \frac{6 \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi}{6}\left(d_{ж}^3 + d_{ч}^3\right)}}{\pi};\ \rho_{\Sigma} = \frac{d_{ж}^3 \cdot \rho_{ж} + d_{ч}^3 \cdot \rho_{ч}}{d_{ж}^3 + d_{ч}^3}. \quad (2)$$

где $d_{ж}$ – диаметр капли жидкости, м; $d_{ч}$ – диаметр микрочастицы, м.

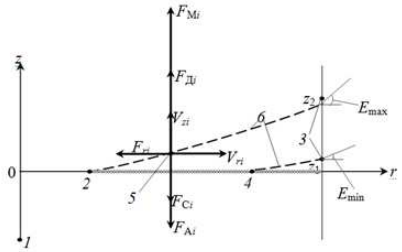


Рис. 2. Схема движения капли жидкости в условиях гидровихревой классификации

Уравнение движения *i*-частицы при ее полном поглощении каплей жидкости в проекции на ось 0*r*, в плоскости расположения гидровихревых форсунок аэратора, в соответствии с классическим уравнением Ньютона, с учетом рис. 2 запишем в виде [6]:

$$m_i \frac{\partial V_{ri}}{\partial t} = F_{ri}, \quad (3)$$

где $F_{ri} = k_i \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2 \rho_{г} \cdot V_{\Sigma i}^2$ – сила сопротивления движению частицы отходов в гидровихревом классификаторе;

k_i – коэффициент сопротивления *i*-й частицы; $d_{\Sigma i}$ – диаметр *i*-й частицы, м; $\rho_{г}$ – плотность газа, кг/м^3; $V_{\Sigma i}$ – скорость *i*-й частицы, м/с.

Уравнение движения *i*-й частицы в проекции на ось 0*z* имеет вид:

$$m_i \frac{\partial V_{zi}}{\partial t} = -F_{Ai} - F_{Ci} + F_{Дi}, \quad (4)$$

где: F_{Ai} – сила Архимеда, направленная вниз, действующая на *i*-ю частицу, являющаяся аналогом силы тяжести, $F_{Ai} = \frac{1}{6}\pi d_{\Sigma i}^3 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{г}) g$; F_{Ci} – сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья, $F_{Ci} = \frac{\varphi}{2} \mu_{г} \pi d_{\Sigma i} V_{zi}$; $F_{Дi}$ – сила давления сжатого газа, создающего кипящий слой, $F_{Дi} = C_c \rho_{г} V_{гi}^2 \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2$; $C_{с}$ – коэффициент силы давления сжатого газа, создающего кипящий слой действующей на *i*-ю частицу; $V_{г}$, V_{zi} – скорость сжатого газа, создающего кипящий слой и вертикальная составляющая скорости *i*-ю частицы м/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; φ_i – коэффициент формы частицы в законе Стокса; μ – коэффициент динамической вязкости газа, кг/мс. Таким образом, уравнение вертикального перемещения в проекции на ось 0*z* *i*-й частицы отходов может быть представлено в виде:

$$V_{zi} = \frac{\frac{1}{2} C_c \rho_{г} V_{гi}^2 d_{\Sigma i} - \frac{1}{3} d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{г}) g}{\varphi \cdot \mu_{г}}. \quad (5)$$

Уравнение гидродинамически неустановившегося режима инерционного движения микрочастиц (3) однородно с уравнением Буссинеска, определяющим время релаксации $\tau_{чi}$ и связывающим его с коэффициентом сопротивления k_i [7]:

$$\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} = \frac{V_{ri}}{\tau_{чi}}, \quad (6)$$

где: $\tau_{чi} = \tau_{\Sigma i} = k_i \frac{2 + 3\overline{\mu}}{3 + 3\overline{\mu}} \cdot \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{г})}{18 \mu_{г}}$; $\overline{\mu} = \frac{\mu_{ж}}{\mu_{г}}$.

Уравнение для расчета времени релаксации $\tau_{\Sigma i}$ может быть получена по аналогии со статьей [4] с учетом теории подобия [8]:

$$\tau_{\Sigma cpi} = 4d_{\Sigma i}^2 \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_\Gamma)\left(1 + 0{,}07\,\mathrm{Re}_{0i}^{0{,}687}\right)(3 + 3\bar{\mu})}{\mathrm{Re}_{0i} \cdot (2 + 3\bar{\mu})\mu_\Gamma}. \quad (7)$$

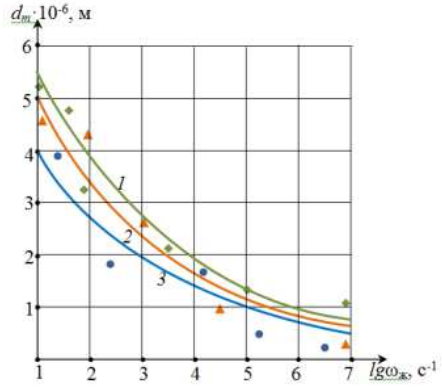


Рис. 3. Зависимость медианного диаметра смачивания частиц отходов от угловой скорости вращения капель жидкости при гидровихревой классификации:
1–уголь; *2* – окись кремния; *3*–окись алюминия

Результаты экспериментальных исследований гидровихревого классификатора, проведенного в «СМК-ТЕСТ», подтвердили достаточную для инженерных расчетов сходимость с предложенной математической моделью.

Выводы:

1. Гидровихревая гетерокоагуляция является эффективным способом классификации гидрофобных тонкодисперсных отходов.
2. Гидровихревая классификация позволяет сепарировать микрочастицы отходов в диапазоне от 0,5 – $5 \cdot 10^{-6}$ м с дисперсией медианных размеров не более 20 %.
3. Геометрические параметры гидровихревого классификатора определяются потребной производительностью и энергетическими характеристиками его аэратора.

Список литературы: 1. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control // applied sciences (switzerland). – 2017. – Т. 7, № 1. – P. 5–20. DOI: 10.3390/APP7010005/. **2.** Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants /V.I. Lyashenko, A. Gurin, F.F. Topolniy, N.A. Taran // metallurgical and mining industry. – 2017 – № 4 – P. 8–17. **3.** S. Ya. Davydov R. A. Apakashev V. N. Korukov/ Capturing Nanoparticles in Alumina Production. Refractories and Industrial Ceramics. – 2016. – Vol. 57, № 1. – P. 9-12. **4.** Макаров В.Н., Макаров Н.В., Потапов В.В., Горшкова Э.М. Перспективный способ повышения эффективности высоконапорного гидрообеспыливания. Вестник ЗабГУ. 2018. Т. 24 № **5.** С. 13–20. 5. Макаров В.Н., Косарев Н.П., Макаров Н.В., Угольников А.В., Лифанов А.В. Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции. Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело № 2, Т. 18, 2018. С. 178–189. **6.** Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Учебник для вузов. – 7–е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с. **7.** Фролов А.В., Телегин В.А., Сечкерев Ю.А. Основы гидрообеспыливания. Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 10. – С. 1–24. **8.** Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. Учебник для вузов. 4–е изд. – М.: Либроком, – 2014. – 439 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ТУРБОМАШИН ДЛЯ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Макаров В.Н., Макаров Н.В., Лифанов А.В., Матеров А.Ю., Пешкова И.Д. Арсланов А.А. (*ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», ул. Куйбышева 30, 620144, Екатеринбург, Россия.)*
Тел/Факс: +7 (963) 0499432; E-mail: mnikolay84@mail.ru

Abstract: *The use of innovative technologies to ensure efficient production and processing of mineral raw materials, is limited by the requirements for the system of aerogasodynamic safety, one of the energy-intensive elements of which are mine turbomachines, characterized by insufficient adaptability and aerodynamic loading. On the basis of the theory of attached vortices, as well as the methods of conformal mapping and singular points by S. A. Chaplygin, a mathematical model of a rotating circular grid of aerogasdynamic profiles. The problem of its aerodynamic calculation is formulated and solved, the uniqueness of the solution is proved to within a constant. The possibility of a significant increase in aerodynamic loading, adaptability and efficiency of mine turbomachines, made by radial aerodynamic schemes with built-in impeller blades vortex chambers. Using the proposed methodology, a straight-through radial vortex fan ВРВП-10А (VRVP-10A) to ventilate blind drift 3,500 m long is developed.*

Специфика конструкции радиальных турбомашин позволяет реализовать в них энергетические методы управления циркуляцией с использованием круговых решеток аэрогазодинамических профилей. При этом, источник энергии аэрогазодинамических профилей - воздух полости высокого давления турбомашины [1].

Взаимодействие потока воздуха с лопатками рабочего колеса турбомашины с встроенным устройством струйного управления циркуляцией осуществляется через устойчивую вихревую дорожку Кармана, то есть адаптивную аэродинамическую систему вихрей, обеспечивающих восприимчивость турбомашины к изменениям внешней среды. Энергетические характеристики вихревой системы аэрогазодинамических профилей определяются не только геометрическими параметрами вихревой камеры и профилей лопаток, но и обратной связью их с характеристиками внешней сети, что, в сущности, и определяет повышенную адаптивность турбомашин.

На рис.1 приведен защищенный патентом профиль лопатки 1 рабочего колеса турбомашины, во внутреннюю полость которого вписаны вихревые камеры 2, входные 3 и выходные 4,5 каналы которых выполняют функции стоков и источников струйного управления циркуляцией скорости потока V вокруг профиля 1. Струи источников управляющего потока V_ω $V_ц$, энергетические параметры которых взаимосвязаны с характеристиками внешней сети, замедляют, либо ускоряют скорость воздуха $V_р$ $V_т$ на рабочей и тыльной поверхностях профиля лопатки 1 соответственно за счет эффекта Магнуса, изменяя циркуляцию воздуха вокруг его и как результат аэродинамическую характеристику турбомашины адаптивно внешним условиям [2,3].

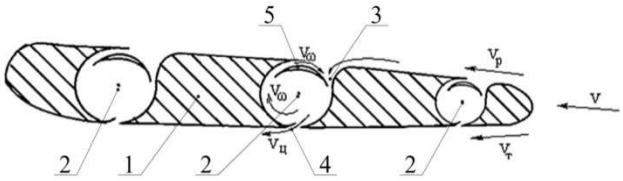


Рис. 1. Профиль лопатки рабочего колеса шахтной турбомашины с вписанными в него вихревыми камерами

В статье базовый принцип конформного преобразования для построения канонического потенциала течения модернизирован с отображением многолистной

римановой области круговой решетки аэрогазодинамических профилей со струйным управлением циркуляции на многолистную каноническую область [4-6].

Согласно общей постановке задачи, в плоском случае обтекания круговой решетки с $n_л$ профилями и $n_и$, $n_с$ струями источников и стоков вихреисточников на каждом профиле ставится в соответствие ($n_и$ + n_c +1) = (n+1)-листный обтекаемый контур. На первом листе (n+1)-листной римановой поверхности – в физической плоскости располагается рассматриваемая круговая решетка аэрогазодинамических профилей, в вихревые камеры которых через входные и выходные каналы соответственно втекают и вытекают струи воздуха.

Используя принцип гидродинамической аналогии, аддитивности осуществим конформное отображение внешности $n_л$-листной римановой поверхности деформированного круга в области $D_{в\gamma}$ на (n+1)-листную римановую поверхность D_z схематизированного контура круговой решетки аналитических профилей произвольной формы (рис. 2).

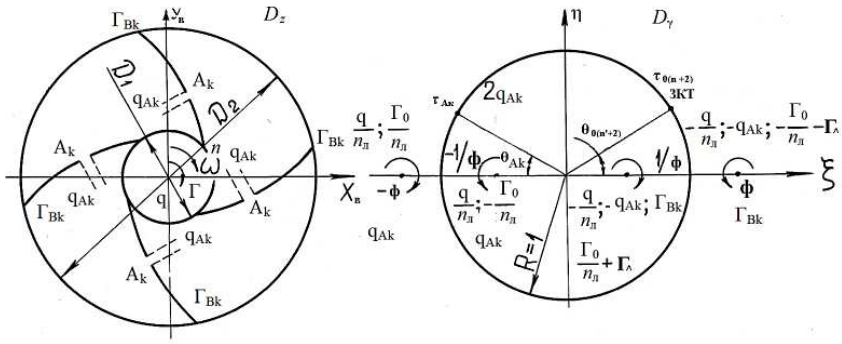


Рис 2. Принципиальная схема последовательности конформного преобразований $n_л$-листной области D_γ в (n+1)-листную область D_z

С учетом предложенной графической модели представленной на рис. 1, комплексный потенциал течения $F_0[Z(\gamma)]$ получим в виде:

$$F_0[z(\gamma)]=\phi_0[z(\gamma)]+i\psi_0[z(\gamma)]=\frac{q\ln(\gamma+\Phi)\left(\gamma+\frac{1}{\Phi}\right)}{(\gamma-\Phi)\left(\gamma-\frac{1}{\Phi}\right)}-\frac{(\Gamma_0-n_л\Gamma_л)i^{-1}\ln\left(\gamma-\frac{1}{\Phi}\right)}{\gamma-\Phi}- \quad (1)$$

$$-\frac{\Gamma_0 2\pi n_л}{i^{-1}\ln(\gamma+\Phi)\left(\gamma+\frac{1}{\Phi}\right)}+\int V_в'\left[z(\gamma)\right]d\gamma-\int\left[u_\tau(z)\frac{dz}{d\gamma}\right]d_\gamma,$$

где $V_в$ – касательная составляющая скорости потока вытеснения на единичной окружности в области D_γ определяемая по известной функции $Z(\gamma)$ с помощью интеграла Пуассона; касательная составляющая переносной скорости течения в плоскости Z; q – коэффициент расхода источника, расположенного в центре круговой решетки аэрогазодинамических профилей в области D_z; Γ_0 – интенсивность вихря (циркуляция), расположенного в центре круговой решетки профилей в области D_z, при наличии предварительной закрутки потока на входе в круговую решетку; $\Gamma_л$ – интенсивность вихря (циркуляция) вокруг профиля круговой решетки в плоскости D_z; φ – функция потенциала течения в области D_γ; Ψ - функция тока (линия тока) течения в области D_γ; $z = re^{iv}$, $\gamma = ce^{i\theta}$ – комплексные координаты точек в областях D_z и D_γ соответственно; r, v – радиус и полярный угол на плоскости *2* соответственно; ρ, θ – радиус и полярный угол на плоскости у соответственно; Φ – формпараметр эквивалентной круговой решетки профилей в виде отрезков логарифмических спиралей; $\beta_л$ – угол логарифмической

спирали эквивалентной решетки профилей; $\gamma_1 = \Phi_1^{-1} e^{i\theta}$, $\gamma_2 = \Phi_2^{-1} e^{i\theta_2}$, $K_\Phi = e^{2i\beta_л + c}$ – комплексные параметры, определяющие форму профиля исходной круговой решетки аналитических профилей. С учетом ограничений, накладываемых на понятие аналитический профиль, точки γ_1, γ_2 могут быть расположены только внутри единичного круга области D_γ, при этом должно сохраняться направление обхода контура профиля в области D_z.

Дополнительный комплексный потенциал течения вне круга единичного радиуса области D_γ определяем с учетом свойств функций комплексного переменного и вышесказанных закономерностей и рис. 2:

$$F_{A_к}(\gamma) = \phi_{A_к}(\gamma) + i\psi_{A_к}(\gamma) = \pi^{-1} q_{A_к} \ln\left(\gamma - \tau_{A_к}\right) - 0{,}5\pi^{-1}\left[q_{A_к}\left(\ln\left(\gamma^2 - \Phi\right) + \right) q_{A_к} \ln\left(\gamma^2 - \frac{1}{\Phi^2}\right)\right]. \quad (2)$$

Тогда общий вид комплексного потенциала $F[Z(\gamma)]$ течения вне круга единичного радиуса на $n_л$-листной римановой области D_γ запишем в виде:

$$F\left[z(\gamma)\right] = F_0\left[z(\gamma)\right] + \sum_{k=1}^{n} F_{A_к}(\gamma) = F_0\left[z(\gamma)\right] + \pi^{-1}\sum_{k=1}^{n} q_{A_к} \ln\left(\gamma - \tau_{A_к}\right) - 0{,}5\pi^{-1} q_{\Sigma A}\left[\ln\left(\gamma^2 - \Phi^2\right) + \ln\left(\gamma^2 - \frac{1}{\Phi^2}\right)\right], \quad (3)$$

где

$$\sum_{к=1}^{n} q_{A_к} = q_{\Sigma A}.$$

С учетом свойства сопряженности, постулата Жуковского-Чаплыгина-Кутта при отсутствии вихреисточника в точке τ_{Ak} при $k = (n+2)$, формула для расчета циркуляции $\Gamma_л$ примет вид:

$$\Gamma_л = -4q\left[1 + \left(\Phi^2 - 1\right)^2\left(\Phi^2 + 2\cos\theta_{0(n+2)} + 1\right)\right] - \frac{\Phi\left(\Phi^2 + 1\right)\sin\theta_{0(n+2)}}{n_л\left(\Phi^2 - 1\right)^2\left(\Phi^2 + 2\Phi\cos\theta_{0(n+2)} + 1\right)} -$$

$$- \frac{\left(2\pi V'_{в(n+2)}\right)\left(\Phi^2 - 2\Phi\cos\theta_{0(n+2)} + 1\right)}{\left(\Phi^2 - 1\right)} - \frac{4\Gamma_0\Phi\cos\theta_{0(n+2)}}{n_л\left(\Phi^2 + 2\Phi\cos\theta_{0(n+2)} + 1\right)} + \frac{\Phi\sin\theta_{0(n+2)}\sum_{к=1}^{n} q_{A_к}}{1 - \cos\left(\theta_{A_к} - \theta_{0(n+2)}\right)}. \quad (4)$$

Дополнительная циркуляция обусловленная адаптивными вихрями, создаваемыми системой струйного управления, определяется расходом источников и стоков вихревых камер $q_{Ак,}$ их положением $\theta_{Ак}$, положением задней угловой точки профиля $\theta_{(n+2)}$ и формпараметром круговой решетки профилей Ф, при этом расход $q_{Ак}$ адаптивно взаимосвязан с аэродинамическим сопротивлением внешней сети:

$$\Gamma_{A_к} = \sum_{к=1}^{n} q_{A_к} \frac{\Phi\sin\theta_{0(n+2)}}{1 - \cos\left(\theta_{A_к} - \theta_{0(n+2)}\right)}. \quad (5)$$

На базе предложенной математической модели разработана и экспериментально проверена радиальная аэродинамическая схема Ц144-24, по которой спроектирован прямоточный радиально-вихревой вентилятор ВРВП-10А, аэродинамаческая характеристика которого приведена на рис. 2.

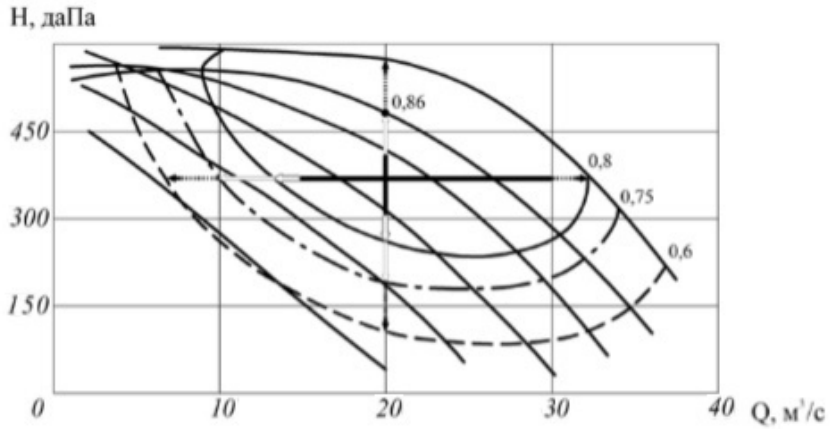


Рис. 3. Аэродинамическая характеристика вентилятора ВРВП-12А с радиальным энергетическим регулятором

Выводы:

1. Предложенная математическая вихревого управления циркуляцией позволяет производить аэродинамический расчет параметров шахтных турбомашин запатентованной конструкции, обеспечивающих существенный рост их аэродинамической нагруженности.
2. Аэродинамическая связь вихревых камер струйного управления циркуляцией с характеристиками внешней сети обеспечивает рост аэродинамической нагруженности шахтных радиальных турбомашин предложенной конструкции на 75%
3. Испытания прототипа ВРВП-10А с радиальным энергетическим регулятором подтвердили достаточную достоверность предложенной математической модели, возможность создания шахтных радиальных турбомашин нового поколения.

Список литературы: 1. J. P. Gostelow B. Eng., M.A., Ph.D., M.A.S.M.E., M.R.Ae.S. Professor, Head of School of Mechanical Engineering, The New South Wales Institute of Tehnology, Sydney, Australia. 391 с. **2.** Патент РФ 2543638. Способ повышения давления и экономичности лопастных турбомашин радиального типа. Косарев Н.П., Макаров Н.В., Макаров В.Н. Опубл.: 10.03.2015, Бюл. №7. **3.** Патент РФ 2557818. Радиально-вихревая турбомашина. Макаров Н.В., Макаров В.Н. Ясаков С.Е. Опубл.: 27.07.2015, Бюл. №21. **4.** Torshizi, S.A.M., Benisi, A.H. and Durali, M. (2016) Numerical Optimization and Manufacturing of the Impeller of a Centrifugal Compressor by Variation of Splitter Blades. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Seoul, 13-17 June 2016, 1-7. **5.** Gu, C.W., Chen, L., Wu, P. and Dai, R. (2013) Design and Optimization for Centrifugal Impeller S2 Streamsheet Based on Circulation Profile. Fluid Machinery, 41, 24-28. (In Chinese). **6.** MAO, Y.F. (2016) Numerical Study of Correlation between the Surge of Centrifugal Compressor and the Piping System. Ph.D. Thesis, Xi'an Jiaotong University, Xi'an. (In Chinese)

ТЕХНОЛОГИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВОВ ОПАСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Макаров В. Н., Макаров Н.В., Угольников А.С., Арсланов А.А. Пешкова И.Д.
(ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», ул. Куйбышева 30, 620144, Екатеринбург, Россия.)
Тел/Факс: +7 (963) 0499432; E-mail: mnikolay84@mail.ru

Abstract: *A mathematical model hidroviaria inertial kinematic coagulation is suggested, which significantly increases the energy efficiency of localization of explosions of aerosols, graphic model of the interaction between liquid droplets and particles of explosive aerosols in the contact zone at the moment of impact is clarified. The hypothesis about decrease of the disjoining action of the gaseous medium in the zone of contact of the particles of explosive aerosols and liquid droplets is suggested. Expressions for the effective values of the Stokes and Reynolds criteria are modified. The proposed method of hydro-vortex inertial coagulation makes it possible to reduce the water consumption required for the localization of explosive aerosols by 20%.*

Key words: *экотехнология, пылеподавление, коагуляция, гидрофобность, циркуляция, угол смачивания, адгезия, энергия поглощения, присоединенный вихрь.*

Гидрообеспыливание является одним из наиболее распространенных методов предотвращения взрывов пылевых смесей. обеспечения санитарно-гигиенических условий в технологиях горного производства [1-3].

При высоконапорном гидрообеспыливании существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов обеспечения санитарно-гигиенических условий и как результат приводит к падению конкурентоспособности экотехнологии в недропользовании [4].

Актуальность внедрения технологии требует нового подхода к построению математической модели инерционной ортокинетической гетерокоагуляции водно-пылевого аэрозоля [5-6].

Целью моделирования параметров системы «капля жидкости – частица пыли» в процессе предлагаемой вихревой инерционной кинематической коагуляции является исследование механизма взаимодействия в системе: жидкое-твердое в условиях действия присоединенного вихря, индуцированного вращающейся каплей жидкости [5-6].

Для захвата гидрофобных частиц пыли каплей жидкости необходимо совершить работу внешних инерционных сил, которая соответствует кинетической энергии $W_к$ взаимодействия в процессе их контакта. Захват частицы пыли каплей жидкости произойдет при условии, когда её кинетическая энергия $W_к$ будет больше или равна энергии поглощения $П_{ж-г}$, соответствующей сумме энергии адгезии $W_{АД}$ ($F_{АД}$ – сила адгезии), определяемой удельной энергией отрыва, и энергии смачивания $W_{ж\text{-}г}$ ($F_{ж-г}$ – сила поверхностного натяжения), определяемой удельной энергией растекания [5].

С учетом выше изложенного и статьи [5] получим:

$$d_{п\,min} = 24\ \frac{\delta_{ж-г}\,Cos\,\theta}{(\rho_п-\rho_г)(V_ж-V_г)^2}, \qquad (1)$$

где: $d_{п\,min}$ – минимальный диаметр поглощаемой частицы пыли, м; $\rho_п$, $\rho_г$ – плотность частицы пыли и газа соответственно, кг/м^3; $V_ж, V_г = V_п$ – скорость капли жидкости и скорость газа, равная скорости частицы пыли, м/с ; $\delta_{ж-г}$ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред «жидкость-газ», Дж/м^2; θ – краевой угол смачивания на границе раздела двух сред «жидкость-газ», рад.

На базе известной модели кинетической коагуляции, частицы взрывоопасной

аэрозоли каплей жидкости при $\omega_ж$=0 [5] предложена графическая модель вихревой инерционной кинематической коагуляции, при которой капля жидкости вращается с угловой скоростью $\omega_ж$, индуцируя в зоне контакта присоединённый вихрь (см. рис. 1).

Из рисунка видно, что площадь контакта капли жидкости с частицей пыли, определяемая диаметром периметра смачивания $d_{см}$ оказывает непосредственное влияние на величину краевого угла смачивания θ. Чем меньше радиус кривизны поверхности капли в зоне контакта, т.е. меньше ее размер, тем меньше краевой угол смачивания θ, и, следовательно, тем больше потребуется затратить энергии для полного поглощения частицы пыли диаметром $d_{п\,min}$ каплей жидкости диаметром $d_ж$, определяемой поверхностной энергией отрыва и растекания.

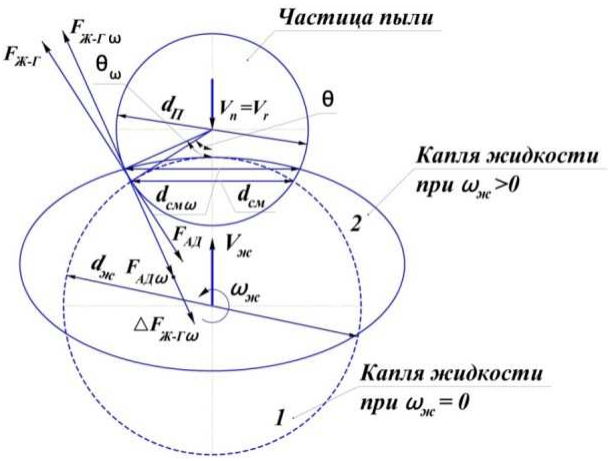


Рис. 1. Графическая модель вихревой кинематической коагуляции частицы пыли каплей жидкости: 1 – модель классической инерционной ортокинетической гетерокоагуляции, т.е. при $\omega_ж = 0$; 2 – вихревая инерционная ортокинетическая гетерокоагуляция, $\omega_ж > 0$

При вращении капли жидкости с угловой скоростью $\omega_ж$ вокруг её поверхности и в зоне контакта согласно условию Гельмгольца-Бернулли создаётся область разрежения, т.е. пониженного статического давления на величину удельной энергии $\Delta W_к$ присоединенного вихря, скорость которого согласно гидродинамической аналогии определяется по известной в теории электродинамике формуле Био-Савара. Таким образом, присоединенный вихрь, обусловленный вращением капли жидкости, снижая статическое давление в зоне ее контакта с частицей пыли, увеличивает краевой угол смачивания до величины θ_ω, способствует снижению аэродинамического энергетического барьера [4,7,8].

Изменение кинематических параметров, приводит к существенным изменениям фактических значений критериев Стокса и Рейнольдса, которые в условиях вихревой определяются по формулам:

$$Re_{ж\omega} = \frac{d_ж \rho_ж \sqrt{(V_ж - V_г)^2 + 0{,}25\omega_ж^2 d_п{}^2 \sin\theta}}{\mu_Г};$$

$$Stk_\omega = \frac{d_п{}^2(\rho_п - \rho_г)\sqrt{(V_ж - V_п)^2 + 0{,}25\omega_ж^2 d_п{}^2 \sin\theta}}{18\mu_Г d_ж}, \quad (2)$$

где: $d_ж$ – диаметр капли жидкости, м; $\rho_ж$ - плотность капли жидкости, кг/м^3; $\mu_Г$ – коэффициент динамической вязкости газа, кг/мс.

Сила давления разрежения в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, обусловленная влиянием присоединенного вихря можно выразить уравнением:

$$\Delta F_{ж-г\omega} = \frac{1}{2}\rho_ж \Gamma_\omega \omega_ж S_к S_п^{-1} \quad , \quad (3)$$

где: Γ_ω - циркуляция в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, м^2/с; S_k - площадь контакта соответствующая площади смачивания, м^2; $S_п$ – площадь поверхности частицы пыли, м^2;

Уравнение для дополнительной кинетической энергии, равной энергии вихря, присоединенного к вращающейся капли жидкости, с учётом (3) и рис. 1, уравнений Бернулли и Остроградского-Гаусса [8] получим в виде:

$$\Delta W_{к\omega} = \frac{\pi}{8}\rho_{ж} {d_{п}}^{3} \sin^{4}\theta\omega_{ж}^{2}\,. \quad (4)$$

Уравнение для силы депрессии в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, обусловленной влиянием присоединенного вихря, с учетом (3, 4)получим в виде:

$$\Delta F_{ж-г\omega} = \frac{\pi^{2}}{32}\rho_{ж} {d_{п}}^{4} \sin^{4}\theta\omega_{ж}^{2}\,. \quad (5)$$

Для вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции минимальное значение энергии для полного поглощения, с учетом уравнений (4) по аналогии с гетерокоагуляцией при $\omega_{ж} = 0$, приведенной в статье [4, стр. 13] запишем в виде:

$$П_{ж-г\,\omega} = П_{ж-г} - \Delta W_{к\omega} = 2\delta_{ж-г}\cos\theta_{\omega}\,, \quad (6)$$

где $П_{ж-г} = 2\delta_{ж-г}\cos\theta$, согласно статье [5, стр. 13].

С учетом уравнений (4, 6) уравнение для краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фазы при вращении капли жидкости с угловой скоростью $\omega_{ж}$ получим в виде:

$$\theta_{\omega} = arc\cos(\cos\theta + \frac{\pi\rho_{ж}d_{п}^{3}\sin^{4}\theta\,\omega_{ж}^{2}}{8\delta_{ж-г}\cos\theta}). \quad (7)$$

С учётом (1) и (7) минимальный диаметр $d_{п\,\omega\,min}$ частицы пыли полностью поглощаемой под действием инерционных сил поступательного и вращательного движения, получим в виде:

$$d_{п\,\omega\,min} = \frac{\delta_{ж-г}\cos\text{arc}\cos(\cos\theta+\frac{\pi\rho_{ж}d_{п}^{3}\sin^{4}\theta\,\omega_{ж}^{2}}{8\delta_{ж-г}\cos\theta})}{(\rho_{п}-\rho_{г})(V_{ж}-V_{г})^{2}}\,. \quad (8)$$

Проведенные экспериментальные исследования с достаточной для инженерного расчета точностью подтвердили результаты расчетов по предложенной математической модели.

С целью установления достоверности полученных формул и критериального уравнения были проведены экспериментальные исследования для установления критического значения критерия Стокса $Stk_{п\omega\,кр}$ зависимости от угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_{ж}$, а также изменения энергетического аэродинамического барьера с изменением диаметра частицы пыли $d_{п\omega}$.

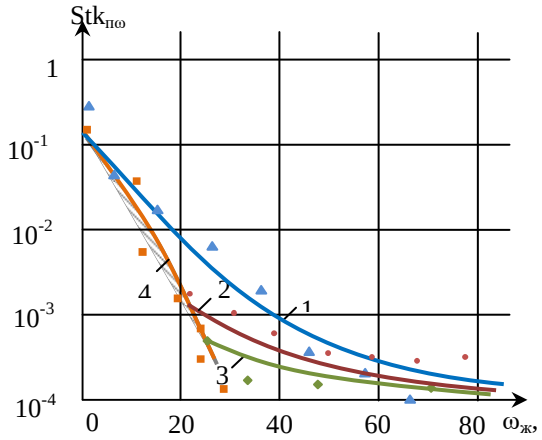


Рис. 2. Зависимость критических значений критерия Стокса от угловой скорости вращения капель жидкости ωж для различных диаметров частиц пыли 1 – dп = 5·10-6 м; 2 – dп = 2·10-6 м; 3 – dп = 5·10-7 м; 4 – граница автомодельности гидровихревой коагуляции

На рис. 2 приведен результат расчета по предложенным критериальным уравнениям вихревой инерционной ортокинетической коагуляции изменения критических значений «инерционного параметра» Стокса $Stk_{п\omega\ кр}$ в зависимости от угловой скорости вращения капель воды $\omega_ж$ диаметром $d_ж = 4{,}5 \cdot 10^{-6}$ м и диаметра частиц угольной пыли $d_{п\omega}$ при значении критерия Рейнольдса капли жидкости $Re_ж = 20$.

Анализ графиков, приведенных на рис. 2 подтверждает аналитический вывод о существовании автомодельного режима гидровихревой коагуляции для диаметров угольной пыли $d_п < 5 \cdot 10^{-6}$ м. По мере увеличения угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_ж > 0$ критические значения «инерционного параметра» $Stk_{п\omega\ кр}$ существенно уменьшаются, что подтверждает эффективность полного поглощения мелкодисперсных частиц пыли. При угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_ж = 400$ $с^{-1}$ критическое значение Стокса снижается более чем в 200 раз, позволяя полностью поглощать частицы пыли диаметром $5 \cdot 10^{-7}$ м.

Вывод:

Критические значения критерия Стокса в процессе гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции уменьшаются с увеличением угловой скорости вращения капель жидкости $\omega_ж$, уменьшая диаметр полностью поглащаемых частиц пыли $d_{п\omega}$.

Список литературы: 1. V.N. Makarov, S. Ya. Davydov. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological rocesses at industrial enterprises//Springer science + business media. – New York. 2015 - №2 – 59 – 63. **2.** Jay F. Colinet, James P. Rider, Jeffrey, M. Listak. NIOSH / translation a document. http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2010-110.pdf **3.** Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block (SCOPUS) Refractions and Industrial Ceramics Vol. 38. – No. 3 – 2017 pp. 288-292. **4.** Frolov A.V., Telegin V.A., Sechkerev Yu.A. Basics of hydro-dusting. Life Safety. - 2007. - № 10. - P. 1–24. **5.** Bautin S.P. Mathemical simulation of the vertical part of an upward swirling flow. High temperature. 2014. T. 52. №2. C. 259-263. **6.** Patent 2601495 (Russia, M.K.V64S 23 / 0,6 The method of creating the lifting force and the device for its implementation / NV Makarov, VN Makarov, published on June 22, 2015, publishes: 11/10/2016, newsletter № 31. **7.** Novakovskiy N.S., Bautin S.P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer. 2017. T. 894. № 1. C. 012067. [Novakovskiy N.S., Bautin S.P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer's problem subject to conditions on characteristic Journal of Physics: Conference Series. 2017. T. 894. № 1. C. 012067.] **8.** Loitsyansky L.G. Fluid and gas mechanics. Textbook for universities. - 7th ed., Corr. - M .: Drofa, 2003. - 840 p.

ПЕРЕРАБОТКА НЕФТИ

Малахов Р.В., Степанова Е.А. *(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)*
Тел. +7(914)6221790; E-mail: len_sta@rambler.ru; malakhov.r.99@gmail.com

Abstract: *The features of refining petroleum products are considered. A recycling scheme is presented. Methods and equipment for oil refining are indicated. Directions of oil refining are characterized.*
Key words: *petroleum products, recycling scheme, oil refining.*

Нефтедобыча и нефтепереработка являются важнейшими отраслями мировой промышленности. Продукты из нефти, получаемые современной промышленностью – это топлива различных видов, керосины, масла, мазуты, битумы, парафины, а также различные растворители, смазки, сажа, сырье для химической промышленности и прочие продукты нефтепереработки. Нефть и продукты, получаемые из неё, являются основными источниками энергии в настоящее время [1].

Переработка нефтепродуктов представляет собой сложный процесс (рис. 1). Объемы мировой добычи этого полезного ископаемого огромны и продолжают расти, и модернизация технологических процессов его переработки актуальна. После доставки на предприятия нефтепереработки, нефть, перед тем, как из неё получат готовые к использованию продукты, проходит несколько этапов [2]: подготовка нефти к первичной переработке; первичная переработка нефти (прямая перегонка); вторичная переработка нефти; очистка полученных нефтепродуктов.

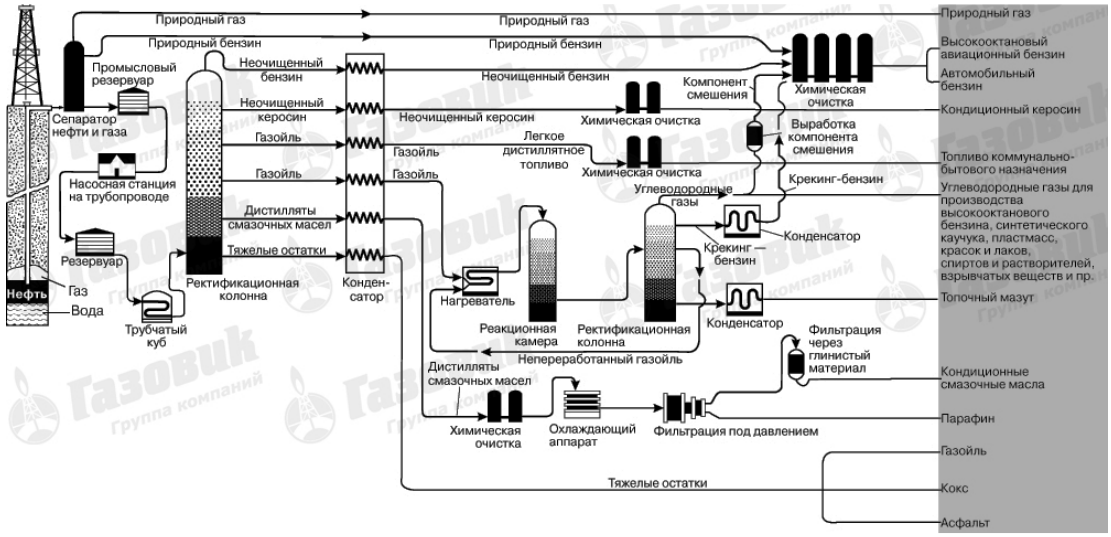


Рис. 1. Общая схема переработки нефти [2]

Рассмотрим, как готовят промысловую нефть к переработке и способы её переработки. Продукция нефтяных скважин, добываемая при бурении, содержит примеси, такие как: вода, соли, глина, частицы грунта, песок и ПНГ (попутный нефтяной газ). Чем дольше идет эксплуатация месторождения, тем больше увеличивается обводнение нефтяного пласта, что увеличивает содержание в добываемом сырье воды и других вредных примесей. Все это затрудняет транспортировку этих жидкостей по нефтепроводам и приводит к образованию в теплообменниках и прочих емкостях нефтяных отложений, что, в свою очередь, затрудняет нефтепереработку.

Промысловая продукция содержит множество нежелательных примесей, и чтобы избежать указанных сложностей, сырье подвергают процессу комплексной переработки нефти и газа (очистке), сначала – механической, а после этого – тонкой. Кроме того, на этапе подготовки промысловая продукция разделяется в сепараторах на нефть и газ.

Большое количество воды и механических примесей удаляется путем отстаивания

на холоде в герметичных резервуарах. Чтобы повысить эффективность дальнейшей переработки, сырую нефть после этого обезвоживают и обессоливают на специальных электрообессоливающих установках.

Во многих случаях из нефти и воды образуются плохо растворимые эмульсии, что сильно замедляет и препятствует обезвоживанию нефти. Существуют два типа нефтяных эмульсий: нефть в воде, или гидрофильная эмульсия, и вода в нефти, или гидрофобная эмульсия. Чаще встречается гидрофобный тип нефтяных эмульсий. Образованию стойкой эмульсии предшествуют, понижение поверхностного натяжения на границе раздела фаз и создание вокруг частиц дисперсной фазы прочного адсорбционного слоя. Такие слои образуют третьи вещества-эмульгаторы. К гидрофильным эмульгаторам относятся щелочные мыла, желатин, крахмал. Гидрофобными являются хорошо растворимые в нефтепродуктах щелочноземельные соли органических кислот, смолы, а также мелкодисперсные частицы сажи, глины, окислов металлов и т.п., легче смачиваемыенефтью, чем водой. Чтобы разрушить такие эмульсии, применяют следующие методы: механические, электрические и химические. К механическим методам относятся отстаивание (рис. 2) и центрифугирование (рис. 3).

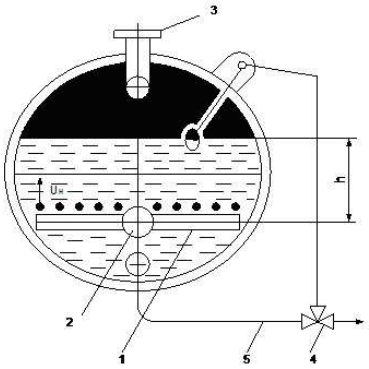


Рис. 2. Схема отстаивания нефти от воды в цилиндрическом горизонтальном отстойнике:
1-раздаточный коллектор (маточник); 2- ввод смеси нефти с водой; 3- отвод обезвоженной нефти; 4- исполнительный механизм сброса воды;
5- линия сброса воды;h – дисперсионная среда (вода) [3]

Эмульсии разделяют с помощью центробежных сил в специальных центрифугах (рис. 3), которые вращаются со скоростью 3500-50000 об/мин.

Электрический метод предусматривает использование электродегидратора (рис. 4). При попадании эмульсии в переменное электрическое поле,частицы воды реагируют сильнее, чем нефть, и начинают колебаться и сталкиваться. Частицы воды объединяются, что приводит к расслоению с нефтью.

Важным аспектом этих процессов является качественная утилизация образующихся отходов, которые способны нанести колоссальный вред экологическому состоянию окружающей среды, а, следовательно, и человеку.

Сырая нефть представляет собой смесь различных углеводородов (с разными молекулярными весами и температурами кипения) и сернистых, кислородных и азотистых органических соединений. Цель первичной нефтепереработки – разделить прошедшую предварительную подготовку нефть и газ на отдельные углеводородные фракции. Такая перегонка позволяет получить целый спектр нефтепродуктов и полуфабрикатов. Такой продукт перегонки нефти называется прямогонным.

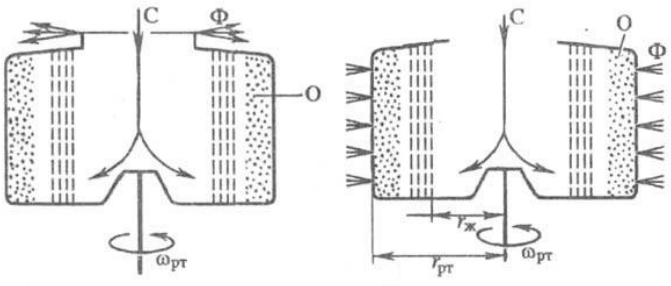


Рис.3. Принципиальная схема центрифуги [4]

При первичной нефтеперегонке используют [6]: однократное испарение; многократное испарение; постепенное испарение. Основными продуктами первичной переработки нефти являются: газ (бутан, пропан); бензиновые фракции; керосиновый дистиллят; дизельное топливо или газойль; смазочные масла; остаток (мазут).

Физико-химические характеристики нефти, а также потребность в конкретном конечном нефтепродукте, определяют способ дальнейшей переработки современными

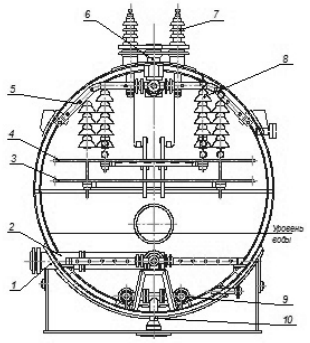


Рис. 4. Поперечный разрез горизонтального электродегидратора:
1-штуцер ввода сырья, 2-нижний распределитель сырья, 3-нижний электрод, 4-верхний электрод, 5-верхний сборник обессоленной воды, 6-штуцер вывода обессоленной воды, 7-штуцер проходного изолятора, 8-подвесной изолятор, 9-дренажный коллектор, 10-штуцер вывода соленой воды [5]

методами. Вторичная нефтепереработка – это термическое и каталитическое воздействие на прямогонный продукт переработки нефти, которое меняет природу содержащихся в нем углеводородов [7].

Основные способы переработки нефти на этой стадии делятся на: топливные; топливно-масляные; нефтехимические. Основными продуктами вторичной переработки нефти являются: топлива; масла; синтетический каучук; азотные удобрениия; различные виды пластмасс; моющие средства; синтетические волокна; жирные кислоты; эфиры, спирты, ацетон, фенол и так далее.

Очистка нефтепродуктов – это удаление компонентов, негативно влияющих на эксплуатационные свойства топлива и масел, из остатков от перегонки нефти, дистиллятов и др. нефтепродуктов. Это могут быть сернистые и азотистые соединения, асфальтово-смолистые вещества, нафтено-ароматические и твердые углеводороды и т.д.

Технологии очистки нефтепродуктов предполагают использование комплексов дорогостоящего высокотехнологичного оборудования, включающего колонны, экстракторы, роторно-дисковые контакторы, инжекторные смесители и т.д.

В промышленности применяются химические, физико-химические и каталитические методы очистки. Химическая очистка производится путём воздействия различными реагентами на удаляемые компоненты очищаемых продуктов. Физико-химическая очистка производится с помощью растворителей, избирательно удаляющих нежелательные компоненты из очищаемого продукта.

При каталитической очистке сернистые, азотистые и кислородные соединения, переходящие в углеводороды и легко удаляемые соединения (сероводород, аммиак, воду) удаляют путем гидрогенизации в мягких условиях (технология гидроочистки).

Нефть останется в ближайшем будущем основным способом обеспечения энергией и источником сырья нефтехимической промышленности. Многоебудет зависеть от успехов в области поисков, разведки, и разработки месторождений. Но ресурсы нефти в природе ограничены. Бурное наращивание в течение последних десятилетий их добычи привело к относительному истощению наиболее крупных и благоприятно расположенных месторождений.

Список литературы: 1. Судо М.М. Нефть и горючие газы в современном мире. – М.: «Недра», 1984. – 184 с. **2.** Этапы переработки нефти [Электронный ресурс]. – URL: https://gazovik-pgo.ru/cat/articles/pererabotka_nefti/ (дата обращения: 14.06.2019). **3.** Технология промысловой подготовки нефти и газа [Электронный ресурс]. – URL: https://designtest.lms.tpu.ru/mod/book/view.php?id=14675 (дата обращения: 14.06.2019). **4.** Центрифугирование [Электронный ресурс]. – URL: http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_4327.html (дата обращения: 14.06.2019). **5.** Электродегидраторы ЭГ для обессоливания и обезвоживания нефти [Электронный ресурс]. – URL: https://tdsarrz.ru/produktsiya/separatory_i_otstoyniki_dlya_nefti_gaza_i_vody/elektrodegidratory.html (дата обращения: 14.06.2019). **6.** Как происходит переработка нефти и нефтепродуктов? [Электронный ресурс]. – URL: https://neftok.ru/pererabotka/pererabotka-nefteproduktov.html (дата обращения: 14.06.2019). **7.** Левинтер М.Е., Ахметов С.А. Глубокая переработка нефти. М., 1992. – 224 с.

ВЛИЯНИЕ ОДНООСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФАЗОВУЮ ДИАГРАММУ ГЕМАТИТА

Меркулов В.С. *(ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь)*
Тел.:+375 17 2842814, E-mail: merkul@physics.by

Abstract: *The phase (T, p)-diagram of hematite is investigated when uniaxial mechanical stress is applied in the basal plane. Unlike the case of uniform compression the existence of the critical and triple points in the diagram is predicted. It is shown that below the Morin temperature the antiferromagnetic vector is always slightly canted from the trigonal axis, regardless of the stress direction. This fact is essential for interpretation of data obtained on real samples.*

Key words: *mechanical stress, hematite, Morin transition, antiferromagnetic phase.*

В последнее время получила развитие деформационная инженерия – совокупность технологий управления свойствами материалов с помощью контролируемых механических напряжений, так называемая стрейнтроника [1]. С ней связывают надежды в достижении рекордно малого энергопотребления в информационных и сенсорных устройствах. В свою очередь использование антиферромагнитных (АФ) материалов в качестве носителей памяти позволяет обеспечить, как энергонезависимость устройств (т.е. сохранение состояния при отсутствии питания), так и рекордную плотность записи информации. Последнее связано с тем, что магнитно-дипольное взаимодействие между антиферромагнитными доменами или наночастицами практически отсутствует. Основная проблема – осуществить контролируемое переключение АФ состояния (запись) и измерить заданное АФ состояние (воспроизведение).

Представляет интерес использование для данных целей АФ гематита α-Fe_2O_3. Ниже температуры Морина T_M =260 К он находится в чисто АФ состоянии, когда вектор антиферромагнетизма **L** направлен вдоль единственной оси третьего порядка. При наложении внешнего магнитного поля может происходить индуцированный переход в слабоферромагнитное состояние, когда вектор **L** лежит в базисной плоскости. На этом переходе предложена АФ память [2], показана возможность контролируемого переключения между двумя возможными АФ состояниями $\mathbf{L}_+$ и $\mathbf{L}_-$.

Другую возможность изменить АФ состояние предоставляет наложение механического напряжения (в присутствии слабого внешнего магнитного поля). Влияние всестороннего сжатия на переход Морина в гематите подробно изучено как экспериментально, так и теоретически [3]. В связи с тем, что изотропное механическое напряжение не изменяет симметрии кристалла, характер фазового перехода и симметрия фаз остаются неизменными. Это утверждение остается в силе при одноосном напряжении вдоль тригональной оси. Произвольное же механическое напряжение, и в частности одноосное в базисной плоскости, понижает симметрию гематита до моноклинной или триклинной, что может существенно изменить характер перехода. В этой связи возникает необходимость детального теоретического рассмотрения влияния одноосных механических напряжений на переход Морина в гематите.

Термодинамический потенциал гематита при наложении произвольного однородного напряжения σ^q (в сокращенных индексах) и в отсутствие внешнего магнитного поля можно записать в следующем виде [4]:

$$\Phi = \Phi_м (\mathbf{L}) - U_q^p (LL)_p \sigma^q + ½ S_{pq} \sigma^p \sigma^q, \quad (1)$$

где $\Phi_м(\mathbf{L})$ — магнитная часть потенциала; U_q^p — тензор констант магнитострикции; S_{pq}

— тензор податливостей. Здесь подразумевается, что в потенциал подставлены равновесные значения компонент вектора намагниченности **M** и тензора деформации.

При ориентационном переходе модуль **L** остается постоянным, поэтому будем полагать $|\mathbf{L}| \equiv 1$ и перейдем к полярным координатам. Анализ показывает, что одноосное напряжение в базисной плоскости может создавать добавки в потенциал такие же по виду, как и произвольное напряжение. Поэтому ограничимся подробным рассмотрением этого случая. С точностью до членов четвертого порядка в разложении $\Phi_м(\mathbf{L})$ с учетом симметрии гематита получим В случае одноосного напряжения **p** в базисной плоскости, направленного под углом α к оси ***x***:

$$\Phi = (a_1/2)\sin^2\theta - (a_2/4)\sin^4\theta + d\sin^3\theta\cos\theta\sin 3\varphi — K_0\sin^2\theta — K_1\sin\theta\cos\theta\sin(\varphi + 2\alpha) — K_2\sin^2\theta\cos 2(\varphi - \alpha) + \text{const}(\theta,\varphi), \quad (2)$$

где $K_0=U_0p$, $K_1= U_1 p$, $K_2=U_2 p$.

Величина дополнительной магнитной анизотропии, возникающей за счет магнитоупругого взаимодействия, превышает тригональную анизотропию, определяемую константой *d*, уже при относительно малых напряжениях порядка 10^7Па. Поэтому в нашем рассмотрении будем пренебрегать членом с константой *d*.

Пусть $\mathbf{p}\|\boldsymbol{x}$ (α=0), т. е. направление напряжения совпадает с одной из трех осей второго порядка, расположенных в базисной плоскости. Исследование потенциала на экстремум дает три вида состояний.

I. $\mathbf{L}\perp\boldsymbol{x}$, класс симметрии 2/*m*. Зависимость угла θ от a_1 при $\varphi = \pm\pi/2$ дается уравнением

$$a_1= 2(U_0 — U_2)p + a_2\sin^2\theta \pm 2U_l p\,\text{ctg}\,2\theta. \quad (3)$$

II. $\mathbf{L}\|\boldsymbol{x}$, класс симметрии 2′/*m*′ ($\theta=\pi/2$; $\varphi = 0, \pi$).

III. Наклонное положение вектора **L**, класс симметрии 1. Зависимости θ от a_1 и φ от θ следующие:

$$a_1 = 2(U_0 + U_2)p + a_2\sin^2\theta - \zeta U_1 p,\ \sin\varphi = — \zeta\,\text{ctg}\,\theta, \quad (4)$$

где введен параметр $\zeta = — U_1/4U_2$.

Анализ устойчивости показывает, что состояние III всегда неустойчиво при $a_2>0$, что соответствует гематиту.

При $p>0$, принимая во внимание, что $U_2<0$, получим устойчивые состояния только вида I. Если $0\le p<p_{кр} \equiv a_2/4U_1$ имеем фазовый переход первого рода по a_1 или, что то же самое, по температуре (см. рис. 1). Потеря устойчивости и равновесный переход происходят соответственно при

$$a_1^{\pm} = 2(U_0 - U_2)p + (a_2/2)\{1 \pm [1 - (p/p_{кр})^{2/3}]^{3/2}, \quad (5)$$

$$a_1^{п} = 2(U_0 - U_2)p + a_2/2 \quad (6)$$

Граница устойчивости в координатах (a_1, *p)* имеет форму астроиды, в вершине которой при $p=p_{кр}$ находится критическая точка (рис. 1). При $p>p_{кр}$ фазовый переход отсутствует и вектор **L** плавно вращается от оси ***z*** к ***y*** с повышением температуры.

При $p<0$ фазовый переход будет осуществляться между состояниями I и II. В зависимости от значения параметра ζ вид фазовой (T, *p*)-диаграммы будет различным. Случаю гематита $\zeta >2$ соответствует фазовая диаграмма с дополнительными тройной и критической точками (рис.1).

Если $|p| \le p^* = p_{кр}[2\zeta/(1+\zeta^2)]^3$, границы устойчивости задаются уравнениями (5). При $p^*<|p|<p_{кр}$ может происходить последовательно два фазовых перехода 1-го рода, а в окрестности $p_{тр}$ имеем два значения $\theta_п$ для равновесных переходов между состояниями вида I и состоянием II ($p_{тр}$ — давление в тройной точке).

Отметим, что критическое напряжение для гематита $p_{кр} = (1{,}1 \pm 0{,}5)\cdot 10^8$ Па является легко достижимым одноосным напряжением.

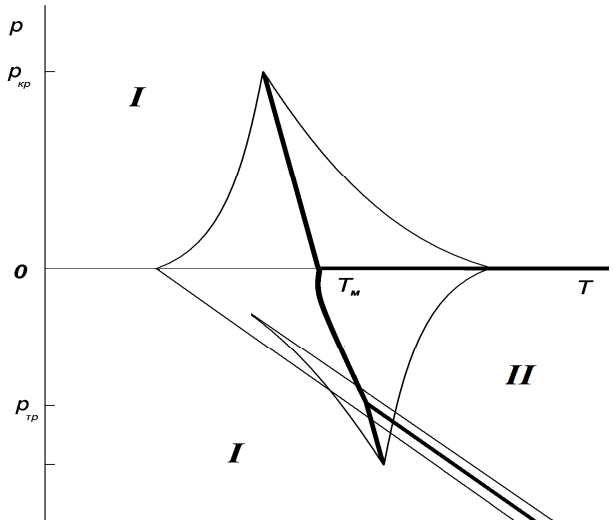


Рис. 1. Фазовая (T, p)-диаграмма гематита при одноосном напряжении вдоль оси второго порядка. Толстые линии соответствуют фазовым переходам 1-го рода, тонкие – границам устойчивости

Если **p**||***y***, т. е. напряжение направлено в одной из трех плоскостей симметрии, то вид фазовой диаграммы будет аналогичен случаю **p**||***x*** изменится только знак величины p, а также наклон всей диаграммы. Абсолютная величина $p_{кр}$ остается неизменной.

При произвольном направлении **p** в базисной плоскости ($\alpha \neq n\pi/6$) на фазовой (T,p) -диаграмме линия перехода 1-го рода не уходит в бесконечность, а заканчивается дополнительной критической точкой. Значения критических напряжений превышают $p_{кр}$. Симметрия в различных областях диаграммы одинакова и можно, минуя фазовые переходы, пройти из одной точки в другую.

Существенно, что независимо от ориентации **p** в базисной плоскости при $T < T_м$ вектор **L** всегда находится в отклоненном от оси z состоянии, причем $\theta \approx U_1\, p/a_1$, $\varphi = -2\alpha + \pi/2$ (для домена с $\theta = 0$ при p=0). Отклонение вектора антиферромагнетизма от тригональной оси при наложении напряжений приводит к образованию магнитного момента перпендикулярного **L**, т. е., к явлению пьезомагнетизма. Величина магнитного момента

$$m = m_D \sin\theta \approx m_D U_1\, p/a_1,$$

где m_D — момент Дзялошинского.

Для пьезомагнитной константы получаем оценку $\approx 10^{-13}$ Тл·Па$^{-1}$, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Действительно, было экспериментально обнаружено, что при наложении одноосного механического напряжения в гематите в АФ фазе вектор **L** отклоняется от тригональной оси и может происходить контролируемая однодоменизация по вектору антиферромагнетизма в слабых магнитных полях.

Список литературы: 1. А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. УФН, т. 188, № 12, 1288, 2018. **2.** В.С.Меркулов. Патент Республики Беларусь №10596 (2008). **3.** A.H. Morrish. Canted Antiferromagnetism: Hematite. - World Scientific Publishing Co. Singapore, 1994, 192 с. **4.** Е.А. Туров, А.В.Колчанов, В.В.Меньшенин, И.Ф.Мирсаев, В.В.Николаев. Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков. - М.: Физматлит. 2001. 560 с.

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА

Мещеряков В.Н. Пикалов В.В. Бойков А.И. Евсеев А.М. *(ЛГТУ, г. Липецк, Липецкая область, Россия)*
Тел.: +79042930968; E-mail: wreditels@mail.ru

Abstract: *There are many constantly improving different plants for waste disposal and recycling, based on high-temperature plasma methods of disposal. Existing electric arc plasma torches have a number of disadvantages, such as: the complexity of regulating the performance of the plasma torch, the complexity of the design and other. The paper presents a simplified design of the electric arc plasma torch, which allows regulating the output power of the produced plasma..*
Key words: *Electrical complex, electric arc, plasma torch, arc ignition unit, plasma generator.*

В современном мире достаточно остро стоит проблема утилизации и единого метода переработки высокотоксичных отходов. Существует множество постоянно совершенствующихся различных установок для их утилизации и переработки. Огневое обезвреживание множества веществ и материалов не удовлетворяет существующим экологическим требованиям, поэтому предопределяется применение более высокотемпературных плазменных методов утилизации. Существующие электродуговые плазмотроны обладают рядом недостатков, таких как: сложность регулирования производительности плазмотрона, сложность конструкции и другие.

Задачей данной работы является упрощение конструкции электродугового плазмотрона, расширение диапазона регулирования количества и выходной мощности вырабатываемой плазмы и регулирование уровня отклонения вынесенной дуги от оси расположения электродов.

Решение поставленной задачи достигается тем, что электродуговой плазмотрон, содержит трубчатый корпус, выполненный из непроводящего ток тугоплавкого материала, внутренняя полость которого образует продольную камеру, анодный и катодный электроды, подключенные к блоку питания с регулируемым по уровню и постоянным по знаку напряжением, блок зажигания дуги, узел подачи рабочего плазмообразующего газа. Трубчатый корпус установлен вертикально и герметично закрыт с торцов крышками, перпендикулярно оси камеры выполнены два расположенных друг против друга отверстия, в одном из которых установлен анодный электрод, а в другом установлен катодный электрод. Соосно с трубчатым корпусом установлен трубчатый магнитопровод, внутренний диаметр которого больше наружного диаметра трубчатого корпуса. В полости трубчатого магнитопровода между его внутренней поверхностью и внешней поверхностью трубчатого корпуса расположены два полюса с обмотками, подключенными к другому источнику регулируемого напряжения постоянного тока. Ось полюсов расположена перпендикулярно по отношению к оси положения электродов. В верхней крышке трубчатого корпуса выполнено окно для подачи сжигаемых материалов, а так же отверстие для отвода газообразных продуктов горения, герметично закрытое заглушкой. В нижней крышке трубчатого корпуса выполнено окно для удаления несгоревших отходов, герметично закрытое заглушкой, в трубчатом корпусе выше уровня расположения горящей дуги выполнены отверстия, наклоненные вниз в направлении расположения нижней точки горения дуги, которые соединены с узлом подачи рабочего плазмообразующего газа.

На рисунке 1 показано устройство предлагаемого плазматрона. Где 1 – трубчатый корпус, 2 – анодный электрод, 3 – катодный электрод, 4 – блок питания, 5 – верхняя крышка, 6 – нижняя крышка, 7 – магнитопровод, 8, 9 – магнитные полюса, 10 –

обмотки, 11 – источник регулируемого напряжения постоянного тока, 12- блок зажигания дуги, 13 – окно для подачи сжигаемого материала, 14- отверстие удаления газов, 15 - окно для удаления отходов горения, 16 – отверстия для подачи плазмообразующего газа, 17 – узел подачи под давлением плазмообразующего газа.

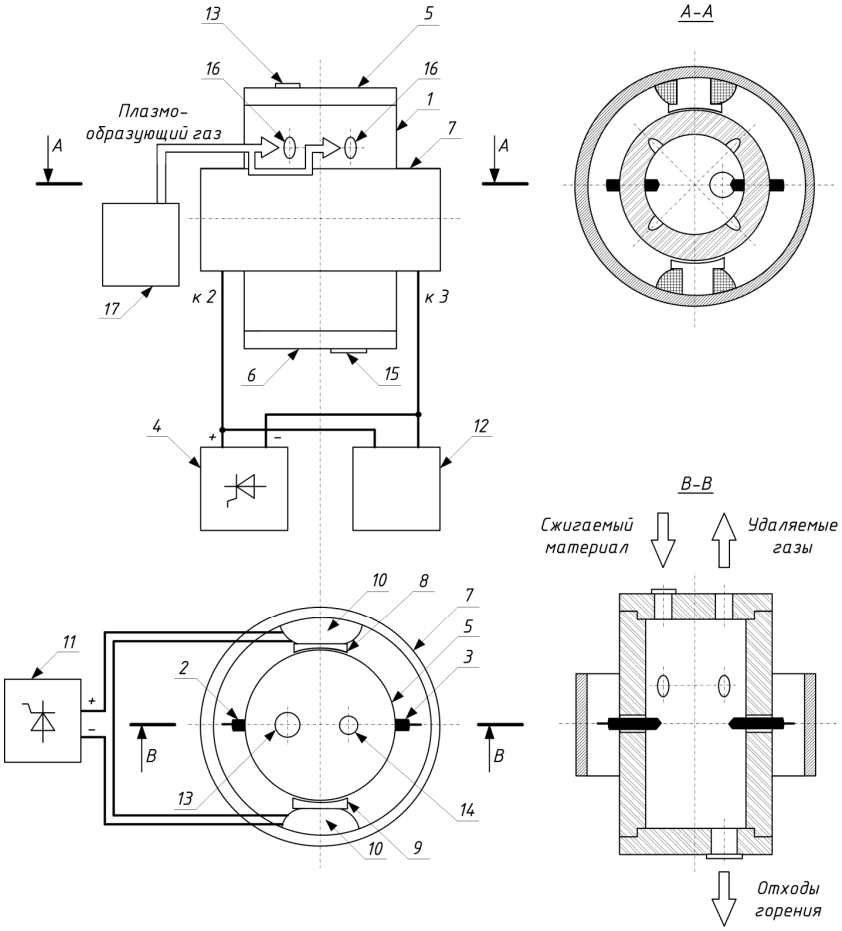


Рис. 1. Устройство предлагаемого плазмотрона

При необходимости увеличения мощности, выделяемой в дуге, увеличивают напряжение, подводимое от блока питания 4 к выводам анода 2 и катода 3, при этом возрастает ток, протекающий через дугу, возрастает температура и результирующая мощность выработанной плазмы. Электродуговой плазматрон характеризуется простотой конструкции, обеспечивает регулирование температуры, расхода плазмы и производительности при сжигании материала за счет возможности регулирования мощности и отклонения дуги.

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. Г.К. Клименко, А.А. Ляпин. Генераторы плазмы. М.: изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. 62 с. **2.** Патент RU № 2465748. Электродуговой плазмотрон / Мчедалов С.Г. Опубл 27.10.2012. Бюл. № 30.**3.** Пискунков, А. Ф. Высокоресурсный электродуговой плазматрон постоянного тока/А. Ф. Пискунков, В. А. Рябый, В. В. Свотина, Х.-Дж.Ли, В. Ю. Плаксин//Прикладная физика. -2009. -№ 6. - С. 98-107. **4.** Лукашов В.П., Ващенко С.П. и др. Плазмотермическая переработка твердых отходов // Экология и промышленность России, ноябрь 2005. С. 4–9. **5.** Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. **6.** Anshakov A.S., Cherednichenko V.S., Urbakh E.K. et al. The treatment of mixed wastes using the thermal plasma / Progress in Plasma Processing of Materials/ Ed.P.Fauchais, J.Amouroux. N. – Y.: Begell House, Inc., 1999. P. 737-743.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВ ИЗ АРХИТЕКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТИПА СЕРДЕЧНИК-ОБОЛОЧКА МЕТОДОМ ДВУХСТОРОННЕГО РЕВЕРСИВНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Мирошниченко С.В. *(ДонФТИ, Донецк, ДНР)*
Тел.: +38 (071) 438 20 56; *E-mail:* svmiro@mail.ru

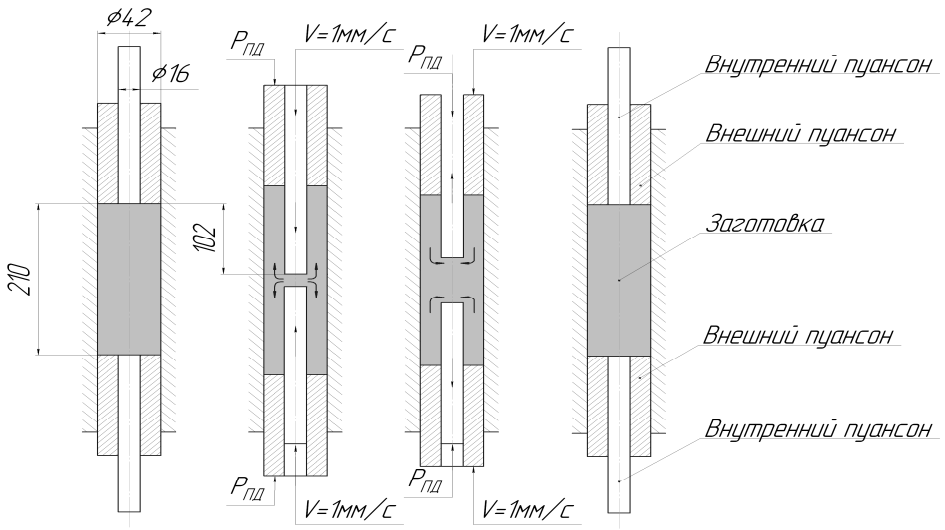
Abstract: *This article presents the numerical simulations of the reversion back extrusion (RBE) by employing the finite element software DeForm-2D/3D. The distribution of the equivalent von-Misses strain in the radial direction of the billet cross section is estimated. The results show availability the RBE process to form in metals an inner architecture of the shell-core type that combines the areas of ultrafine-grained and coarse-grained structures.*
Key words: *severe plastic deformation, reversive back extrusion, simulation, architecture material, equivalent strain (von-Misses)*

Интенсивная пластическая деформация (ИПД), широко используемая для достижения в материалах однородных по объему субмикрокристаллических (СМК) состояний, в разработках последнего десятилетия успешно реализуется как инструмент формирования на базе СМК структур архитектурных материалов, физико-механические свойства которых скачкообразно или равномерно изменяются в пределах одного образца. Условно архитектурные материалы можно разделить на две группы. К первой причисляют гибридные материалы, представляющие собой комбинации двух или нескольких разнородных компонентов, каждый из которых выполняет свою функцию [1,2]. Ко второй группе относят архитектурные материалы с градиентной структурой. Их структура постепенно изменяется в пределах одного объема, например, от СМК - на периферии к крупнокристаллической (КК) - в центре [3,4]. Получаемый при этом градиент свойств, наделяет материал комплексом противоположных характеристик (например, высоким уровнем прочности и пластичности), а наличие протяженного переходного слоя обеспечивает целостность объема. Присущая таким материалам высокая эксплуатационная надежность в сочетании с низкими экономическими показателями делает их актуальными для любых отраслей техники и в строительстве, где критичным является снижение веса без потери в прочностных свойствах элемента конструкции.

Предшествующими исследованиями был спрогнозирован эффект формирования в металлических заготовках внутренней архитектуры типа СМК сердцевина – КК оболочка в результате обработки методом реверсивного выдавливания (РВ), суть которого состоит в многократном чередовании операций обратного выдавливания и реверсирования к исходной форме заготовки [5,6]. Недостатком РВ является его низкая производительность, из-за кантовки заготовки после каждого цикла обработки, что привело к необходимости усовершенствования данной технологической схемы. В итоге РВ получила дальнейшее развитие путём использования двухсторонней схемы процесса. Сообщая одновременное встречное движение двум деформирующим пуансонам и обеспечивая синхронный подпор выдавливаемого металла, заготовку можно обрабатывать одновременно с двух сторон. В результате сокращения машинного и вспомогательного времени за счет выполнения двухстороннего деформирования и исключения переустановки заготовки между циклами производительность метода значительно повышается.

Использование длинномерных заготовок с соотношением высоты (H) к диаметру (D) равным 5 позволит избежать дополнительной операции формирования прутка из коротких заготовок (H/D=0,5-1,5) традиционно используемых в РВ [7] и аналогичных ей технологиях [8]. С одной стороны, это снизит текущие затраты, а с другой – исключит дополнительную нежелательную деформацию внешних слоёв на заключительном этапе выдавливания прутка.

В качестве инструмента для исследования предложенного метода двухстороннего реверсивного выдавливания (ДРВ) использован конечно-элементный комплекс DeForm-2D/3D [8]. Расчетная схема моделируемого процесса представлена на рис.1.

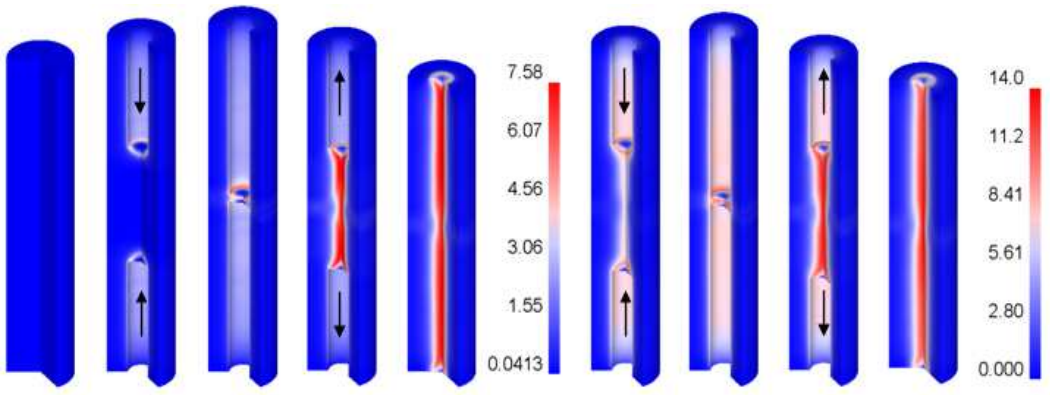


а б в г

Рис. 1. Расчетная схема обработки заготовки ДРВ: а, б – соответственно начало и конец цикла двухстороннего выдавливания; в – реверсирование; г – конец этапа реверсирования

Один цикл моделирования включал два расчетных этапа: обратное выдавливание с двухсторонним истечением металла (рис.1 б) и операцию реверсирования (рис.1 в). Концом цикла считается момент принятия заготовкой первоначальной формы (рис.1, г). Полученные в конце каждого расчета поля параметров напряженно-деформированного состояния использовались как исходные данные для моделирования следующей операции. В данной модели конструкции штампа и пуансонов значительно упрощены, а устройство противодавления заменено действием силы, соответствующей значению противодавления $P_{ПД}$=200МПа. Взаимодействие между жестким инструментом и деформируемым материалом моделировался с помощью контактных поверхностей, с показателем трения по Зибелю равным 0.4. Реология материала (сплава АД1) задавалась с использованием физико-феноменологической модели пластичности, учитывающей эффект циклического нагружения [9]. Расчет проводился для двух циклов деформирования.

Приведенные на рис. 2 поля деформаций Мизеса (ε_{eff}), полученные в результате решения модельной задачи, дают качественное представление об их уровне и градиенте распределения в радиальном направлении.



а б

Рис. 2. Распределение деформаций Мизеса в объеме заготовки по этапам ДРВ: а – первый цикл, б – второй цикл

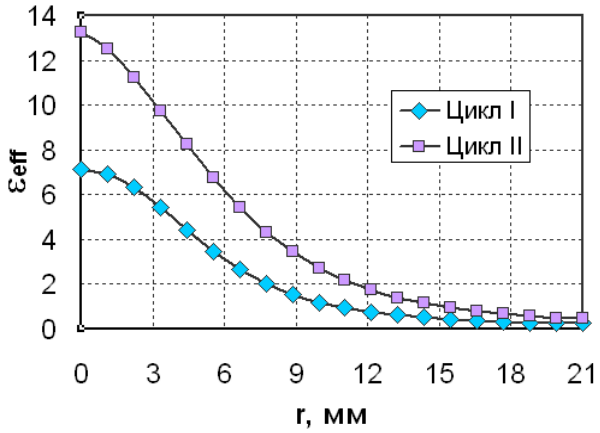


Рис. 3. Распределение среднего значения накопленных деформаций вдоль радиуса заготовки после первого и второго циклов реверсивным выдавливанием с двухсторонним истечением металла

Рис. 3 дает количественную оценку распределения накопленных деформаций вдоль радиуса прутка после каждого цикла ДРВ.

Анализ приведенных данных на рис. 2 и 3 показывает, что величина накопленной деформации в центральной части (r < 3мм) заготовки за один цикл достигает уровня $\varepsilon_{eff} > 6$. После второго цикла реверсивного выдавливания с двухсторонним истечением металла величина интенсивности деформаций в приосевой зоне возрастает до значения $\varepsilon_{eff}=14$. При этом на периферии заготовки (r>18мм) остаются практически нулевые значения интенсивности деформаций (ε_{eff} <0,4). Такое распределение деформаций свидетельствует о возможности формирования в материале внутренней СМК–КК архитектуры после нескольких циклов обработки.

Предложенный способ может быть использован для получения заготовок с соотношением высоты к диаметру не более 5. Возможности данной технологии для обработки больших значений соотношения габаритов требует дополнительного изучения.

Выводы: Результаты численного исследования процесса ДРВ позволили получить картины деформированного состояния по этапам двух циклов обработки. Характер распределения эквивалентных деформаций вдоль оси заготовки, возрастающих от периферии к центру, делает технологию ДРВ перспективной для создания архитектурного материала с изменяющимися по радиусу свойствами.

1. **Список литературы: 1.** Bouaziz O., Kim H.S., Estrin Y. Architecturing of metal-based composites with concurrent nanostructuring: A new paradigm of materials design. Adv. Eng. Mater. 2013. – 15. – P. 336–340. **2.** Medvedev A.E., Lapovok R., Koch E., Hoppel H.W., Goken M. Optimization of interface formation by shear inclination: Example of aluminium-cooper hybrid produced by ECAP with back-pressure. Materials and Design. - 2018. - N.146. - P. 142-151. **3.** 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. - A 639. - P.165–172. **4.** 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. **5.** Прокофьева О.В., Мирошниченко С.В., Прилепо Д.В., Сапронов А.Н. Формирование в металлических материалах внутренней архитектуры типа оболочка-сердечник методами интенсивной пластической деформации. Вестник Луганского национального университета им. В.Даля, 2017. − №2(4), Ч.1. С.219-223. **6.** Мирошниченко С.В. Варюхин В.Н. Анализ сложного напряженно-деформированного состояния металла, возникающего при воздействии интенсивного пластического деформирования методом реверсивной закрытой прошивки. Физика и техника высоких давлений, 2017. – Т. 27, № 3. − С. 1-13. **7.** Мирошниченко С.В. Управление деформированным состоянием заготовок при многоцикловом реверсивном выдавливании. Физика и техника высоких давлений, 2018. – Т. 28, № 2. − С. 20-13. **8.** S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki. Processing of AZ31 magnesium alloy by a new noble severe plastic deformation method. Materials Science and Engineering, 2011, 1334. – P. 528-536. **9.** В.М. Грешнов, И.В. Пучкова. Модель пластичности металлов при циклическом нагружении с большими деформациями. Прикладная механика и техническая физика, 2010. – Т. 51, №2. – С. 160-169.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ ДОНЕЦКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ТЕХНОЛОГОВ-МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

Михайлов А.Н. *(ДонНТУ, МСМ, г. Донецк, ДНР)*
Тел. моб.: +38 (071) 3060879; E-mail: tm@fimm.donntu.org

Abstract: *В представленной работе дана структура развития народного хозяйства Донецкой народной республики. Исследованы особенности существующих проблем, восстановления и развития машиностроения. Показана структура и основные направления выполняемых исследований и научно-технических работ Донецкой научной школы технологов-машиностроителей. Представлены некоторые особенности и перспективы развития машиностроения и Донецкой научной школы технологов-машиностроителей.*

Key words: *проблемы, народное хозяйство, машиностроение, основные направления исследований, научная школа, перспективы.*

1. Введение

Научно-технический прогресс непрерывно ставит перед машиностроением все новые, более сложные задачи, которые обусловлены, в первую очередь, улучшением параметров качества изделий и эффективностью производства, автоматизацией производственных процессов и повышением производительности изготовления машин, обеспечением экологической безопасности производства и конъюнктуры рынка продаж произведенных технических систем, а также решением других насущных проблем. Это определяется запросами общества, особенностями прогресса науки и техники, а также развитием экономики.

Можно отметить, что, уровень развития промышленного производства любого прогрессивного государства, прежде всего, определяется прогрессом машиностроения, отраслью народного хозяйства, которая обеспечивает производство машин и технических систем. Машиностроение это фундамент, основа развития всех других отраслей народного хозяйства. Без прогрессивного развития машиностроения не возможно развитие всех других отраслей. Поэтому в народном хозяйстве, на наш взгляд, в первую очередь нужно решать вопросы прогрессивного развития машиностроения.

Рис. 1. Структурная схема макросистемы в процессе развития и возникновения производственных проблем различного уровня

Заметим, что исторический процесс развития машиностроения, происходящий в условиях видоизменяющейся мировой глобальной экономики, обуславливает возникновение целого комплекса крупномасштабных проблем производства (рис. 1). Эти проблемы можно объеди-

нить в три основных типа, а именно: межгосударственные, внутригосударственные и внутрипроизводственные. Они определяют уровень развития промышленного производства, и в частности прогресса машиностроения. Поэтому эти задачи необходимо последовательно решать в процессе развития народного хозяйства [1].

В настоящее время, машиностроение Донецкой народной республики находится в сложных условиях. Это, прежде всего, множество нерешенных проблем, отсутствие инвестиций, рынков сбыта, наличие ограничений различного характера, блокада республики, санкции различного характера и тому подобное. Вместе с тем, эти проблемы постепенно решаются, запускаются предприятия и заводы, и конечно на наш взгляд эти проблемы будут со временем решены.

Далее, рассмотрим некоторые особенности, которые имели место в машиностроении Донецкой области при Украине, до 2014 г. [1, 2], и в настоящее время в Донецкой народной республике (ДНР).

Можно отметить, что Донецкой области Украины от Советского Союза досталась мощная промышленная база. Именно тогда в Донецкой области выпуск промышленной продукции составлял более 20% от производства продукции Украины.

Машиностроительный комплекс Донецкой области тогда составлял 220 предприятий, на которых работало около 140 тысяч человек, что составляло 18,8 % от общей численности занятых в промышленности людей региона. При этом объем производства машиностроения, в общем объеме промышленного производства области, составлял 10,3 % [1, 2].

Анализируя тот период, а именно состояние машиностроительного комплекса, можно отметить, что с 1990 … 2001 годы машиностроение Донецкой области прошло через существенные преобразования и изменения. При этом динамика объемов выпуска промышленной продукции машиностроения, представленная на рис. 2, характеризует особенности стагнации и развития машиностроения того исторического периода.

Проведенный анализ особенностей работы машиностроительных предприятий, представленных на графике рис. 2 [1], показывает, что до 1999 года развитие отрасли осуществлялось в плохих экономических условиях из-за кризиса предыдущих лет, не стабильности производства и проблем, возникающих из-за передела собственности. Однако с 2000 года положение в машиностроении стабилизировалось. И в 2001 году машиностроители области достигли самого высокого уровня выпуска объема промышленной продукции за последние три года. При этом увеличение объема выпуска промышленной продукции составило 50,7 % [1] к 2000 году. Положительная тенден-

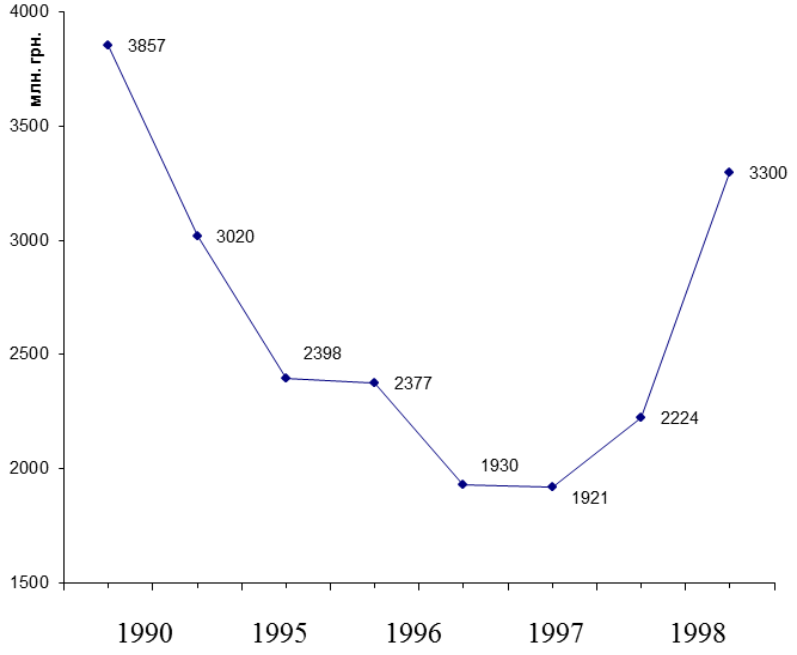


Рис. 2. Динамика объемов производства изделий машиностроения Донецкой области в 1990-2001 годах [1]

ция роста объемов производства промышленной продукции сохранялась до 2004 года.

Подъем и развитие машиностроения стал возможным, прежде всего, благодаря освоению машиностроительными заводами новых видов промышленной продукции, повышению ее качества и эффективности производства. Все это в значительной степени способствовало увеличению экспорта промышленной продукции машиностроения. По основной группе предприятий, которые производили около 65 % продукции в отрасли, доля экспорта в среднем составляла 33,5 % [1]. Поэтому, не смотря на глобальные проблемы и сложившиеся внутрипроизводственные проблемы, процессы развития машиностроения пошли по пути развития.

Проведенный анализ показал, что увеличение выпуска продукции машиностроения в Донецком регионе для того времени было обусловлено следующим:

- увеличением выпуска продукции за счет обновления оборудования отечественными потребителями,
- переходом предприятий на выпуск продукции новых номенклатур,
- увеличением продукции за счет экспортных поставок и расширения рынков сбыта,
- за счет реализации в машиностроении инвестиционных проектов (14 проектов), которые позволили привлечь в производство более 20 млн. долларов США для выпуска высококачественных изделий с новыми свойствами.

Именно в тот период уже начали строить прогнозы развития машиностроения Донецкой области на перспективу. Тогда, этот вопрос вызывал большую дискуссию между специалистами восточных и западных регионов, особенно в разделе получаемых доходов и отчислений. Например, в работе [1] авторы представили динамику роста промышленного производства изделий машиностроения на период до 2020 года [1]. Здесь, прогнозируемое увеличение выпуска промышленной продукции планировалось с постепенным ростом, происходящим примерно по прямой пропорциональной зависимости, с увеличением выпуска продукции машиностроения почти в 2,5 раза в 2010 году по отношению к 2000 году. А также предполагалось уже к 2020 году превзойти выпуск продукции машиностроения 1990 года.

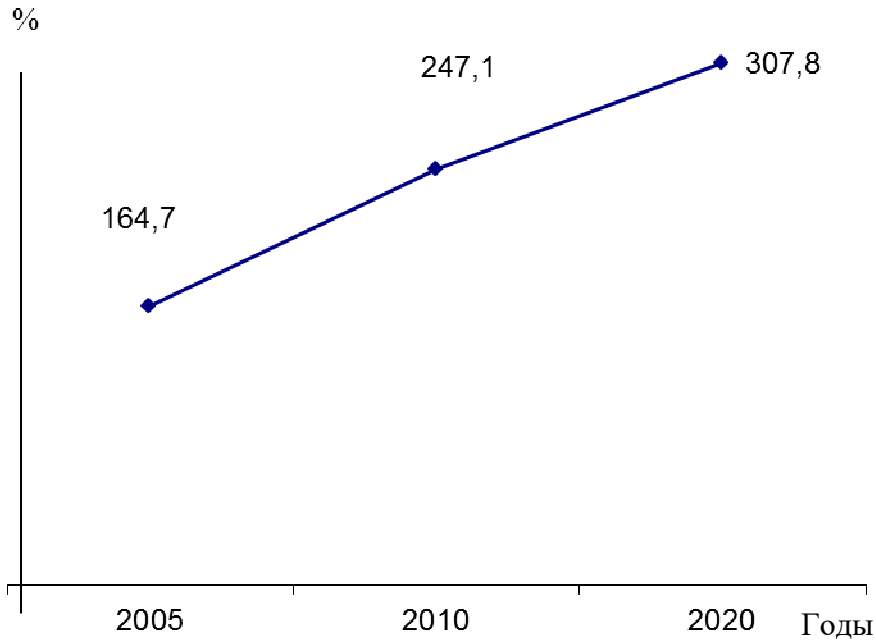


Рис. 3. Прогнозируемая динамика промышленного производства в машиностроительной отрасли на период до 2020 года (в 2000 году = 100 %) [1]

Вместе с тем, в связи с возникающими политическими проблемами, отсутствием связи науки с производством, не заинтересованности олигархических структур во

внедрении затратных перспективных технологий и отсутствием значительных инвестиций, многие специалисты высказывали сомнение по достижению этих результатов.

В 2004 году произошла так называемая «Оранжевая революция», которая значительно способствовала стагнации и упадку машиностроения Донецкой области. В этот период, значительно сократилось количество машиностроительных заводов, нарушились связи с предприятиями Российской Федерации, денежные средства ускоренными темпами начали выводить за рубеж, активно разрушалась сложившаяся структура связей в промышленности, происходили рейдерские захваты предприятий. Эти проблемы продолжались до 2014 года, которые особенно сказались на состоянии машиностроения Донецкой области.

В 2014 году началась гражданская война на Донбассе, которая была организована Киевской хунтой и ее кураторами, это окончательно привело к полной остановке производства в отрасли, что нанесло глобальный удар для машиностроения Донецкой области. В ходе военных действий разрушалось народное хозяйство Донбасса, обстреливались и полностью останавливались заводы и предприятия, а в ряде случаев, уничтожалось как обычное, так и уникальное оборудование машиностроительных заводов. При этом начали уезжать высококвалифицированные специалисты и кадры.

В этих сложных военных условиях была образована Донецкая народная республика, которой предстояло вести титаническую работу по восстановлению народного хозяйства, в том числе, и машиностроения в частности. При этом начали образовывать министерства и необходимые структуры для восстановления народного хозяйства Донецкой народной республики. Поэтому уже в 2015 году началась работа по восстановлению объектов народного хозяйства республики, разработке программ восстановления и запуску предприятий отрасли, определению целесообразности восстановлений предприятий и выработке необходимых мероприятий по их развитию [3, 4, 5].

Целью данной работы является информирование научно-технической общественности о существующих проблемах в машиностроении Донецкой народной республике, особенностях участия ученых и специалистов Донецкой научной школы технологов-машиностроителей в решении этих проблем, а также основных направлениях исследований и выполняемых научно-технических работ в этой научной школе.

В соответствии с поставленной целью в этой работе планируется представить следующее: анализ особенностей развития и структуры народного хозяйства Донецкой народной республики; особенности процессов восстановления и развития машиностроения; структуру и основные направления выполняемых исследований и научно-технических работ Донецкой научной школы технологов-машиностроителей; перспективы развития машиностроения и научной школы в Донецкой народной республике.

Эти задачи решаются в данной работе

2. Проблемы и цели развития машиностроения Донецкой народной республики

Можно отметить, что в настоящее время, структура народного хозяйства Донецкой народной республики имеет следующий состав: перерабатывающая промышленность – 40%, оптовая и розничная торговля – 29%, поставки электроэнергии 18%, добывающая промышленность – 6%, транспорт – 2%, другие отрасли – 5 %. В этой структуре, приоритетными направлениями является металлургическая и коксохимическая промышленности, машиностроение, пищевая и сельскохозяйственная промышленности.

Важнейшими задачами, стоящими сейчас перед машиностроением Донецкой народной республики являются следующие направления:

- возобновление работы предприятия или восстановление мощностей предприятия для производства продукции выпускаемой ранее или для новой продукции;

- определение целесообразности возобновления и/или восстановления производства продукции на данном предприятии или заводе;

- изыскание рынков сбыта производимой продукции и преодоление действующих ограничений (снятие блокады со стороны Украины и санкций по сбыту продукции);

- улучшение инвестиционного климата на предприятиях;

- ускоренное инновационное развитие предприятий;

- повышение уровня коммерциализации отечественных прикладных разработок;

- опережающее развитие фундаментальных научных разработок, внедрение новых технологий и освоение нового продукта;

- переориентация производства на научно-технический вариант экономического развития, в основе которого лежит полный цикл инновационного развития «Наука – технологии – производство – сфера потребления»;

- обновление основных фондов производства и снижение критического их износа;

- снижение дисбаланса и затрат на производство продукции машиностроения, а также решения других насущных проблем, в том числе и уменьшение оттока кадров.

На решение этих задач направлена деятельность различных государственных структур Донецкой народной республики, в том числе и Донецкой научной школы технологов-машиностроителей, которые в целом определяют техническую политику развития народного хозяйства и машиностроения в частности.

3. Структура и особенности работы Донецкой научной школы технологов-машиностроителей

Особое значение в решении вопросов активизации производства занимают научные школы, которые сейчас творчески продолжают свою деятельность в Донецком национальном техническом университете. Именно ученые и специалисты научных школ имеют достаточный опыт, возможности и необходимый потенциал для выработки перспективной технической политики для возобновления, восстановления и развития производства продукции машиностроительных заводов. А также комплексно могут участвовать в решении фундаментальных и прикладных проблем машиностроения.

В процессе решения сложных научно-технических вопросов машиностроения активно работают ученые и специалисты Донецкой научной школы технологов-машиностроителей Донецкого национального технического университета.

Представим некоторые исторические особенности, связанные с формированием Донецкой научной школы технологов-машиностроителей.

Становление этой научной школы начало реализовываться в конце прошлого века, а именно во второй половине 90-х годов. Этот процесс ее становления можно характеризовать следующими основными вехами:

1. Образование Донецкой научной школы технологов-машиностроителей в Донецком национальном техническом университете начало реализовываться в конце прошлого века, а именно во второй половине 90-х годов.

2. В 1998 году был создан первый в регионе специализированный совет по защите диссертационных работ по технологии машиностроения, в котором успешно защищались специалисты кафедры, ДонНТУ, из Украины, Туниса, Ирака, Иордании и других стран.

3. С 1993 года начали издаваться научно-технические сборники, в которых публиковались результаты исследований полученных в диссертациях.

4. С 1994 года ученые и специалисты активно начали участвовать, организовывать и проводить ряд международных научно-технических конференций и семинаров в Украине, России, Румынии, Молдове и Тунисе.

5. Ученые кафедры ТМ ДонНТУ начали творчески работать в редакционных коллегиях научно-технических сборников трудов, издаваемых в Донецке, Москве, Киеве, Брянске, Вильнюсе, Яссах, Армении и других городов, имеющих европейские и российские индексы научного цитирования.

6. На кафедре ТМ ДонНТУ начали формироваться новые научные направления исследований в области технологии машиностроения.

7. Активно начали развиваться связи с производством, предприятиями и машиностроительными заводами.

8. Активно пошли процессы развития международного сотрудничества с университетами и организациями других стран.

9. С образованием Донецкой народной республики Донецкая научная школа технологов-машиностроителей активно включились в работу по восстановлению и развитию машиностроения региона.

Представим некоторые особенности функционирования данной научной школы.

В настоящее время, не смотря на существующие проблемы, ученые и специалисты Донецкой научной школы технологов-машиностроителей продолжают активно работать в новых условиях, участвуют в процессах возобновления, восстановления и развития производства продукции отрасли. При этом творчески продолжается научно-техническая и международная работа. С декабря 2015 года, уже в рамках Министерства образования и науки Донецкой народной республики, возобновлена работа диссерта-

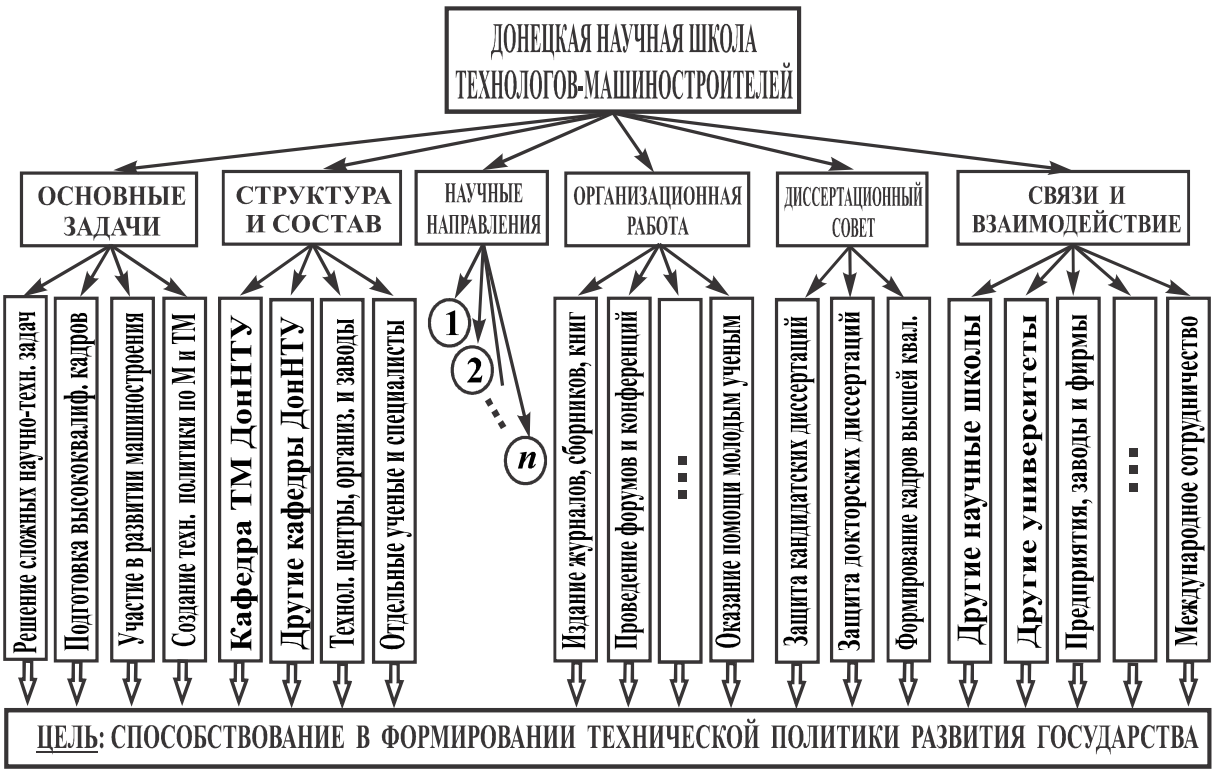


Рис. 4. Структурная схема состава Донецкой научной школы технологов-машиностроителей

ционного совета по защитам кандидатских и докторских работ по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения.

Основные особенности работы Донецкой научной школы технологов-машиностроителей в новых условиях можно представить в виде схемы рис. 4. Эти особенности базируются на группе составляющих, которые можно представить следующими элементами:

- основные задачи, которые стоят перед научной школой;
- структура и состав научной школы;
- научные направления, на базе которых создана научная школа;
- организационная работа научной школы;
- диссертационный совет по защите кандидатских и докторских диссертаций в области машиностроения;
- связи и взаимодействия с заводами, предприятиями, организациями, университетами, учеными и специалистами региона и на международном уровне, а также решение других важнейших проблем.

4. Основные направления исследований и научно-технических работ

Главной составляющей Донецкой научной школы технологов-машиностроителей является кафедра «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета. Именно ученые и сотрудники этой кафедры ведут основополагающую работу в деятельности Донецкой научной школы технологов-машиностроителей. Следует также отметить, что в эту школу входят ученые и других кафедр Донецкого национального технического университета, ученые и специалисты Донецкой академии внутренних дел МВД ДНР и Донецкой академии защиты населения МЧС ДНР, Камчатского государственного технического университета, Филиала Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске и других организаций. В этих организациях выполняются докторские и кандидатские диссертации по перспективным научным направлениям Донецкой научной школы технологов-машиностроителей.

Основные научные направления, по которым работают сейчас ученые и специалисты Донецкой научной школы технологов-машиностроителей, являются следующие:

1. Основы проектирования и автоматизации производственных процессов на базе технологий непрерывного действия (д.т.н., профессор Михайлов А.Н., к.т.н. доцент Чернышев Е.А., к.т.н. доцент Буленков Е.А.) [6].

Цель работы: повышение уровня автоматизации производственных процессов и производительности изготовления изделий.

Сфера применения: массовое производство деталей, изделий и продукции в машиностроении, пищевой, фармацевтической и химической промышленности.

Потенциальные заказчики: машиностроительные, пищевые, фармацевтические и химические заводы и предприятия.

2. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения (д.т.н., профессор Михайлов А.Н., к.т.н., доцент Петряева И.А., к.т.н., доцент Матвиенко С.А.) [7].

Цель работы: повышение качества деталей, обеспечение нетрадиционных свойств машин и технических систем.

Сфера применения: производство машин и технических систем.

Потенциальные заказчики: машиностроительные заводы и предприятия.

3. Повышение параметров качества и ресурса газотурбинных двигателей и установок на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств элементов (д.т.н., профессор Михайлов А.Н., к.т.н., доцент Михайлов Д.А., к.т.н., доцент Шейко

Е.А., аспирант Михайлов В.А., соискатель Хавлин Т.В., соискатель Колодяжный А.А., соискатель Кравчук Ю.А.) [8, 9].

Цель работы: повышение качества деталей, узлов и подсистем газотурбинных двигателей и установок.

Сфера применения: изготовление и ремонт деталей с функционально-ориентированными свойствами для авиационных газотурбинных двигателей и установок.

Потенциальные заказчики: авиационные и авиаремонтные заводы, Объединенная двигателестроительная компания, нефтегазовая промышленность.

4. Разработка технологий повышения качества изготовления деталей судовых дизелей с функционально-ориентированными свойствами (к.т.н., доцент Костенко А.В., д.т.н., профессор Михайлов А.Н.) [10].

Цель работы: повышение качества деталей, узлов и подсистем судовых дизелей.

Сфера применения: изготовление и ремонт деталей с функционально-ориентированными свойствами для судовых дизелей.

Потенциальные заказчики: машиностроительные, судостроительные и судоремонтные предприятия и заводы.

5. Разработка технологий нанесения сверх прочных функционально-ориентированных покрытий изделий машиностроения (д.т.н., профессор Михайлов А.Н., к.т.н. доцент Михайлов Д.А., аспирант Михайлов В.А.) [11].

Цель работы: повышение качества деталей, узлов и подсистем на основе функционально-ориентированных покрытий.

Сфера применения: изготовление деталей с функционально-ориентированными свойствами.

Потенциальные заказчики: машиностроительные, судостроительные и судоремонтные предприятия и заводы, предприятия нефтегазовой промышленности.

6. Синтез новых технологий и методов производства пространственно-модифицированной геометрии зубьев и пространственных зубчатых колес (к.т.н., доцент Грубка Р.М., д.т.н., профессор Михайлов А.Н., к.т.н., доцент Лахин А.М.) [12].

Цель работы: повышение качества деталей, обеспечение нетрадиционных свойств машин и технических систем.

Сфера применения: производство пространственных зубчатых колес.

Потенциальные заказчики: машиностроительные заводы и предприятия.

7. Совершенствование технологии обработки хрупких неметаллических материалов (д.т.н., профессор Михайлов А.Н., к.т.н., профессор Горобец И.А., к.т.н. доцент Байков А.В., ст. преподаватель Голубов Н.В.).

Цель работы: повышение качества изготовления деталей из неметаллических материалов.

Сфера применения: обработка изделий и деталей из природного камня.

Потенциальные заказчики: камнеобрабатывающие и инструментальные заводы, машиностроительные предприятия.

8. Разработка методов повышения качества инструментов машиностроения, оптимизация структуры и параметров технологических процессов (к.т.н., доцент Ивченко Т.Г., к.т.н. доцент Петряева Е.В.) [13, 14].

Цель работы: повышение качества металлорежущих инструментов и технологических процессов машиностроения.

Сфера применения: производство машин и технических систем.

Потенциальные заказчики: машиностроительные заводы и предприятия.

9. Совершенствование технологий сборки изделий машиностроения (д.т.н., профессор Мельникова Е.П, соискатель Калинин А.В.)

Цель работы: повышение эффективности и качества сборки изделий и систем в машиностроении.

Сфера применения: сборочные технологические процессы машиностроения

Потенциальные заказчики: машиностроительные заводы и предприятия.

10. Синтез наноматериалов, нанопокрытий и фуллеренов (д.т.н., профессор Михайлов А.Н., аспирант Михайлов В.А., соискатель Кравчук Ю.А.).

Цель работы: обеспечение принципиально новых свойств изделий и материалов.

Сфера применения: машиностроение, материаловедение, металлургия, кибернетика, производство полупроводников и сверхпроводящих материалов, фоторезистов, химическая промышленность и медицина.

Потенциальные заказчики: машиностроительные и химические заводы.

Эти научные направления являются принципиально новыми для технологии машиностроения. На базе этих научных направлений можно решать вопросы обеспечения качественно новой совокупности свойств изделий машиностроения и других отраслей народного хозяйства.

Особенно следует отметить, что начиная с 2014 г. ученые и сотрудники кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета провели большие работы по совершенствованию лабораторной базы кафедры. Выполнили существенные преобразования существующего оборудования лабораторной базы. В настоящее время в рамках данной научной школы работают следующие лаборатории:

1. Лаборатория технологического оборудования и функционально-ориентированных технологий.

2. Лаборатория по напылению функционально-ориентированных покрытий изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

3. Лаборатория синтеза нанопокрытий и фуллеренов.

Можно также отметить, что в настоящее время, кафедра «Технология машиностроения» ведет большую работу по подготовке аспирантов и докторантов для народного хозяйства Донецкой народной республики и Российской Федерации (8 аспирантов и докторантов).

К основным результатам работы Донецкой научной школы технологов-машиностроителей можно отнести следующее:

1. Подготовлено для народного хозяйства различных стран мира более 30 кандидатов и докторов наук (Россия, Украина, ДНР, ЛНР, Тунис и Ирак). В диссертационном совете защищено более 100 диссертаций. С 2015 года диссертационный совет работает в рамках МОН ДНР.

2. С 1992 года силами кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета было издано более 150 книг - сборников научно-технических трудов, где опубликованы научно-технические статьи ведущих ученых и специалистов из 35 стран мира.

3. Проведено целый ряд международных научно-технических, практических и методических конференций, семинаров и выставок, основные из которых следующие:

- двадцать пять международные научно-технические конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», которые проведены в г. Севастополе;

- восемнадцать международных научно-практических семинаров «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы», которые проводились поочередно в г. Донецке и г. Таганроге;

- девять международных научно-методических конференций “Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров”, которые проводились в различных городах Республики Тунис и в г. Сухум (Абхазия);

- начато проведение международных научно-технических конференций в Петропавловске-Камчатском;

- восемнадцать международных студенческих научно-технических конференций «Автоматизация, технология и качество в машиностроении», которые проведены в г. Донецке.

4. В работе проводимых конференций и семинаров приняло участие более 5500 ученых и специалистов из 35 стран мира. На конференциях доложено около 35 докторских и 120 кандидатских диссертаций ученых из 12 стран мира.

5. В 2000 году в рамках Донецкой научной школы технологов-машиностроителей создана международная общественная организация Международный союз машиностроителей. В настоящее время, в Международном союзе машиностроителей активно работают представители из 20 стран мира.

6. Созданы новые научные направления исследований.

7. Активизировалась подготовка аспирантов и докторантов.

8. Выполнено решение целого комплекса фундаментальных и прикладных научных проблем для народного хозяйства.

9. Выполнена кардинальная модернизация научных лабораторий и создание новых.

10. Активизировалась научно-исследовательская работа студентов, аспирантов и докторантов.

11. В области международного сотрудничества активизировались работы по развитию связей с университетами, организациями и учеными стран ЕАЭС.

12. Целый комплекс других работ.

5. Некоторые особенности работы и перспективы развития

В результате выполняемых исследований учеными и специалистами Донецкой научной школы технологов-машиностроителей разработано ряд научно-технических проектов, новые научные направления исследований и рекомендаций. В качестве рекомендаций, для повышения эффективности машиностроительного комплекса Донецкого региона в период научно-технического перевооружения предприятий можно рекомендовать следующие направления развития:

- создание и внедрение новых, нетрадиционных и наукоемких технологий;

- широкое использование технологий, оборудования и станков лучших мировых образцов;

- переход предприятий на выпуск принципиально новых видов продукции с качественно новой совокупностью свойств и мерой полезности, создаваемых отечественными организациями или через покупку за рубежом лицензий и лучших образцов;

- повышение качества продукции машиностроения;

- широкое внедрение на всех уровнях изготовления изделий средств автоматизации и механизации производственных процессов;

- в единичном и мелкосерийном производстве широкое применение станков с ЧПУ и гибких производственных систем;

- в серийном и крупносерийном производствах использование автоматических модулей, автоматов, автоматических линий и комплексов;

- в массовом производстве внедрение высокоэффективных автоматов, автоматических линий, поточно-пространственных технологических систем непрерывного действия.

Можно отметить, что в настоящее время стратегия региональной политики развития машиностроения [1] базируется на обеспечении опережающих темпов роста объемов наукоемкой продукции, создании новых конкурентных образцов техники, повышении качества и эффективности производства. При этом предлагается реализацию стратегии развития машиностроения выполнять в несколько этапов, характеризуемых лавинообразным процессом в решении проблем перспективного развития машиностроения.

Для создания прогрессивной стратегии региональной политики в области развития машиностроения, традиционные методы не подходят. На рис. 5 показаны этапы прогрессивной стратегии региональной политики в области развития машиностроения при итеративном проектировании. Здесь прогрессивная стратегия региональной политики в области развития машиностроения не является отдельным монолитным этапом. Она представляет собой один из шагов на пути последовательной итеративной разработки прогрессивной стратегии региональной политики. При этом последовательность шагов может иметь оптимальный характер. В данной модели предусмотрена возможность перехода на любой этап развития машиностроения без прохождения всех составляющих, в том числе возможен возврат к предыдущим этапам. Основные этапы прогрессивной стратегии региональной политики в области развития машиностроения при итеративном проектировании следующие:

- стабилизация положения предприятий;
- повышение объема выпуска продукции;
- научно-техническое перевооружение производства;
- повышение качества продукции машиностроения;
- наращивание новой конкурентоспособной продукции машиностроения;
- формирование новых рынков сбыта продукции;
- переход предприятий на выпуск принципиально новых видов продукции.

Рис. 5. Этапы прогрессивной стратегии региональной политики в области развития машиностроения при итеративном процессе

На всех этапах прогрессивной стратегии региональной политики в области развития машиностроения при итеративном процессе должно широко использоваться научно-техническое обеспечение. При этом необходимо применение новых и прогрессивных технологий.

В качестве рекомендаций по определению прогрессивности технологий можно представить характеристиками, представленными структурной схемой рис. 6. Она имеет иерархическую структуру и содержит: основные признаки, особенности и обеспечение технологий [2].

В технике, технологии служат средством для изготовления изделий. Поэтому судить о прогрессивности новых технологий нужно по конечным результатам, а именно по изделиям. На основании этого, основные признаки, характеризующие прогрессивность новых технологий, даны на структурной схеме (рис. 6) относительно конечного результата их действия – изделий. Эти признаки можно представить следующими категориями:

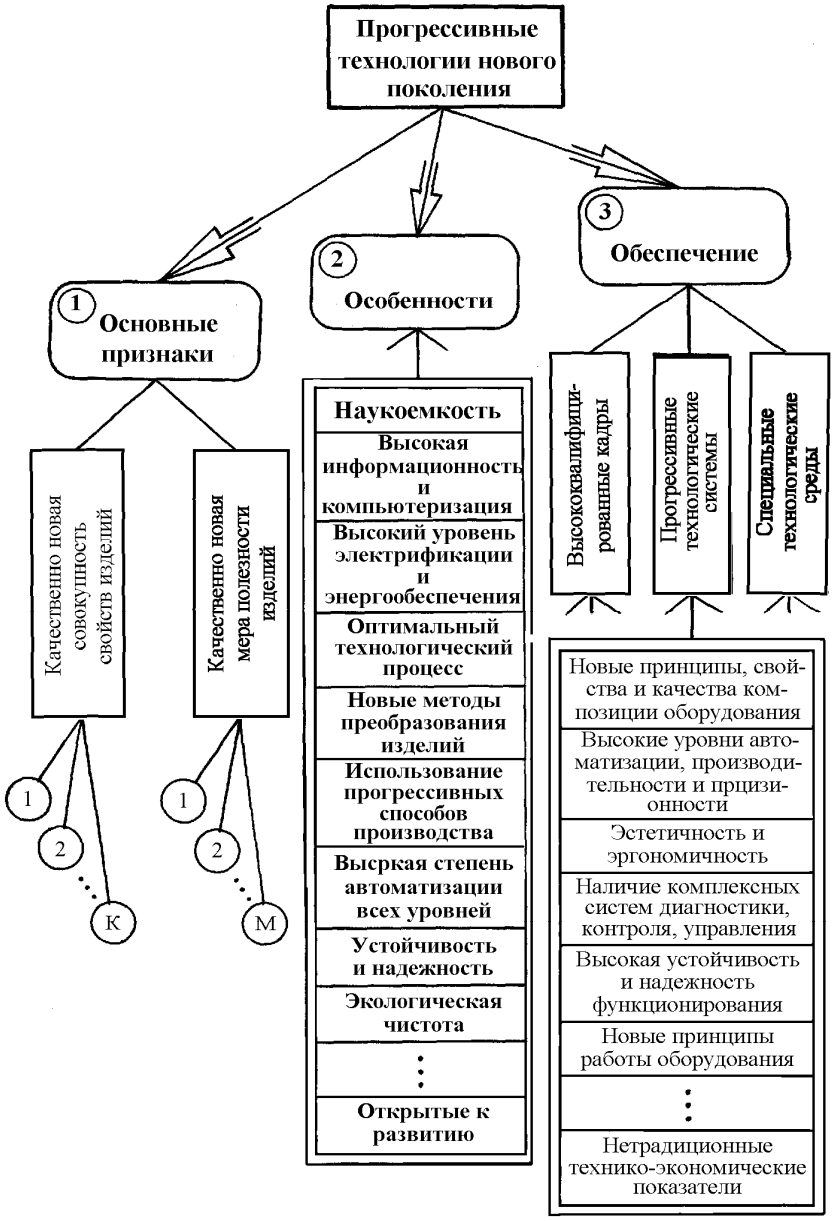


Рис. 6. Основные характеристики прогрессивных технологий нового поколения

- качественно новая совокупность свойств изделий (причина);
- качественно новая мера полезности изделий (следствие).

Изготавливаемые изделия всегда являются носителями самых разнообразных свойств. С развитием науки и техники создаются возможности для улучшения имеющихся свойств изделий, например, геометрических, кинематических, механических, тепловых, оптических и других. А также реализуются качественно новые свойства изделий, например, экологические, манипуляционные, отражения жестких космических лучей, обладания эффектом “магнитная потенциальная яма” и другие. Для обеспечения этого, проектируемые технологии непрерывно совершенствуются и создаются качественно новые, а это значит, что они будут постоянно улучшаться, и создавать качественно новые свойства изделий.

Однако только мера этих свойств – полезность изделий или их ценность имеет решающее значение, так как конечной целью изготовления любого изделия является обеспечение необходимой ценности. Создаваемые прогрессивные технологии должны

непрерывно повышать ценность изделий и соответственно реализовать качественно новую меру их полезности.

Создаваемые прогрессивные технологии нового поколения имеют некоторые базовые особенности. Основные из них могут быть связаны с высокой наукоемкостью их создания, сложностью реализации и функционирования. При этом необходима высокая информационность и компьютеризация, потребен определенный уровень электрификации и энергообеспечения. В этом случае, проектирование новых технологий должно базироваться на оптимальных технологических процессах. При необходимости могут быть использованы новые методы преобразования заготовок в изделия. Для этого должны применяться прогрессивные способы производства. На всех этапах жизненного цикла новых технологий необходимо обеспечивать высокую степень автоматизации процессов. Созданные технологии должны иметь высокую устойчивость и надежность функционирования по заданному алгоритму. Все это должно быть тщательно проработано на основе новых подходов в проектировании и обеспечена экологическая чистота. Вместе с тем, создаваемые технологии должны быть открытыми к развитию и иметь возможность эволюционировать и модифицироваться в соответствии с изменяющимися внешними условиями. Кроме того, прогрессивные технологии могут иметь ряд других особенностей относящихся к специальным вопросам их проектирования.

Для создания прогрессивных технологий нового поколения необходимо нетрадиционное обеспечение, а именно: высококвалифицированные кадры, прогрессивные технологические системы и специальные технологические среды. В этом случае, проектирование технологических систем должно, прежде всего, определяться конъюнктурой рынка; основываться на новых принципах, свойствах и качестве композиции элементов оборудования; иметь высокие уровни автоматизации, производительности и прецизионности оборудования, оснастки и инструментов. Созданные технологические системы должны быть эстетичны и эргономичны, иметь высокую устойчивость и надежность функционирования. Для этого широко должны быть использованы комплексные системы диагностики, контроля и управления, а также новые принципы работы оборудования и методы воздействия орудий и средств обработки на изделия. Такой комплексный подход позволяет сориентировать создателя прогрессивных технологий на проектирование качественно новых технологий с нетрадиционными технико-экономическими показателями.

Для развития машиностроения Донецкой народной республики можно рекомендовать некоторые перспективные тенденции прогрессивного развития технологий машиностроения [3]:

- повышение концентрации и параллелизма технологических зон обработки, обеспечивающих повышение производительности и новых возможностей технологических систем;

- создание прогрессивных нетрадиционных пространственных структур технологических зон обработки (создание многомерных циклических структур, повышение размерности многообразия и объектов в каждом многообразии структуры), реализующих повышение технологических возможностей пространства и среды;

- обеспечение компоновки технологических зон обработки в линейные, поверхностные и объемные структуры; обеспечение компоновки этих структур в производственные ячейки (поточно-пространственные технологические модули); обеспечение компоновки производственных ячеек в пространственные структуры и заполнение ими всего объема пространства производственного цеха с возможностью изменения их пространственного расположения;

- повышение степени компактирования структуры за счет увеличения плотности (линейной, поверхностей, объемной) технологических зон обработки;

-создание новых классов технологических машин, разработка и функционирование которых базируется на основе новых принципов;

- организация поточности функционирования технологических зон обработки на основе многомерных замкнутых рекуррентных групп, выполняемых на базе их сложных транспортных движений и повышения интенсивности;

- обеспечение одновременности или параллельности выполнения функций технологических систем;

- повышение непрерывности и устойчивости функционирования технологических систем в соответствии с заданным алгоритмом;

- повышение информационности технологий, снижение массы технологических систем и повышение их энерговооруженности;

- создание технологий и технологических систем с использованием принципов механотроники и адаптроники;

- упрощение функциональной структуры за счет совмещения различных функций технологических систем, выполнение технологических функций посредством транспортных функций и наоборот.

В практике машиностроения могут использоваться и другие направления прогрессивного развития технологий, технологических систем и промышленного производства. В каждом конкретном случае, для прогрессивного развития машиностроительного завода, нужно широко использовать рекомендации ученых, выполнять проработку возможных изменений потенциала предприятия, и реализовать это конечно необходимо - на строгой научной основе. В этом случае, необходимо привлекать научно-технических работников научно-исследовательских институтов и университетов.

6. Заключение

В заключении можно отметить то, что Донецкая научная школа технологов-машиностроителей имеет большой потенциал в области создания и внедрения новых прогрессивных технологий. Поэтому в настоящее время ученые и специалисты этой научной школы активно участвуют в решении насущных проблем машиностроения региона.

Также следует заметить, что только на базе использования современных достижений науки и техники возможно дальнейшее развитие машиностроительного комплекса Донецкой народной республики. Поэтому руководству машиностроительных заводов нужно серьезно пересмотреть техническую политику развития предприятий и широко использовать достижения науки и техники, а также всемерно привлекать ученых для решения насущных проблем машиностроения на всех уровнях производства.

В представленной работе выполнено следующее:

1. Показаны особенности становления и развития Донецкой научной школы технологов-машиностроителей и ее работы в рамках Донецкой народной республики.

2. Даны данные по структуре и составу Донецкой научной школы технологов-машиностроителей.

3. Показаны основные научные направления научных исследований ученых и специалистов этой научной школы.

4. Даны рекомендации по перспективным тенденциям развития машиностроения Донецкой народной республики.

5. Показаны результаты работы Донецкой научной школы технологов-машиностроителей.

Список литературы: **1.** Кольцов С.В., Демин В.П., Косоруков Н.Д., Кашников А.Н. Стратегия развития машиностроения Донецкой области до 2020 года // Сборник трудов международной научно-технической конференции в г. Севастополе 9-15 сентября 2002 г.: Машиностроение и техносфера XXI века. В 3-х томах. - Донецк: ДонНТУ, 2002. Т.3. С. 151-157. **2.** Демин В.П., Михайлов А.Н. Инновации, инвестиции – основа развития предприятий машиностроения Донецкой области // Известия ТРТУ-ДонНТУ. Материалы Пятого Международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». В 2-х кн. – Таганрог: ТРТУ. Кн. 1, 2004, № 4. С. 6-10. **3.** Михайлов А.Н. XXV международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века», традиция в четверть века. / Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 10-16 сентября 2018 г. В 2-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2018. Т. 1. С. 272-291. **4.** Михайлов А.Н. Международный союз машиностроителей - консолидирующая основа машиностроителей в глобальном мире // Сборник трудов международной научно-технической конференции в г. Севастополе 9-15 сентября 2002 г.: Машиностроение и техносфера XXI века. В 3-х томах. - Донецк: ДонНТУ, 2002. Т. 2. С. 127-139. **5.** Михайлов А.Н. Закономерности эволюционного процесса развития технологий машиностроения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сб. научн. статей. - Донецк: ДонГТУ, 1995. Вып. 2. С. 32-49. **6.** Михайлов А.Н. Основы проектирования и автоматизации производственных процессов на базе технологий непрерывного действия. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 421 с. **7.** Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. **8.** Михайлов, А. Н. Структурная надежность и методы повышения ресурса газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств. / А. Н. Михайлов и [др.] [Текст] // Наукоемкие технологии в машиностроении. – Брянск: ФГБО ВО «БГТУ». - 2018. - №3 (81). - С. 32-41. **9.** Михайлов, Д.А. Методика и алгоритм синтеза технологического обеспечения комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора газотурбинной установки [Текст] / Д. А. Михайлов, А. П. Пичко, Е. А. Шейко и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 2 (65). - С. 16 – 25. **10.** Михайлов, А. Н. Особенности обеспечения функционально-ориентированных технологий изготовления деталей судовых дизелей [Текст] / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2017. – №4. – С. 31-36. **11.** Михайлов А.Н. Общий подход к созданию композиционных технологий машиностроения / Наукоемкие технологии в машиностроении. №6, 2012. С. 24-29. **12.** Грубка, Р.М. Аппроксимация координат точек профиля дисковой зуборезной модульной фрезы сплайнами Безье [Текст] / Р. М. Грубка, И. А. Петряева, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 3 (58). - С. 8 – 15. **13.** Ивченко, Т.Г. Обеспечение гарантированного уровня безотказности режущего инструмента при оптимизации режимов резания [Текст] / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 1 (64). - С. 23 – 28. **14.** Петряева, И.А. Исследование переменности теплового состояния зоны резания при обработке фасонных поверхностей твердосплавным инструментом с ФОС [Текст] / И. А. Петряева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 4 (59). - С. 48 – 55.

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ФУЛЛЕРЕНОВОЙ САЖИ И РАЗДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПО ПЛОТНОСТИ

Михайлов А.Н., Михайлов В.А. Кравчук Ю.А. (*ДонНТУ, г. Донецк, ДНР*)
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.org

Abstract: *The paper presents data on the production of fullerene soot by the unified method. The problems of the separation of fullerene soot according to the density of the material are solved, and the determination of its quantitative components on the basis of the principle of binary dependence is carried out.*

Keywords: *fullerene, synthesis of fullerene soot, plasma arc synthesis, liquid chromatography, nanotechnology, nanomaterials*

1. Ведение

Исследуя проблемы машиностроения, наталкиваешься на ограниченность свойств различных материалов и возможностей технологии. Поэтому, наиболее прогрессивными направлениями развития, является синтез традиционных отраслей промышленности и инновационных технологий. За последнее десятилетие в промышленности развитых стран повсеместно внедряются нанотехнологии, для получения качественно новых свойств материалов, наиболее распространенными наноматериалами являются фуллерены.

Возможность их существования была предсказана ещё в 1971 году в Японии и теоретически обоснована в 1973 году в СССР [1, 2]. Открытие фуллеренов, учёными Крото Х., Смоли Р., было осуществлено при исследовали масс-спектров паров графита, полученных в лазерном луче при облучении твёрдого образца. Что в 1996 было отмечено Нобелевской премией по химии [3].

Фуллерен - аллотропная модификация углерода, которая стоит в ряду с такими соединениями углерода как алмаз и графен и имеет выпуклую гранецентрированную кристаллическую решетку, которая состоит из 60, а в ряде случаев даже из 100 атомов углерода.

Фуллерен имеет очень широкий спектр свойств, позволяющий применять его во всех областях народного хозяйства.

Фуллерен являются наномодификатором и позволяет улучшать свойства практически любых материалов в несколько раз. Эти возможности фуллерена позволят производителям наладить выпуск качественно новых материалов в привычной для них сфере.

В качестве примера можно привести то, что при модификации машинных масел фуллереном C_{60} коэффициент трения трущихся поверхностей снижаются на 90% , а износ на 80% , это позволит снизить расходы на затрачиваемую энергию на 7 - 10% , и повысить ресурс используемого оборудования. Так же при использовании фуллеренов в металлургии и при получении некоторых сплавов, предел прочности металлов увеличивается в 10 - 15 раз [4].

Однако наиболее широкая сфера применения фуллеренов это электронная промышленность, например в квантовых компьютерах [5] и фотоэлементах гелиоэлектростанций, так же часто используется этот материал в медицине и фармацевтике.

На текущий момент синтез фуллеренов и их разделение очень длительный и трудоемкий процесс, поэтому требуются дополнительные исследования, разработка и описание новых методов получения этого материала. Существует несколько методов синтеза фуллеренов:

- при каталитическом пиролизе по методу (CVD) [6];

- сжигание в дуговом разряде графитовых электродов в среде гелия [7];
- сжигание графита в лазерном луче.

Одним из наиболее эффективных способов получения фуллереновой сажи является метод Хаффмана-Кретчмера [7, 8, 9]. Суть метода заключается в сжигании графитовых электродов в электродуговым разрядом в среде гелия (He). При этом, для разделения фуллереновой сажи широко применяется метод жидкостной хроматографии [10, 11, 12].

2. Метод, технология и обеспечение

В данной работе предложены, унифицированный вариант сжигания графита в плазменно-дуговом луче в среде гелия (He), удерживаемого электромагнитным полем и сфокусированным на кремневой подложке. Данный метод воплощался в камере вакуумной ионно-плазменной установке ННВ-6,6-И1, что показано на рис. 1. На рис. 2 представлены основные составляющие этапов метода разделения по плотности в солено-щелочной воде.

Рис. 1. Вакуумная ионно-плазменная установка ННВ-6,6-И1

а) ***б)*** ***в)***

Рис 2. Метод разделения по плотности в водно-солено-щелочной среде:
а - измельчение и травление в HCl, б - фильтрация, в - разделение по плотности

3. Цели и задачи

Целью работы является получение фуллереновой сажи унифицированным методом путем ее разделения по плотности материала на базе принципа бинарного соответствия параметров.

В соответствии с поставленной задачей в работе решаются следующие задачи:

- получение фуллереновой сажи унифицированным методом,
- разделение фуллереновой сажи по плотности материала,
- определение количественных составляющих, и их бинарной зависимости.

4. Результаты экспериментальных исследований

Синтез фуллереновой сажи производился на поверхности графитового электрода в луче электродуговой плазмы длинной 400 мм и при токе 100 А , в среде He, с давлением $3 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-3}$ Па, и осаждался на кремневую подложку при температуре 700 С. Данный метод выявил ряд преимуществ, к которым можно отнести следующее:

- простота замены графитного электрода за счёт двух составной схемы, где на охлаждаемый металлический стержень, накручивается графитовый электрод конической формы. Что позволяет снизить натекание в камеру паразитных газов за счет неподвижности электродов в отличие от метода Хаффмана-Кретчмера, схема которого представлена на рис. 1, где электрод является подвижным и продвигается по мере его сгорания.

- возможность регулировки тока I, на подложке что позволяет достаточно точно получать требуемую температуру конденсации, за счет этого можно регулировать концентрацию фуллеренов на поверхности подложки.

- конденсация фуллереновой сажи на поверхности подложки, а не на поверхности всей камеры, что упрощает сбор материала.

Эти преимущества позволяют сделать вывод, что синтез фуллереновой сажи унифицированным методом, является более эффективным и более универсальным.

Однако выделение фуллерена из фуллереновой сажи не менее сложный и трудоемкий процесс и поэтому следующим этапом исследований является определение количественной составляющей разделения сажи по плотности материала.

Возьмем 100 грамм фуллереновой сажи, предварительно промоем её в соляной кислоте, для растворения металлов и других примесей и удаления их путем

фильтрации. Полученную сажу очистили от органических включений нефтяной фракцией нифраса плотностью 0.7 кг/дм^3 и просушили, масса сухого материала составила 99.3. Затем в смесь нифраса и сажи добавили крепкий солено-щелочной раствор плотностью 1350 кг/дм^3, что позволило разделить сажу на две составляющие разной плотности. Далее в среде солено-щелочной жидкости образовались кристаллы соли NaCl с кластерами сажи соответствующей плотности которые находились во взвешенном состоянии в объеме солено-щелочного раствора, а часть более тяжёлых частиц сажи выпала на дно делительной воронки. После промывки фильтрации и просушки вес сажи в нифрасе составил 82,4 грамма, в щелочном растворе 17.1 грамм.

Таблица 1 - Бинарная зависимость содержания материала на единицу объема жидкости по плотности.

Плотность жидкости ρ, гр/см^3	Кол-во сажи данной плотности на единицу объема, в граммах
0,7	0,7
1,0	23,4
1,1	20,6
1,2	19,0
1,35	17,1

Затем процедуру повторили несколько раз при разной плотности щелочной жидкости от 1 до 1.35 кг/дм^3 результаты в таблице 1.

Используя принцип соответствия плотности жидкости к количеству вещества данной плотности можно определить функцию бинарной зависимости.

$$\rho_i = f(\rho_{ci}), \qquad (1)$$

где ρ_i -плотность жидкости, а ρ_{ci} - содержание материала данной плотности в данном объеме жидкости.

Для многослойного разделения, в выражении (1) элементы формулы можно представить следующей системой бинарного соответствия (2):

$$\left.\begin{array}{l} \rho_1 \leftarrow \circledcirc \rightarrow \rho_{c1} \\ \rho_2 \leftarrow \circledcirc \rightarrow \rho_{c2} \\ \vdots \\ \rho_i \leftarrow \circledcirc \rightarrow \rho_{ci} \end{array}\right\} \qquad (2)$$

где $\circledcirc$ - знак бинарного соответствия.

На основании этого можно предположить, что при использовании жидкостей с более высокой плотностью, чем плотность фуллерена, можно не только выделить фуллерен из фуллереновой сажи, но разделить фуллерен по плотности на C_{60} и C_{70} и высшие фуллерены. Такими жидкостями являются растворы солей, такие как поливольфрамат натрия $Na_6(H_2W_{12}O_{40})$, хлорид цезия CsCl, хлорид бария BaCl. При последовательном внесении данных солей в жидкость можно добиться плотности жидкости от 1,7 до 2 кг/дм^3.

Из всего выше указанного можно сделать вывод, что если в эксперименте солено-щелочную жидкость с плотностью 1,35 кг/дм^3 заменить на жидкость с плотностью выше чем 1,7 кг/дм^3 фуллерен C_{60} осядет на поверхности данной жидкости так как его

плотность составляет 1,67 грамм на $см^3$, а C_{70} и высшие фуллерены выпадут в осадок так как его плотность выше.

5. Выводы

На основании выше изложенного можно констатировать факт того что:

- получение фуллереновой сажи унифицированным методом, является эффективным и в отличие от перечисленных выше методов, более универсальным;
- разделение фуллереновой сажи по плотности в солено-щелочном растворе воды, так же подтвердил эффективность и устойчивую тенденцию разделения;
- в работе определены количественные составляющие процесса, базирующиеся на бинарном соответствии параметров.

Простота и доступность этих методов позволяют сделать вывод, что представленный способ синтеза и разделения фуллереновой сажи, является более эффективным и универсальным.

Список литературы: 1. Osawa E. Kagaku (Kyoto), V.25, P.854 (1971); Chem. Abstr. V.74 (1971). 2. *Бочвар Д. А., Гальперн Е. Г.* О гипотетических системах: карбододекаэдре, s-икосаэдране и карбо-s-икосаэдре. Доклады АН СССР. — 1973. — Т. 209, № 3. — С. 610. 3. Нобелевская премия по химии за 1996 год. 4. http://bardahl.com.ua 5. *Arndt M. et al.* Wave–particle duality of C_{60} molecules. Nature. — 1999. — 14 October (vol. 401, no. 6754). — P. 680—682. — ISSN 0028-0836. 6. Царева С. Ю., Жариков Е. В., Аошкин И. В., Коваленко А. Н. Образование углеродных нанотрубок при каталитическом пиролизе углеводородов с железосодержащим катализатором. Известия вузов. Электроника. – 2003. – № 1. 7. Kraetschmer W., Lamb L.D., Fosioripoulos K., Huffman D.R. Solid C60 – a new form of carbon// Nature. 358.–1990. - V. 347. - P. 354. 8. Афанасьев Д.В., Богданов А.А., Дюжев Г. А. и др. Образование фуллеренов в дуговом разряде. – ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 2. - С. 125 – 128. 9. Сазонов М.И., Циганов Д.Л.. Плазмотрон с графитовым катодом для получения фуллеренов. Фуллерены и Фуллереноподобные структуры. Минск 2005. 10. Шаповалова Е. Н., Пирогов А.В. Хроматографические методы анализа Методическое пособие для специального курса. Москва 2007. 11. Щур Д. В., Загинайченко С. Ю., Котко А. В., Аникина Н. С., Каменецкая Е. А. Изучение особенностей процесса высаливания фуллерита из насыщенного раствора С60 в толуоле. II. Турбулентное смешивание реагентов. Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies 2013, т. 11, № 4. - С. 833–861. 12. Березкин В.И., Викторовский И.В., Вуль А. Я., Голубев Л. В., Петрова В. Н., Хорошко Л. О. Фуллереновые микрокристаллы как адсорбенты органических соединений. Физика и техника полупроводников, 2003 - Том 37. - Вып. 7. – С. 128–131.

МЕТОДИКА НАПРАВЛЕННОГО ПОИСКА РАЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ ВАРИАНТОВ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГТУ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

Михайлов А.Н., Пичко А.П., Михайлов Д.А.,
Михайлов В.А., Колодяжный А.А., Шейко Е.А.
(ДонНТУ, ДАГЗ, г. Донецк, ДНР)
Тел.: +38 (071) 3060879; E-mail: tm@fimm.donntu.org

Abstract: *In this paper, the analysis of the features of the synthesis of structural variants of technological processes of finishing and hardening treatment of gas turbine blades is carried out. A technique for the directional search for rational structural variants of the processing of compressor blades and turbine blades with regard to technological links is given. The schemes of synthesis of structural variants of complex technological processes are presented.*
Key words: *technological process, blade, gas turbine installation, synthesis, method, communication.*

1. Введение

Выполненные исследования позволили установить, что лопатки газотурбинных установок (ГТУ) работают в сложных эксплуатационных условиях [1, 2]. При этом лопатки компрессора работают в принципиально различных условиях по сравнению с лопатками турбины [3, 4, 5]. Это обусловлено, прежде всего, тем, что в компрессоре действуют одни виды эксплуатационных воздействий, а в зоне турбины происходит целый комплекс других воздействий. Это приводит к принципиально различным разрушениям лопаток компрессора относительно лопаток турбины, что значительно снижает ресурс ГТУ и происходит неполное использование эксплуатационного потенциала лопаток компрессора по сравнению с лопатками турбины.

Кроме того, в процессе эксплуатации ГТУ вследствие особенностей формы каждой лопатки, ее расположения, кинематики и движения пыле газо-воздушного потока по тракту двигателя происходит неодинаковый и неравномерный износ каждой лопатки турбокомпрессора ГТУ. Все это значительно снижает ресурс ГТУ и приводит к снижению ее эксплуатационного потенциала.

Для повышения ресурса ГТУ, выравнивания процесса разрушений лопаток компрессора и лопаток турбины, а также обеспечения одинакового процесса износа поверхностей каждой лопатки турбокомпрессора применяются отделочно-упрочняющая обработка (ОУО) лопаток с обеспечением им функционально-ориентированных свойств (ФОС) [6] на базе функционально-ориентированных покрытий (ФОП) [2, 3, 4]. ФОП позволяют повысить в целом ресурс ГТУ, выровнять ресурс работы лопаток компрессора относительно лопаток турбины, снизить и выровнять износ поверхностей каждой лопатки, повысить эксплуатационный потенциал ГТУ и обеспечить увеличение ремонтопригодности элементов установки.

Для реализации ОУО с применением ФОП лопаток турбокомпрессора разработано необходимое технологическое обеспечение проектирования технологических процессов [6] с учетом технологических связей между процессами обеспечения ФОС лопаток компрессора и лопаток турбины. Процесс проектирования технологических процессов с реализацией ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом технологических связей [6] является сложной задачей, которая направлена на разработку единого комплексного технологического процесса ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОП. При этом обычно структура единого комплексного технологического процесса ОУО лопаток с ФОП является многовариантной. Поэтому возникает проблема нахождения рациональной или доминирующей струк-

туры таких технологических процессов, которая бы была близка к оптимальному составу и обеспечивала бы комплексную реализацию процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОС.

Целью данной работы является повышение эффективности синтеза комплексных технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОС для ГТУ на основе разработки методики направленного поиска рациональных структурных вариантов процессов, с учетом технологических связей.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: выполнить анализ особенностей синтеза структурных вариантов технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины; разработать методику поиска рациональных структурных вариантов комплексных технологических процессов обработки лопаток компрессора и турбины с учетом технологических связей; предложить схемы возможных вариантов технологий для ОУО лопаток на базе ФОП.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Особенности синтеза структурных вариантов технологических процессов

Процесс проектирования технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС имеет многовариантную структуру. При этом наиболее рационально использовать автоматизированный поиск рациональных вариантов технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС. В этом случае, для выявления рациональных структурных вариантов технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС целесообразно использование элементов теории графов (рис. 1) [7].

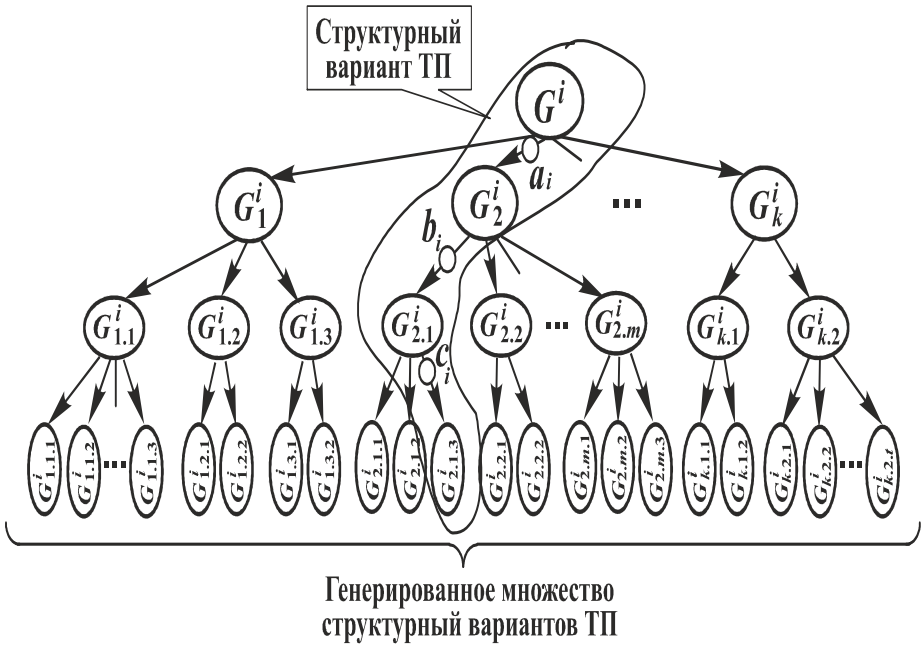


Рис. 1. Граф возможных вариантов технологий для нанесения ФОП лопаток турбокомпрессора ГТУ

На рис. 1 представлен граф возможных вариантов технологий для нанесения ФОП лопаток турбокомпрессора ГТУ. В соответствии с методикой проектирования графов технологических процессов G^i, представленной в работе [7], процесс проектирования выполняется пошагово в соответствии с иерархическими уровнями. На самом нижнем уровне иерархии располагается генерированное множество структурных вариантов технологических процессов. С помощью выражения (1) определяется рациональный или оптимальный вариант структурного варианта технологического процесса (рис. 1), который определяется направлениями графа a_i, b_i, c_i .

3. Методика поиска рациональных структурных вариантов комплексных технологических процессов

Для проектирования комплексных технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС, методика поиска рациональных вариантов технологических процессов базируется на следующих положениях (последовательности):

1. Строятся общие двухпоточные графы G_1 и G_2 технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОС.

2. Устанавливаются связи между структурами технологических процессов ОУО лопаток компрессора f_{i1} и лопаток турбины f_{i2}. Эти связи определяются на базе следующих условий:

$$R_1 = R_2 \tag{1}$$

или

$$k_1 R_1 = k_2 R_2 \ , \tag{2}$$

где R_1 и R_2 – ресурс лопаток компрессора и турбины, соответственно;
k_1 и k_2 – коэффициент кратности ресурса лопаток компрессора и турбины, соответственно.

Следует отметить, что для выполнения условий (1) и (2) между свойствами модулей M_{R12} и M_{R24} должны действовать определенные связи и закономерности. Например, если ресурс лопаток определяется толщиной покрытий, то в этом случае существуют следующие закономерности:

- при выполнении условия (1)

$$\frac{H_{R12}}{\mu_{R12}} = \frac{H_{R24}}{\mu_{R24}}, \tag{3}$$

- при выполнении условия (2)

$$k_1 \frac{H_{R12}}{\mu_{R12}} = k_2 \frac{H_{R24}}{\mu_{R24}}; \tag{4}$$

где H_{R12} - толщина абразивно-эрозионно-стойкого покрытия лопатки компрессора;

H_{R24} - толщина абразивно-эрозионно-жаростойкого покрытия лопатки турбины;

μ_{R12} - интенсивность разрушения покрытия лопатки компрессора;

μ_{R24} - интенсивность разрушения покрытия лопатки турбины.

Учитывая выражения (3) и (4) закономерности свойств покрытий лопаток компрессора и турбины по своей толщине можно представить следующим образом:

- при выполнении условия (1)

$$H_{R12} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} H_{R24}, \tag{5}$$

- при выполнении условия (2)

$$H_{R12} = \frac{k_2}{k_1} \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} H_{R24}. \tag{6}$$

В случае, если абразивно-эрозионно-стойкие покрытия многослойные, выражения (5) и (6) будут иметь следующий вид:

- при выполнении условия (1)

$$\sum_{i=1}^{n_1} h_{R12i} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \sum_{j=1}^{n_2} h_{R24\,j} \ , \tag{7}$$

- при выполнении условия (2)

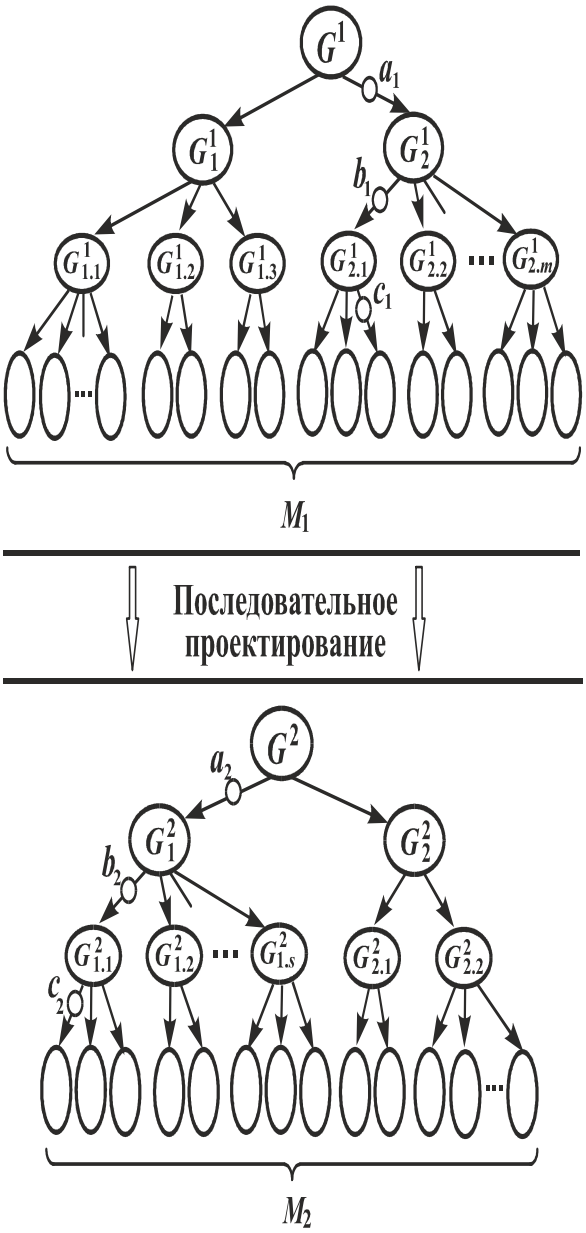


Рис. 2. Граф возможных вариантов технологий для нанесения ФОП лопаток турбокомпрессора ГТУ для лопаток компрессора и лопаток турбины при последовательном процессе проектирования технологических процессов

$$\sum_{i=1}^{n_1} h_{R12i} = \frac{k_2}{k_1}\frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}}\sum_{j=1}^{n_2} h_{R24j}\,; \qquad (8)$$

где h_{R12i} - толщина i – го слоя покрытия лопатки компрессора;

h_{R24j} - толщина j – го слоя покрытия лопат

n_1 - количество слоев покрытия лопатки компрессора;

n_2 - количество слоев покрытия лопатки турбины.

Если толщины покрытий слоев $h_{R121} = h_{R122} = \cdots = h_{R12i} = \cdots = h_{R12n_1} = h_{R12}$ лопатки компрессора и толщины покрытий слоев $h_{R241} = h_{R242} = \cdots = h_{R24j} = \cdots = h_{R24n_2} = h_{R24}$ лопатки турбины равны, то выражения (7) и (8) будут иметь следующий вид:

- при выполнении условия (1)

$$h_{R12} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}}\frac{n_2}{n_1}h_{R24}, \qquad (9)$$

- при выполнении условия (2)

$$h_{R12} = \frac{k_2}{k_1}\frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}}\frac{n_2}{n_1}h_{R24}. \qquad (10)$$

3. Определяется тип последовательности проектирования технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины или тип последовательности связей между графами технологических процессов. В этом случае возможны два типа последовательностей проектирования технологических процессов, а именно: с последовательным процессом (рис. 2), с параллельным процессом (рис. 3).

4. Выполняется генерирование структурных вариантов технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС.

5. Производится выбор рациональной структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС. Этот процесс выполняется на базе выражений (12) и (13).

6. Производится окончательное уточнение структуры технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС и их проработка.

7. Оформляется необходимая документация технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС.

При разработке технологий ОУО лопаток турбокомпрессора, оценку технико-экономической эффективности их изготовления, наиболее целесообразно вести на ос-

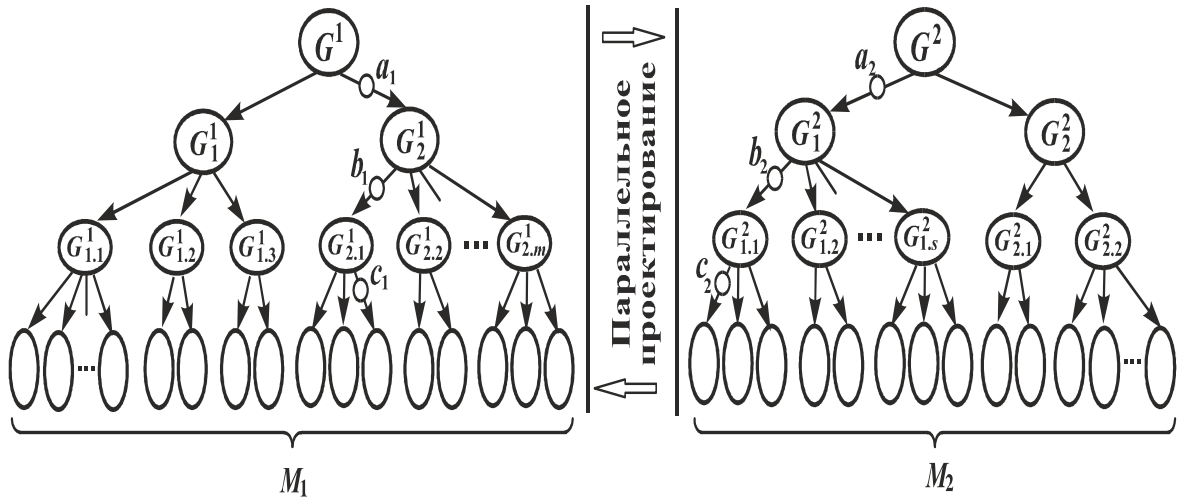


Рис. 3. Граф возможных вариантов технологий для нанесения ФОП лопаток турбокомпрессора ГТУ для лопаток компрессора и лопаток турбины при параллельном процессе проектирования технологических процессов

новании следующего критерия [7, 8]:

$$З_k = \left| N_k \sum_{i=1}^{P_k} C_i + E_H \sum_{i=1}^{P_k} a_i (A_i + Ц_{Иi}) \right| \to \min; \qquad (11)$$

где $З_k$ - приведенные затраты (переменная величина) на реализацию k-й технологии ОУО лопаток турбокомпрессора;

N_k - годовая программа выпуска лопаток турбокомпрессора (k = 1 – лопатки компрессора, k = 2 – лопатки турбины);

C_i - себестоимость реализации i-й операции технологического процесса ОУО лопаток турбокомпрессора;

P_k – общее количество операций ОУО технологического процесса;

E_H – нормативный коэффициент экономической эффективности технологии ОУО лопаток турбокомпрессора (E_H = 0,15 … 0,20);

a_i – число параллельно действующих рабочих позиций на i-й операции технологического процесса ОУО лопаток турбокомпрессора;

A_i – стоимость технологического оборудования на i-й операции технологического процесса ОУО лопаток турбокомпрессора;

$Ц_{Иi}$ – цена одного комплекта инструментального обеспечения для ОУО лопаток турбокомпрессора.

Можно отметить, что процесс направленного поиска рациональных вариантов технологий для лопаток компрессора и лопаток турбины может реализовываться следующим образом:

- с последовательным процессом поиска (рис. 2);
- с параллельным процессом поиска (рис. 3).

На рис. 2 представлен граф возможных вариантов технологий для нанесения ФОП лопаток турбокомпрессора ГТУ для лопаток компрессора и лопаток турбины при последовательном процессе проектирования технологических процессов. Генерированные множества возможных вариантов технологических процессов определяются мно-

жествами M_1 и M_2. При этом рациональные варианты технологических процессов определяются следующими направлениями ориентированных графов a_i, b_i, c_i и a_j, b_j, c_j.. Здесь, выбор направления поиска определяется методом направленного поиска рациональных вариантов [7].

В этом случае, если процесс направленного поиска рациональных вариантов технологии изготовления лопаток компрессора и лопаток турбины выполняется с последовательным процессом поиска (рис. 2), оценку технико-экономической эффективности их изготовления следует выполнять по следующему выражению:

$$З = |З_1| + |З_2| = \left| N_1 \sum_{i=1}^{P_1} C_i + E_H \sum_{i=1}^{P_1} a_i (A_i + Ц_{Иi}) \right| + \left| N_2 \sum_{j=1}^{P_2} C_j + E_H \sum_{j=1}^{P_2} a_j (A_j + Ц_{Иj}) \right| \to \min ; \quad (12)$$

где $З_1$ и $З_2$ - приведенные затраты (переменная величина) на реализацию технологии ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины, соответственно;

N_1 и N_2 - годовая программа выпуска лопаток компрессора и турбины, соответственно;

C_i и C_j- себестоимость реализации *i*-й и *j*-й операции технологического процесса ОУО лопаток турбокомпрессора, соответственно;

P_1 и P_2 – общее количество операций ОУО технологического процесса изготовления лопаток компрессора и лопаток турбины, соответственно;

a_i и a_j – число параллельно действующих рабочих позиций на *i*-й и *j*-й операциях технологического процесса ОУО лопаток компрессора и турбины, соответственно;

A_i и A_j – стоимость технологического оборудования на *i*-й и *j*-й операциях технологического процесса ОУО лопаток компрессора и турбины, соответственно;

$Ц_{Иi}$ и $Ц_{Иj}$ – цена одного комплекта инструментального обеспечения для ОУО лопаток на *i*-й и *j*-й операциях технологического процесса ОУО лопаток компрессора и турбины, соответственно;

i и *j* – *i*-я и *j*-я операции, применяемые для ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины, соответственно.

Если процесс направленного поиска рациональных вариантов технологии изготовления лопаток компрессора и лопаток турбины выполняется с параллельным процессом поиска (рис. 3), оценку технико-экономической эффективности их изготовления следует выполнять по следующему выражению:

$$\left.\begin{aligned} З_1 &= \left| N_1 \sum_{i=1}^{P_1} C_i + E_H \sum_{i=1}^{P_1} a_i (A_i + Ц_{Иi}) \right| \to \min, \\ З_2 &= \left| N_2 \sum_{j=1}^{P_2} C_j + E_H \sum_{j=1}^{P_2} a_j (A_j + Ц_{Иj}) \right| \to \min. \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

На рис. 3 представлен граф возможных вариантов технологий для нанесения ФОП лопаток турбокомпрессора ГТУ для лопаток компрессора и лопаток турбины при параллельном процессе проектирования технологических процессов Генерированные множества возможных вариантов технологических процессов определяются множествами M_1 и M_2. При этом рациональные варианты технологических процессов определяются следующими направлениями ориентированных графов a_i, b_i, c_i и a_j, b_j, c_j. Здесь, выбор направления поиска определяется методом направленного поиска рациональных вариантов [7].

4. Заключение

Таким образом, выполненные исследования направлены на повышение эффективности синтеза комплексных технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОС для ГТУ на основе разработки методики направленного поиска рациональных структурных вариантов процессов, с учетом технологических связей.

Для реализации этого в работе выполнен анализ особенностей синтеза структурных вариантов технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины. При этом разработана методика поиска рациональных структурных вариантов комплексных технологических процессов обработки лопаток компрессора и турбины с ФОП с учетом технологических связей. В работе предложены схемы возможных вариантов технологий для ОУО лопаток с ФОП с учетом технологических связей между процессами для лопаток компрессора и лопаток турбины из условия равенства или кратности их ресурсов.

Представленная методика поиска рациональных вариантов комплексных технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС позволяет отыскивать их рациональные варианты, а именно близкие к оптимальным вариантам.

Список литературы: 1. Пичко, А. П. Эксплуатационные особенности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности и общий подход в повышении их свойств / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. - Вып. 3 (62). - С. 47 - 54. 2. Пичко, А. П. Особенности обеспечение свойств лопаток компрессора и турбины газотурбинной установки на базе функционально-ориентированных покрытий и равенства их ресурсов / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 1 (64). - С. 68 - 77. 3. Михайлов, А. Н. Структурная надежность и методы повышения ресурса газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств. / А. Н. Михайлов [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении. – Брянск: ФГБО ВО «БГТУ». - 2018. - №3 (81). - С. 32-41. 4. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированного подхода. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. А. Михайлов. - Донецк, 2016. - 22 с. 5. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. 6. Пичко, А.П. Технологические особенности синтеза структуры процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными покрытиями / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 4 (67). - С. 71 - 87. 7. Автоматические линии в машиностроении. Справочник. В 3-х т. / Ред. совет: А. И. Дащенко (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1984. – Т.1. Этапы проектирования и расчет // Под ред. Л. И. Волчкевича, 1984. – 312 с. 8. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. - М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ “КЛИЕНТ-СЕРВЕР” МЕЖДУ ПЭВМ И МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМОЙ

Нестуев Д. С., Конотопченко А.А., Дюбрюкс С.А. *(ЮЗГУ, г. Курск, Россия)*
Тел: +7 (951) 0781430; E-mail: serhio5551@yandex.ru

Abstract: *This article is devoted to the development of methods of informational interaction between standard electronic computers and equipment of the “system on module” class, based on the NXP iMX6 ULL processor, for the direction test procedures by service modules.*
Key words: *testing programms, service programms, client, server, connect, reaction, socket.*

В процессе жизненного цикла изделия выделяются 3 типа программного обеспечения функциональное, тестовое и сервисное.

Функциональное программное обеспечение (ФПО) запускается в режиме эксплуатации готового изделия, и именно его работу “ощущает” пользователь. Как правило, ФПО идентифицирует только факт исправности изделия. В случае возникновения неисправности пользователь видит только следствие поломки, её конечный результат. ФПО не даст ему рекомендации, какой элемент нужно заменить, и какую цепь на плате пропаять.

Тестовое программное обеспечение (ТПО) предназначено для локализации неисправностей. Оно может либо храниться отдельными файлами во внутренних каталогах операционной системы изделия, либо прошиваться в изделие по мере необходимости. Тестовое программное обеспечение может запускаться на исполнение или/и прошиваться сервисным программным обеспечением (СПО). СПО устанавливается на контрольно-проверочную аппаратуру (чаще всего компьютер или ноутбук), обладающую набором средств для обслуживания и тестирования целевого оборудования. В ряде случаев СПО может выводить на терминал результаты выполнения ФПО.

Для организации взаимодействия сервисного СПО контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) с ТПО и ФПО аппаратной части необходим собственный интерфейс. В качестве данного интерфейса разработчики чаще всего используют один из следующих интерфейсов: COM-Port, Ethernet или USB. Для рассматриваемого процессорного модуля с использованием процессора Freescale IMX6 ULL тестовый протокол поддерживается по Ethernet (Рисунок 1), питание осуществляется через КПА в виде промышленного ноутбука (ПЭВМ) [1].

В понятии интерфейса различают логический и физический уровни обмена. Физическая часть определяет такие параметры, как уровни сигналов, частоты передачи, длительность пауз, способы физического кодирования/декодирования информации. Логическая часть оперирует такими понятиями, как длина кадра, число адресных, информационных бит, способами контроля целостности передаваемой информации, иными словами, обеспечивает принятый на уровне протокола формат кадра. Но для того, чтобы организовать взаимодействие между КПА и разрабатываемой аппаратурой, недостаточно просто реализовать программно связывающий их интерфейс. Необходима реализация дополнительного наложенного протокола второго уровня (протокол информационного взаимодействия - ПИВ) через информационную часть кадров, которыми оперирует интерфейс. Данная задача решается при использовании методов и алгоритмов клиент-серверного ПО, где сервером является тестируемая аппаратура, а клиентом – ПЭВМ.

Рассмотрим пример взаимодействия ПО клиента и сервера. Предполагается, что на клиентском модуле установлена ОС Windows, на серверном – ОС Linux.

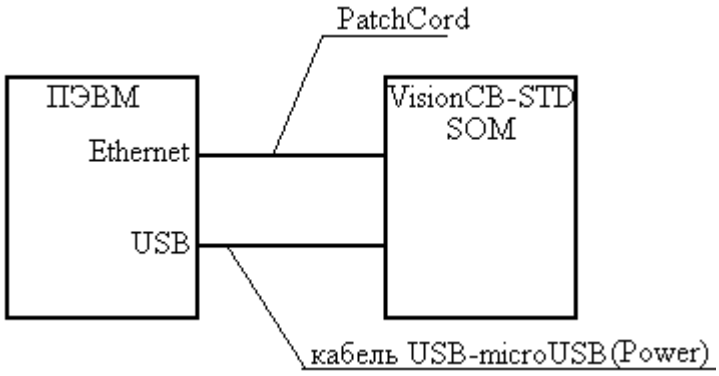


Рис. 1. подключение аппаратной платформы с модулем VisionSOM-6ULL к ПЭВМ

Алгоритм работы клиента приведён на рисунке 1. Приложение «клиент» начинает свою работу после его запуска в системе Windows выводом следующего меню (Рисунок 2):

По нажатию соответствующих цифр выполняется ряд операций с аппаратными средствами платформы, подключёнными к процессору iMX6 ULL. Это обеспечивается передачей на сервер кодов команд, выбранных в клиентском меню Первые четыре команды «1. Diod On», «2. Diod Off», «3. Diod Blink» и «3. OFF Diod Blink» управляют светодиодом, который показан на рисунке 3. При вводе пользователем номера команды «клиент» выводит в консоль название выбранной команды. Далее при удачной отправке номера команды на «сервер» в консоль выводится сообщение «Sent!», говорящее о том, что сообщение доставлено. При ошибке отправки в консоль выводится сообщение об ошибке открытия порта “Socket Error”.

```
44          printf("1. Diod On;\n");
45          printf("2. Diod Off;\n");
46          printf("3. Diod Blink;\n");
47          printf("4. OFF \"Diod Blink\";\n");
48          printf("5. Button Test;\n");
49          printf("9. Quit;\n");
```

Рис. 2. фрагмент программы вывода меню клиента

Отправка на сервер происходит с помощью функции «send(), которая служит для записи данных в сокет (Рисунок 4)».

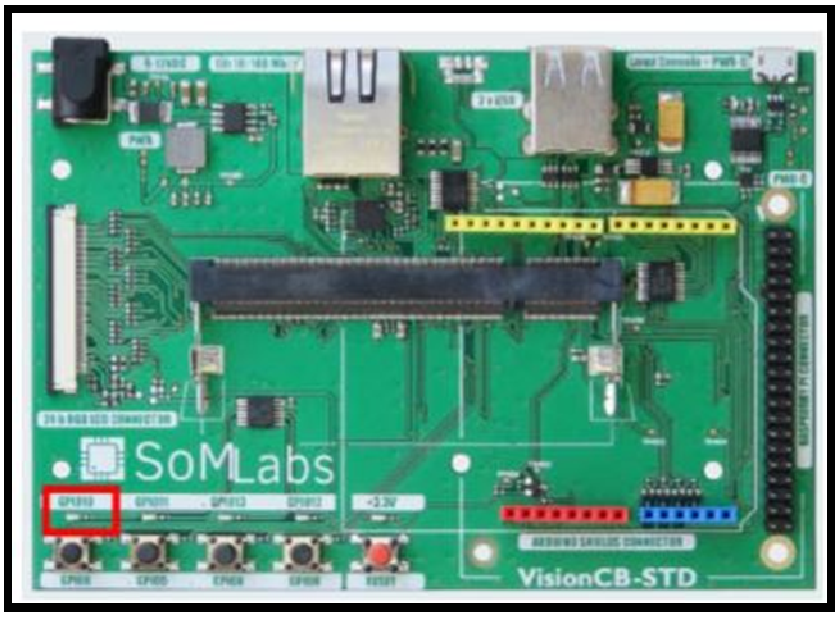


Рис. 3. Управляемый диод на аппаратной платформе

Первый аргумент - сокет-дескриптор, в который записываются данные. Второй и третий аргументы - соответственно, адрес и длина буфера с записываемыми данными. Четвертый параметр - это комбинация битовых флагов, управляющих режимами записи. Если аргумент flags равен нулю, то запись в сокет (и, соответственно, считывание) происходит в порядке поступления байтов. Если значение flags есть MSG_OOB, то записываемые данные передаются потребителю вне очереди. третий аргументы -

соответственно, адрес и длина буфера с записываемыми данными. Четвертый параметр - это комбинация битовых флагов, управляющих режимами записи. Если аргумент flags равен нулю, то запись в сокет (и, соответственно, считывание) происходит в порядке поступления байтов. Если значение flags есть MSG_OOB, то записываемые данные передаются потребителю вне очереди.

```
int send(int s, char * buf, int len, int flags);
```

Рис. 4. Прототип функции «send()»

Функция send возвращает число записанных в сокет байтов (в нормальном случае должно быть равно значению параметра len) или -1 в случае ошибки. Отметим, что запись в сокет не означает, что данные приняты на другом конце соединения процессом-потребителем. Для этого процесс-потребитель должен выполнить функцию «recv()». Таким образом, функции чтения и записи в сокет выполняются асинхронно.

Для проверки работы «сервера» «клиент» проверяет входящие сообщения функцией «recv()». Если сообщение с «сервера» поступило, то «клиент» выводит в консоль это сообщение, в противном случае выводит сообщение об ошибке открытия порта.

Для проверки нажатия кнопок на микропроцессорном модуле существует процедура тестирования на «сервере», для вызова которой необходимо с «клиента» отправить команду «5». Для постоянного тестирования кнопок микропроцессорного модуля создается цикл, который прекращает свою работу если переменная «ch» будет равна коду клавиши «y» (121) на ПЭВМ. Нажатие клавиши проверяется функцией «_getch()».

Функция «_getch()» нужна для чтения одного символа с клавиатуры, этот символ на экран не выводится. Чаще всего данная функция используется чтобы не дать консоли преждевременно закрыться.

Для выхода из программы «клиент» и, соответственно, для завершения программы «сервер», пользователь вводит число 9 в консоль.

Для реализации программного управления системным ядром в модульном исполнении на основе процессора NXP i.MX 6ULL было разработано приложение «сервер». Оно начинает свою работу после его запуска в системе Linux (рисунок 5), и предназначено для обработки разовых команд корпус/обрыв, инициированных клиентом, а также соответствующей реакции на них своими разовыми командами или их серией, отображаемыми на светодиодах аппаратной платформы.

```
root@localhost:~/MyProject/DiplomProject/server# ./play
server: waiting for connections...
```

Функция «listen()» используется сервером, чтобы информировать ОС, что он ожидает ("слушает") запросы связи на данном сокете. Без такой функции всякое требование связи с этим сокетом будет отвергнуто. Синтаксис функции представлен на рисунке 5.

```
int listen(int s, int backlog);
```

Рис. 5. Синтаксис функции «listen()»

Первый аргумент - сокет для прослушивания, второй аргумент (backlog) - целое положительное число, определяющее, как много запросов связи может быть принято на сокет одновременно. В большинстве систем это значение должно быть не больше пяти. Заметим, что это число не имеет отношения к числу соединений, которое может поддерживаться сервером. Аргумент backlog имеет отношение только к числу запросов

на соединение, которые приходят одновременно. Число установленных соединений может превышать это число.

После проверки состояния сокета, выводится сообщение об ожидании клиента. Далее, в бесконечном цикле «while(1)» создается новый экземпляр сокета, «сервер» получает IP адрес «клиента» и выводит информацию о подключении с конкретным ПЭВМ.

Первый запрос на соединение из очереди ожидающих соединений извлекается при помощи функции accept(). Эта функция извлекает, создаёт новый подключенный сокет с аналогичными параметрами, что и у «s», и выделяет для сокета новый файловый дескриптор. При этом новый сокет более не находится в состоянии прослушивания, а старый – не изменен. При помощи функции «read()» в переменную «bufin» производится запись той информации, которая приходит с «клиента», с одновременным выводом на терминал сервера номера команды от клиента. Далее с помощью конструкции «switch-case» организуется выборка номера команды из переменной «bufin». Если на сервер поступают разовые команды «1» или «2» на включение/выключение светодиода, то на выполнение запускаются ранее подготовленные файлы с соответствующими процессами. При поступлении команды «3» создаётся параллельный поток Если функция завершилась успешно «сервер» передает на «клиент» информацию о включении функции мигания диода, в противном случае выдается сообщение об ошибке создания потока. Для завершения мигания светодиода на сервер должен поступить команда «4», вызывающая завершение потока. В случае если на «сервер» приходит сообщение с командой «5», тогда с помощью конструкции «switch-case» мы переходим в case '5'. В этом случае выполняется функция «pressButton», которая возвращает значение нажатой клавиши микропроцессорной системы. В противном случае «сервер» передает «клиенту» сообщение о несуществующей команде.

При помощи клиент-серверных конструкций, подобных описанным, можно производить удалённое управление изделием (в том числе беспроводное), запуская заранее скомпилированные процессы. в том числе тестовые. Это один из механизмов связи сервисного программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры и внутренних тестовых процедур выпускаемого изделия с интегрированной операционной системой.

Также возможен старт необходимых процессов серверной части и по включению питания. Для этого, как один из вариантов, в системной папке …/etc/systemd/system помещаются службы, запускающие требуемые процессы [2]. Чтобы служба запускалась при автозагрузке, необходимо выполнить команду "systemctl enable *идентификатор службы*". Для выгрузки используется команда "systemctl disable *идентификатор службы*". Таким образом, дополняя основные службы ОС Linux, разработчик программно-аппаратной платформы может сам формировать её автозагрузку необходимыми ему программами различного назначения.

Данная работа посвящена разработке способов информационного взаимодействия между стандартными электронно-вычислительными машинами и аппаратурой класса "система на модуле" на процессоре NXP iMX6 ULL, предназначенного для связи сервисных и тестовых процедур.

Список литературы: 1. Неструев Д.С Дюбрюкс С.А. Программное обеспечение для сопровождения жизненного цикла изделий, реализованных на аппаратных платформах на основе процессоров Freescale iMX6. Материалы IV научно-практической международной конференции (школы-семинара) молодых ученых "Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. Часть2", Тольятти, 2018. **2**. Sreekrishnan Venkateswaran. Essential linux device drivers. Prentice Hall, 2008.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Павлыш В.Н., Зайцева М.Н. *(ДонНТУ, ДонПИ, г. Донецк, ДНР)*
Тел. *+38 (062) 301 03 91; E-mail: pavlyshvn@mail.ru*

Abstract: *The problem of new information technologies application for study process development and modification in technical university considered. The using of computer teaching and expert systems is most effective.*
Key words: *education, information, process, system, method.*

Одним из важнейших требований к современному специалисту является умение оперативно пользоваться научной информацией в своей профессиональной деятельности. Особенно важна эта проблема при решении задач развития и совершенствования организации учебного процесса в университете.

В этой связи тема статьи является актуальной и важной при обучении студентов университетов.

Перед образовательной сферой всегда стояла проблема подготовки выпускников с уровнем квалификации, адекватным спросу на специалистов определенной профессии. В сложившейся к настоящему времени ситуации, когда происходят постоянные изменения в профессиональной структуре общества, эта проблема стоит еще более остро. Общество в лице работодателя является заказчиком на «продукцию» образовательной сферы, которая, в свою очередь, должна удовлетворять эту потребность и при этом ориентироваться на долгосрочный прогноз, реализуя своеобразный маркетинг рынка труда.

Особенно высокие требования предъявляются к качеству высшего образования, поскольку именно ему принадлежит особое место в структуре профессионального образования. Высшая школа является механизмом воспроизводства всей системы образования и науки и поэтому тенденция формирования нового качества высшего образования должна опережать процессы изменений во всех остальных системах непрерывного образования.

Обучение с использованием компьютерных технологий постепенно становится новым образовательным стандартом, который внедряется во все структуры, проводящие подготовку и переподготовку специалистов.

На пути информатизации и автоматизации учебного процесса в высшей школе актуальной становится задача внедрения компьютерных программных продуктов, которые помогают улучшить учебную и организационную деятельность вуза [1].

Внедрение автоматизированной системы управления в деятельность образовательного учреждения позволит решить следующие задачи:

- добиться прозрачности всех процессов управления образовательным учреждением;
- повысить эффективность планирования учебной нагрузки преподавателей и контроля ее выполнения, оптимизировать составления расписания занятий;
- повысить уровень контроля успеваемости и посещаемости занятий, а также оплаты обучения с момента поступления до выпуска обучаемого;
- улучшить контроль качества оказания образовательных услуг студенту;
- обеспечить оперативное предоставление достоверных данных организаторам учебного процесса высшего и среднего звена, повысить оперативность, точность и правильность принятия управленческих решений;

- автоматизировать документооборот с подготовкой всей необходимой учебной документации и контролировать исполнительскую дисциплину сотрудников, участвующих в организации учебного процесса;

- реализовывать изучение отдельных учебных дисциплин или всего учебного плана с применением дистанционных технологий.

В начале 80-х г.г. в исследованиях по искусственному интеллекту сформировалось самостоятельное направление, которое получило название экспертные системы (ЭС) [2].

Экспертные системы – компьютерные программы, моделирующие действия эксперта-человека при решении задач в какой-либо предметной области на основе накопленных знаний, составляющих базу знаний (БЗ), которая может изменяться и дополняться в процессе развития системы.

Программные средства (ПС), базирующиеся на технологии ЭС, получили значительное распространение в мире. Важность ЭС состоит в следующем:

- технология экспертных систем существенно расширяет круг практически значимых задач, решаемых с применением компьютеров, что приносит значительный экономический эффект;

- технология ЭС является важнейшим средством в решении глобальных проблем традиционного программирования, таких, как длительность и, следовательно, высокая стоимость разработки сложных приложений;

- высокая стоимость сопровождения сложных систем, которая часто в несколько раз превосходит стоимость их разработки; низкий уровень повторной используемости программ и т.п.;

- объединение технологии ЭС с технологией традиционного программирования добавляет новые качества к программным продуктам за счет обеспечения динамичной модификации приложений пользователем, а не программистом, большей "прозрачности" приложения, лучшей графики, интерфейса и взаимодействия.

Главным достоинством экспертных систем является возможность накопления знаний и сохранение их длительное время. В отличие от человека к любой информации экспертные системы подходят объективно, что улучшает качество проводимой экспертизы. Еще 11 октября 2005 г. премьер-министр Королевства Таиланд Таксин Шинаватра и президент Португалии Жоржи Сампайю в своих выступлениях на проходящей в Париже сессии Генеральной конференции ЮНЕСКО особый упор сделали на важности высокого уровня и качества образования. В своем выступлении Таксин Шинаватра призвал также творчески использовать информационные технологий для развития формальных и неформальных образовательных систем. «В своем развитии Таиланд стремится к экономике, основанной на знаниях, именно знания – главная движущая сила развития личности», – добавил премьер-министр. Он подчеркнул также, что качественное образование представляет собой основополагающий фактор социального развития как отдельных граждан, так и всего общества в целом [3].

Системы, основанные на знаниях, могут входить составной частью в компьютерные системы обучения (КСО). Система получает информацию о деятельности студента и анализирует его поведение. База знаний изменяется в соответствии с поведением объекта. Большинство ЭС включают знания, по содержанию которых их можно отнести одновременно к нескольким типам. Например, обучающая система может также обладать знаниями, позволяющими выполнять диагностику и планирование. Она определяет способности обучаемого по основным направлениям курса, а затем с учетом полученных данных составляет учебный план. Управляющая система может применяться для целей контроля, диагностики, прогнозирования и планирования.

При создании ЭС необходимо учесть основные этапы ее разработки:

- этап идентификации проблем — определяются задачи, которые подлежат решению, выявляются цели разработки, определяются эксперты и типы пользователей;

- этап извлечения знаний — проводится содержательный анализ проблемной области, выявляются используемые понятия и их взаимосвязи, определяются методы решения задач;

- этап структурирования знаний — выбираются ИС и определяются способы представления всех видов знаний, формализуются основные понятия, определяются способы интерпретации знаний, моделируется работа системы, оценивается адекватность целям системы зафиксированных понятий, методов решений, средств представления и манипулирования знаниями;

- этап формализации — осуществляется наполнение экспертом базы знаний (в связи с тем, что основой ЭС являются знания, данный этап является наиболее важным и наиболее трудоемким этапом разработки ЭС; процесс приобретения знаний разделяют на извлечение знаний из эксперта, организацию знаний, обеспечивающую эффективную работу системы, и представление знаний в виде, понятном ЭС; процесс приобретения знаний осуществляется инженером по знаниям на основе анализа деятельности эксперта по решению реальных задач);

- этап реализации ЭС — создается один или нескольких прототипов ЭС, решающие поставленные задачи;

- этап тестирования — производится оценка выбранного способа представления знаний в ЭС в целом.

На основании теоретических исследований можно сделать вывод, что ЭС заслуживают гораздо более детального изучения, так как их применение вскоре станет не просто нужным, а необходимым, поэтому всестороннее рассмотрение ЭС необходимо современному специалисту в той же мере, что и знание теоретических основ своего предмета.

Внедрение в учебный процесс современных информационных технологий открывает возможности реализации разнообразных методик преподавания учебного материала, который не присущ традиционным методикам обучения. Оно ориентировано на реализацию психолого-педагогических целей обучения и воспитания [4].

Современный уровень развития компьютерной техники, телекоммуникационных технологий и программного обеспечения предоставляет широкие возможности по модернизации, автоматизации и повышению эффективности учебного процесса. В вузах возникает вопрос о внедрении компьютерных программных продуктов, например компьютерных систем обучения (КСО), которые помогут организовать, активизировать и контролировать самообразовательную деятельность студентов.

Широкие возможности по использованию КСО открылись благодаря развитию сети Интернет. С появлением телекоммуникационных технологий уже нет необходимости пересылать задания и результаты их выполнения по почте или собирать студентов для проведения семинара в одном месте в определенное время. Электронная почта заменяет обычную почту, а обсуждение некоторых вопросов, проблем стало возможным проводить в режиме аудио- и телеконференций. При такой организации предусматривается применение новых средств телекоммуникационных технологий, в том числе и мультимедийных, всех информационных ресурсов Интернет. В результате все шире стала практиковаться такая форма получения образования, при которой учащиеся и преподаватель отдалены друг от друга в пространстве и при работе над учебным материалом используют сервисы Интернет, иными словами, дистанционное (дистантное) обучение. Современный уровень развития компьютерной техники и программного обеспечения позволяют организовывать процесс дистанционного образования на основании компьютерных средств обучения (КСО).

Компьютерные обучающие системы представляют собой программно-технические комплексы, включающие методическую, учебную и организационную поддержку процесса обучения, производимого на базе информационных технологий и ориентированного на взаимодействие с обучаемым. Это могут быть компьютерные учебни-

ки, компьютерные обучающие системы, компьютерные системы контроля знаний, компьютерные задачники, тренажеры, компьютерные лабораторные практикумы и т.п.

В связи со специфичностью обучения на расстоянии возникает вопрос об организации проведения видов работ: лекций, лабораторных работ, зачетов и экзаменов. Достаточно важным вопросом в этом аспекте выступает разработка таких программных продуктов, которые организуют и направят сотрудничество обучаемых. Коллективное, общее решение проблем увеличит заинтересованность в обучении, распределение идей улучшит рассуждение, выведет его на более высокий уровень, поможет углубить понимание материала, который студент изучает.

При разработке компьютерных систем обучения, которые будут использоваться дистанционно, необходимо обратить внимание на разработку лекционного материала, лабораторных и индивидуальных заданий, средств для контроля и самоконтроля знаний и умений, соответствующих критериев шкалы оценивания.

При разработке лекций в компьютерных системах обучения основной акцент ставится на наглядность, которая реализуется с помощью компьютера. Но при этом лекция не должна быть слайд-фильмом. При создании лекционного материала необходимо:

- учитывать научные требования, которые предъявляются к лекциям в вузах;
- мотивировать обучаемых на контакт с новой областью знаний;
- оптимальным образом визуализировать учебный материал (фрагменты видеосъемок);
- обеспечивать вариативность в подаче учебного материала и представлять его с помощью систем навигации;
- рационально сочетать различные технологии предъявления учебного материала (иллюстративный материал, гипертекст, гипермедиа, звукозапись, мультимедиа);
- структуру лекций формировать в виде опорного конспекта;
- учитывать возможность пополнения базы систем новыми фактами.

Задания для лабораторных и индивидуальных работ в компьютерных системах обучения должны быть многовариантны, с различной степенью сложности, чтобы студент сам мог регулировать свой уровень достижения знаний. Задания должны носить творческий характер, интегрировать теоретико-методологические знания с практическими навыками студентов в условиях приближения к реальной профессиональной деятельности. В настоящее время при дистанционном обучении становятся возможными «виртуальные» лабораторные работы, которые помогают подготовить студентов к выполнению реальной программы.

При создании средств контроля знаний и умений необходимо определиться, какие знания и умения проверяются. В зависимости от этого выбирается вид контроля. При составлении контролирующих средств предусматриваются ограничения на время обдумывания ответа и общее время контроля, задания должны включать разноуровневые и разнообразные виды работ, содержать проблему, носить творческий, научно-исследовательский характер. В КСО существует возможность выбора заданий для иллюстраций, для закрепления материала, для диагностики, для организации контроля любого вида.

Таким образом, внедрение экспертных систем и компьютерных систем обучения являются основными путями инновационного развития высшего образования.

Список литературы: 1. К. Таунсенд, Д. Фохт. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ.- М.: Финансы и статистика, 1990. **2.** В. Н. Убейко. Экспертные системы.- М.: МАИ, 1992. **3.** Д. Уотермен. Руководство по экспертным системам.- М.: Мир, 1980. 4. Д. Элти, М. Кумбс. Экспертные системы: концепции и примеры.- М.: Финансы и статистика, 1987.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕГАЗАЦИИ ПРИ ЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Павлыш В.Н., Перетолчина Г.Б. *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
Тел. +38 (062) 301 03 91; E-mail: pavlyshvn@mail.ru

Abstract: *The determined mathematical model of coal-face degassing process, based on nonlinear particular derivative equation, is considered. The end-differences method of according boundary task computer solution is applied.*
Key words: *mathematical model, process, method, digital solution, parameter.*

В настоящее время известно большое количество способов и технологических схем воздействия на угольные пласты, предназначенных для повышения безопасности подземных горных работ. В частности, важной проблемой является дегазация призабойной зоны угольных пластов для борьбы со взрывами газовоздушных смесей и подземными пожарами в лавах и выработанном пространстве [1].

Эффективность воздействия по уменьшению числа опасных явлений в шахтах и снижению их интенсивности не всегда высока. Одной из причин этого является то, что на этапе проектирования предварительная оценка параметров технологических схем весьма затруднена ввиду сложности процесса. Применение математического моделирования позволяет улучшить качество принимаемых технических решений [2]. В этой связи тема статьи является актуальной.

Схема дегазации призабойной зоны пласта скважинами, предложенная МакНИИ, показана на рис. 1. Дегазационные скважины пробурены перпендикулярно забою в разгруженной зоне размером $l_{р.з}$ на расстоянии L. С помощью вакуум-насоса в скважинах поддерживается постоянное разрежение P_C.

В основу математической модели процесса положено уравнение Р. М. Кричевского [3]

$$\left[m+\frac{abRT}{(1+bP)^2}\right]\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(x,y)P\frac{\partial P}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(x,y)P\frac{\partial P}{\partial y}\right), \qquad (1)$$

где P – давление газа; $\lambda=k/\mu$; k – проницаемость пласта; μ – вязкость газа; m – пористость пласта; a,b – константы сорбции Лэнгмюра; T – абсолютная температура пласта; R – газовая постоянная; t – время; x,y – пространственные координаты.

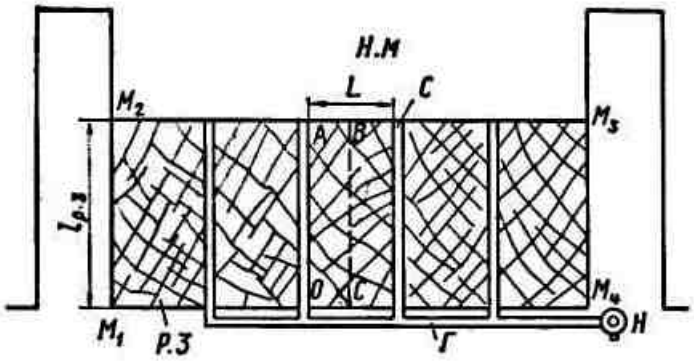


Рис. 1. Схема дегазации призабойной зоны:
Н.М. – нетронутый массив; ***С*** – скважина; ***Р.З.*** – разгруженная зона; ***Г*** – газопровод; ***Н*** – насос.

Для формирования краевых условий полагаем, что давление в скважинах равно P_C, давление на выработках (стороны M_1M_2, M_1M_4, M_3M_4, рис. 1) равно атмосферному $P_б$, на глубине $l_{р.з}$ за счет максимума опорного давления считаем, проницаемость практически равной нулю (сторона M_2M_3, рис. 1).

В начальный момент времени давление газа в пласте

принимается равным природному $P_{пр}$. Предполагается, что газопроницаемость λ изменяется по линейному закону в направлении, перпендикулярном забою:

$$\lambda = \lambda_0(-y / l_{р.з}), \tag{2}$$

где λ_0 - газопроницаемость у забоя лавы.

Учитывая симметрию граничных условий и считая, что дегазационные скважины пробурены на достаточном удалении от штреков, при решении задачи достаточно рассмотреть половину участка пласта, расположенного между двумя дегазационными скважинами (прямоугольник OABC, рис. 1). Поместив начало координат в устье скважины и направив ось x вдоль лавы, ось y — по длине скважины, задаем граничные условия:

$$P\Big|_{t=0} = P_{пр}; P\Big|_{OC} = P_{б}; \frac{\partial P}{\partial y}\Big|_{AB} = 0; \frac{\partial P}{\partial x}\Big|_{BC} = 0; P\Big|_{OA} = P_C\ . \tag{3}$$

Решая задачу (1)—(3), можно рассчитать поле давлений *P(x, y, t)* и определить основные характеристики процесса, такие как газовыделение в скважину и в лаву, метаноносность угля в разгруженной зоне.

Аналитическое решение поставленной краевой задачи невозможно, поэтому необходимо использовать приближенные численные методы.

Перейдем к безразмерным величинам:

$\overline{P} = P / P_x, \overline{\lambda} = \lambda / \lambda_x, \bar{x}x / L_x, \bar{y} = y / L_x;$

$$\tau = t / T_x, \alpha = aRT / P_x, \beta = bP_x, T_x = L_x^2 / \lambda_x P_x, \tag{4}$$

где P_x - характерное давление газа;

λ_x - характерная газопроницаемость пласта;

L_x - характерный размер пласта;

T_x - характерное время.

В новых безразмерных переменных задача (1)—(3) примет вид:

$$\left[m + \frac{\alpha\beta}{(1+\beta\overline{P})^2}\right]\frac{\partial\overline{P}}{\partial\tau} = \frac{\partial}{\partial\bar{x}}\left(\overline{\lambda P}\frac{\partial\overline{P}}{\partial\bar{x}}\right) + \frac{\partial}{\partial\bar{y}}\left(\overline{\lambda P}\frac{\partial\overline{P}}{\partial\bar{y}}\right); \tag{5}$$

$$\overline{P}\Big|_{t=0} = \overline{P}_{пр}; \overline{P}\Big|_{OC} = \overline{P}_{б}; \frac{\partial\overline{P}}{\partial\bar{y}}\Big|_{AB} = 0; \frac{\partial\overline{P}}{\partial\bar{x}}\Big|_{BC} = 0; \overline{P}\Big|_{OA} = \overline{P}_C\ , \tag{6}$$

где $\overline{P}_{пр} = P_{пр} / P_x, \overline{P}_{б} = P_{б} / P_x, \overline{P}_C = P_C / P_x$.

Метаноносность угля

$$M = m\frac{P}{RT} + \frac{abP}{+bP}. \tag{7}$$

Переходим к безразмерной величине

$$\overline{M} = \frac{M}{M_x} = \frac{m\overline{P} + \dfrac{\alpha\beta\overline{P}}{1+\beta\overline{P}}}{m\overline{P}_{пр} + \dfrac{\alpha\beta\overline{P}_{пр}}{+\beta\overline{P}_{пр}}}, \tag{8}$$

где в качестве характерной принята метаноносность угля при природном давлении газа $P_{пр}$ до вскрытия угольного пласта.

Для решения уравнения (5) с граничными условиями (6) применяется метод сеток с использованием экономичных разностных схем [4].

Проведены исследования по изучению влияния различных параметров, входящих в (5) и (6), на метаноносность угля в разгруженной зоне и газовыделение из пласта в лаву и скважины.

На рис. 2 приведены графики изменения газовыделения в лаву, на рис. 3 - средней метаноносности угля в разгруженной зоне при дегазации и без ее применения.

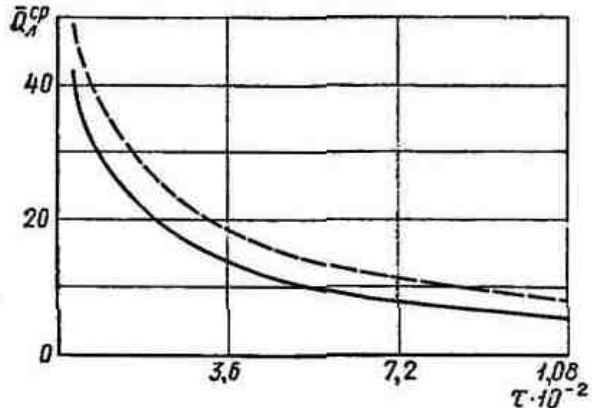


Рис. 2. Средняя интенсивность газовыделения (объемный расход на единицу площади) в лаву с обнаженной поверхности пласта:
$L = 5$ м, $l_{р.з} = 2$ м, $m = 0{,}04$, $\alpha = 2$, $\beta = 0{,}4$, $\bar{P}_{пр} = 30$, $P_x = P_б = 10^5$ н/м², $\lambda_x = \lambda_0$,
$L_x = 1$ м; пунктирная линия – без дегазации, сплошная – с дегазацией, $\bar{P}_C = 0{,}5$

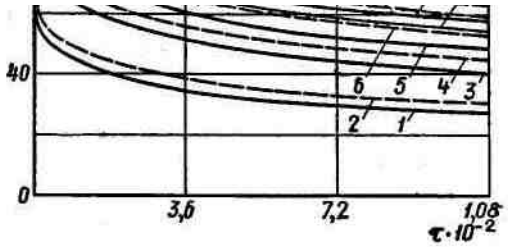


Рис. 3. Средняя метаноносность угля в разгруженной зоне. Кривые соответствуют следующим расстояниям от забоя:
1, *2* – 0,1м; *3*, *4* – 0,5м; *5*, *6* – 1м; *7*, *9* – 1,5м; *8*, *10* – 1,9м

позволяет уменьшить газовыделение с обнаженной поверхности пласта на 30—40%, а также снизить метаноносность угля в разгруженной зоне.

Математическое моделирование позволяет исследовать ряд характеристик процесса. В частности, параметры сорбции Лэнгмюра и пористость пласта мало влияют на газовыделение в лаву и заметно влияют на метаноносность. Константы сорбции, пористость и разрежение мало влияют на дебит метана в скважины.

Газовыделение в лаву увеличивается с ростом пластового давления, длины разгруженной зоны и проницаемости угля и уменьшается с уменьшением расстояния между скважинами. Процесс дегазации ускоряется с увеличением проницаемости угля.

Таким образом, методом математического моделирования можно определять основные характеристики процесса дегазации призабойной зоны скважинами. Полученные результаты показывают, что этот способ борьбы с газовыделением является достаточно эффективным.

В работе [5] предложена инженерная методика расчетов на основании однократного нормированного решения уравнения. Приняв такой подход к конкретной схеме дегазации, получим следующие зависимости для расчета ее параметров.

Радиус влияния скважины

$$R = \sqrt{\frac{k(P_C + P_\Gamma)T}{5790\mu m}}\ ,\ \text{м}, \tag{9}$$

где P_C - разрежение в скважине, ат;

T - время дегазации, ч ; определяется делением длины скважины l_c на скорость подвигания очистного забоя V.

Для того, чтобы дегазация была эффективной, расстояние между скважинами Δl должно выбираться из условия $\Delta l<2R$.

Дебит газа в скважину рассчитывается по формуле

$$G_C = \frac{12\cdot 10^{-9}\pi^2 k(P_C + P_\Gamma)}{\mu\Delta l}\left[100\left(l_c - l_\Gamma\right) + 0{,}05d\right],\ \text{м}^3/\text{мин}, \tag{10}$$

где d - диаметр скважины, мм;

l_Γ - глубина герметизации, м;

l_c - длина скважины, м.

Суммарное количество газа, выделившееся в скважину за время Т

$$G = 60TG_C\ ,\ \text{м}^3. \tag{11}$$

На основании этой методики выполнен расчет для следующих условий: П =0,02; γ =1,4 т/м³; a =20 м³/т; b =0.5 1/ат; $P_г$ =10 ат; k =20 мд; μ =0,01 спз; Т =60 ч.; V=2 м/сутки; l_c =5 м; P_c=0.05 ат; $l_г$=0,2 м; d=100 мм.

Радиус влияния скважины согласно (9) равен 22,5 м. Принимаем расстояние между скважинами l_c=5 м, тогда общее количество газа, выделившееся в скважину, рассчитанное по формуле (11), составит 900 м³. При длине лавы 200 м, общий объем газа, выделившийся из всех скважин, будет равен около 30000 м³.

При мощности пласта 1 м, газоносности 50 м³/т количество газа в дегазируемой части пласта составит 45000 м³, а коэффициент эффективности будет более 60%. Выполненный ориентировочный расчет показывает, что способ дегазации пласта в призабойной зоне может иметь достаточно высокую эффективность и его следует рекомендовать для промышленных испытаний.

Список литературы: 1. ДНАОП 1.1.30-1.XX-04. Безопасное ведение горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям (1-я редакция). – К.: Минтопэнерго Украины, 2004. – 268с. 2. Павлыш В.Н. Развитие теории и совершенствование технологии процессов воздействия на угольные пласты: Монография. - Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. - 347с. 3. Павлыш В.Н., Штерн Ю.М. Основы теории и параметры технологии процессов гидропневматического воздействия на угольные пласты: Монография. – Донецк: «ВИК», 2007. - 400с. 4. Самарский А.А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1977. - 656с. 5. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. - М.: Недра, 1979. - 271с.

ФОРМИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ НА ФОНДОВЫХ РЫНКАХ

Павлыш В.Н., Пшекоп В.Ю. *(ГОУВПО «ДонНТУ», ГУ «ИПИИ», г. Донецк, ДНР)*
Тел. +38 (062) 301 03 91; E-mail: pavlyshvn@mail.ru

Abstract: ***In*** *the article it is justified the origin of «heavy tails» in a density function of probability of growth of stock indices. The mathematical description of the two-parameter function received on the basis of Laplace distribution is provided. The behavior of the moments of a random variable is studied, check of adequacy to the received model on the basis of empirical data is made.*

Key words: *empirical data, share indices, Laplace distribution, random variable, mathematical model.*

Процесс формирования цены финансовых инструментов можно представить в виде функциональной схемы (рис.1). На вход системы поступает два потока событий (под событием здесь понимается некоторый факт, оказывающий влияние на процесс формирования цены. Например, некоторая новость в СМИ, приход на рынок нового игрока, что угодно, повлекшее за собой изменение цены). Событие может быть такое, что привело к увеличению цены (μ^+), либо к уменьшению (μ^-). События имеют разное влияние на цену не только по знаку, но и по абсолютному значению. Очевидно, менее значимые события происходят чаще более значимых.

Рынок (В) некоторым образом (не будем сейчас рассматривать процессы происходящие на рынке, это задача фундаментального анализа) реагирует на поток событий формируя текущую цену финансового инструмента S(t). Одной из основных актуальных задач финансовой математики является анализ статистических характеристик приращения цены, или приращения логарифмов цены. Эту задачу можно свести к анализу функции распределения вероятности *f(x,θ)*, где θ – вектор параметров функции распределения, или иногда удобнее анализировать характеристическую функцию *φ(t, θ)*.

В этой связи тема статьи является актуальной.

Рассмотрим принципы формирования математической модели.

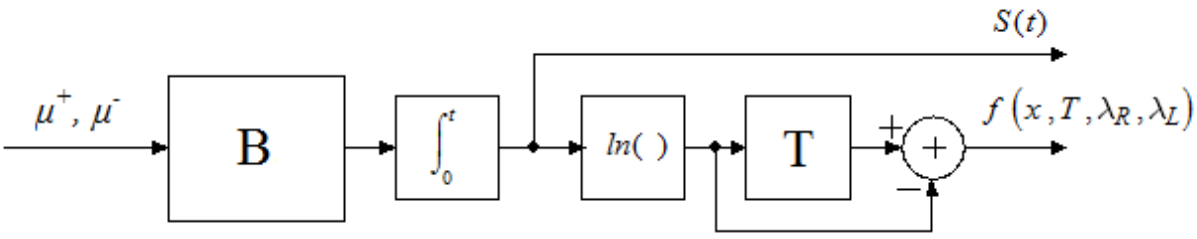


Рис. 1.

В силу того, что события оказывают различное влияние на динамику изменения цены и небольшие приращения цены происходят гораздо чаще больших (по некоторым исследованиям частота событий пропорциональна обратной экспоненте значимости (влиянию) события), автором в качестве базового распределения функции плотности вероятности было выбрано двустороннее экспоненциальное распределение, в общем случае несимметричное, с вектором параметров $\theta = (T, \lambda_R, \lambda_L)$, где: λ_R, λ_L - параметры определяющие толщину соответственно правого и левого «хвоста» распределения; T – таймфрейм (см. ниже).

Блок T (рис.1) – элемент задержки сигнала, имеет тот же физический смысл что и линия задержки на период T в теории автоматического управления для дискретных систем. Экономический смысл T - интервал времени, используемый для группировки котировок при построении элементов ценового графика, или таймфрейм (англ. *time-frame*). Внутри временного периода ($t_n \ldots t_n+T$) из всех котировок оставляют как правило, только цены открытия. закрытия, минимума и максимума за период, которые используются для построения графика, бара, японской свечи и т.п.

Очевидно, таймфрейм влияет на функцию распределения вероятности $f(x,\theta)$ и должен входить в нее в качестве одного из параметров. Исследованию влияния таймфрейма на статистические характеристики функции распределения исследователи, как правило, уделяют недостаточно внимания, максимум, ограничиваясь тезисом, что коэффициенты смещения (μ) и масштаба (σ) пропорциональны $\mu \sim T$, $\sigma \sim \sqrt{T}$, для моделей в которых в качестве базовых принимаются устойчивые, модифицированные устойчивые или нормальное распределения. Однако, эмпирические данные часто показывают, что зависимость $\sigma(T)$ несколько сложнее чем $\sigma \sim \sqrt{T}$.

Как было сказано выше в качестве базового распределения функции плотности вероятности было выбрано двустороннее экспоненциальное распределение. Если рассматривать упрощенную симметричную модель в предельном случае, когда $T = dt \to 0$, характеристическая функция такого распределения будет:

$$\varphi(t, T = dt, \lambda) = \left(\frac{\lambda^2}{\lambda^2 + t^2} \right)^{\frac{T}{\lambda}} \tag{1}$$

В формуле (1) и далее T – величина пропорциональная таймфрейму.

Нетрудно видеть, что при $\frac{T}{\lambda} = 1$, характеристическая функция (1) совпадает с характеристической функцией распределения Лапласа (плотность вероятности (2), характеристическая функция (3)).

$$f_L(x, \lambda) = \frac{\lambda}{2} e^{-\lambda \cdot |x|} \tag{2}$$

$$\varphi_L(t, \lambda) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + t^2} \tag{3}$$

Для характеристической функции вида (1) соответствующую плотность распределения вероятности в элементарных функциях можно получить только для целых значений отношения $\frac{T}{\lambda} = 1, 2 .. N$.

Аналитические выражения для целых $\frac{T}{\lambda}$ были получены в [1].

Рассмотрим асимметричное распределение Лапласа с нулевым средним $AL(\lambda_R, \lambda_L)$. Плотность распределения вероятности (4), характеристическая функция (5).

$$f_{AL}\left(x,\lambda_R,\lambda_L\right) = \left\| \begin{array}{l} \dfrac{\lambda_R\cdot\lambda_L}{\lambda_R+\lambda_L}\cdot e^{-\lambda_R\cdot x} \quad if\ \ 0 \le x \\ \dfrac{\lambda_R\cdot\lambda_L}{\lambda_R+\lambda_L}\cdot e^{\lambda_L\cdot x} \quad if\ \ 0 > x \end{array} \right. \tag{4}$$

$$\varphi_{AL}\left(t,\lambda_R,\lambda_L\right) = \frac{\lambda_R\cdot\lambda_L}{\lambda_R+\lambda_L}\cdot\left(\frac{1}{\lambda_R-\mathrm{i}\cdot t}+\frac{1}{\lambda_L+\mathrm{i}\cdot t}\right) \tag{5}$$

Для большинства практических приложений верно следующее: $\lambda_R \approx \lambda_L$, тогда приближенная формула для вычисления (5), будет:

$$\varphi_{AL}(t,\lambda,\Delta\lambda) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2+t^2}\cdot e^{\mathrm{i}\cdot\phi(t,\lambda,\Delta\lambda)} \tag{6}$$

где:

$$\lambda = \frac{2\cdot\lambda_R\cdot\lambda_L}{\lambda_R+\lambda_L} \qquad \Delta\lambda = \lambda_R-\lambda_L \qquad \phi(t,\lambda,\Delta\lambda) = -atan\left(\frac{\Delta\lambda\cdot t}{\lambda^2+t^2}\right)$$

Как видно, формулы (3) и (6) отличаются только аргументом комплексной функции. По аналогии с (1) для $T = dt \to 0$ можно записать:

$$\varphi(t,T=dt,\lambda) = \left(\frac{\lambda^2}{\lambda^2+t^2}\right)^{\frac{T}{\lambda}}\cdot e^{-\mathrm{i}\cdot\frac{T}{\lambda}\cdot atan\left(\frac{\Delta\lambda\cdot t}{\lambda^2+t^2}\right)} \tag{7}$$

Для более продолжительных таймфреймов, соизмеримых или больших чем параметр λ ($\lambda \le$T), (напомним, λ имеет физический смысл как среднее время между событиями), в функции распределения вероятности необходимо дополнительно учитывать закон распределения количества событий в фиксированном интервале времени T (в таймфрейме). Если события в потоке независимы, то количество событий в фиксированном интервале будет случайной величиной с гамма-распределением. Тогда интегрируя выражение (1) по *dt* с учетом гамма-распределения, будем иметь:

$$\varphi_{MLG}(t,T,\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{x^{\frac{T}{\lambda}-1}}{\Gamma\left(\frac{T}{\lambda}\right)}\cdot e^{-x}\cdot\left(\frac{\lambda^2}{\lambda^2+t^2}\right)^x dx \tag{8}$$

Если случайную величину x в выражении (8) заменить на ее математическое ожидание $x = \frac{T}{\lambda}$ (это можно сделать, например, если $\frac{T}{\lambda}$>>1), тогда выражение (8) снова трансформируется в (1). Физически это можно интерпретировать следующим образом, если в фиксированные интервалы времени T происходит всегда постоянное количество событий $\frac{T}{\lambda} = n$, то для расчета характеристической функции подходит формула (1) или (6), если мы имеем дело с асимметричным потоком событий $\mu^{+} \neq \mu^{-}$. Данной допущение не является грубым с практической точки зрения и вполне применимо в некоторых моделях [1].

Аналогично алгоритму вывода выражения (8) можно получить выражение для асимметричного распределения (6).

$$\varphi_{MALG}(t,T,\lambda,\Delta\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{x^{\frac{T}{\lambda}-1}}{\Gamma\left(\frac{T}{\lambda}\right)} \cdot e^{-x} \cdot \left(\frac{\lambda^2}{\lambda^2+t^2}\right)^x \cdot e^{-i \cdot x \cdot atan\left(\frac{\Delta\lambda \cdot t}{\lambda^2+t^2}\right)} dx$$

$$\varphi_{MALG}(t,T,\lambda,\Delta\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{x^{\frac{T}{\lambda}-1}}{\Gamma\left(\frac{T}{\lambda}\right)} \cdot e^{-x} \cdot \left(\frac{\lambda^2}{\lambda^2+t^2}\right)^x \cdot cos\left(x \cdot atan\left(\frac{\Delta\lambda \cdot t}{\lambda^2+t^2}\right)\right) dx - i \cdot \int_0^{\infty} \frac{x^{\frac{T}{\lambda}-1}}{\Gamma\left(\frac{T}{\lambda}\right)} \cdot e^{-x} \cdot \left(\frac{\lambda^2}{\lambda^2+t^2}\right)^x \cdot sin\left(x \cdot atan\left(\frac{\Delta\lambda \cdot t}{\lambda^2+t^2}\right)\right) dx$$

Таким образом, сформирована стохастическая модель, которая может применяться для оценки роста фондовых показателей.

Список литературы: 1. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка [Электронный ресурс] / Э. Петерс ; пер. с англ. В. И. Гусева ; под редакц. А. Н. Романова. – Москва: «Мир», 2000 г. – 333 с. илл. – Режим доступа : bookre.org"читатель"?файл=469565 **2.** Новиков М. В. Оптимизация процессов на РЦБ по критерию оптимума номинала цены [Текст] / М. В. Новиков // Проблемы искусственного интеллекта. – 2015. – № 0 (1). – С. 74–82. **3.** Lev B. Klebanov. Heavy Tailed Distributions in Finance: Reality or Mith Amateurs Viewpoint [Электронный ресурс] / Lev B. Klebanov, Irina Volchenkova. – 2015. – Режим доступа : arXiv:1507.07735v1 [math.PR] 28 Jul 2015. **4.** Kim Y. S. Financial market models with Lévy processes and time-varying volatility [Электронный ресурс] / Kim Y.S., Rachev, Svetlozar T., Michele L. Bianchi, Fabozzi F.J. // Chair of Econometrics, Statistics and Mathematical Finance School of Economics and Business Engineering University of Karlsruhe Kollegium am Schloss. – 2008. – Режим доступа : http://www.statistik.uni-karlsruhe.de

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С ПОКРЫТИЯМИ

Петряева И.А., Базаров А.В., Романенко Р.К. *(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*
E-mail: irina_petryaeva@mail.ru

Abstract: *Established the basic laws of the cutting process when machining shaped surfaces. A general approach and a method of integrated research has been developed to increase the efficiency of turning machining of shaped surfaces, taking into account the variability of process parameters through the use of carbide tools with wear-resistant coatings with function-oriented properties.*
Key words: *shaped surfaces, variability of the cutting process, function-oriented coatings.*

Процесс обработки фасонной поверхности характеризуется постоянным изменением параметров процесса резания, что обуславливает необходимость детального исследования их взаимного влияния, установления связей и закономерностей их влияния на процессы в зоне резания. Исходя из этого, возникает ряд последовательных задач по обеспечению эффективности обработки при заданном уровне качества поверхности с учетом переменности параметров процесса резания. Во-первых, это управление процессом обработки фасонной поверхности детали (изменением ее геометрических характеристик со снятием припуска). Во-вторых, комплексная оценка возможностей повышения эффективности обработки (одновременное повышение производительности и снижение себестоимости) с учетом переменности условий процесса резания.

Значительным этапом является установление взаимосвязи между характеристиками инструмента (геометрия, инструментальный материал, покрытие) и обрабатываемой детали, а именно нахождение оптимального соответствия применяемого инструмента условиям обработки. В случае непрерывно изменяющихся условиях при точении фасонной детали выбор режущего инструмента, в частности резца, оказывает существенное влияние на ряд показателей при выполнении технологических воздействий.

Комплексный учет и аналитическое определение переменных параметров, положенные в основу работы, позволит наиболее точно смоделировать процессы в зоне резания при обработке фасонной поверхности (рис. 1). Поскольку использование упрощенных аналитических зависимостей в данном случае приведет к снижению достоверности определения действующих ограничений при расчете оптимальных режимов обработки.

Решение данной проблемы возможно только путем разработки соответствующих аналитических методик, позволяющих определять весь комплекс особенностей обработки фасонной поверхности расчетным путем без проведения дополнительных экспериментальных исследований. Создание такой аналитической модели процесса точения криволинейной поверхности является довольно сложной задачей ввиду сложности и переменного характера процессов, протекающих в зоне обработки.

При обработке фасонной поверхности сложный характер изменения кинематических геометрических параметров лезвия инструмента и параметров среза поверхностного слоя существенно усложняет анализ влияния этих параметров на формирование шероховатости поверхности, режимы обработки, силовые и температурные характеристики процесса резания.

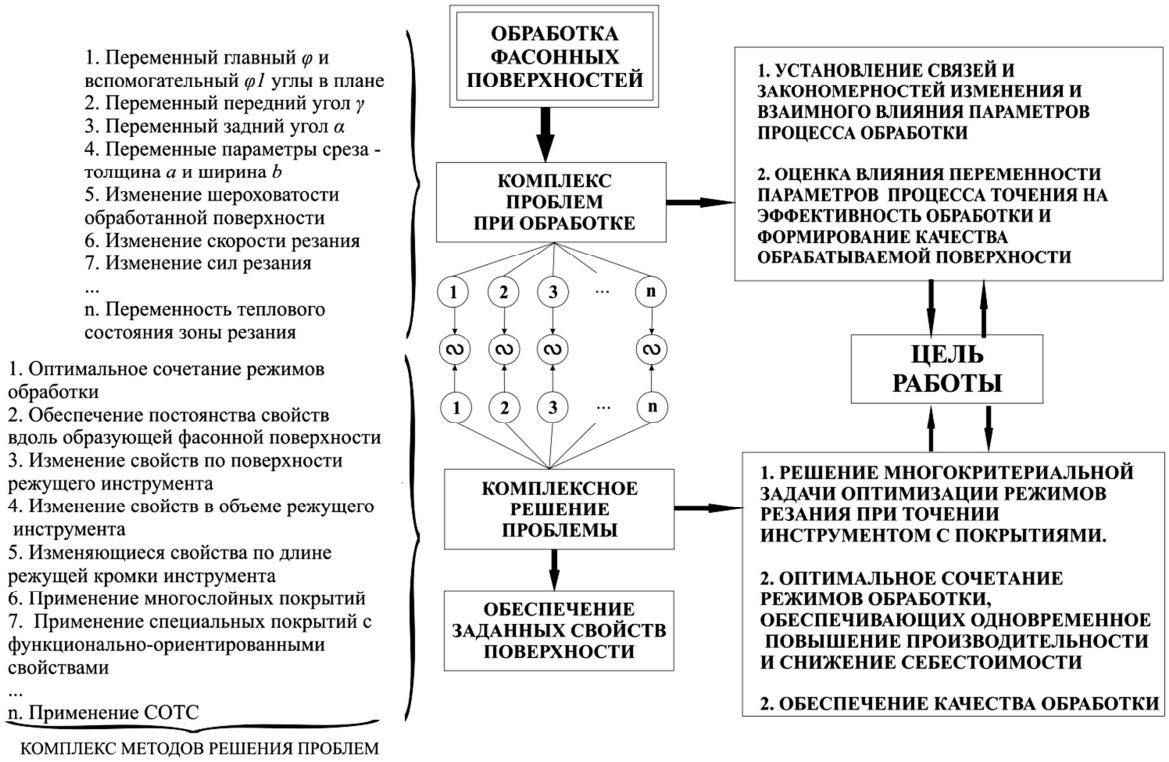


Рис. 1. Общая методика повышения эффективности обработки фасонных поверхностей деталей

Вдоль криволинейной образующей переменными являются: углы в плане (главный φ, вспомогательный φ_1), параметры среза - ширина b и толщина a. В результате нестационарный характер приобретают физические параметры процесса резания: скорость резания, параметры стружкообразования, силы резания [1].

С учетом переменности характера процесса обработки в настоящей работе предусмотрено исследование влияния геометрических параметров инструмента на параметры шероховатости обработанной поверхности и установление количественных связей шероховатости с углами в плане резца с целью обеспечения ее постоянства вдоль криволинейной образующей [4].

Производительность и качество обработанной поверхности с учетом переменности параметров инструмента и параметров сечения среза в значительной степени обусловлены тепловыми явлениями в зоне обработки. Исследование переменности тепловых потоков в зоне резания при обработке фасонных поверхностей, получение зависимости температуры резания от скорости резания, подачи, глубины резания и безразмерной координаты, определяющей положение вершины лезвия на обрабатываемой поверхности вдоль образующей обусловлено необходимостью учета температурных ограничений для определения оптимальных режимов резания при токарной обработке криволинейных поверхностей [2]. Снятие температурных ограничений за счет использования инструментов с покрытиями позволяет интенсифицировать процесс обработки [3].

Дальнейшее обеспечение повышения эффективности обработки фасонной поверхности целесообразно осуществлять в соответствии с принципами функционально-ориентированного подхода. Применение твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями с функционально-ориентированными свойствами позволяет максимально повысить их общие эксплуатационные параметры за счет местного увеличения технических возможностей и свойств отдельных элементов, поверхностей и/или зон изделия в зависимости от функциональных местных особенностей их эксплуатации. При

этом вид и структура покрытия на рабочих поверхностях инструмента определяются, а также топологически, функционально и количественно ориентируются при их реализации в отдельные зоны инструмента в зависимости от заданных функциональных особенностей их эксплуатации. Здесь на начальном этапе предусмотрено деление инструмента на функциональные элементы по следующим уровням [5]: уровень изделия, уровень частей, уровень составляющих, уровень зон.

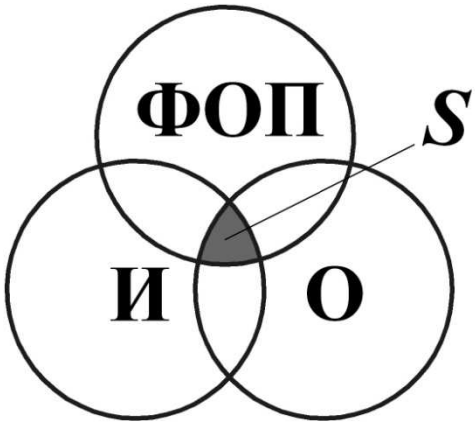


Рис. 2. Схема поиска рациональных решений

После деления инструмента на функциональные элементы выполняется определение характера воздействия на каждый из них в зависимости от особенностей эксплуатации изделия. Далее на основании основных принципов функционально-ориентированного подхода (структурного, функционального, топологического, количественного, адекватного структурно-функционального) определяется вид, тип, качественные характеристики и структура покрытия режущей части инструмента с целью обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах изделия.

Таким образом, в основу настоящей работы положено решение комплексной задачи повышения эффективности обработки, которое можно представить схематически (рис. 2.2).

Здесь окружность И обозначает изменяющиеся условия обработки фасонной поверхности, их исследование и аналитическое описание. Окружность О представляет собой решение задачи оптимизации, а именно определение оптимальных режимов обработки с учетом изменяющихся условий обработки. Окружность ФОП представляет собой решение задачи обеспечения возможностей режущего инструмента за счет применения износостойких покрытий с функционально-ориентированными свойствами.

Область решений рассматриваемой задачи можно представить выражением:

$$S = И \cap О \cap ФОП.$$

Таким образом, представленный подход обеспечивает возможность комплексного решения задачи повышения эффективности обработки фасонных поверхностей деталей с учетом всех особенностей процесса.

Список литературы: 1. Петряева И.А., Михайлов А.Н., Т.Г. Ивченко. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания // Наукоемкие технологии в машиностроении: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – М: Машиностроение. – 2014. – № 9. С. 6-13. **2.** Івченко Т.Г., Петряєва І.О., Король К.О. Визначення теплових потоків та температури різання під час точіння фасонних поверхонь// Машиностроение и техносфера XX1 века. Сб. трудов XX международной конференции в г. Севастополе 17-21 сентября 2013г. В 4-х томах. - Донецк: ДонНТУ, 2013. Т.1. - С. 253-257. **3.** Табаков, В. П. Влияние состава износостойкого покрытия на контактные и тепловые процессы и на изнашивание режущего инструмента // СТИН. 1997. - № 10. - С. 20 - 24. **4.** Петряєва І.О. Дослідження параметрів шорсткості під час обробки фасонної поверхні // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжн. зб. наук. праць / ДонНТУ. Донецьк. 2014. № 2(48). С. 50-56. **5.** Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОЛЕНЧАТОВОГО ВАЛА ПРИ ЕГО МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Поветкин В.В.[1], Аринова Д.Б.[2], Букаева А.З.[3]

(*[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, [2]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, г. Алматы, Казахстан, [3]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 article considers tasks of dynamic shaft strength analysis. The algorithms and capabilities of the Transient Structural subsystem of course the elementary package ANSYS Workbench are used. Modeling of mill movement at the interval of time, which is five periods of shaft rotation at an angular speed of 500 rpm, is carried out. Three options for mill loading have been investigated: minimum, maximum and unbalanced. The limits of shaft endurance in a symmetrical cycle are determined.*

Keywords: *crankshaft, strength, finite element method, stress-strain state.*

Задача анализа динамической прочности вала решалась с использованием алгоритмов и возможностей подсистемы Transient Structural конечно-элементного пакета ANSYS Workbench. Было проведено моделирование движения мельницы на промежутке времени, составляющем пять периодов вращения вала при угловой скорости 500 об/мин (около 0,6 с). Зависимость максимального перемещения мельницы от времени показана на рисунке 1. Она носит периодический характер, за исключением начала первого оборота. Это связано с тем, что угловая скорость вращения задавалась согласно зависимости по формуле $\sigma_{ae} = \frac{K_\sigma}{\varepsilon\beta} * \sigma_{ia} + \psi_\sigma \sigma_{1m}$ для снижения длительности и интенсивности переходного процесса.

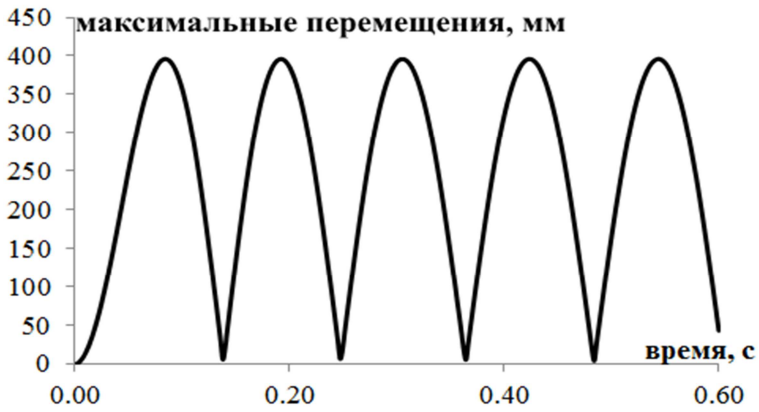


Рис. 1. Зависимость максимальных перемещений систем от времени

Исследовалось три варианта загрузки мельницы: минимальный (каждая помольная камера загружена на 30% крупной рудой), максимальный (каждая помольная камера на 40% загружена мелкой рудой) и с дисбалансом (одна помольная камера заполнена на 30% крупной рудой, другая – на 40% мелкой).

Динамическая прочность конструкции характеризуется значениями эквивалентных по Мизесу напряжений в ней. На рисунке 2 показано распределение напряжений в конструкции мельницы в момент времени $t = 0.47185$ с, когда механические напряжения достигают своего максимума.

Очевидно, что для точного анализа динамической прочности необходимо сосредоточиться на напряжённо-деформированном состоянии вала. Минимальное и максимальное распределение механических напряжений вала для несбалансированного типа загрузки мельницы показано на рисунке 3-4.

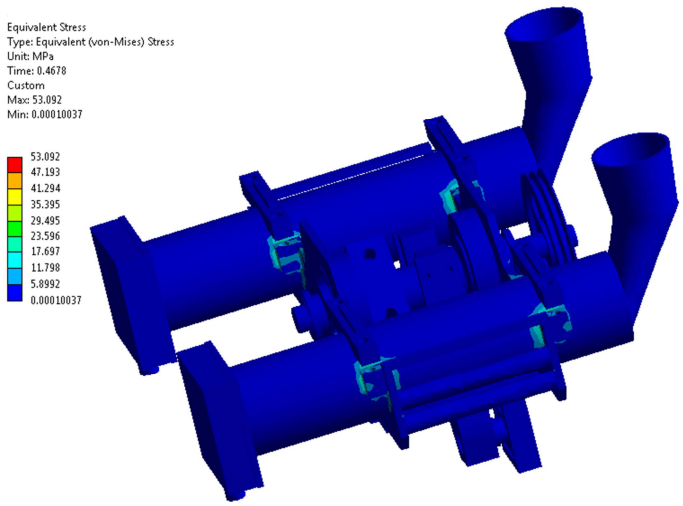


Рис. 2. Механические напряжения конструкции

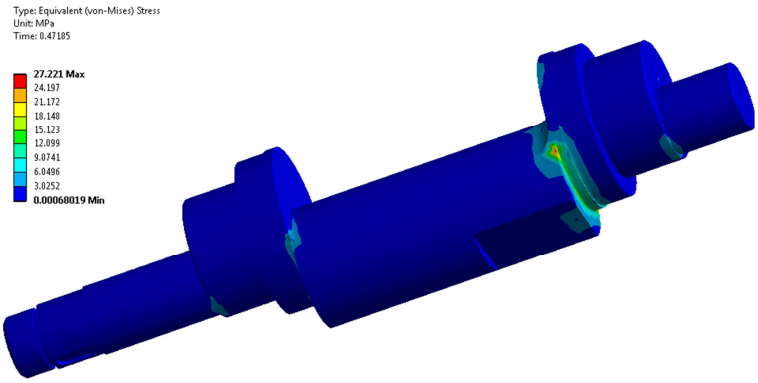


Рис. 3. Распределение напряжений при максимально значении напряжения вала

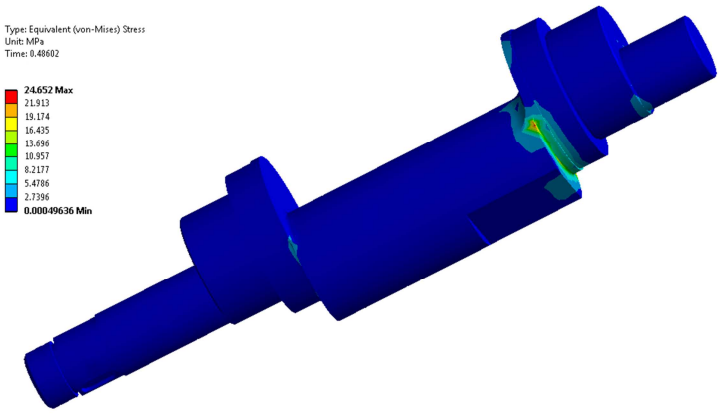


Рис. 4. Распределение напряжений при минимально значении напряжения вала

Из рисунка 3-4 следует, что наиболее напряжённой является область вала, показанная на рисунке 5. Таким образом, анализ динамической прочности вала сводится к анализу напряжённо-деформированного состояния на этой поверхности.

Изменчивость значения максимального эквивалентного напряжения вала в этой области для разных вариантов загрузки мельницы показана на рисунке 6-7. Следует отметить, что в начале движения в системе возникает переходной процесс, связанный с нереалистичным заданием нагружения на шкив вала. Исследование установившегося режима движения мельницы проводится с использованием данных моделирования, отстоящих от начала движения на 3 периода (интервал времени $t \in [0.36; 0.6]$ с).

Предел текучести материала вала (сталь 45) составляет 323 МПа; предел прочности – 540 МПа. Таким образом, максимальные напряжения вала в установившемся режиме работы мельницы при любом виде загрузки не превышают 10% предела текучести материала вала.

Анализ многоцикловой усталости вала.

Графики, изображённые на рисунке 6-8, описывают циклическое изменение напряжений в участке вала. Этот цикл является асимметричным циклом сложной формы.

Анализ усталости объекта при таком цикле нагружения требует следующих шагов:

– разбиение цикла на участки простой формы;

– приведения каждого участка к эквивалентному симметричному отнулевому циклу;

–оценки повреждения вала на каждом участке;

– оценки усталости вала на одном цикле нагружения.

Цикл нагружения вала изображён на рисунке 9.

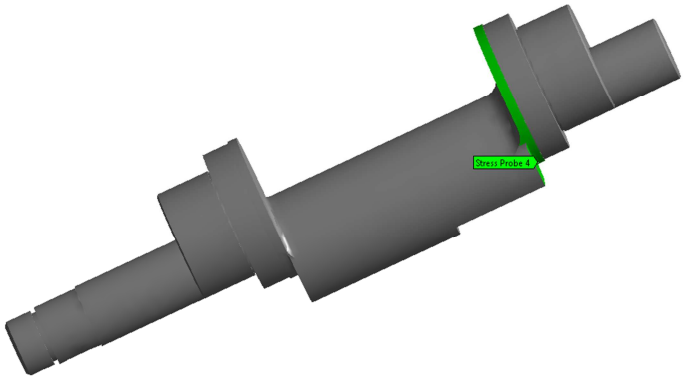


Рис. 5. Область максимального напряжения вала

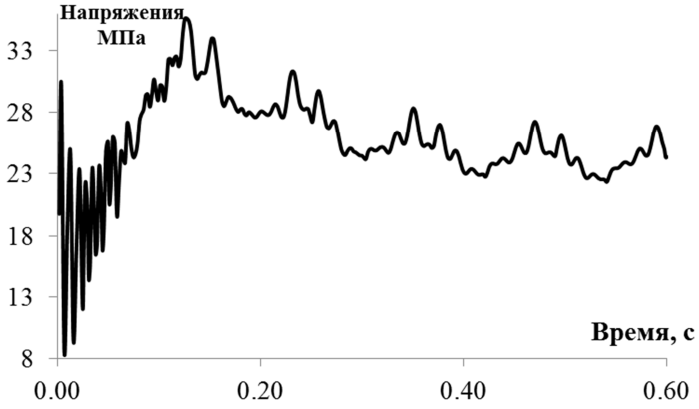


Рис. 6. Изменение напряжения от времени в наиболее нагруженной области: мельница загружена мелкой рудой на 40%

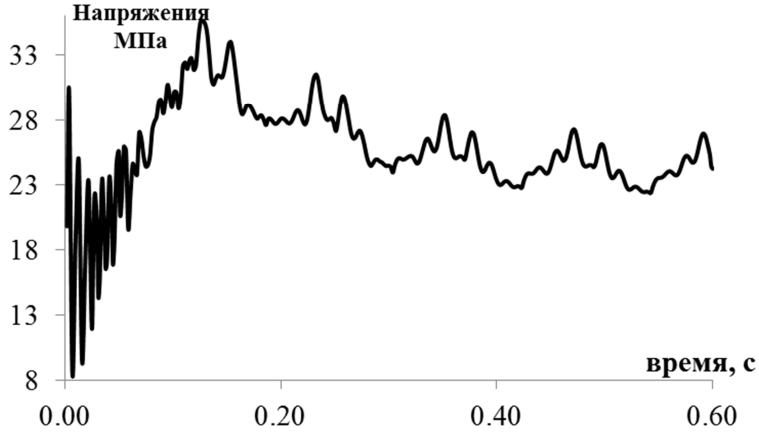


Рис. 7. Изменение напряжения от времени в наиболее нагруженной области: мельница загружена крупной рудой на 30%

Цикл, изображённый на рисунке 9, может быть разбит на 16 асимметричных участков. Соответствующие значения максимальных и минимальных напряжений приведены в таблице 1.

Степень повреждения вала вследствие нагружения на каждом из участков вычисляется по правилу суммарных линейных повреждений (Miner's rule):

$$D = \sum_{i=1}^{16} \frac{1}{N_i}, \quad (1)$$

где N_i – число циклов, которое вызовет разрушение при соответствующих напряжениях.

Число циклов указанных на рисунке 9 4.33, которое выдержит вал, составляет $\frac{1}{D}$.

Для определения предела выносливости вала используется метод множителей Марина. Согласно этому методу, предел выносливости вала вычисляется по формуле [1,2]:

$$\sigma_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f \sigma_e', \quad (2)$$

где σ_e – предел выносливости вала;

σ_e' – предел выносливости материала;

k_a – фактор поверхности;

k_b – фактор размера;

k_c – фактор нагрузки;

k_d – фактор температуры;

k_e – фактор надёжности;

k_f – множитель, учитывающий прочие эффекты.

Для определения предела выносливости материала вала σ_e' используется марочник сталей. В нём определён предел выносливости стали 45 при испытании на кручение с симметричным циклом, который составляет 157 МПа.

Множители Марина определяются из экспериментальных исследований, приведенных в литературе [3].

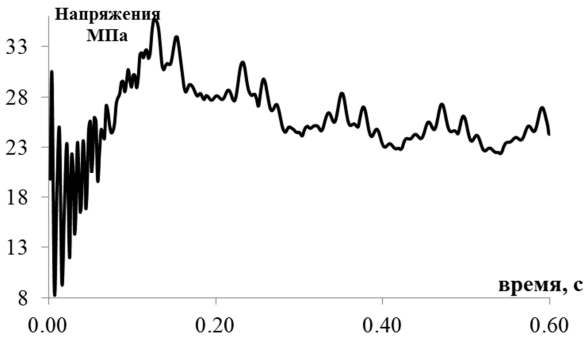


Рис. 8. Изменение напряжения от времени наиболее нагруженной области: мельни загружена рудой с дисбалансом

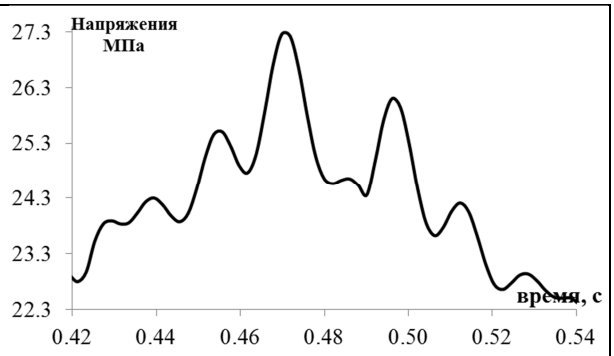


Рис. 9. Цикл нагружения вала

Таблица 1. Участки цикла нагружения вала

Номер участка	σ_{max}	σ_{min}
1	23.888	22.796
2	23.888	23.833
3	24.298	23.833
4	24.298	23.871
5	25.457	23.871
6	25.457	24.766
7	27.258	24.766
8	27.258	24.565
9	24.626	24.652
10	24.652	24.355
11	26.105	24.355
12	26.105	23.621
13	24.209	23.621
14	24.209	22.656
15	22.932	22.656
16	22.932	22.498

Для закалённой стали коэффициент k_a составляет 0,41.

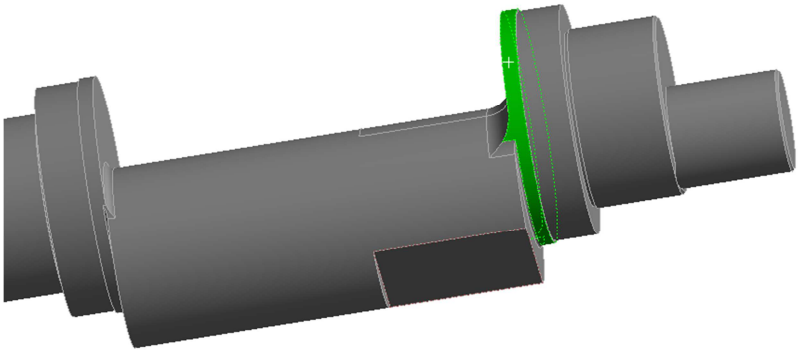


Рис. 10. Цилиндрическая поверхность для оценки коэффициента k_b

Множитель k_b для цилиндров под действием изгибной и крутильной нагрузок вычисляется в зависимости от диаметра цилиндра, причём этот множитель убывает при возрастании диаметра. Поэтому для оценки значения этого множителя используется

диаметр цилиндрической поверхности, показанной на рисунке 10 который составляет 96 мм. Для неё коэффициент k_b равен $0{,}91d[\text{дюйм}]^{-0.157} = 0.74$ [3].

Влияние множителя k_c на предел выносливости уже учтено, так как используется экспериментальное значение предела выносливости σ_e' на кручение. Поэтому значение k_c принимается равным 1.

Фактор температуры в данном исследовании не принимался во внимание, поэтом множитель k_d принимается равным 1.

Коэффициент k_e зависит от степени надёжности, которая ожидается от машины. Надёжность 95% соответствует значению $k_e = 0{,}868$.

Поскольку прочие эффекты (остаточные напряжения, коррозия и т.д.) в рамках данного исследования не рассматриваются значение множителя k_f принимается равным 1.

Таким образом, предел выносливости для вала с учётом особенностей его свойств составляет $\sigma_e = 41{,}35$ МПа.

Для определения числа циклов N_i в формуле (3) используется следующее соотношение [3]:

$$N_i = \left(\frac{\sigma_{rev}}{a}\right)^{\frac{1}{b}}, \tag{3}$$

где $b = -\frac{1}{3}\log\left(\frac{f\sigma_\text{B}}{\sigma_e}\right)$; $a = \frac{(f\sigma_\text{B})^2}{\sigma_e}$; $f = 0.79$ для выбранных параметров материала;

σ_{rev} – значение напряжения в валу при симметричном цикле.

Приведение цикла нагружения к симметричному от нулевому циклу для хрупких материалов, к которым относится сталь, используется диаграмма Гудмана [3]. Значение σ_{rev} вычисляется следующим образом:

$$\sigma_{rev_i} = \frac{\sigma_{a_i}}{1-\frac{\sigma_{m_i}}{\sigma_\text{B}}}, \tag{4}$$

где $\sigma_{a_i} = \frac{\sigma_{max_i}-\sigma_{min_i}}{2}$; $\sigma_{m_i} = \frac{\sigma_{max_i}+\sigma_{min_i}}{2}$.

Значения σ_{a_i}, σ_{m_i} приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры для вычисления параметров симметричного цикла на разных участках нагружения

Номер участка, i	σ_a	σ_m
1	0.546	23.342
2	0.0275	23.8605
3	0.2325	24.0655
4	0.2135	24.0845
5	0.793	24.664
6	0.3455	25.1115
7	1.246	26.012
8	1.3465	25.9115
9	-0.013	24.639
10	0.1485	24.5035
11	0.875	25.23
12	1.242	24.863
13	0.294	23.915
14	0.7765	23.4325
15	0.138	22.794
16	0.217	22.715

Значение параметра a в формуле (3) составляет 4401.15. Значение параметра $b = -0{,}33785$.

Значения σ_{rev_i} и N_i приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры для вычисления параметров симметричного цикла на разных участках нагружения

Номер участка, i	σ_{rev_i}	N_i
1	0.570668	$3.2 \cdot 10^{11}$
2	0.028771	$2.22 \cdot 10^{15}$
3	0.243345	$3.99 \cdot 10^{12}$
4	0.223467	$5.14 \cdot 10^{12}$
5	0.830953	$1.05 \cdot 10^{11}$
6	0.36235	$1.23 \cdot 10^{12}$
7	1.309058	$2.74 \cdot 10^{10}$
8	1.414367	$2.18 \cdot 10^{10}$
9	0.013622	$2.03 \cdot 10^{16}$
10	0.155559	$1.5 \cdot 10^{13}$
11	0.917886	$7.85 \cdot 10^{10}$
12	1.301945	$2.79 \cdot 10^{10}$
13	0.307624	$2 \cdot 10^{12}$
14	0.811724	$1.13 \cdot 10^{11}$
15	0.144082	$1.88 \cdot 10^{13}$
16	0.226529	$4.94 \cdot 10^{12}$

Значение D составляет $1.54 \cdot 10^{-10}$. Это соответствует числу циклов нагружения, равному $6{,}8 \cdot 10^{10}$, то есть условно бесконечному времени работы.

Выводы.

Установлена аналитическая зависимость для определения предела выносливости КВ, при использовании метода множителей Марина, определяемых экспериментально, составляющего $\sigma_e = 41{,}35$ МПа, а при симметричном цикле, где $N_i = \left(\frac{\sigma_{rev}}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$ при использовании диаграммы Гудмана максимальное значение $\sigma_e = 22 - 26$ МПа, что соответствует условно бесконечному времени работы ($6.48 \cdot 10^{10}$).

Список литературы: 1. Joseph Marin. Mechanical Behavior of Engineering Materials. – Prentice-Hall; Fourth Printing edition: 1962. – 502 pages. **2.** Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах: Учебное пособие. 3-е изд., стер. – СПб.: Издательство Лань, 2011. – 352 с. **3.** J. Keith Nisbett and Richard G. Budynas. Shigley's Mechanical Engineering Design. – New York, NY: McGraw-Hill Education. 2006. – 1109 pages.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ЦЕНТРОБЕЖНО – ГИРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ОБЪЕМНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ (ЧАСТЬ 1)

Поветкин В.В.[1], Бектибай Б.Ж.[1], Аринова Д.Б.[2], Букаева А.З.[3]

(*[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, [2]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, г. Алматы, Казахстан, [3]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. *In the article the questions of estimation rotor mechanisms are considered. The application of the ANSYS Workbench 17.2 finite element analysis package for the analysis of the stress-strain state and vibration strength of the crankshaft of the mill is described. Calculated modeling of the crankshaft dynamics of the centrifugal gyratory mill (CGM 140/320) is given. The complete geometric model of the mill CGM-140/320 includes both the moving parts of the mill and the elements of its reinforcing to the fixed foundation.*

Keywords: *crankshaft, reliability, finite element analysis, stress-strain state, vibration.*

Повышение надежности при одновременном снижении материалоемкости и увеличении энергонасыщенности – одна из наиболее актуальных проблем современного машиностроения, решит которую можно лишь используя новые подходы и критерии прочностной оптимизации [1,2]. При расчете деталей МКЭ в качестве критерия оптимального проектирования часто используют эквивалентные напряжения или интенсивность напряжений.

Используя критерий равнопрочности примем, что при заданной нагрузке выбранных размерах детали во всех ее сечениях должны быть одинаковы коэффициенты запас прочности n при переменных напряжениях, которые определяются по известным тензорам напряжений. Основные нагрузки на КВ ДВС – это усилия давления газов в цилиндре и силы инерции. По графику изменения этих сил за полный цикл можно определить максимальную и минимальную нагрузки для расчета МЭК. Результат таких расчетов – тензоры напряжений в узлах расчетной схемы, позволяющие исследовать НДС в окрестности каждой точки.

Для определения коэффициента n в случае плоского напряженного состояния при известных компонентах тензора напряжений от действия максимальной и минимальной нагрузок используется формула (3) Гафа и Полларда, распространяющаяся на общий случай плоского напряженного состояния с компонентами σ и τ, изменяющимися регулярно по ассиметричным циклам. Классический пример использования этой формулы – определение коэффициента запаса прочности коленчатого вала при совместном действии изгиба и кручения. В этом случае напряжения σ и τ легко определяются по элементарным формулам, а кроме того, они действуют при циклически меняющихся нагрузках в поперечном сечении вала.

Среди известных детерминированных моделей усталостной долговечности при стационарном нагружении в случае сложного напряженного состояния можно отметить [3]

$$\sigma_{ae}^{m(\sigma_{ae},T)}\overline{N} = C(\sigma_{ae},T), \qquad (1)$$

где σ_{ae}- эквивалентное напряжение, равное:

$$\sigma_{ae} = \frac{K_\sigma}{\varepsilon\beta} * \sigma_{ia} + \psi_\sigma \sigma_{1m}, \qquad (2)$$

Здесь σ_{ia}– интенсивность амплитуд (σ_{xa}, σ_{ya}, σ_{za}, τ_{xya}, τ_{yza}, τ_{zxa}) напряжений (σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx} соответственно), равная

$$\sigma_{ia} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_{xa}-\sigma_{ya}\right)^2+\left(\sigma_{ya}-\sigma_{za}\right)^2+(\sigma_{za}-\sigma_{xa})^2+6*\left(\tau_{xya}^2+\tau_{yza}^2+\tau_{zxa}^2\right)}; \quad (3)$$

σ_{im} - наибольшее постоянное напряжение цикла (первое главное напряжение). Запас усталостной прочности в этом случае определяется как $n_0 = \sigma_{-1}/\sigma_{ae}$.

Однако, как отмечает И.А. Биргер, модель усталостной долговечности (1) еще не получила в полном объеме экспериментальной проверки и ее можно использовать только для приближенной оценки. Поэтому проблема выбора модели усталостной долговечности при сложном напряженном состоянии остается нерешенной.

При расчете деталей ДВС МКЭ по известным компонентам тензора напряжении можно определить главные напряжения σ_i (i=1, 2, 3) и главные площадки для максимальной и минимальной нагрузок, а также коэффициент n_0 [4]. Однако при таком расчете из анализа выпадает тот очевидный факт, что при действии на деталь максимальных и минимальных сил положение главных площадок будет различным. Это означает, что, в отличии от подсчета коэффициента n_a в поперечном сечении КВ, амплитудные σ_a и средние σ_m напряжения фактически вычисляются для случаев, когда максимальные σ_{max}, τ_{max} и минимальные σ_{min}, τ_{min} напряжения действуют в разных площадках.

При расчете МКЭ в каждой узловой точке расчетной схемы детали тензоры Т напряжении определяют в виде:

$$T = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{vmatrix} \quad (4)$$

Для того чтобы можно было использовать формулы (1) - (3), преобразуем компоненты тензора напряжений, которые получены расчетом МКЭ в узловых точках расчетной схемы, поворотом осей таким образом, чтобы нормальное напряжение σ_a на одной из площадок отсутствовало (рисунок 1):

$$\sigma_\alpha = \sigma_x * cos^2\alpha + 2 * \tau_{xy} * sin\alpha cos\alpha + \sigma_y sin^2\alpha = 0 \quad (5)$$

Откуда

$$\alpha = arctg\left[\frac{-\tau_{xy}\pm\sqrt{\tau_{xy}^2-\sigma_x\sigma_y}}{\sigma_y}\right] \quad (6)$$

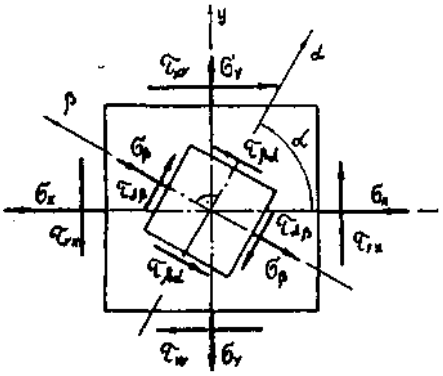


Рис. 1. Напряжения на площадке, расположенной под углом α к исходной

$$\sigma_\beta = \frac{\sigma_x+\sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\cos 2\alpha - \tau_{xy}\, sin2\alpha, \quad (7)$$

$$\beta = \alpha + 90^0 \quad (8)$$

$$\tau_{\alpha\beta} = \frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\, sin2\alpha + \tau_{xy}cos2\alpha \quad (9)$$

Если дискриминант уравнения (6) $D = \sigma_x\sigma_y - \tau_{xy}^2$ отрицателен, то имеются два решения или существуют две площадки, где нормальное напряжение σ_α отсутствует. Если D=0, то имеется единственная площадка, где σ_α = 0. В случае когда $D > 0$ не существует такой площадки, нормаль к которой определяется углом α, на которой $\sigma_\alpha = 0$. При $D < 0$, определяются две площадки, где $\sigma_\alpha = 0$.

При действии максимальных и минимальных нагрузок расчетом МКЭ будет определено по два тензора T_1 и T_2 в каждой узловой точке. Для тензора T_1 по формулам (5)-(9) определяют две площадки, нормали к которым имеют углы α_1^{I} и α_2^{II}, аналогично для тензора T_2 – углы α_2^{I} и α_2^{II}, причем в общем случае $\alpha_2^{I} \neq \alpha_1^{I}$, $\alpha_2^{II} \neq \alpha_1^{II}$.

Графическое представление различных случаев напряженного состояния рассмотрим с помощью кругов Мора изображенном на рисунке 2 а – имеются две площадки где, $\sigma_\alpha = 0$ (D<0); б – имеется единственная площадка, где $\sigma_\alpha = 0$ (касательное напряжение при этом отсутствует), причем на взаимоперпендикулярной площадке действует главное напряжение (D=0); в – площадка, где $\sigma_\alpha = 0$, не существует (D>0).

Для случаев, когда D=0, расчеты n_σ и n_τ ведутся для площадки, определяемой углом α_1, как описано выше при действии максимальной и минимальной нагрузок.

Когда D>0, то для тензора T_1 (при действии максимальных нагрузок) определим лавные площадки и главные напряжения, а также нормальные и касательные напряжения в тех же площадках для тензора T_2 (при действии минимальной нагрузки). Аналогично определяем главные площадки и главные напряжения для тензора T_2 и напряжения в тех же площадках для тензора T_1.

После этого в каждой площадке находим минимальные n_a, n_τ и общий коэффициент запаса прочности n.

Сравнение результатов расчетов, приведенных в [5] показывает, что минимальные коэффициенты запаса прочности n_1 получены с учетом нормальных и касательных напряжений по формулам (1), (2) и (6). Совпадение коэффициентов n_1 и n_2 (по площадкам, где действуют главные напряжения) дает основание полагать, что и для случая, когда D> 0, предлагаемая методика даст хорошие результаты, что позволит сравнить запасы прочности, полученные при расчетах МКЭ и в случае плоского напряженного состояния.

Далее выполняем расчётное моделирование динамики коленчатого вала центробежно – гирационной мельницы (ЦГМ 140/320).

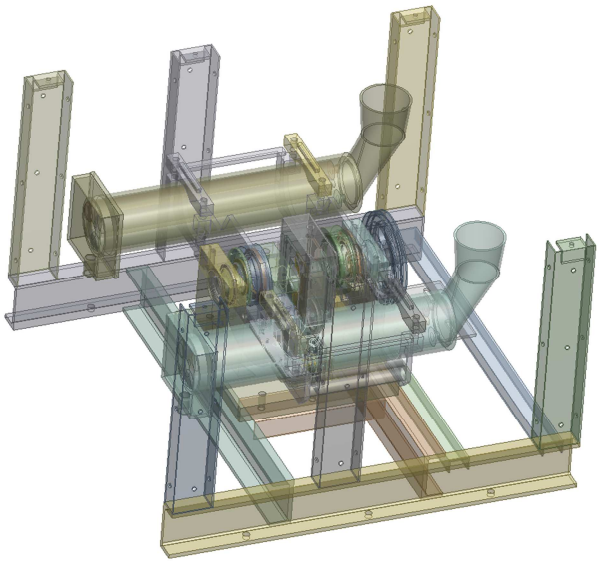
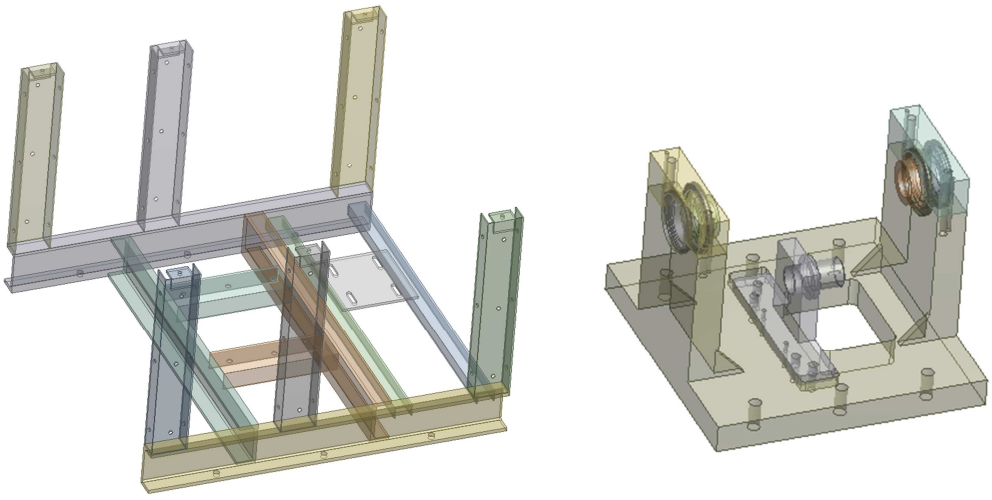


Рис. 2. Полная геометрическая модель ЦГМ-140/32

Одной из основных причин поломок роторных механизмов являются усталостные напряжения несущего коленчатого вала. Анализ таких напряжений с учётом всевозможных особенностей нагружения, которые проистекают из условий функционирования машины, является сложной задачей, которая редко может быть решена с помощью классических аналитических или полуаналитических методов. Поэтому наиболее рациональной методологией для анализа динамических характеристик вала, его многоцикловой усталости и вибрационной прочности является метод конечных элементов. Он позволяет учесть особенности геометрии конструкции и её нагружения, но предъявляет значительные требования к вычислительным мощностям.

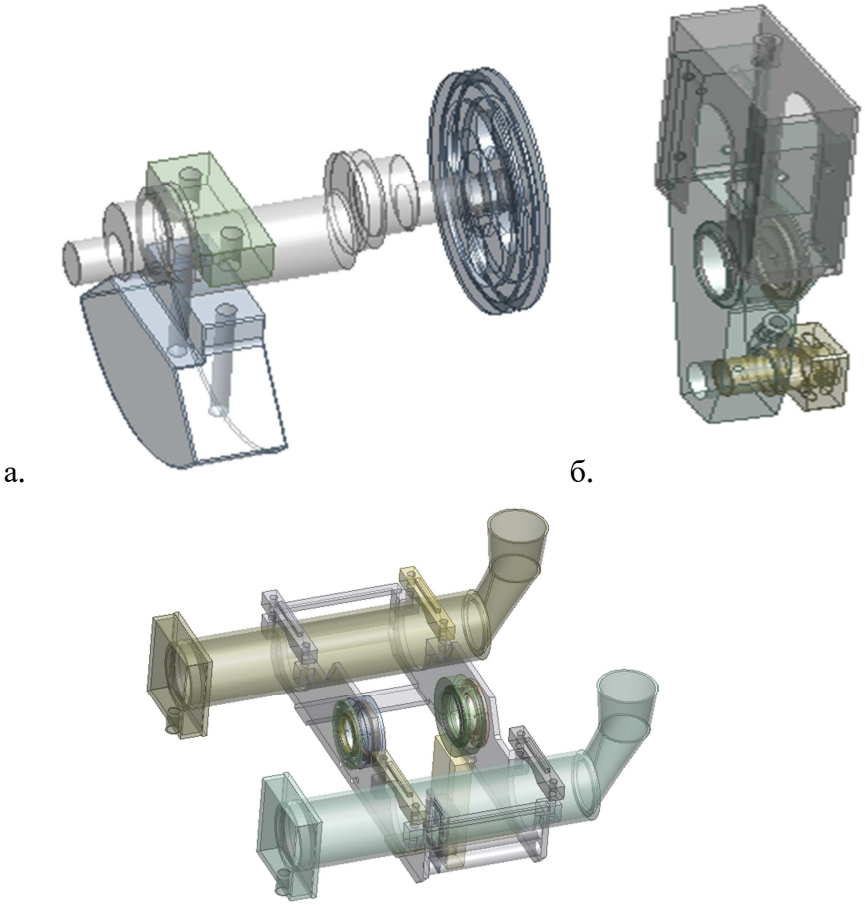
Для анализа напряжённо-деформированного состояния и вибрационной прочности коленчатого вала мельницы использовался пакет конечно-элементного анализа ANSYS Workbench 17.2. Моделирование мельницы ЦГМ-140/320, геометрическая модель. Полная геометрическая модель мельницы ЦГМ-140/320 приведена на рисунке 2. Она включает в себя как движущиеся части мельницы, так и элементы её закрепления к неподвижному фундаменту.



а. б.

Рис. 3. Неподвижные части конструкции: а. – рама; б. – корпус

Основными неподвижными частями мельницы являются рама и корпус со стойкой изображен на рисунке 3. Движущиеся части включают в себя вал с противовесом, кулису и водило с помольными камерами представленные на рисунке 4. Такая конструкция обеспечивает сложное плоское движение помольных камер.



а. б.

в.

Рис. 4. Движущиеся части конструкции: а. – вал с противовесом; б. – кулиса; в – водило с помольными камерами

При построении расчётной модели для метода конечных элементов необходимо определиться с тем, какие аспекты работы системы считаются несущественными в рамках заданного анализа. При проведении анализа были приняты следующие предположения:

- на динамику ротора мельницы слабо влияют её неподвижные части, поэтому рама и корпус не учитывались в конечно-элементном анализе, за исключением втулок корпуса, в которых закрепляется вал;
- не учитывалось трение между частями машины;
- закрепление вала во втулках считалось идеальным и абсолютно жёстким, поскольку использование такой абстракции приводит лишь к увеличению напряжений вала;
- поскольку анализ динамики частиц руды в помольных камерах является чрезвычайно сложной расчётной задачей, содержимое помольных камер считалось сплошным телом, свойства которого изложены ниже.

Геометрическая модель мельницы с учётом описанных допущений приобрела вид, изображённый на рисунке 5. Эти предположения позволяют избавиться от ряда структурных элементов (рама, корпус, уплотнения), которые призваны приблизить реальное взаимодействие тел к идеальному. Таким образом, снижается сложность конечно-элементного расчёта и повышается его эффективность.

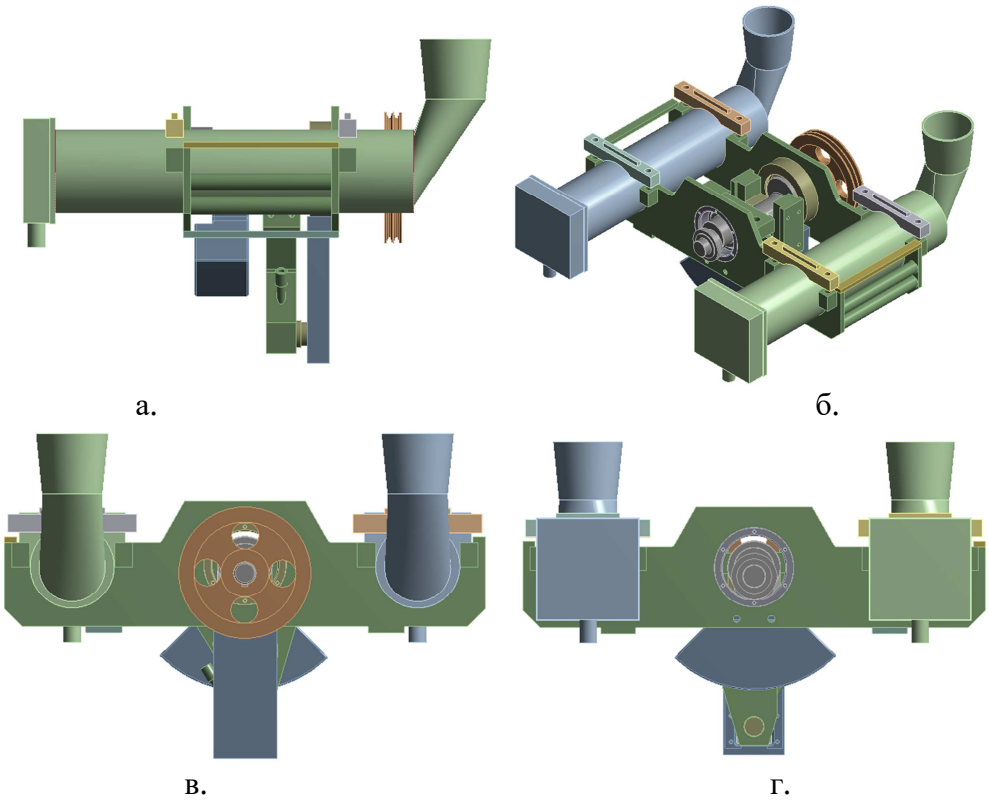


Рис. 5. Расчётная модель ЦГМ-140/320: а. – вид сбоку; б. – изометрическая проекция; в. – вид сзади; г. – вид спереди

Вид тела, которое использовалось для моделирования влияния руды в помольных камерах на динамику вала, приведено на рисунке 6.

Тело, изображённое на рисунке 6, состоит из твёрдого тела, моделирующего руду при установившемся режиме работы мельницы, и четырёх включений – помольных тел изображенных на рисунке 7. Эти тела неразрывно связаны между собой. Рассматривалось два вида связи модели руды с помольными камерами: неразрывная связь (модель 1) и связь, допускающая вращение модели руды в помольной камере (модель 2).

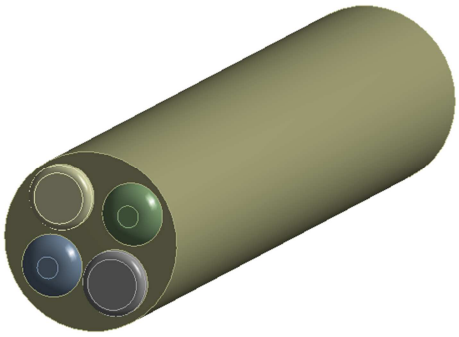
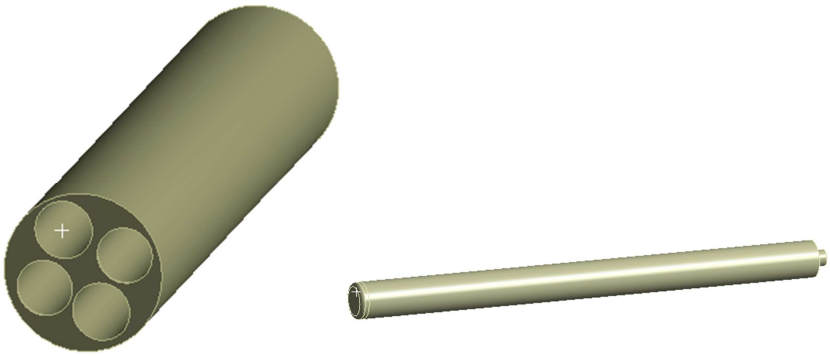


Рис. 6. Модель руды

Физическая модель. Материалы, из которых состоят основные элементы мельницы ЦГМ-140/320, принимались следующими данными:

– вал – сталь 45;
– противовес – сталь 3;
– кулиса – сталь 20;
– палец – сталь 45;
– помольные тела – сталь 65Г;
– помольные камеры – сталь 65Г;
– сухарь – бронза БРОФ 10-1-ОСТ1-90054.

Расчёт остальных элементов конструкции мельницы проводился из предположения, что они изготовлены из материала «сталь 45».



а. б.

Рис. 7. Модель содержимого помольной камеры: а. – модель руды; б. – модель помольного тела

При моделировании руды представленной на рисунке 7а были использованы данные о насыпном весе баритовой руды крупности –10мм и – 50мм (1,42 и 1,40 кг/дм^3), предоставленные в «Заключении о проведении полупромышленных испытаний мельниц ЦМ-2 и МЦ-4». С учётом того, что допустимая степень загрузки помольных камер составляет 30-40%, использовалось два вида материалов, моделирующих руду: материал плотностью 0,568 кг/дм^3 и материал плотностью 0,42 кг/дм^3, как полярные случаи загрузки помольной камеры.

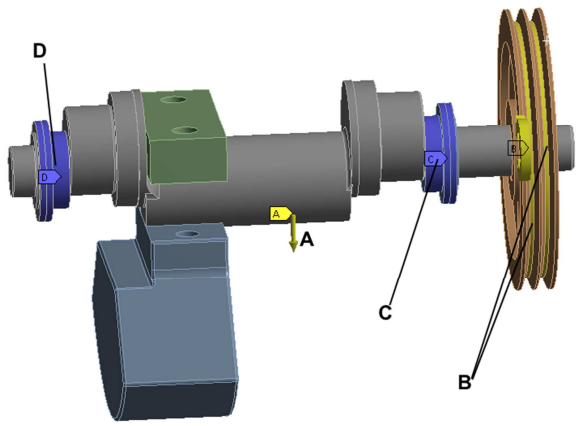


Рис. 8. Нагрузки и связи, приложенные к системе

Модель нагружения. Для корректного построения конечно-элементной модели мельницы и анализа прочности её вала необходимо верно задать связи между элементами машины и действующие на неё нагрузки. На рисунке 8 показаны нагрузки, действующие на систему. Все нагрузки, за исключением силы тяжести, приложены к валу или элементам его закрепления.

Нагрузки на рисунке 8 имеют следующую комбиацию: «D» и «C» – жёсткие заделки, приложенные к втулкам, в которых закреплён вал. В модели, изображённой на рисунке 2, они являются частью

корпуса изображенном на рисунке 3б. «А» – ускорение свободного падения 9,81 м/с^2, приложенное ко всей системе. «В» – угловая скорость, которая приложена к шкиву в месте контакта его с приводным ремнём. Эта угловая скорость меняется по закону приведенной в формуле 10 [6-8]:

$$\omega(t) = 52(1 - e^{-15t}) + 780e^{-15t} \cdot t, \text{рад/с} \qquad (10)$$

График угловой скорости вала представлен на рисунке 9. Из графика видно, что угловая скорость быстро стремится к значению 52 рад/с, что соответствует рабочей частоте мельницы 500 об/мин.

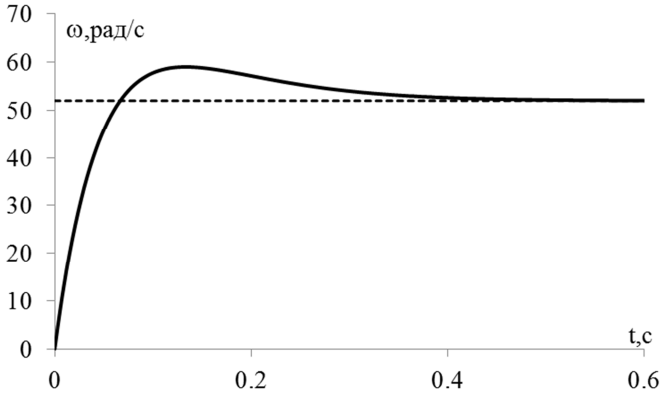


Рис. 9. График зависимости угловой скорости ва от времени

Такой способ задания угловой скорости используется для того, чтобы снизить интенсивность и длительность переходных процессов, а также повысить сходимость вычислительного процесса. По этой же причине угловая скорость не прикладывается непосредственно к валу, а имеет в качестве поверхности приложения упругий шкив, дополнительно снижающий динамическую нагруженность вала.

Выводы.

1. Для определения запаса прочности n в случае плоского напряженного состояния при известных компонентах тензора напряжений от действия максимальной и минимальной нагрузок используется формула Гафа и Полларда, с компонентами σ и τ, изменяющимися регулярно по ассиметричным циклам;

2. Установлено, что рациональной методологией анализа динамических характеристик коленчатого вала, его многоцикловой усталости и вибрационной прочности, является метод конечных элементов позволяющий, учесть особенности геометрии конструкции и её нагружения;

3. В расчётной модели МКЭ КВ, для снижения сложности КЭР, принято:

- на динамику ротора мельницы – рама и корпус, а также трение не учитывалось;
- закрепление вала – абсолютно жёстким;
- содержимое помольных камер – сплошным телом;

4. Впервые установлено аналитическая зависимость угловой скорости КВ изменяющаяся по закону $\omega(t) = 52(1 - e^{-15t}) + 780e^{-15t} \cdot t, \text{рад/с}$, в котором угловая скорость стремится к значению 52 рад/с соответствующее рабочей частоте мельницы (500 об/мин).

Список литературы: 1. Кряжков В.М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники. - М.: Агропромиздат, 1989. - 335 с. **2.** Kumar K.K., Jha B.N. Doshmukh S.K. Fatique failure of crankshafts. Kurbeiwellen mit Dauerbruchen. - Prakt. Metallogr., 1984. - Т. 21, № 11. - с. 586 - 590. – Нем. **3.** Биргер И.А. Детерминированные и статистические модели долговечности//Проблемы прочности, 1982, №4. – С.24-28. **4.** Коллинз Д.А. Повреждение материалов в конструкциях: Анализ, предсказание, предотвращение: Перевод с англ. А. М. Васильева. - М.: Мир, 1984. - 624 с. **5.** Вольфович А.С., Гоц А.Н. Корпусные детали ДВС: оптимизация по запасу прочности // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1995. - № 3. - С . 30-32. **6.** Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. - М.: Энергоиздат, 1981. – 576с. **7.** Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины: Машины переменного тока. - Санкт-Петербург: Питер, 2010. - 350 с. **8.** Ключев В.И. Теория электропривода: Учебн. для вузов. – 2-ое изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704с.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ЦЕНТРОБЕЖНО – ГИРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ОБЪЕМНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ (ЧАСТЬ 2)

Поветкин В.В.[1], Орлова Е.П.[2], Аринова Д.Б.[2], Букаева А.З.[3]

(*[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, [2]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, г. Алматы, Казахстан, [3]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 article modal analysis of the mill construction is performed with the use of Modal subsystem of the finite element package ANSYS Workbench. The shaft rotation was taken into account during the analysis. A series of computational experiments was carried out to analyze the resonance frequencies of the mill with maximum allowable load, minimum allowable load and unbalanced load (one grinding chamber is filled with 30% coarse ore, the other with 40% fine ore). Experiments have also been carried out both with and without the rotation of the ore model in the grinding chambers. To analyze the dependence of resonant frequencies of the system on the speed of the shaft rotation, Campbell diagrams for the frequency range of 200, 800 rpm are plotted.*

Keywords: *crankshaft, mill, finite element analysis, resonance.*

Модель связи составных частей. Для создания условий, при которых становится возможным взаимное перемещение элементов мельницы, используется инструмент Joint пакета ANSYS Mechanical. Основным видом движения в мельницы является вращение вала во втулках. Также следует учитывать следующие соединения:

– возможность вращения вала между вкладышами;
– скольжение вкладышей по кулисе;
– вращение кулисы относительно корпуса (неподвижного основания);
– вращение пальца в кулисе;
– продольное скольжение сухаря в водиле;
– вращение водила относительно вала.

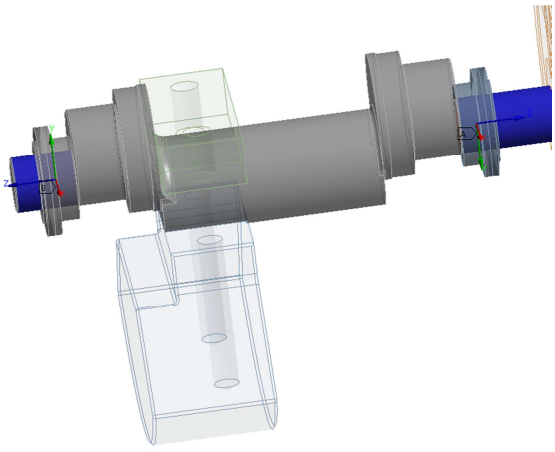


Рис. 1. Закрепление вала во втулках

Для описания вращения вала во втулках используется соединение Cylindrical между соприкасающимися поверхностями втулок и вала изображенная на рисунке 1. Оно допускает вращение и продольное перемещение вала во втулках, не допуская иных перемещений. Преимущество такого закрепления по сравнению с Revolute (разрешено только взаимное вращение) заключается в том, что статическая нагрузка на валу приводит к неадекватным значениям напряжений внутри вала при Revolute-соединении вследствие возникновения фиктивного концентратора напряжений на границе поверхности втулки.

Для исключения проникновения материала вала в материал втулки вследствие изгиба вала, был создан контакт типа No Separation между соприкасающимися поверхностями вала и втулки изображенные на рисунке 2. Этот контакт не позволяет

поверхностям разделяться либо пересекаться, являясь при этом линейным. Такая мера значительно улучшила сходимость вычислительного процесса.

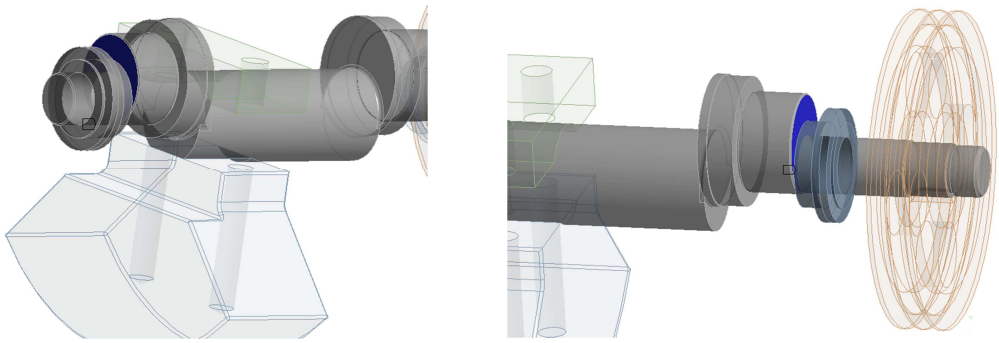


Рис. 2. Контакты No Separation между втулками и валом

Вращение вала между вкладышами определяется соединением Revolute между соответствующими поверхностями представленными на рисунке 3.

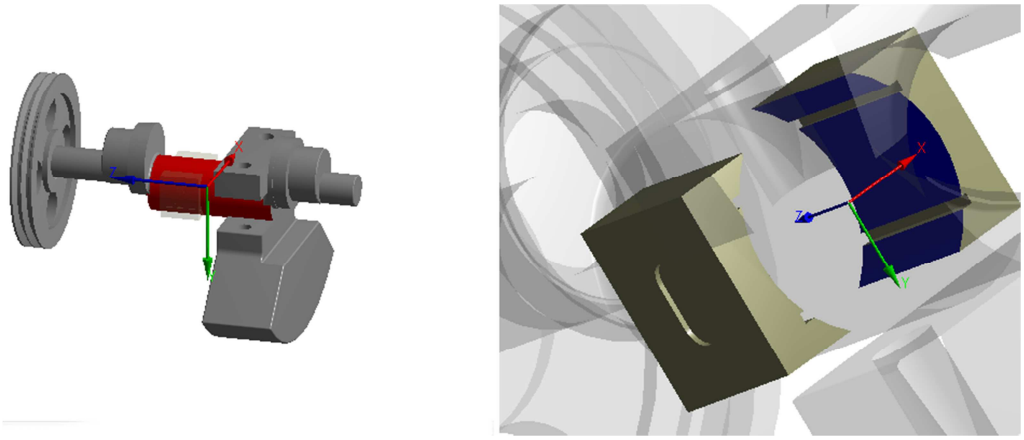


Рис. 3. Соединение между валом и вкладышами

Скольжение вкладышей в кулисе может быть определено с помощью соединения Translational изображенная на рисунке 4. Это позволяет исключить из расчёта ограничительные пластины на кулисе.

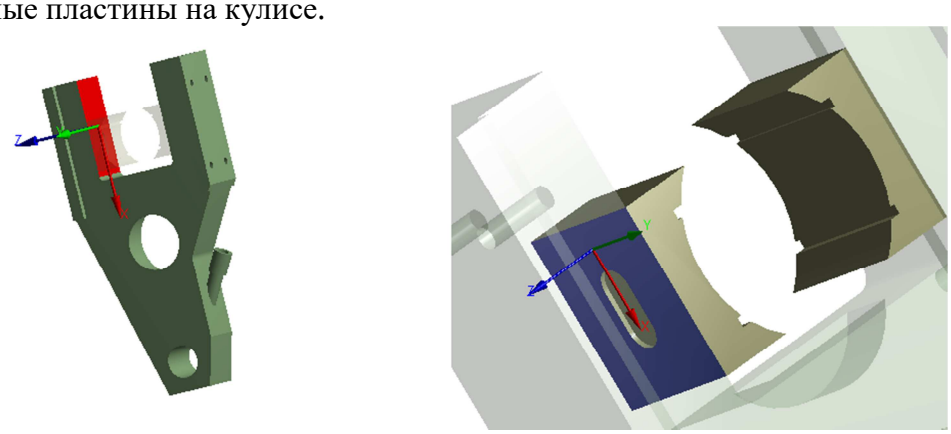


Рис. 4. Соединение между кулисой и вкладышами

Вращение кулисы относительно оси может быть смоделировано связью Body-Ground типа Revolution. Это позволяет исключить из рассмотрения корпус и ось.

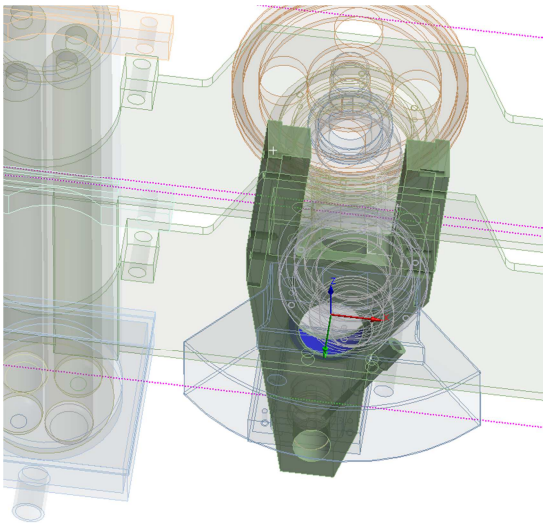


Рис. 5. Соединение для задания вращения кулисы

Вращение пальца в кулисе задаётся соединением Revolute на соответствующих поверхностях изображенном на рисунке 6.

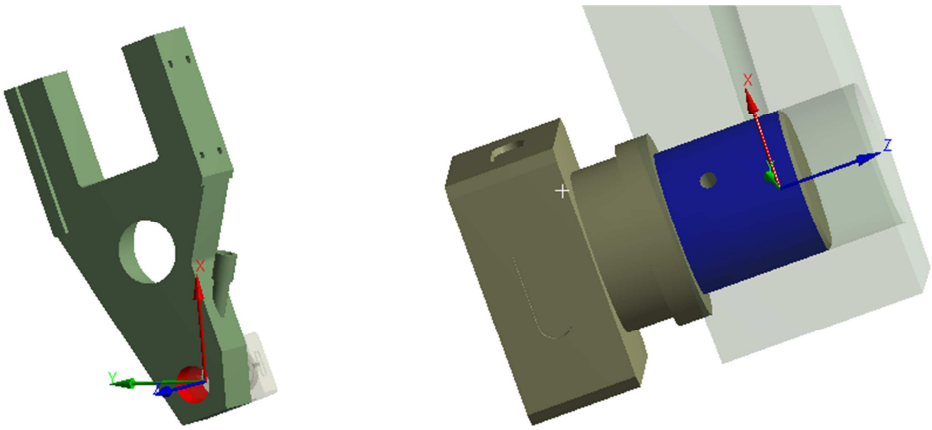


Рис. 6. Соединение пальца и кулисы

Для обеспечения продольного скольжения сухаря в водиле используется соединение Translational. Такая модель позволяет исключить ограничительную пластину на водиле из моделирования.

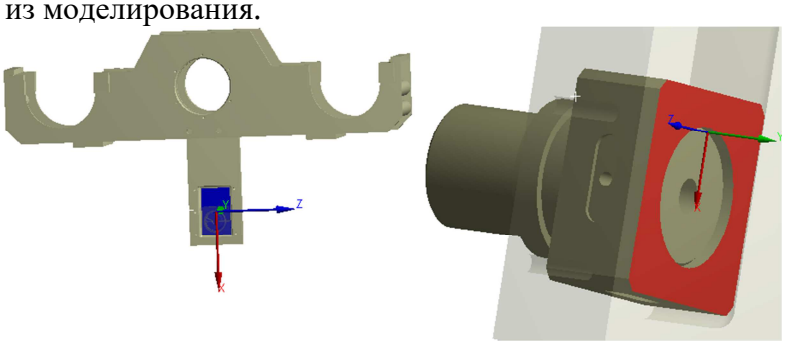


Рис. 7. Соединение сухаря и водила

Обеспечение вращения водила вокруг вала осуществляется с помощью двух соединений Revolution изображенном на рисунке 8. При этом соединяемые поверхности геометрически не соприкасаются: это позволяет избежать взаимопроникновения водила и вала и исключить уплотнения из конечно элементной модели.

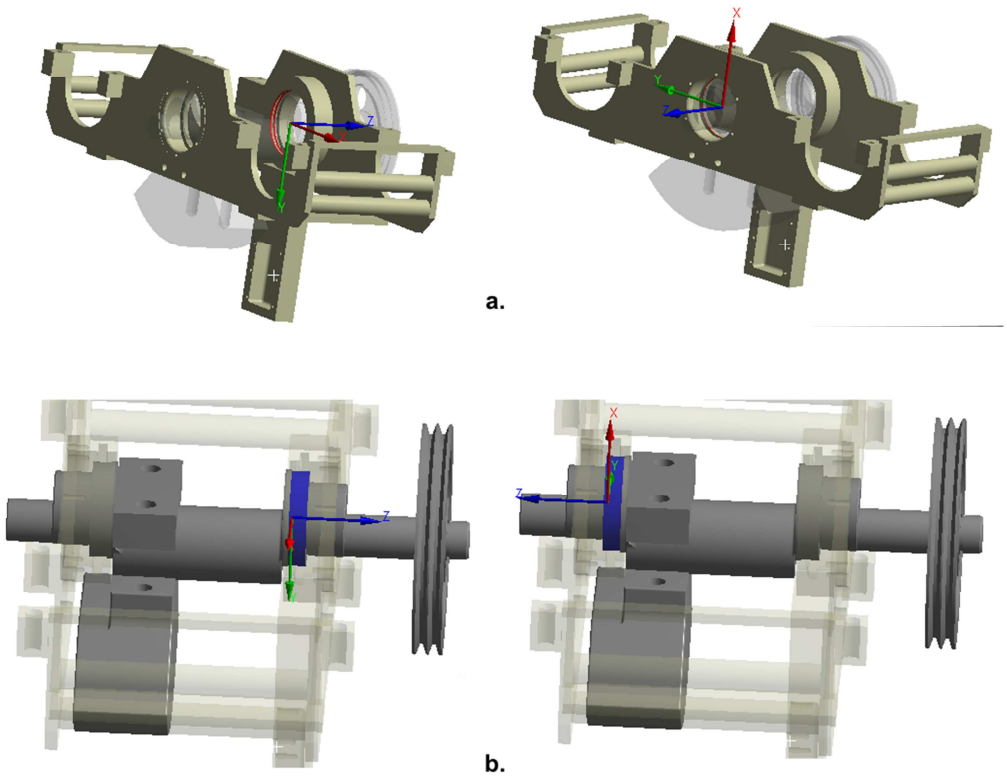


Рис. 8 – Соединения вала и водила: a. – поверхности водила; b. – поверхности вала

Описанные соединения позволяют непротиворечиво задавать динамику системы, не прибегая при этом к чрезмерной детализации.

Для анализа резонансных частот вала мельницы ЦГМ-140/320 выполнен модальный анализ конструкции мельницы, проводимым с использованием подсистемы Modal конечно-элементного пакета ANSYS Workbench [1]. Во время анализа учитывалось вращение вала.

Была проведена серия вычислительных экспериментов для анализа резонансных частот мельницы с максимальной допустимой нагрузкой, минимальной допустимой нагрузкой и нагрузкой с нарушением баланса (одна помольная камера на 30% заполнена крупной рудой, другая – на 40% мелкой). Были проведены эксперименты как с учётом вращения модели руды в помольных камерах, так и без его учёта. Для анализа зависимости резонансных частот системы от скорости вращения вала построены диаграммы Кэмпбелла для диапазона частот $\omega\epsilon[200; 800]$ об/мин [2]. Результаты экспериментов приведены ниже.

В таблице 1 приведены значения собственных частот колебаний системы (в рад/с) для разных условий моделирования при частоте вращения вала 500 об/мин. Из таблицы следует, что собственные частоты слабо зависят от загруженности мельницы.

Таблица 1. Значения собственных частот ЦГМ-140/320 в зависимости от типа модели и загруженности мельницы

Номер частоты	Мелкая руда, модель 1	Крупная руда, модель 1	Дисбаланс, модель 1	Мелкая руда, модель 2	Крупная руда, модель 2	Дисбаланс, модель 2
1	0.49576	0.49563	0.4957	0.46454	0.46441	0.46448
2	66.375	66.12	66.247	61.232	60.995	61.113
3	102.02	101.58	101.79	99.723	99.292	99.494
4	112.66	112.17	112.43	109.85	109.37	109.62
5	200.43	199.6	200.01	170.15	169.44	169.8
6	230.76	229.91	230.33	209.03	208.26	208.65
7	328.51	327.2	327.85	300.48	299.26	299.87
8	374.11	372.74	373.42	342.9	341.67	342.28

Сравнение собственных частот, полученных в модели 1 и в модели 2, позволяет предположить, что динамика ротора слабо зависит от учёта вращения вещества в помольных камерах. Таблица 2 содержит значения относительных погрешностей определения частоты по модели 2 в сравнении с моделью 1.

Таблица 2. Сравнение собственных частот, полученных по моделям 1 и 2

Номер частоты	Относительная погрешность модели 2 по сравнению с моделью 1		
	Мелкая руда	Крупная руда	Дисбаланс
1	-0.06297402	-0.062990537	-0.062981642
2	-0.077483992	-0.077510587	-0.077497849
3	-0.022515193	-0.022524119	-0.022556243
4	-0.024942304	-0.024962111	-0.024993329
5	-0.151075188	-0.151102204	-0.151042448
6	-0.0941671	-0.094167283	-0.094125819
7	-0.085324648	-0.085391198	-0.085343907

Из таблицы 2 видно, что существенная погрешность в определении собственной частоты наблюдается только на пятой собственной форме. Вид этой формы приведен на рисунке 9-10.

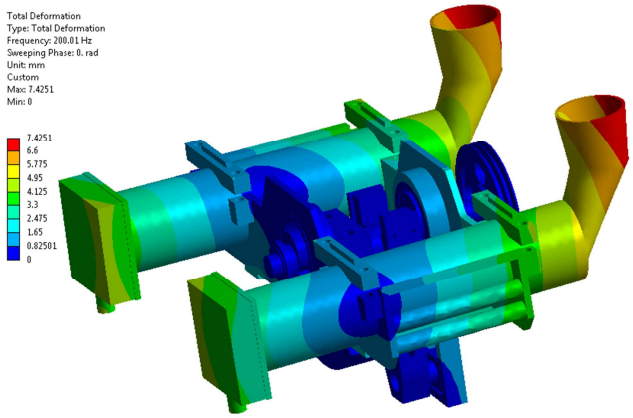


Рис. 9. Пятая форма колебаний системы, полученная по модели 1

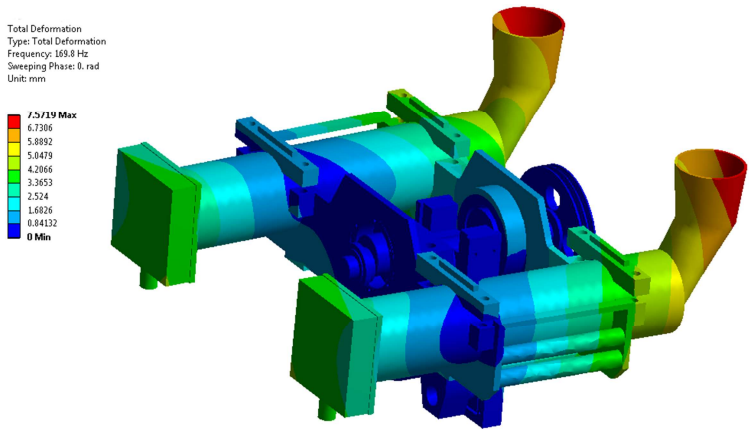


Рис. 10. Пятая форма колебаний системы, полученная по модели 2

Из рисунка 9-10 следует, что пятая форма локализована преимущественно в помольных камерах и не затрагивает вал мельницы. Действительно, сравнение перемещений вала на этой форме по рисунку 11-12 с максимальными перемещениями системы позволяет сделать вывод, что амплитуда колебаний вала составляет около 2% для обеих моделей.

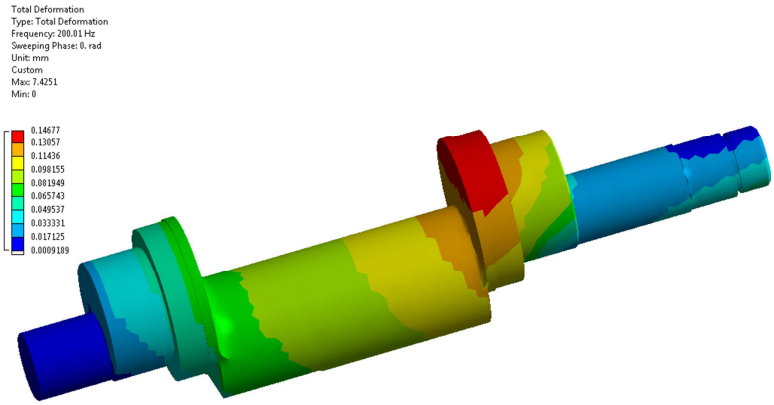


Рис. 11. Деформации вала на пятой форме, рассчитанные по модели 1

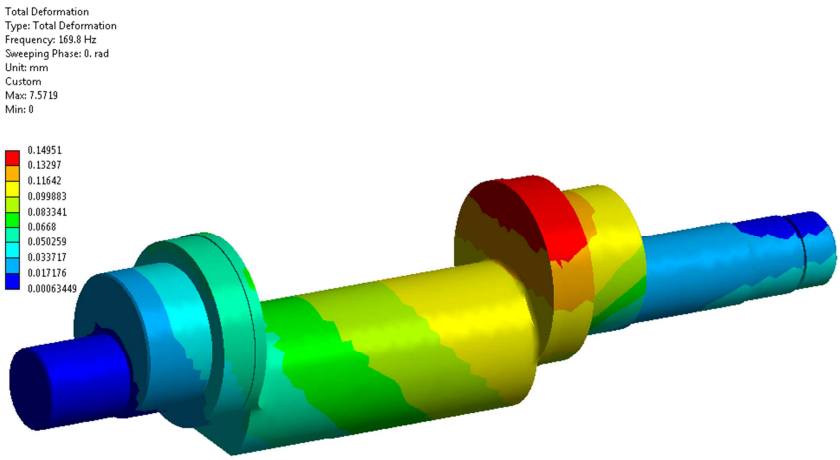


Рис. 12. Деформации вала на пятой форме, рассчитанные по модели 2

Таким образом, для анализа динамики вала мельницы достаточно использовать модель 2, что значительно ускоряет вычислительный процесс, увеличивает его сходимость и точность, а также снижает длительность переходного процесса при анализе его динамической прочности.

Крутильные колебания вала ротора происходят преимущественно на первой форме по рисунку 13, 14. Эта форма соответствует частоте 0,4957 Гц (около 30 об/мин). Таким образом, крутильные колебания вала не могут быть возбуждены при штатной работе мельницы.

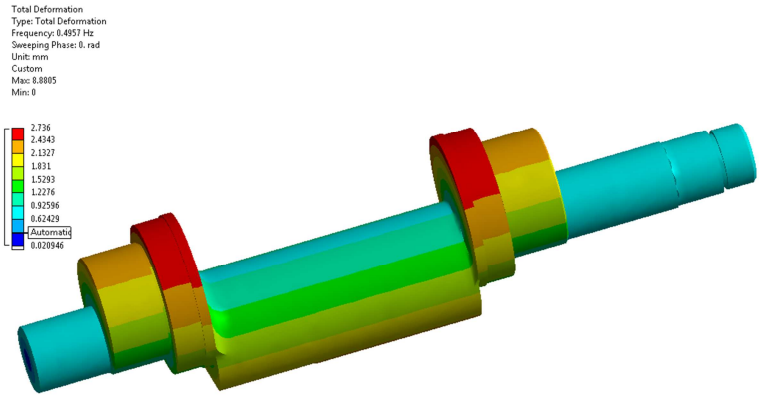


Рис. 13. Крутильная форма колебаний вала, рассчитанная по модели 1

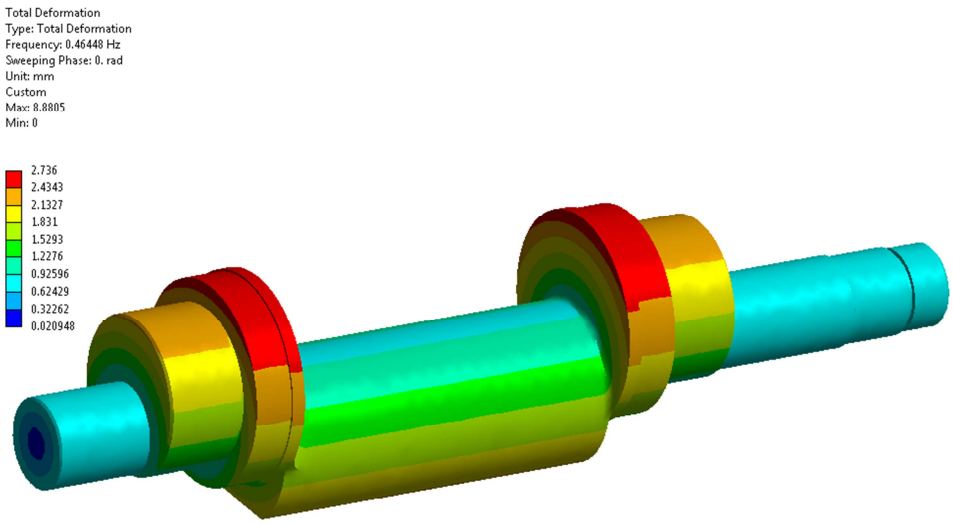


Рис. 14. крутильная форма колебаний вала, рассчитанная по модели 2

Результаты анализа зависимости частот собственных колебаний системы от скорости вращения вала приведены на рисунке 15. Из рисунка следует, что собственные частоты колебаний системы слабо зависят от угловой скорости вращения вала в диапазоне $\omega\epsilon[200;800]$ *об/мин*. Критические частоты вала в этом диапазоне отсутствуют.

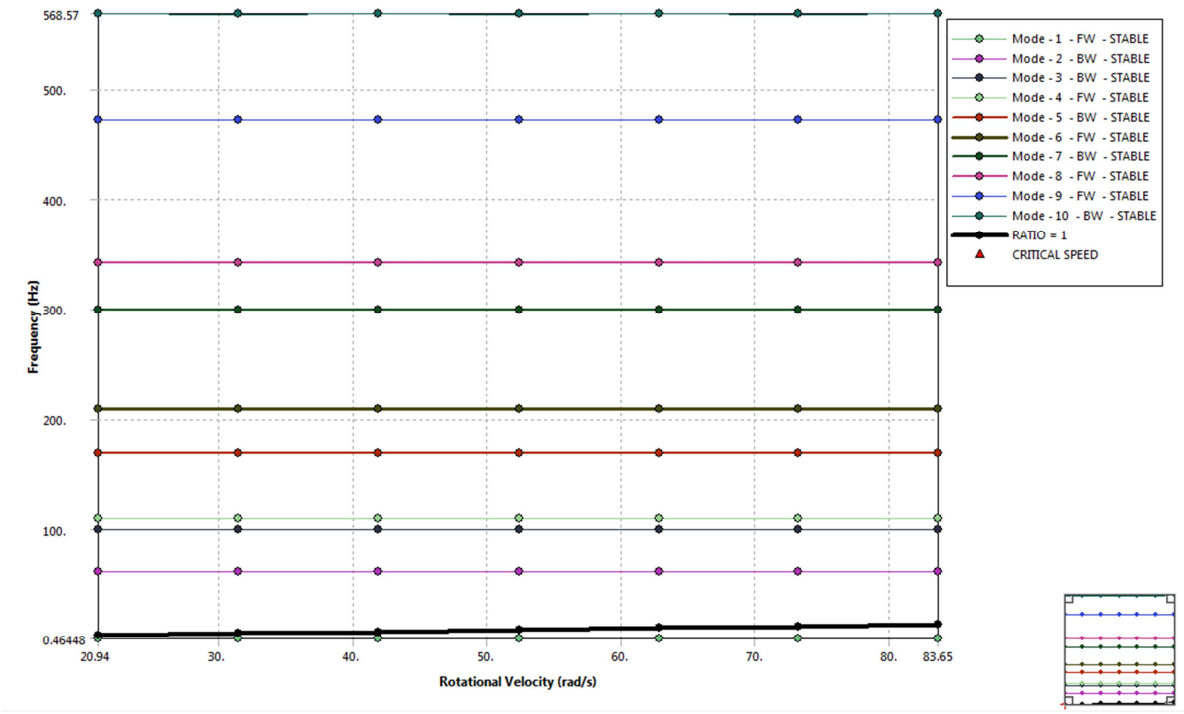


Рис. 15 – Диаграмма Кэмпбелла вала ротора в диапазоне угловых скоростей вала $\omega\epsilon[200; 800]$ об/мин

Таким образом, в условиях штатной работы мельницы резонансных явлений не возникает.

Выводы.

Модальным анализом конструкции мельницы с использованием подсистемы Modal конечно-элементного пакета ANSYS Workbench установлено, что резонансные частоты мельницы с максимальной допустимой нагрузкой, минимальной допустимой нагрузкой и нагрузкой с нарушением баланса, и с учётом вращения модели руды в помольных камерах, так и без его учёта из диаграммы Кэмпбелла для диапазона частот $\omega\epsilon[200; 800]$ об/мин. установлено, что собственные частоты слабо зависят от загруженности мельницы и вращения вещества в помольных камерах.

Список литературы: 1. ANSYS Mechanical APDL Rotordynamic Analysis Guide/ Release 14.5, 2012. **2.** Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. - М.: Издательство Академии Наук СССР, 1959. -248 с.

ГАРМОНИЗАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ НА МЕТАЛЛОПРОКАТ - ОБЪЕКТИВНАЯ НЕОБХОДИМОСТЬ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ СНГ. ОПЫТ БЕЛАРУСИ

Покровский А.И.
(ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь.
Тел./факс +375 (17) 267-52-99; E-mail: arturu@tut.by)

Abstract: *Harmonization of a standard is bringing its content to conformity with another standard to ensure product compatibility and mutual understanding of test results and technical description. In this work, we report our experience in the unification and standardization of rolled structural steel in regard to the specifics of Belorussian industry. The work was performed at the Physic technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus according to project No. 1.59, "To develop and implement in practice a technology for the production of rolled structural steels for Belorussian engineering industry taking into account the harmonization of European standards" within the State Scientific and Technological Program "Machine Building and Engineering Technologies" for years 2016-2020.*
Key words. *International standards. Harmonization. Round steel hire. Carbon and alloy steels.*

Аннотация. Изложен опыт по унификации и стандартизации металлопроката из углеродистых и легированных конструкционных сталей применительно к специфике металлургии и машиностроения Беларуси. Показано, что в Беларуси при производстве круглого стального проката назрела необходимость унификации устаревших, еще советских ГОСТов с передовыми мировыми нормативными документами. Доказывается, что гармонизация стандартов - объективный и неизбежный процесс, аналогичный тому, как в большинстве стран английский язык постепенно и безоговорочно становится языком международного общения. Изложен опыт разработки модифицированных стандартов на металлопрокат. Показано, что в отличие от идентичных стандартов (т.н. «метод обложки»), модифицированные стандарты должны содержать «национальные приложения», учитывающие специфику местных нормативных документов. Кроме того, адаптация международных стандартов требует корректировки существующей технологии производства стали и последующей обработки у потребителя.

Введение. Гармонизация (адаптация, унификация) стандарта это приведение его содержания в соответствие с другим стандартом для обеспечения взаимозаменяемости продукции, взаимного понимания результатов испытаний и информации. Гармонизация стандартов имеет важнейшее значение для расширения взаимовыгодного обмена товарами (услугами), заключения соглашений по сертификации, развития и углубления промышленного сотрудничества и совместного решения научно-технических проблем, повышения и обеспечения качества продукции, оптимизации затрат материальных и энергетических ресурсов, повышения эффективности мер по безопасности труда и защите окружающей среды.

В Западноевропейских странах гармонизовано с международными 80% национальных стандартов. В Российской Федерации к настоящему времени принято различными методами до 20% стандартов ИСО и около 60% стандартов МЭК (международного электротехнического комитета), в Казахстане гармонизировано 95% стандартов в области металлов и металлообработки.

Термины, определения, классификация. Существуют два пути гармонизации: простой перевод стандарта на национальный язык и модификация.

ИСО/МЭК 21 устанавливает следующую классификацию для адаптированных международных стандартов:

1) Идентичные: гармонизованные стандарты, полностью идентичные по содержанию и по форме. Это т.н. «метод обложки» - точный перевод международного стандарта + новая обложка;

2) Измененные или модифицированные (MOD): То же с дополнительными требованиями, отражающими специфику потребностей национальной экономики. Содержат технические отклонения, которые ясно идентифицированы и объяснены.

Допускаются следующий вариант применения международных и региональных стандартов: принятие аутентичного текста международного стандарта, но с дополнениями, отражающими особенности местных требований к объекту стандартизации. При обозначении такого нормативного документа к шифру отечественного стандарта добавляется номер соответствующего международного стандарта.

Объекты исследований:

1) Круглый прокат конструкционных (углеродистых и легированных) сталей диаметром 20-160 мм производства БМЗ;

2) Стали марок: Сталь 20, Сталь 45, 18ХГТ, 40Х, 38ХМ, 25ХГТ (по ГОСТ), C35R, C35E, C45R, C45E, 42CrMoS4 (по европейским им международным стандартам);

3) Стандарт ISO 683 в трех частях, принятый в Европе в 2018 году, а именно: - ISO 683-1:2018. «Стали термообработанные легированные и автоматные. Часть 1. Нелегированные стали для закалки и отпуска»; - ISO 683-2:2018. «Стали термообработанные, легированные и автоматные. Часть 2. Легированные стали для закалки и отпуска»; - ISO 683-3:2018 «Стали термообработанные легированные и автоматные. Часть 3. Цементируемые стали».

4) Технология производства круглого проката и возможности ее совершенствования.

Существующие в мире и в Беларуси нормативы на круглый стальной прокат различаются. В Беларуси действует ряд, разработанных еще в СССР, стандартов на химический состав и механические свойства проката конструкционных сталей марок: 45, 40Х, 18ХГТ, 25ХГТ, 20Г2 (ГОСТ 4543-71, 14959-79, 1050-2013). В мире и в странах ЕС существуют аналоги этих сталей, но более качественные, как по примесям (сера, фосфор), так и с более узкими пределами легирования хромом, молибденом (марки 42CrMo4, 20MnCrS5, S355J2 и др.).

За рубежом эти стали изготавливаются: (до 20.06.2018) по DIN EN 10025-2005, DIN EN 10083-2006, DIN EN 10084-2008; (после 01.07.2018) по ISO 683-1:2016, ISO 683-2:2016, ISO 683-2:2016.

Примеры различных обозначений аналогичных марок сталей в Беларуси и в ЕС: 40Х – 42CrMo4; 18ХГТ – 16MnCrS5; 25ХГТ – 20MnCrS5; 20Г2 – S355J2; 45 – C45.

Адаптация нормативной базы будет способствовать: - унификации марочного состава с международным; - сокращению номенклатуры применяемых конструкционных сталей (до 30%); - максимальному исключению импорта Беларусью аналогичных сталей, закупаемых за рубежом.

В Беларуси с 2018г. начаты работы по гармонизации зарубежных стандартов на стальной прокат в рамках задания «Разработать и внедрить технологию производства проката конструкционных сталей для машиностроительных пред-

приятий Республики Беларусь с учетом гармонизации европейских стандартов» ГНТП «Машиностроение и машиностроительные технологии».

Цель проекта - повышение качества и конкурентоспособности круглого проката углеродистых и легированных сталей производства БМЗ. Задачи:

1) Гармонизация марочного состава сталей в соответствии с действующими международными стандартами;

2) Совершенствования технологии производства конструкционных сталей на БМЗ (шихтовки, разливки, внепечной обработки, прокатки);

3) Достижение качественных характеристик проката, соответствующих лучшим мировым аналогам;

4) Повышение конкурентоспособности конструкционных сталей, расширение рынков сбыта в Беларуси и за рубежом.

Кратко о белорусском изготовителе проката. Белорусский металлургический завод построен в 1984г фирмами «Voestalpine» (Австрия) и «Danieli» (Италия). Первоначальная мощность - 700 тыс.т. стали в год. В 2011-2015гг. прошла масштабная модернизация, увеличившая выпуск стали до 2,2 млн.т. в год. За январь-ноябрь 2018г. выпущено: 2,24 млн.т. стали, 1,95 млн.т. проката. Численность сотрудников составляет около 11 тыс. человек. БМЗ входит в пятерку крупнейших экспортеров (приносит 15% от всего экспорта Беларуси). В 2018г. экспорт достиг 1,13 млрд. долларов.

Основные этапы работы по адаптации стандартов: 1) Сравнительный анализ стандартов EN и требований ГОСТ; 2) Разработка комплекта ТД на производство проката сталей; 3) Экспериментальные плавки, изготовление образцов, испытания; 4) Разработка и согласование в Госстандарте первой редакции проектов гармонизированных СТБ; 5) Изготовление опытных партий проката и проведение испытаний; 6) По результатам испытаний доработка проектов гармонизированных стандартов СТБ; 7) Испытания авто компонентов; 8) Изготовление промышленной партии проката и освоение технологии в производстве.

Опыт, полученный в процессе гармонизации стандартов.

1) Важно сразу же включить работу в «План государственной стандартизации Республики Беларусь». Это снимет множество последующих проблем.

2) Необходимо правильно выбрать первоисточник для перевода. Все, что скачано из интернета - незаконно. Легален только экземпляр, полученный из Белорусского государственного института стандартизации.

3) Перевод, осуществляемый гильдией переводчиков не всегда высококачественный. Переводить на русский язык должен не просто переводчик, а переводчик и одновременно высококвалифицированный специалист в металлургии.

4) Нужно учитывать, что ни один зарубежный стандарт не существует сам по себе. Он тесно взаимосвязан еще как минимум с 10-ю (а то и 30-ю) другими. Поэтому создание модифицированного стандарта требует увязки материала с другими стандартами (иногда справочниками и даже учебниками) путем публикации приложений и дополнений.

5) Необходимо постоянно отслеживать изменения в зарубежной нормативной базе. В отличие от отечественных стандартов, действующих неизменными десятилетия, за рубежом изменения в стандартах происходят, и будут происходить очень часто (иногда даже чаще одного раза в год). Никто заранее предупреждать об этих изменениях не будет.

6) На каждом этапе работ действовать на опережение. Всегда иметь временной лаг на форсмажорные обстоятельства.

7) Сразу же по готовности первой редакции немедленно рассылать проект стандарта заинтересованным предприятиям.

8) Нужно учитывать и быть готовым к замечаниям и даже к категорическому неприятию новых стандартов. Если конструкторское сообщество в целом встречает новые стандарты позитивно, то в областях, требующих смены параметров технологий или поставщиков проката (технологи и снабженцы) наблюдается противодействие.

9) Необходимо представлять, что испытания авто компонентов и деталей из новых сталей длительный процесс, поэтому внести в планы заводов и начинать его как можно раньше.

Резюме. Некоторые итоги гармонизации ISO 683.

На текущий момент процесс гармонизации ISO 683 завершается.

1. Выполнен сравнительный анализ требований европейских стандартов (ISO 683-1:2016, ISO 683-2:2016, ISO 683-3:2016) и требований ГОСТ (ГОСТ 4543-2016, ГОСТ 1050-2013) на прокат из конструкционных сталей.Выполнен сравнительный анализ требований европейских стандартов и требований ГОСТ на прокат из конструкционных сталей.

2. Разработана первая редакция проектов государственных стандартов СТБ на прокат конструкционных сталей (на базе гармонизации соответствующих европейских стандартов). Впервые выполнен перевод оригиналов стандартов на русский язык, они актуализированы: текст существенно переработан, учтены нормы Беларуси, текст адаптирован к специфике БМЗ и требованиям машиностроительных предприятий:

- СТБ /ПР1 (ISO 683-1:2016) –объемом 43 стр.
- СТБ /ПР1 (ISO 683-2:2016) –объемом 42 стр.
- СТБ /ПР1 (ISO 683-3:2016) –объемом 37 стр.

Разработанные СТБ согласованы с БМЗ.

3. Проекты СТБ включены в План государственных стандартов и размещены на сайте Госстандарта для информирования всех заинтересованных ведомств. Начиная с 29.11.2018г. полый текст проектов можно бесплатно скачать на сайте Госстандарта Республики Беларусь.

4. Проекты стандартов СТБ ISO 683-1:2018, СТБ ISO 683-2:2018, СТБ ISO 683-3:2018 с пояснительной запиской разосланы на все заинтересованные промышленные холдинги Беларуси (перечень согласован с Министерством промышленности) для получения замечаний и отзывов.

5. Разработана опытная технология выплавки сталей по гармонизированным стандартам в условиях БМЗ (комплект ТД на технологию производства машиностроительного проката стали марок 42CrMo4, C45 и 16MnCrS5 (в соответствии с проектами СТБ ISO 683-1:2018, СТБ ISO 683-2:2018, СТБ ISO 683-3:2018)

6. По опытной технологии и гармонизированным стандартам на БМЗ выплавлены опытные плавки и изготовлены образцы проката.

7. Проведены сравнительные испытания низколегированных и углеродистых сталей, изготовленных по гармонизированным стандартам, которые показали, что они не уступают сталям, выплавленным в соответствии с существующими ГОСТами, а по некоторым показателям превосходят их.

8. В установленные сроки поступили отзывы на проекты СТБ от всех предприятий, на которые они рассылались. Большинство отзывов - без замечаний, имеющиеся замечания носят конструктивный непринципиальный характер, в настоящее время по ним вносятся изменения в текст СТБ.

ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Полуянович И А.
ЮФУ, Таганрог, Российская федерация, nik1-58@mail.ru.89508609983

Abstract: *The temperature field in the cable section is investigated in accordance with the theory of thermal conductivity. In Matlab, using a system of Fourier equations in a cylindrical coordinate system, we construct a temperature gradient in the cross section of the cable and the environment. On the basis of the thermofluctuation theory, the process of destruction of the insulation by thermal vibrations of atoms, taking into account partial discharges (PD), is investigated. The probabilities of PD occurrence are determined depending on the influencing factors (insulation temperature, number and size of inclusions). The distribution of the probability of occurrence of a partial discharge is analyzed depending on the density of the inhomogeneity of the insulation (y) and the energy of the rupture of the chemical bond (D).*

Введение. Современный технический прогресс требует от применяемых электроизоляционных материалов высоких эксплуатационных свойств. Важной характеристикой силовой кабельной линии (СКЛ) из сшитого полиэтилена (СПЭ) является пропускная способность, которая в свою очередь определяется тепловым режимом, исходя из которого, определяют площадь поперечного сечения кабеля, способы соединения и заземления экранирующих оболочек [1]. Пропускная способность определяется при проектировании СКЛ, однако учесть на практике все нюансы [12], которые существенно влияют на температурный режим работы СКЛ весьма затруднительно. Поэтому, при проектировании СКЛ стремятся выбирать коэффициенты с определённым запасом, поэтому в ряде случаев кабели оказываются недогруженными, а иногда работают на пределе температурного режима. Одним из решений указанной проблемы является мониторинг температуры кабеля во время работы. Датчик устанавливается на поверхности кабеля, таким образом, измеряет температуру поверхности либо приповерхностного слоя СКЛ. Использование системы мониторинга СКЛ позволит решить ряд эксплуатационных задач, таких как снижение количества перебоев в электроснабжении или системных аварий, происходящих в результате выхода из строя кабельной линии по причине превышения рабочих температур; оперативное реагирование на возникающие перегрузки; выявление скрытых резервов существующих мощностей (увеличение нагрузки без превышения допустимых температур); прогнозирование срока эксплуатации и текущих ремонтов [2].

Мониторинг тепловых процессов. Для исследования тепловых режимов СКЛ использовались математические и имитационные модели силового кабеля с СПЭ [3,9], где кабель и окружающая среда разбиваются на зоны, которые представляются в виде электрической схемы замещения, рис. 4, где $\theta_{ж}, \theta_{э}, \theta_{о.и.}, \theta_{з.о.}, \theta_{о.с.}$– соответственно температуры на жиле, экране, основной изоляции, защитной оболочке, окружающей среде; $C_{ж}, C_{э}, C_{о.и.}, C_{з.о.}, C_{о.с.}$ – теплоёмкости соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки, окружающей среды; $R_{ж}, R_{э}, R_{о.и.}, R_{з.о.}$ – тепловые сопротивления соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки; $Q_{ж}, Q_{о.и.}$– источники тока, замещающие температурный напор, создаваемый током, протекающим по жиле и экрану. На рисунке 4 показаны слои и точки, в которых проводится контроль тепловых параметров. Исследование распределения температуры кабельной линии выполнялось в соответствии с теорией теплопроводности, используя дифференциальное уравнение Фурье [3,4,5,10].

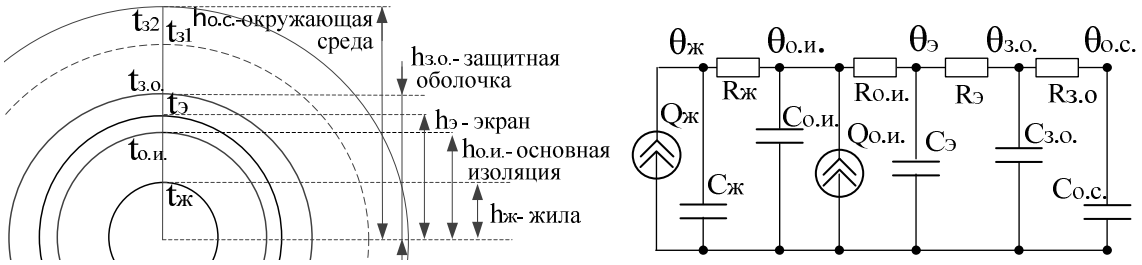


Рис. 4 Сечение кабеля и его эквивалентная тепловая схема замещения

Физические свойства материалов и_геометрические размеры элементов кабеля АПвПу г-1х30/25-10, сведены в табл.1[5,6].

Таблица 1. Параметры кабеля

Параметр \ Материал	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

Профиль температур в сечении силового кабеля (рис. 4) 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 но; $I_{\text{ж}}, I_{\text{э}}$ – 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.

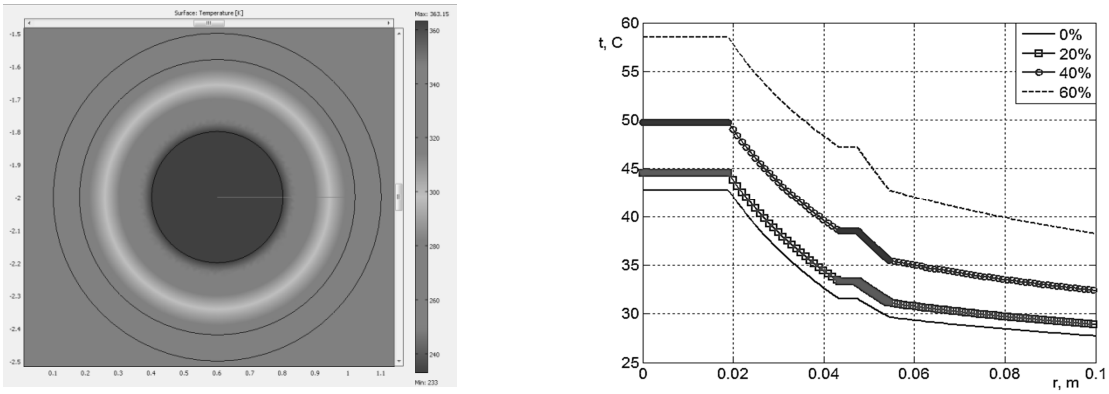
В соответствии с системой уравнений (1) в MatLab строится профиль температур в сечении кабеля и окружающей среды [3,6].

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_{\text{о.с}} + \left(\dfrac{I_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}} S_{\text{ж}}} + \dfrac{I_{\text{э}}^2}{\gamma_{\text{э}} S_{\text{э}}}\right)/2\pi r\varkappa, & (h = h_{\text{о.с.}}) \\ \theta(h_{\text{о.с.}}) + ln\left(\dfrac{r_{\text{о.с.}}}{h}\right)\left(\dfrac{I_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}} S_{\text{ж}}} + \dfrac{I_{\text{э}}^2}{\gamma_{\text{э}} S_{\text{э}}}\right)/2\pi\lambda_{\text{о.с}}, & (h_{\text{з.о.}} \le h \le h_{\text{о.с.}}) \\ \theta(h_{\text{з.о.}}) + ln\left(\dfrac{r_{\text{з.о.}}}{h}\right)\left(\dfrac{I_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}} S_{\text{ж}}} + \dfrac{I_{\text{э}}^2}{\gamma_{\text{э}} S_{\text{э}}}\right)/2\pi\lambda_{\text{о.и.}}, & (h_{\text{э}} \le h \le h_{\text{з.о.}}) \\ \theta(h_{\text{э}}) + ln\left(\dfrac{h_{\text{э}}}{h}\right)\dfrac{\frac{I_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}} S_{\text{ж}}} - \frac{\delta_{\text{э}}^2}{\gamma_{\text{э}}} h_{\text{о.и.}}^2 \pi}{2\pi\lambda_{\text{э}}} + \dfrac{I_{\text{э}}^2(h_{\text{э}}^2 - h^2)}{4\lambda\gamma_{\text{э}}}, & (h_{\text{о.и.}} \le h \le h_{\text{э}}) \\ \theta(h_{\text{о.и.}}) + ln\left(\dfrac{h_{\text{о.и.}}}{h}\right)\dfrac{I_{\text{ж}}^2}{\gamma_{\text{ж}} S_{\text{ж}}}/2\pi\lambda_{\text{о.и.}}, & (h_{\text{ж}} \le h \le h_{\text{о.и.}}) \\ \theta(h_{\text{ж}}) + \delta_{\text{ж}}^2(h_{\text{ж}}^2 - h^2)/4\lambda_{\text{ж}}\gamma_{\text{ж}}, & (0 \le h \le h_{\text{ж}}) \end{cases} \quad (1)$$

Результаты исследования теплопроводности СКЛ. В соответствии с системой уравнений (3) в Matlab построен градиент температур в сечении кабеля и окружающей среды. Расчёты выполнены при токе в жиле кабеля 1000 А. Ток в оболочке кабеля определяется режимом работы кабеля (током жилы) и зависит от схемы соединения (транспозиции) экрана, способа его заземления (одностороннего или двухстороннего). Поэтому ток в оболочке был принят в процентном отношении от тока жилы 0%, 20%, 40% и 60%, рис. 2 (б).

Вывод. В высокотеплопроводных элементах (жиле и экране кабеля), полученные графики доказывают слабую зависимость распределения температуры (горизонтальные полки на графиках). В объёме изоляции из сшитого полиэтилена наблюдается значи-

тельно больший градиент температур, что приводит к существенной разнице температур экрана кабеля и центральной жилы. Выявлено, что достаточно определить температурное поле на поверхности кабеля, а затем на основании приведенной системы уравнений теплопроводности (1) получить температуру по всем слоям СКЛ. Мониторинг температуры вдоль всей СКЛ предлагается осуществлять с помощью распределённого оптоволоконного датчика температуры, устанавливаемого на поверхности кабеля.



а б

Рис.1. Градиент распределения температуры кабеля: а – по сечению кабеля; б – при различных процентных отношениях тока экрана от тока жилы

Термофлуктуационное разрушение изоляции с учетом ЧР. Процесс разрушения изоляции на основе термофлуктуационной теории, предложен В.С. Дмитревским. Для твердых органических диэлектриков основной структурной цепью является связь С-С. Здесь представлены в качестве примера химические связи *C*-*C*, *C*-*H* и *C*-R, где *R* – группа радикала [7,8]. Если принять, что энергия разрыва химической связи *D* соответствует высоте потенциальной ямы, то

$$\Delta W = D \cdot \varphi(x) \tag{2}$$

где: $\varphi(x)$ – функция, описывающая изменение глубины потенциального барьера от величины и вида воздействующих нагрузок.

$$\varphi(x_{PD}) = \sqrt{1-2\mathrm{x}} - \mathrm{x}\ln\left[\frac{1}{\mathrm{x}} + \frac{1}{\mathrm{x}}\sqrt{1-2\mathrm{x}} - 1\right] \tag{3}$$

$$\mathrm{x}_{PD} = \frac{1}{\mathrm{D}}\left(\mathrm{A}e^{-\mathrm{bT}}\beta\eta\mathrm{E}\right). \tag{4}$$

где

$$\eta = (r_i - r_C)/\left(r_{i-1} ln\frac{r_i}{r_{i-1}}\right) \tag{5}$$

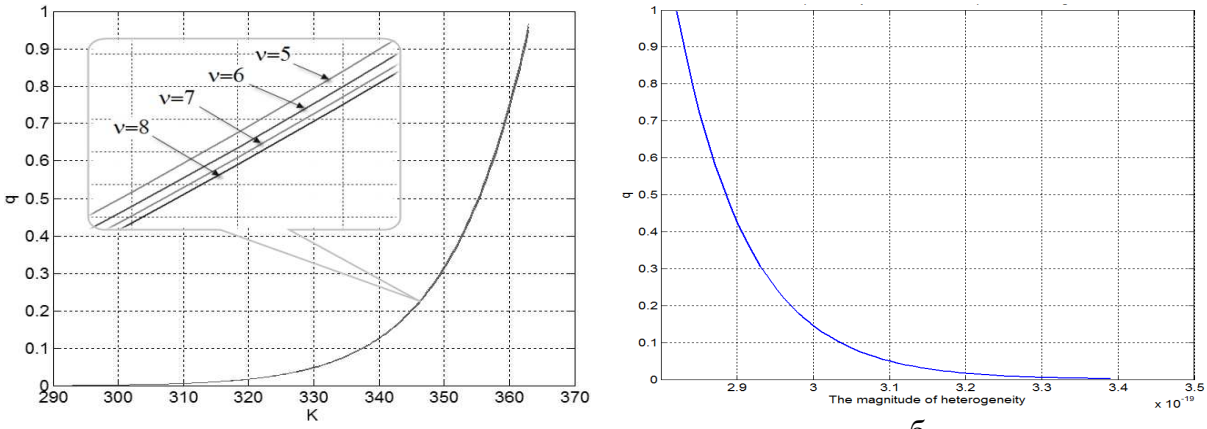
$$\beta = v/\left(1 + (v-1)\frac{1}{y^2-1}\left(\frac{y}{\sqrt{y^2-1}} ln\left(y + \sqrt{y^2-1}\right)\right)\right) \tag{6}$$

Здесь: A – структурно чувствительный коэффициент; y–соотношение сторон эллипсоида вращения, образованного близко расположенными неоднородностями [7]; b – коэффициент, учитывающий изменение модуля упругости материала с температурой; E – напряженность электрического поля, [В]; σ – механическая нагрузка, [Н/м]; T – температура, [^{0}К]; η – коэффициент, учитывающей повышение напряженности электрического поля за счет формы электродов; β – коэффициент, учитывающий повышение напряженности электрического поля за счет неоднородности структуры, r_i–радиус изоляции, r_C – радиус жилы.

Исследование безотказной работы изоляционного материала. Вероятность возникновения ЧР [7,8] зависит от целостности основной структурной цепи связи С-С [9]. ЧР вызывают уменьшение срока службы за счет дополнительного разрыва химиче-

ских связей [6,11], т.е. вероятность возникновения ЧР будет описываться выражением (4). Получены зависимости вероятности $q_{чр}$ от температуры изоляции, рис.2,а. При изменении $(\nu = (\gamma 1 + j\varepsilon 1)/(\gamma 2 + j\varepsilon 2)$, где $\gamma = 1/\rho$, здесь ρ - удельное сопротивление изоляции) в диапазоне 5<ν<8. На рис.2,б представлена зависимость вероятности $q_{чр}$ от энергии разрыва химической связи D.

$$q_{чр} = 1/\tau_0 * \exp(-D\varphi(x_{чр})/(2КТ)) \quad (7)$$



а б

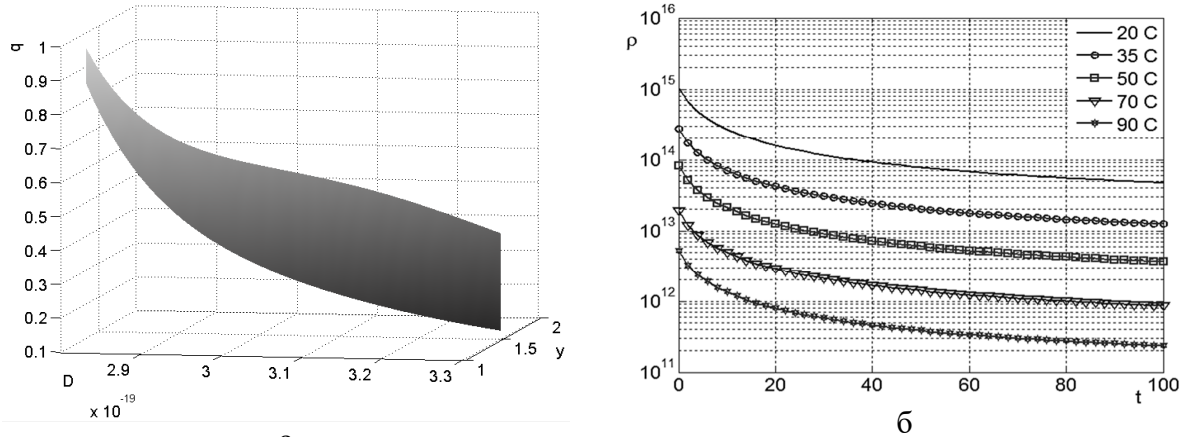
Рис. 2. Вероятность возникновения ЧР: а– от температуры изоляции; б – в зависимости от энергии разрыва химической связи (D)

Долговечность изоляции зависит от воздействующих нагрузок и других факторов [9], таких как величина плотности неоднородностей изоляции (у), энергия разрыва химической связи (D),

$$q = f\ (E, T, D, y\ldots), \quad (8)$$

Получена зависимость распределения вероятности возникновения ЧР в зависимости от плотности неоднородностей изоляции (у) и высота потенциального барьера разрыва химической связи (D) рис. 3,а.

Удельное сопротивление $\rho = 1/tg\delta\varepsilon\varepsilon_0\omega$ учитывающее тангенс угла диэлектрических потерь, как показано в работе [11,12], является одним из параметров характеризующих состояние изоляции. Поэтому исследована временная зависимость удельного сопротивления изоляции кабеля (рис 3,б).



а б

Рис.3. Зависимости распределение вероятности возникновения ЧР: а – от величины плотности неоднородностей изоляции (у) и энергии разрыва химической связи (D), б - расчетные значения временных зависимостей удельного сопротивления изоляции

Заключение. Расчет установившегося температурного поля кабеля, зная его тепловые характеристики, условия окружающей среды и прокладки, позволяет избавиться от необходимости решать дифференциальное уравнение теплопроводности, что значительно ускоряет процесс анализа и прогнозирования рабочих режимов работы КЛ, особенно это существенно для длинных КЛ с переменчивыми условиями прокладки по длине линии. Для оценки ресурса силовых кабелей предлагается использовать величину удельного электрического сопротивления изоляции как параметр, обладающий большей чувствительностью к старению, нежели $tg\delta$ и ε [11,12].

Работа выполнена при поддержке гранта: Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии, № ВнГр-07/2017-15.

Список литературы: 1. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. // Томск: Изд-во ТПУ. 2007. С. 172 **2.** Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Щуровский В.А. Методы испытания силового электрооборудования. / Южный Федеральный Университет, Инженерно-технологическая академия, Институт радиотехнических систем и управления, Кафедра электротехники и мехатроники. Таганрог, 2016**. 3.** Dubyago M.N. Poluyanovich N.K., and Burkov D.V . Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial dis-charge thermal fluctuation theory. // Applied Engineering, Materials and Mechanics. 2016. doi:10.1142/ 9789813146587_0032. pp. 205-211. **4.** Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследования изоляции кабельных линий. Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7 (132). С. 200-205. **5.** Pshikhopov V. Kh., Medvedev M.Y. Estimation and control in complex dynamic systems. // Moscow: Physical and Mathematical Literature. 2009. ISSN 978-5-9221-1176-8.pp. 295. **6.** Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration // Atlantis Press. 2015. ISSN:2352-5401. pp. 49-54. **7.** Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system. // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Switzerland. 2015. Vols. 459. pp. 70-75. **8.** Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Burkov D.V., Tibeyko I.A. Dependence of dielectric loss tangent on the parameters of multilayer insulation materials cable. Environment, Energy and Applied Technology – Sung & Kao (eds), 2015 Taylor & Francis Group, London, pp.1003-1007. **9.** Меркулов В.И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях. // Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ. 2001. С. 156. **10.** Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K. Thermodynamic Approach for Identifying oxidative processes insulation breakdown. // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 752-753. pp. 1153–1157. **11.** А.Н. Королев, Н.К. Полуянович, В.В. Петров. Импедансная спектроскопия нанокомпозитных газочувствительных материалов: учебное пособие // Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2010. С. 200. **12.** М.Н. Полуянович, Н.К. Полуянович Микроконтроллерная система компенсации реактивной мощности // Инженерный вестник Дона. 2007. №2. **13.** Poluyanovich N.K., Rassoha D.P., Formanyuk V.S. The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development. В сборнике: Proceedings of x international saum conference on systems, automatic control and measurements (SAUM 2010) 2010. С. 265-269**. 14.** Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Analysis of insulation materials of cable systems by method of partial discharges. Advances in Materials Science and Applications. 2015. Т. 4. № 1. С. 23-32.

ЛЕВ НИКОЛАЕВИЧ КОШКИН – ОСНОВОПОЛОЖНИК НАПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИ ПРОИЗВОДСТВ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ РОТОРНЫХ ЛИНИЙ

(к 75-летию Конструкторского бюро автоматических линий им. Л.Н. Кошкина)

Прейс В.В. *(ТулГУ, г. Тула, Россия)*
Тел. +7 (4872) 734493; E-mail: rabota-preys@yandex.ru

Abstract: *A brief historical sketch about the main stages of creation and development of the direction of complex automation of cartridge-sleeve manufacture on the basis of automatic rotor lines and its founder - Lev Nikolayevich Koshkin is given.*
Key words: *complex automation, automatic rotor line, cartridge-sleeve manufacture.*

Л.Н. Кошкин родился 12 октября 1912 года в г. Вязьме Смоленской области. В 1929 году окончил среднюю школу и строительные курсы в г. Орле. Трудовую деятельность начал в 1929 году бетонщиком, а позже работал токарем в железнодорожном депо станции «Орел-1». В 1932 году поступил на вечернее отделение Московского механико-машиностроительного института им. Н.Э. Баумана (ММИ) и одновременно работал сначала токарем, мастером, а потом – конструктором на московских заводах «Калибр», «Пресс».

После окончания ММИ в 1937 году Лев Николаевич был направлен в г. Ульяновск на патронный завод № 3 (впоследствии – Ульяновский машиностроительный завод им. Володарского), который в те годы являлся одним из старейших и ведущих заводов нашей страны, выпускавших патроны для стрелкового оружия.

Как вспоминал потом сам Л.Н. Кошкин, работая на заводе над созданием специальных станков для патронного производства, он готовился к сдаче экзаменов кандидатского минимума по философии и погрузился в изучение «Капитала» К. Маркса, «Диалектики природы» Ф. Энгельса и «Философских тетрадей» В.И. Ленина. Фундаментальные положения К. Маркса о сущности, признаках и преимуществах автоматической системы машин и непрерывного поточного производства стали ключевыми для всей последующей деятельности Л.Н. Кошкина. Диалектический анализ исторических путей развития техники и технологии привели его к убеждению, что единственно верным направлением автоматизации патронного производства должно стать создание станков-автоматов, в которых изготовление элементов и сборка патронов производится в процессе их непрерывного транспортирования по замкнутым траекториям совместно с обрабатывающим инструментом. Такие станки-автоматы Л.Н. Кошкин назвал роторными машинами (РМ), а автоматические линии, создаваемые на основе таких машин – автоматическими роторными линиями (АРЛ).

В предвоенные годы Л.Н. Кошкин прошел путь от инженера-конструктора до Главного конструктора завода № 3 в 1940 году. Под его руководством были созданы отдельные РМ для обработки резанием элементов и сборки патронов стрелкового оружия. Опытом проектирования этих автоматов Л.Н. Кошкин поделился на страницах журнала «Машиностроитель» (№ 7, 1940 г.) в своей первой статье «Шире дорогу конструкторскому творчеству».

На Ульяновском машиностроительном заводе, когда, по существу, формировался фундамент нового направления автоматизации патронного производства на базе РМ, вместе с Л.Н. Кошкиным работали такие опытные конструкторы как Г.А. Касаткин, Г.Ф. Андреев, И.Н. Николаев, В.В. Легостов. Они с энтузиазмом восприняли идеи Л.Н. Кошкина и своим опытом содействовали рождению первых РМ для патронного производства. Там же стала формироваться группа конструкторов молодого поколения: С.Н. Панков, В.М. Таныгин и др., которые посвятили всю свою жизнь развитию этого

направления автоматизации. Большое внимание и поддержку коллективу Л.Н. Кошкина оказывал директор Ульяновского завода А.С. Елян – крупный организатор промышленности. Также большую помощь в создании первых РМ для патронного производства оказывали нарком вооружения СССР Д.Ф. Устинов (впоследствии – министр оборонной промышленности, министр обороны СССР) и главный специалист наркомата С.И. Ветошкин (впоследствии – руководитель Главного управления, а затем заместитель министра оборонной промышленности СССР).

В 1943 году за разработку серии специальных станков-автоматов, в том числе и РМ, успешное внедрение их в производство патронов для стрелкового оружия Л.Н. Кошкину была присуждена Сталинская премия, которая была передана им в фонд обороны на строительство танка для Красной Армии.

В годы Великой Отечественной войны РМ прошли первые жесткие испытания. С самого начала они показали высокие эксплуатационные показатели при изготовлении элементов и сборке патронов для стрелкового оружия. Несмотря на эвакуацию Луганского и Тульского патронных заводов на Урал и в Сибирь, выпуск патронов из года в год увеличивался и составил в 1944 году более 7 млрд. штук. В течение всей войны Красная Армия не знала недостатка в патронах для стрелкового оружия [1].

Успешное развитие работ по созданию РМ послужило основанием для создания в июне 1944 года приказом наркома вооружения СССР Д.Ф. Устинова Центрального Конструкторского бюро (ЦКБ-3) под руководством Л.Н. Кошкина. В 1951 году ЦКБ-3 перебазировалось на свою постоянную базу в г. Климовск (Московская область) и было переименовано в Конструкторское бюро автоматических линий (КБАЛ). Главной задачей КБАЛ стало создание АРЛ для производства патронов стрелкового оружия.

В послевоенные годы правительством СССР был поставлен вопрос о путях дальнейшего развития отечественного патронного производства. Высказывалось мнение о целесообразности использования оборудования германских патронных заводов, оказавшихся в советской зоне оккупации. Однако для коллектива КБАЛ во главе с Л.Н. Кошкиным сомнений не было – генеральным направлением развития патронного производства должна стать комплексная автоматизация на базе отечественных АРЛ.

Это направление комплексной автоматизации патронного производства было безоговорочно поддержано Д.Ф. Устиновым. Заведующий отделом ЦК КПСС И.Ф. Дмитриев вспоминал: «...Когда Устинов вынес обсуждение идеи Кошкина в наркомат, крупнейшие специалисты, представители предприятии, ответственные работники - все до единого ее отвергли ... Дмитрий Федорович отпустил всех, а Кошкина спросил, что тому нужно, чтобы сделать образец линии... Когда же линия заработала, Устинов снова собрал всех, кто был в прошлый раз. Кошкин доложил о результатах, Устинов спросил: «Ну и как теперь поступим, товарищи?» Другие разговоры пошли!...» [2].

По инициативе Д.Ф. Устинова на Климовском штамповочном заводе (КШЗ) началось создание экспериментального автоматизированного производства патронов на базе АРЛ. В 1947 году были смонтированы и в 1949 году внедрены в эксплуатацию АРЛ для снаряжения пистолетных патронов.

В течение второй половины 50-х годов коллектив КБАЛ под руководством Л.Н. Кошкина усиленно работал над созданием типовых роторных машин для различных технологических операций: штамповочных, металлорежущих, термических, химических, лакокрасочных, сборочных, контрольных, упаковочных. Л.Н. Кошкин понимал, что только наличие широкого арсенала надежных конструкций роторных машин разнообразного технологического назначения позволит эффективно решать задачи комплексной автоматизации производства на основе АРЛ в различных отраслях народного хозяйства. Накапливался практический опыт эксплуатации линий [3]. Конец 50-х нача-

ло 60-х годов ознаменовались становлением и интенсивным развитием общетеоретических принципов комплексной автоматизации производства, теории проектирования и эксплуатации автоматических роторных машин и линий. В 1954 году Л.Н.Кошкин защищает кандидатскую диссертацию и начинает вести по совместительству научно-педагогическую работу: сначала в промышленной академии Министерства Вооружения, а затем с 1957 года в Тульском механическом институте (позднее – Тульском политехническом). В институт он был приглашен по инициативе заведующего кафедрой «Оборудование штамповочного производства» (ОШП) В.Ф. Прейса для чтения факультативного курса лекций по основам проектирования роторных машин и линий [4].

К началу 60-х годов XX века на действующих производствах патронов для стрелкового оружия были организованы первые автоматизированные участки, оснащенные АРЛ с производительностью 120…150 шт./мин. За эту работу коллектив специалистов КБАЛ и патронного производства во главе с Л.Н. Кошкиным в 1962 году был удостоен Ленинской премии. В 1963 году Л.Н. Кошкину была присуждена ученая степень доктора технических наук, а в 1964 году присвоено ученое звание профессора. В 1972 году Л.Н. Кошкину было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР».

В середине 70-х годов на базе технологических систем роторных машин с производительностью 200…250 шт./мин были созданы первые комплексно-автоматизированные производства (заводы-автоматы) по выпуску патронов для стрелкового оружия калибра до 9 мм. Эта работа коллектива КБАЛ была отмечена Государственной премией СССР в области науки и техники за 1980 год.

В 1982 году Л.Н. Кошкину в день его семидесятилетия был вручен орден Ленина и Золотая звезда Героя социалистического труда. В 1983 году Л.Н. Кошкин был удостоен почетного звания «Заслуженный изобретатель СССР».

Все без исключения награды воспринимались Л.Н. Кошкиным как высокие оценки не только его личного труда, но и вклада всего руководимого им коллектива КБАЛ в дело создания прогрессивной производственной техники – АРЛ. Заслуженным признанием этого вклада явилось награждение в 1984 году коллектива КБАЛ орденом Трудового Красного Знамени.

В декабре 1984 года за большой вклад в становление и развитие научных принципов комплексной автоматизации производства на базе АРЛ Л.Н. Кошкин был избран действительным членом (академиком) Академии наук СССР.

С целью широкого внедрения АРЛ в различных отраслях народного хозяйства в 1985 году по решению Совета министров СССР и Центрального комитета КПСС был создан Межотраслевой научно-технический комплекс (МНТК) «Ротор», головной организацией которого стало КБАЛ, а генеральным директором МНТК был назначен Л.Н. Кошкин. В работе МНТК «Ротор» приняли участие 35 научно-исследовательских и конструкторских организаций 17 министерств.

В 1985 году Л.Н. Кошкин выступил на совещании в Политбюро ЦК КПСС под председательством М.С. Горбачева о задачах и перспективах комплексной автоматизации различных производств на базе АРЛ. По итогам совещания в рамках МНТК «Ротор» была создана общесоюзная программа на 1986-1990 годы и на период до 2000 года. Программа предусматривала выпуск около 5000 линий 352 типов.

Широкие масштабы развертывания работ по созданию и внедрению в отраслях народного хозяйства АРЛ потребовали и особого подхода в деле передачи опыта проектирования линий и комплексно-автоматизированных производств на их основе, ввода их в эксплуатацию. Было организована система обучения специалистов с разработкой конкретных проектов под руководством специалистов КБАЛ. С этой целью совместным решением Минобразования и Миноборонпрома СССР, в структуре Межотраслево-

го факультета повышения квалификации при МВТУ им.Н.Э. Баумана была организована кафедра «Комплексная автоматизация производства на основе роторных и роторно-конвейерных линий» во главе с Л.Н. Кошкиным. Было начато строительство межотраслевого научно-информационного центра с учебным конструкторским бюро, что позволило бы обеспечить не только теоретическую, но и практическую подготовку ведущих специалистов, в том числе, конструкторов для предприятий различных отраслей промышленности СССР.

В целом, к началу 90-х годов прошлого века в различных отраслях промышленности СССР эксплуатировалось несколько тысяч АРЛ для обработки металлов давлением и резанием, термохимической обработки, сборки и упаковки штучной продукции, изготовления деталей из пластмасс методами прессования и литья под давлением и других технологических операций с производительностью от 50 до 1000 шт./мин [5].

На посту начальника и главного конструктора КБАЛ Л.Н. Кошкин проработал вплоть до 1990 года. После ухода с этих постов он оставался Почетным директором МНТК «Ротор» вплоть до внезапной кончины в год своего восьмидесятилетия. До последних дней Лев Николаевич Кошкин оставался неутомимым генератором и пропагандистом идей комплексной автоматизации производств на базе технологических систем роторных машин – главном детище всей его творческой жизни. В интервью корреспонденту газеты «Советская Россия» (22 марта 1985 года, № 6) Л.Н. Кошкин подчеркнул «… Пока мы будем достигать мирового уровня, наши зарубежные коллеги на месте стоять не будут. Значит, чтобы не отстать, мы должны работать с расчетом на опережение ныне известных передовых идей».

Еще в начале своего творческого пути в далекие сороковые годы XX века Л.Н. Кошкин не только сформулировал и обосновал с позиций диалектики основные положения своей теории, но и практически доказал возможность их осуществления, пронеся убежденность в исторической необходимости и экономической эффективности этого направления автоматизации производства через всю свою жизнь. Став организатором и на многие годы бессменным руководителем КБАЛ, Л.Н. Кошкин смог воплотить свои идеи в сотнях оригинальных конструкций АРЛ, во многом опережавших мировой технический уровень. АРЛ, разработанные коллективом КБАЛ под руководством Л.Н. Кошкина, позволили в кратчайшие сроки модернизировать отечественное производство патронов для стрелкового оружия и к началу 80-х годов XX века создать на их основе заводы-автоматы, которые полностью обеспечили потребность Вооруженных Сил СССР в этом виде боеприпасов.

В настоящее время направление комплексной автоматизации производств на базе АРЛ, как и все машиностроение России, переживает не лучшие времена. Но то, что было сделано академиком Л.Н. Кошкиным и руководимым им коллективом КБАЛ, навсегда останется яркой страницей в истории отечественной науки и техники.

Сегодня КБАЛ с честью носит имя своего создателя и многолетнего руководителя – АО «Конструкторское бюро автоматических линий им. Л.Н. Кошкина», продолжая развивать заложенные Л.Н. Кошкиным традиции комплексной автоматизации различных производств на основе АРЛ.

Список литературы: 1. Оружие победы / И.В. Бах, И.И. Вернидуб [и др.]; Под общ. ред. В.Н. Новикова. М.: Машиностроение. 1987. 512 с. **2.** Нарком Устинов // Советская Россия. 1 марта 1985 г. С.4. **3.** Прейс В.В. Технологические роторные машины: вчера, сегодня, завтра. М.: Машиностроение, 1986. 128 с. **4.** Прейс В.В. Комплексная автоматизация производства на основе роторных линий / Роторные технологии (Новое в жизни, науке, технике. Серия: Техника). М.: Знание, 1988. Вып.7. 56 с. **5.** Прейс В.В. Академик Л.Н. Кошкин – эпоха роторных технологий. Тула: Гриф и К°. 2002. 50 с.

САПР РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рахутин М.Г., Сурина Н. В., Мнацаканян В.У. *(НИТУ «МИСиС», Москва, Россия)*
Тел./Факс: +7(499) 230-94-40; E-mail: kaftmr@mail.ru

Abstract: *Questions of automation of technological design of the repair documentation, various methods of design of technological processes of restoration of details are considered. The automated system based on a method of use of unified typical technological processes is presented.*

Key words: *The automated design, methods of design, the technological processes, the automated systems, route of restoration, technological cards.*

Технологическая подготовка ремонтного производства, предусматривает разработку технологических процессов восстановления типовых поверхностей деталей различными методами в зависимости от вида и степени повреждения. Многовариантность возможных технологических решений и необходимость выбора из них оптимального, большой объем документации (маршрутные, операционные карты, инструкции и т.п.) объясняет необходимость использования автоматизированных систем технологического проектирования.

Разработка технологических процессов может осуществляться на основе следующих методов:

1. Метода прямого проектирования, основанного на создании технологических процессов в диалоговом режиме с помощью специальных процедур доступа к справочным базам данных;

2. Метода повторного использования единичных техпроцессов восстановления, состоящего в автоматическом выборе технологии, соответствующей аналогичной детали из архива, с последующей доработкой в диалоговом режиме;

3. Метода анализа, основанного на использовании унифицированных типовых технологических процессов.

Задачи, связанные с разработкой технологических процессов ремонта, является логическими задачами САПР, поэтому применять формализованные методы принятия решений достаточно сложно. Чисто диалоговые системы имеют свои недостатки, т.к. разомкнутый алгоритм принятия решений усложняет процесс проектирования сквозной технологии восстановления детали, включающей предварительную обработку изношенных поверхностей, непосредственно восстановление, последующую термическую и механическую обработку.

Диалоговые системы могут применяться на различных предприятиях, т.к. основа их – это расширенная база данных. Успех же проектирования зависит от квалификации технолога. Преимуществом систем автоматизированного проектирования такого типа является возможность их модификации исходя из условий конкретного производства и особенностей ремонтных работ. В процессе освоения системы пользователь наполняет информационную базу данными конкретного предприятия, вносит ряд структурных изменений, корректируя систему с целью достижения максимального удобства при эксплуатации.

Полностью автоматизированные системы могут создаваться для реализации на предприятиях узкого профиля и охватывают ограниченное количество типов восстанавливаемых деталей.

Наиболее простой способ автоматизированного проектирования является метод повторного использования единичных технологических процессов

восстановления, хранящихся в базе данных предприятия. Этот метод отдельным модулем также может входить в системы, основанные на прямом проектировании. Как правило, сочетает в себе автоматизированный (в отношении расчетных задач) и диалоговый режим работы.

Однако, на предприятиях с большой номенклатурой ремонтируемых деталей и большим разнообразием поврежденных поверхностей (по видам повреждений) целесообразнее использовать систему автоматизированного проектирования, основанную на методе анализа, на использовании унифицированных типовых технологических процессов. Подобная система была разработана на кафедре Горного оборудования, транспорта и машиностроения НИТУ «МИСиС».

Система является гибкой и трансформируется для любого вида ремонтного производства, исходя из его технологических возможностей. В связи с этим требуется достаточно подробный ввод данных на первоначальном этапе. Выбирается тип детали, подвид детали, габариты, материал и марка, вид окончательной термообработки, твердость поверхностного слоя, характер нагружения детали. В зависимости от требований к качеству поверхностей, условий работы детали, ее конструктивных особенностей выбирается вид ремонтных работ и затем осуществляется выбор типового технологического процесса после указания величины износа поверхности.

Следующий этап — это непосредственно разработка технологического процесса ремонта: выбор операций, вида и модели оборудования, оснастки, инструмента и вида контроля. Завершающим этапом является создание отчета в виде технологической карты ремонта.

Последовательность проектирования:

1. Ввод общих характеристик;
2. Выбор вида ремонтных работ;
3. Ввод величины износа;
4. Выбор типового маршрута восстановления;
5. Выбор операций и назначение оборудования;
6. Формирование технологической карты ремонта.

Созданные технологии заносятся в базу данных системы, таким образом расширяя ее. Программа имеет понятный интерфейс и доступна для пользователя.

Список литературы: 1. Бойко П. Ф. Оптимизация технического обслуживания и ремонта оборудования в ОАО «Стойленский ГОК» // Горный журнал. 2011. № 6. С. 52–54. **2.** Зинина И. Н. О развитии САПР ТП, или автоматизация автоматизированных систем // CAD\CAM\CAE Observer. 2010. № 5(57). С. 52–56. **3.** САПР технологических процессов : учеб. пособие / Н. В. Сурина. - М.: Изд. Дом МИСиС, 2016. – 104 с.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Розоринов Г.Н., Архиереева Е.Г. *(НТУУ "КПИ имени Игоря Сикорского", г. Киев, Украина)*
Тел./Факс:+38 (099) 0447802; E-mail: grozoryn@gmail.com

Abstract: *The types of unauthorized division are analysed to information which circulates in the electronic system. The problems of information security are considered in the electronic systems and the ways of their decision are rotined. It is showed that it is necessary to utillize the complex going near development of all of facilities and methods of information security. The new method of information security, being on flesh-memory from an unauthorized division is offered.*
***Keywords*:** *information security, unauthorized division, complex approach, flesh-memory, electronic system.*

Введение

Архитектура различных электронных устройств и технологии их функционирования позволяет злоумышленнику находить или специально создавать лазейки для скрытого доступа к информации. При этом разнообразие даже известных фактов преступных действий дает достаточные основания допускать, что таких лазеек существует много, или они могут быть созданы.

Несанкционированный доступ к информации, которая находится в электронной системе бывает:

• непрямым – без физического доступа к ее элементам;
• прямым – с физическим доступом к ее элементам.

В настоящее время существуют такие пути несанкционированного получения информации (каналы утечки информации) [1, 2]:

• применение подслушивающих устройств;
• дистанционное фотографирование;
• перехват электромагнитных излучений;
• разворовывание носителей информации и производственных отходов;
• считывание данных в массивах других пользователей;
• копирование носителей информации;
• несанкционированное использование терминалов;
• маскировка под зарегистрированного пользователя с помощью разворовывания паролей и других реквизитов ограничения доступа;
• использование программных ловушек;
• получение данных, которые защищаются с помощью серии разрешенных запросов;
• использование недостатков программирования и операционных систем;
• преднамеренное подключение к библиотекам данных специальных программ типа "троянский конь";
• незаконное подключение к аппаратуре или линиям связи вычислительной системы;
• злоумышленное выведение из строя механизмов защиты.

Целью работы является анализ проблем защиты информации в электронных системах и поиск путей их решения.

Средства защиты информации

Для решения проблемы защиты информации основными средствами, используемыми для создания механизмов защиты принято считать:

Технические средства – реализуются в виде электрических, электромеханических, электронных устройств. Технические средства разделяются на:

• аппаратные – устройства, которые встраиваются непосредственно в аппаратуру, или устройства, которые сообщаются с контрольной системой по стандартному интерфейсу (схемы контроля информации по четности, схемы защиты полей памяти по ключу, специальные регистры);

• физические – реализуются в виде автономных устройств и систем (электронно-механическое оборудование охранной сигнализации и наблюдения. Замки на дверях, решетки на окнах).

Программные средства – программы, специально предназначенные для выполнения функций, связанных с защитой информации.

В ходе развития концепции защиты информации специалисты пришли к выводу, что использование любого одного из выше отмеченных способов защиты, не обеспечивает надежного сохранения информации. Необходим комплексный подход к использованию и развитию всех средств и способов защиты информации.

Способы защиты информации

Способы защиты информации показаны на рис. 1. Они включают в себя следующие элементы:

1. Препятствие – физически перегораживает злоумышленнику путь к защищаемой информации, (на территорию и в помещение с аппаратурой, носителями информации).

2. Управление доступом – способ защиты информации регуляцией использования всех ресурсов системы (технических, программных средств, элементов данных).

Управление доступом включает в себя такие функции защиты:

• идентификацию пользователей, персонала и ресурсов системы, причем под идентификацией понимается присвоение каждому названному выше объекту персонального имени, кода, пароля и узнавание субъекта или объекта по предъявленному ими идентификатору;

• проверку полномочий, которая заключается в установлении соответствия дня недели, времени суток, а также запрашиваемых ресурсов и процедур установленному регламенту;

• разрешение и создание условий работы в пределах установленного регламента;

• регистрацию обращений к ресурсам, которые защищаются;

• реагирование (задержка работ, отказ, отключение, сигнализация) при попытках несанкционированных действий [3].

3. Маскировка – способ защиты информации путем ее криптографического преобразования. При передаче информации по линиям связи большой протяженности криптографическое закрытие является единственным способом надежной защиты.

4. Регламентация – заключается в разработке и реализации в процессе функционирования электронной системы комплексов мероприятий, которые создают такие условия автоматизированной обработки и хранения информации, при которых возможности несанкционированного доступа к ней сводились бы к минимуму. Для эффективной защиты необходимо строго регламентировать структурное построение системы, организацию и обеспечение работы всего персонала, занятого обработкой информации.

5. Принуждение – пользователи и обслуживающий персонал должны придерживаться правил обработки и использования информации, которая защищается под угрозой материальной, административной или криминальной ответственности.

Все способы защиты информации реализуются применением технических, программных, организационных, законодательных и морально-этических средств.

Организационными средствами защиты называются организационно-правовые мероприятия, осуществляемые в процессе создания и эксплуатации систем для обеспечения защиты информации. Организационные мероприятия охватывают все

структурные элементы на всех этапах: строительства помещений, проектирования системы, монтажа и налаживания оборудования, испытания и проверки, эксплуатации.

К законодательным средствам защиты относятся законодательные акты страны, которыми регламентируются правила использования и обработки информации ограниченного доступа и устанавливаются меры ответственности за нарушение этих правил.

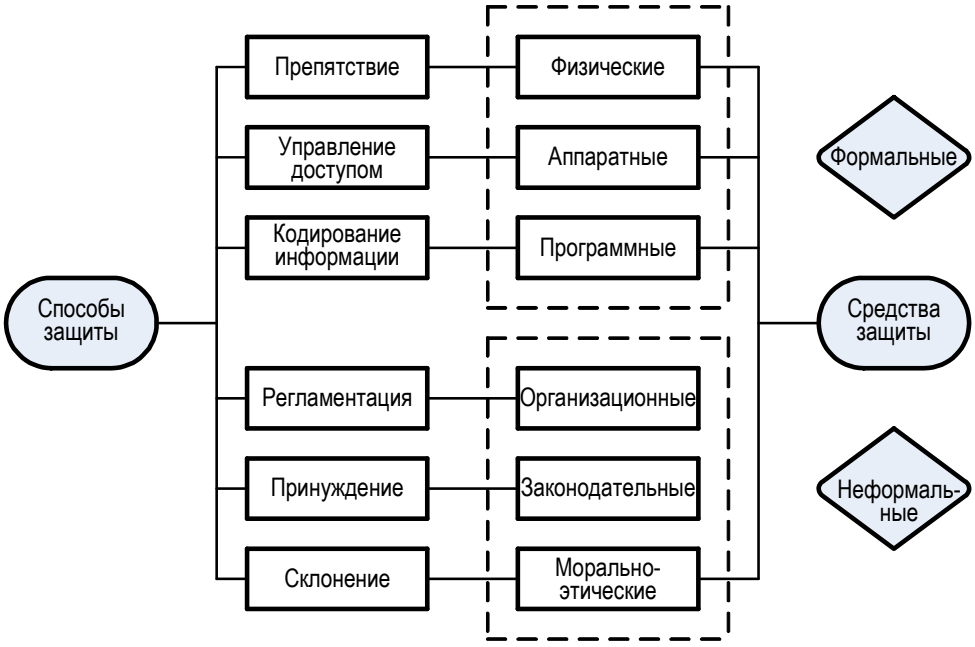


Рис. 1. Способы и средства защиты информации в электронных системах

К морально-этическим средствам защиты относятся всевозможные нормы, которые сложились традиционно или складываются по мере распространения вычислительных средств в стране или обществе. Эти нормы по большей части не являются обязательными, как законодательные мероприятия, однако несоблюдение их ведет обычно к потере авторитета, престижа человека или группы лиц.

Рассмотренные выше средства защиты также можно разделить на формальные, выполняющие защитные функции строго по предварительно предусмотренной процедуре и без непосредственного участия человека, и неформальные, такие, которые или определяются целеустремленной деятельностью людей, или регламентируют эту деятельность [3].

Следует отметить, что ни одна система защиты не является абсолютно надежной. Нужно исходить из того факта, что всегда найдется искусный злоумышленник, который найдет лазейку для доступа к информации.

Защита информации в компьютере. Каналы утечки информации

Защита информации в компьютере – организованная совокупность правовых мероприятий, средств и методов (организационных, технических, программных), которые предотвращают или снижают возможность образования каналов утечки, искажения обрабатываемой и хранимой информации.

Организационные мероприятия защиты – мероприятия общего характера, которые осложняют доступ к ценной информации посторонним лицам, независимо от особенностей способа обработки информации и каналов утечки информации.

Организационно-технические мероприятия защиты – мероприятия, связанные со спецификой каналов утечки и метода обработки информации, которые не требуют для своей реализации нестандартных приемов и/или оборудования.

Технические мероприятия защиты – мероприятия, жестко связанные с особенностями каналов вытока и требуют для своей реализации специальных приемов, оборудования или программных средств.

Канал утечки информации – совокупность источника информации, материального носителя или среды распространения, несуших эту информацию, и средств выделения информации из сигнала или носителя.

На рис. 2 показаны известные каналы утечки информации.

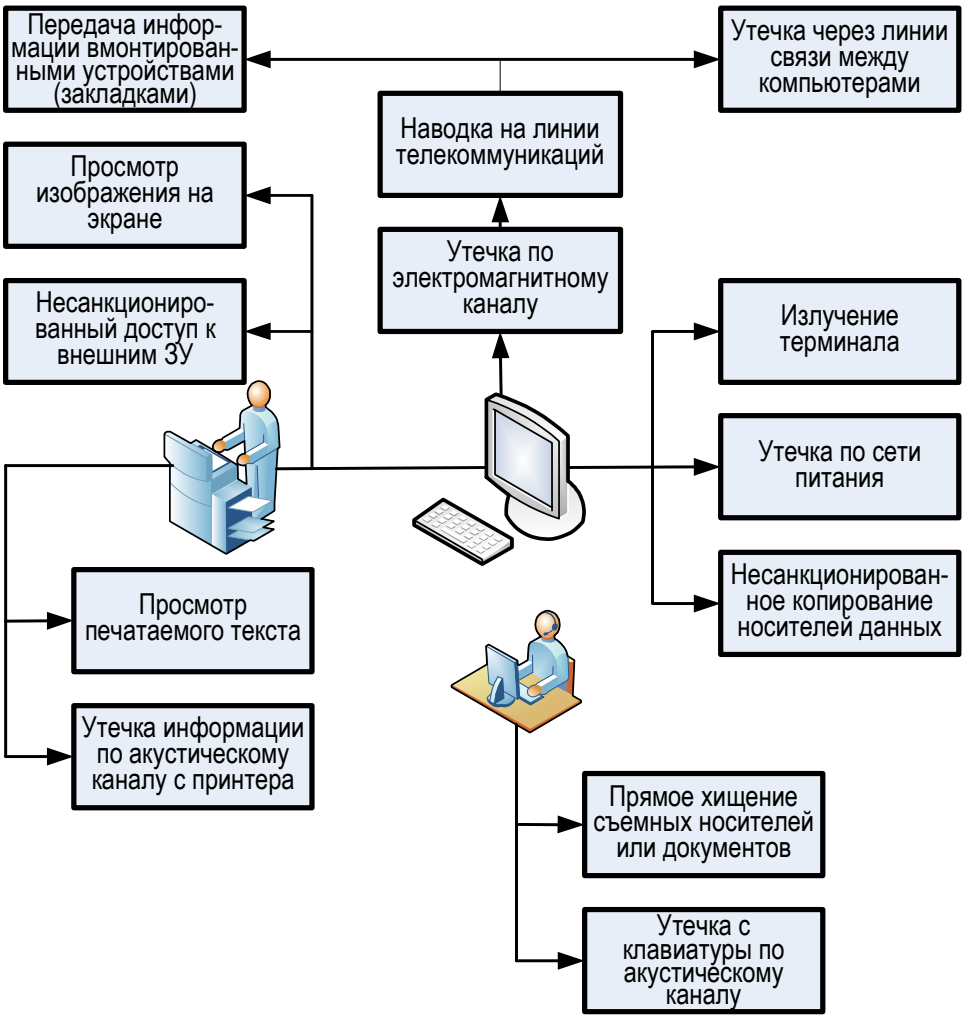


Рис. 2. Основные каналы утечки информации при ее обработке в компьютере

Одним из наиболее распространенных в настоящее время съемных носителей данных большой емкости является *флеш-память*. Именно флеш-память является целью большого числа злоумышленников.

Как у любых полевых транзисторов, у них есть сток и исток. Однако у транзистора флеш-памяти два изолированных затвора: управляющий (control) и плавающий (floating). Плавающий затвор способен накапливать и удерживать электроны (рис. 3) [4].

Несмотря на разнообразие корпусов, все флеш-накопители устроены одинаково. Половинки корпуса часто соединены задвижками и легко разбираются.

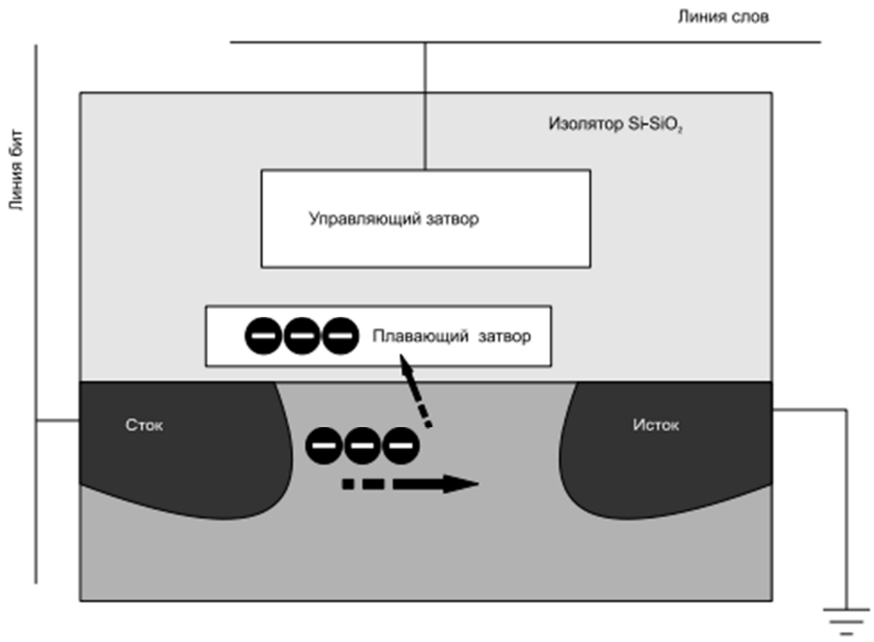


Рис. 3. Ячейка флеш-памяти

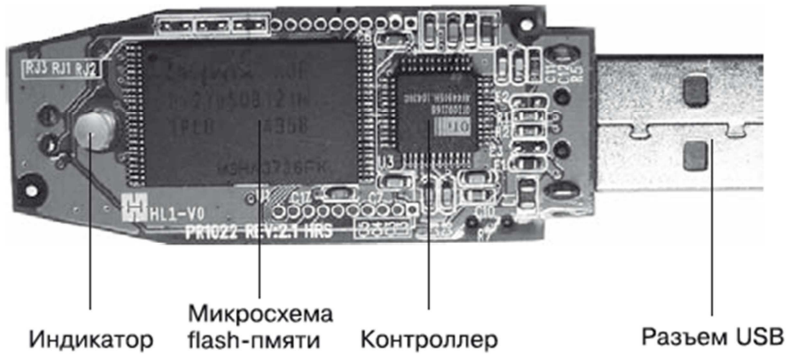


Рис.4. Устройство флеш-памяти

Исключение составляют водонепроницаемые или ультрамодные корпуса – для их раскрытия иногда нужно разрезать склеенные или залитые герметиком детали.

На плате внутри флеш-памяти обязательно присутствуют две микросхемы: чип памяти и контроллер (рис. 4).

Обвязка микросхем состоит из нескольких резисторов и диодов, стабилизатора питания и кварцевого резонатора. В последнее время стабилизатор все чаще встраивается непосредственно в контроллер, и число навесных элементов сокращается до минимума. Кроме того, на плате могут находиться светодиодный индикатор и миниатюрный переключатель для защиты от записи.

Разъем USB припаян непосредственно к плате. Места доли контактов во многих моделях достаточно велики, поскольку на них приходится механическая нагрузка при подключении и отключении устройства.

Для управления чтением и записью служит *контроллер памяти*. В настоящее время контролер всегда выполняется в виде отдельного элемента (это или микросхема одного из стандартных форм-факторов, или бескорпусный чип, встроенный в карту памяти), хотя не исключена интеграция контроллера непосредственно в кристалл флеш-памяти. Способ адресации ячеек конструктивно заложен в контроллере. Данные при записи в микросхему располагаются определенным образом, переменчивым от модели к модели.

Производители эти тонкости не раскрывают и, по всей видимости, раскрывать не планируют. Очевидно, микропрограмм контроллеров создается значительно больше, чем самих моделей контроллеров. Микропрограмма контроллера и таблица трансляции адресов записываются в служебную область флеш-памяти. Именно эту область контроллер начинает считывать сразу после подачи на него питания. Кроме собственно адресации

ячеек, контроллер выполняет ряд других функций: контроля плохих секторов, коррекции ошибок (ECC – error check code) и равномерности сноса ячеек (wear leveling).

Технологической нормой при изготовлении микросхем памяти считается наличие в них в среднем до 2% нерабочих ячеек. Впоследствии их количество может еще увеличиваться, поэтому во флеш-памяти предусмотрен резервный объем. Если появляется дефектный сектор, контроллер в процессе форматирования или записи подменяет его адрес в таблице размещения файлов адресом сектора из резервной области. Коррекция осуществляется контроллером, но реализуется на уровне файловой системы конкретного носителя. Чтобы запись информации осуществлялась равномерно, свободное пространство условно разбивается на участки, и для каждого из них учитывается количество операций записи.

Статистика циклов заносится в скрытую служебную область памяти, и за этими сведениями контроллер периодически обращается к ней.

Известны много способов защиты информации, находящейся на флеш-накопителе от несанкционированного использования с помощью ключей. Как ключи могут быть использованы кодовые карты: картонные, магнитные, оптические. Чаще всего используются электронные ключи. Информацию, которая защищается, в процессе работы идентифицирует ключ, то есть определяется код ключа и сравнивается с кодом, записанным в программе. По результатам идентификации информации обеспечивается реализация заданного регламента ее использования [5].

Также можно защищать информацию от несанкционированного использования паролем. Пароль, который вводится пользователем на запрос информационной программы является условием для реализации заданного регламента использования информации. Такой способ защиты достаточно эффективен при ограниченном круге пользователей и их заинтересованности в защите информации.

Однако, он не может использоваться в случае большого числа пользователей, поскольку сообщение пароля людям, обычно не заинтересованным в защите информации, быстро приводит к падению эффективности защиты.

Эта проблема может быть решена, если воспользоваться дефектными секторами, всегда присутствующими в памяти и использовать их как элементы ключа. Иначе, как идентифицирующий ключ использовать координаты дефектных блоков флеш-накопителя, который является одновременно носителем информации.

Заключение. Проанализированы виды несанкционированного доступа к информации, которая циркулирует в электронной системе. Рассмотрены проблемы защиты информации в электронных системах и показаны пути их решения. Показано, что необходимо использовать комплексный подход к развитию всех средств и способов защиты информации. Предложен новый способ защиты информации, находящейся на флеш-накопителе от несанкционированного доступа.

Список литературы: 1. Железняк В.К. Защита информации от утечки по техническим каналам: Учебное пособие. — СПб.: СПбГУАП, 2006. – 188 с. **2.** Торокин А.А. Инженерно-техническая защита информации. – М.: Гелиос Арв, 2005. — 960 с. **3.** Зайцев А.П. Технические средства и методы защиты информации: под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова.Учебник для вузов / А.П. Зайцев, А.А. Шелупанов, Р.В. Мещеряков, С.В. Скрыль, И.В. Голубятников – М.: Машиностроение, 2009. — 508 с. **4.** Tanzawa T., et al. A Compact On-Chip ECC for Low Cost Flash Memories, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 32, May 1997, pp. 662–669. **5.** Патент 98851 Україна, МПК GO6F 12/14. Спосіб захисту інформації від несанкціонованого використання / Розорінов Г.М., Брягін О.В.; заявл. 20.11.2014; опубл. 12.05.2015, бюл. №9.

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБОРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Рябичев В.Д., Витренко В.А. (ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)
Тел./Факс: +38 (0642) 341826;*E-mail:* vitrenko.vl@gmail.com

Abstract: *The article investigates production of hyperbola instrument on general-purpose equipment usingla the cutting-tool sand end-milltype cutters .Instrumental surface has been obtained by shape-forming movement along one-cave hyperboloid linear generatrix.*
Keywords: *gear wheel, hyperbola cutter, specific points, tooth surface, work-piece, contact.*

Самым сложным и трудоемким в производстве является зуборезный инструмент. Его изготовление требует наличия высокоточного оборудования, специалистов высочайшей квалификации, наличие современных материалов и оборудования для термической обработки[6]. До настоящего времени зуборезный инструмент, как правило, изготовлялся на зуборезном оборудовании. В настоящее время, благодаря использованию оборудования с ЧПУ, появилась возможность изготовлять зуборезный инструмент на вертикально и горизонтально фрезерных станках, а также на токарных станках, имеющих три независимые координаты.

На первом этапе проектирования зуборезного инструмента, необходимо изготовить исходную инструментальную поверхность [3]. В качестве исходной инструментальной поверхности выбираем гиперболоидный зубчатый червяк. В зависимости от схемы формообразования такой поверхности она может быть трех видов: гиперболоидная исходная инструментальная поверхность на теле вида однополостной гиперболоид, на глобоидном червяке и на однополостном гиперболоиде. Первые две формы гиперболоидной поверхности могут находиться в станочном зацеплении с зубчатыми колесами определенной геометрии. Третья инструментальная поверхность может находиться в станочном зацеплении с зубчатым колесом любой геометрии. Следовательно, процесс профилирования такой поверхности вызывает у нас наибольший интерес.

Для того чтобы получить такую инструментальную поверхность, инструмент образующий ее профиль должен двигаться вдоль прямолинейной образующей однополостного гиперболоида. В качестве такого инструмента может быть выбран обкаточный резец, зуборезная рейка, дисковая или концевая фреза, токарный резец. Любой из перечисленных выше инструментов должен двигаться вдоль прямолинейной образующей однополостного гиперболоида.

Зная уравнение режущей кромки формообразующего зубчатого колеса или уравнение производящей поверхности, по которой движется токарный резец или концевая фреза можно описать поверхность искомой гиперболоидной инструментальной поверхности. Необходимо отметить, что в своем относительном движении концевая фреза движется вдоль прямолинейной образующей однополостного гиперболоида и описывает производящую зуборезную рейку [4].

Запишем уравнение инструментальной поверхности в системе координат $x_1y_1z_1$ и осуществим переход от системы координат $x_1y_1z_1$ к системе координат $x_2y_2z_2$ связанной с искомой гиперболоидной зубчатой поверхностью.

Системы координат $x_1y_1z_1$ и $x_2y_2z_2$ связаны между собой, что позволяет найти семейство поверхностей искомого профиля в следующем виде:

$$\begin{aligned}
x_2 &= -r_0(\cos\theta+\theta\sin\theta)(\cos\varphi_2\cos\varphi_1+\cos\gamma\sin\varphi_2\sin\varphi_1)+r_0(\sin\theta-\\
&\theta\cos\theta)(\cos\gamma\sin\varphi_2\cos\varphi_1-\cos\varphi_2\sin\varphi_1)-\mu\sin\gamma\sin y_2+a_w\cos\varphi_2\\
y_2 &= -r_0(\cos\theta+\theta\sin\theta)(\sin\varphi_1\cos\gamma\cos\varphi_2-\sin\varphi_2\sin\varphi_1)+r_0(\sin\theta-\\
&\theta\cos\theta)(\sin\varphi_2\sin\varphi_1+\cos\gamma\cos\varphi_2\cos\varphi_1)-\mu\sin\gamma\cos\varphi_2-a_w\sin\varphi_2\\
z_2 &= -r_0(\cos\theta+\theta\sin\theta)\sin\gamma\sin\varphi_1+r_0(\sin\theta-\theta\cos\theta)\sin\gamma\cos\varphi_1+\mu\cos\gamma
\end{aligned} \qquad (1)$$

Для того, чтобы найти искомый профиль необходимо связать между собой приведенные три выражения. Для связи параметров φ_1, θ и μ запишем уравнение связи в следующем виде:

$$\vec{N} \cdot \vec{V}^{(12)} = 0 \qquad (2)$$

где: $\vec{N}$ - вектор нормали к нарезаемой и формообразующей поверхностям; $\vec{V}^{(12)}$ - относительная скорость скольжения зубьев контактирующих поверхностей.

Добавив уравнение связи (2) к системе уравнений (1), получим в аналитическом виде поверхности зубьев искомогогиперболоидного основного червяка.

Уравнения режущей кромки производящего исходного контура, которым может быть как обычный резец, так и концевая фреза, записан в виде обобщённого исходного контура под которым понимают контур, профиль которого очерчён произвольной кривой имеющей вид:

$$x_1 = f_1(\lambda) - r_1;\ y_1 = f_2(\lambda); \qquad (3)$$

где: $f_1(\lambda)$, $f_2(\lambda)$– произвольное необходимое число раз дифференцируемые функции; λ – переменная величина; r_1 – радиус окружности.

При формообразовании зубьев на гиперболоидной заготовке режущие кромки производящего исходного контура совершают движения, определяемые параметрами μ и φ_1. В этом выражении φ_1– угол поворота режущих кромок инструмента относительно оси o_1z_1, μ – расстояние режущей кромки от плоскости $o_1x_1y_1$.

Подставляя в уравнение (1) значения координат режущей кромки, получим уравнения семейства поверхностей зубьев на гиперболоидной заготовке. Таким образом, уравнения семейства определяют поверхности зубьев в зависимости от трёх параметров λ, μ и φ_1. Здесь параметр φ_2 заменён через φ_1 и передаточное число u_{21} с использованием выражения $\varphi_2 = \varphi_1 \cdot u_{21}$. Тогда уравнения производящей поверхности с учётом выражений (3) в системе координат $x_1y_1z_1$ примут следующий вид:

$$x_1 = f_1(\lambda) - r_1;\ y_1 = f_2(\lambda);\ z_1 = \mu. \qquad (4)$$

Запишем уравнение производящей поверхности в векторной форме, которые представляют собой производящий исходный контур в непрерывном станочном зацеплении:

$$\vec{r}_1(\lambda, \mu) = [f_1(\lambda) - r_1]\vec{i} + \mu\vec{k}. \qquad (5)$$

Найдем векторы касательных к прямым $\lambda = const$ $\mu = const$ расположенным вдоль и поперек поверхности зуба:

$$\vec{r}_1^{(\lambda)} = f_1'\lambda\vec{i} + f_2'\vec{j};\ \vec{r}_1^{\mu} = \vec{k}. \qquad (6)$$

Для определения непрерывного станочного зацепления необходимо чтобы выдерживалось уравнение (2), следовательно необходимо определить вектор нормали к контактирующим поверхностям [3]:

$$\vec{N} = \left(\vec{r}_1^{\lambda} \times \vec{r}_1^{\mu}\right). \qquad (7)$$

Единичный вектор нормали в проекциях на координатные оси запишем в следующем виде:

$$n_{x1} = f_2' \Big/ \sqrt{(f_1')^2 + (f_2')^2};\ n_{y1} = f_1' \Big/ \sqrt{(f_1')^2 + (f_2')^2};\ n_{z1} = 0. \qquad (8)$$

Относительную скорость скольжения $\vec{V}^{(12)}$, входящую в выражение (2) найдем в пространственном станочном зацеплении в следующем виде:

$$V_{x1}^{(12)} = -f_2(1 - u_{21}\cos\gamma) - \mu u_{21}\sin\gamma\cos\varphi_1 - a_w u_{21}\cos\gamma\sin\varphi_1;$$
$$V_{y1}^{(12)} = (f_1 - r_1)(1 - u_{21}\cos\gamma) + \mu u_{21}\sin\gamma\sin\varphi_1 - a_w u_{21}\cos\gamma\cos\varphi_1; \qquad (9)$$

$$V_{z1}^{(12)} = u_{21}\sin\gamma[(f_1 - r_1)\cos\varphi_1 - f_2\sin\varphi_1 + a_w].$$

Уравнение непрерывности станочного зацепления выполняется при формообразовании гиперболоидной инструментальной поверхности. Для изготовления такой поверхности в данной работе были использованы токарные станки с ЧПУ, позволяющие токарному резцу двигаться вдоль трех независимых систем координат. Результирующим движением при формообразовании инструмента, является движение резца вдоль прямолинейной образующей гиперболоидной заготовки.

После получения гиперболоидной основной инструментальной поверхности необходимо из нее изготовить производящую поверхность. Для этого необходимо пройти весь необходимый технологический цикл создания инструмента. Это прежде всего изготовление стружечных канавок на горизонтально-фрезерном станке при помощи делительной головкипри помощи дисковой двух угловой фрезой. При этом шпиндель повернут на угол γ. Необходимо отметить, что передний угол на гиперболоидном инструменте может быть изготовлен под любым углом, в зависимости от того, какой материал будет обрабатывать гиперболоидная фреза. Такое положение обусловлено тем, что основной инструментальный червяк совпадает с производящим червяком. Следовательно, сконструированная гиперболоидная фреза имеет, как геометрические так и кинематические задние углы, следовательно не затылуется. В дальнейшем гиперболоидная фреза подвергается термообработке после которой шлифуется по передним граням на станках модели 3673 или на универсально-заточных станках в делительной головке.

Необходимо отметить, что отсутствие операции затыловкипредложенного гиперболоидного инструмента повышает его точность. Благодаря улучшенному профилю поверхности зуба уменьшаются в несколько раз затраты машинного времени на изготовление такого инструмента, существенно снижает трудоемкость его изготовления, а также повышается технологичность и точность его изготовления.В гиперболоидном инструменте прямолинейная образующая однополосного гиперболоида, находящаяся между любым большим торцом и горловым сечением будет отходить от нарезаемой поверхности цилиндрического зубчатого колеса. Передняя режущая грань гиперболоидной многозаходной фрезы всегда находится на большем торце. Однако необходимо также отметить, что выбор левого или правого торца однополосного гиперболоида в дальнейшем определяет направление вращения.

Для создания гиперболоидного инструмента изготовлялся основной червяк с количеством зубьев $z_2 = 16$, модуль нормальный $m_n = 1$ìì , угол наклона зуба в горловом сечении $\beta = 60^\circ$. Нарезание производилось при помощи токарного резца с прямолинейным профилем. При нарезании червяка глубина резания была увеличена на $0{,}5m$ с целью получения глубины впадины зуба на гиперболоидной заготовке на величину $0{,}25m_n$ с целью получения радиального зазора между контактирующими зубьями гиперболоидного инструмента и нарезаемого зубчатого колеса. Ширина гиперболоидногоинструмента была принята равной 20мм.

Список литературы: 1. Гавриленко В.А. зубчатые передачи в машиностроении. М.: Машгиз, 1962.-531 с**. 2.** Гохман Х.И. Теория зацепления, обобщенная и развитая путем анализа. Одесса, 1986.–157с. **3.** Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машиностроение, 1984. – 272 с. **4.** Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений /Ф.Л.Литвин.– М.: Наука, 1968, 584 с. **5**. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. М., изд-во «Машиностроение», 1967.–372с.**6.** Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов / П.Р.Родин. – К.: Вища школа, 1990. – 424 с. **7.** Цвис Ю.В. Профилирование режущего обкатного инструмента /Ю.В. Цвис–М.:Машгиз,1961,155 с.

УПРАВЛЯЕМОЕ ОСЕВОЕ НАГРУЖЕНИЕ РОТОРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВ НА БАЗЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Савин Л.А., Сытин А.В., Тюрин В.О. *(ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия)*
Тел.: +79030294778; E-mail: v7a7l@mail.ru

Abstract: *The paper considers the process of applying external load to fluid-film bearings using traditional means for this purpose, as well as its improvement using controllable mechatronic devices. This approach provides more flexible, controllable and fast experimental studies in comparison with the traditional approach. The proposed approach with using mechatronic loading devices is illustrated with the description of the test rig with an electromagnetic drive.*
Key words: *test rig, fluid-film bearings, axial load, mechatronic device, proportional electromagnets.*

Полноценность любого научного изыскания подтверждается наличием экспериментальных исследований моделируемого объекта. Целью экспериментального исследования является проверка адекватности построенной математической модели, реальное воспроизведение процессов моделирования, подтверждение теоретических обоснований. Поскольку роторно-опорный узел является наиболее нагруженным и ответственным элементом роторной системы, то основные характеристики, такие как ресурс работы, надежность, экономичность, зависят от работоспособности опорных узлов. Кроме того, если обозначенные выше характеристики можно считать общими для всех видов подшипников, то дополнительными требованиями для опорных узлов различных машин и агрегатов являются: сохранение работоспособности в условиях значительных термических деформаций, высокая демпфирующая способность и предельная быстроходность. Для экспериментальных исследований опор скольжения часто применяют специализированные стенды, включающие в себя, как правило, электродвигатель и ротор на исследуемых опорах скольжения. Однако не менее важной составляющей данных стендов является система нагружения ротора, которая позволяет исследовать подшипники скольжения под действием широкого спектра внешних сил. Базовые конструкции большинства экспериментальных стендов предполагают фиксированное поэтапное нагружение при помощи набора грузов. При этом для смены грузов, необходимо останавливать привод вращения, а запись показаний производится каждый раз по команде оператора. Все это требует значительных временных затрат, не позволяя оценить промежуточные значения и переходные процессы нагружения.

Наиболее простым способом нагружения ротора в экспериментальных установках по исследованию подшипников скольжения является применение нагрузочных дисков [1]. Экспериментальный стенд (рис. 1а) состоит из вала 1, приводимого в движение электродвигателем 13 и вращающегося в двух подшипниковых узлах: радиальном лепестковом 2 (рис. 1б) и радиально-упорном 3 (рис. 1в). В подшипниковом узле 3 устанавливается сменная втулка 4, которая представляет собой подпятник упорного подшипника жидкостного трения. Подшипниковые узлы 2 и 3 имеют отверстия для крепления датчиков перемещения 5 в радиальном и осевом направлениях. Подшипниковые узлы закреплены в стальном корпусе 6, который имеет отверстия с резьбой для крепления элементов системы подачи смазочного материала 7 и датчиков давления 8. Стальной корпус 6 крепится к раме 9, установленной на массивной станине 10. Нижняя часть рамы 9 представляет собой герметичный резервуар с системой слива 11 смазочного материала для проведения испытаний опор «затопленного» типа [2]. Для наблюдения за

экспериментом стенки резервуара выполнены из оргстекла. Нагружение подшипников осуществляется через подвижный нагрузочный диск 12, который устанавливается на упорный подшипник качения.

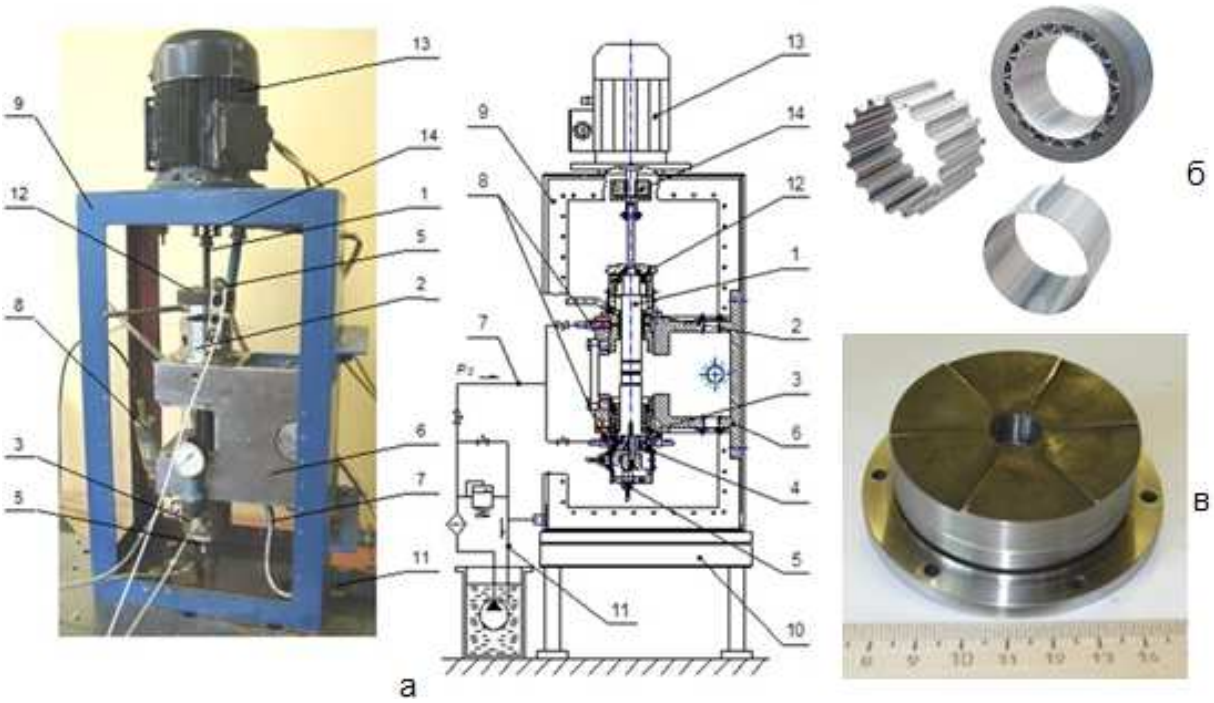


Рис. 1. Экспериментальный стенд: а – установка для исследования подшипников скольжения: б – радиальный лепестковый, в – гидродинамический упорный

Для решения поставленных ранее задач в работе предлагается конструкция устройства нагружения, которое содержит пропорциональный электромагнит ПЭМ10 [3] и механический преобразователь рычажного типа, обеспечивающее возможность осевого нагружения при любой частоте вращения ротора, контролируя величину силы и перемещения с возможностью их плавного регулирования по заранее разработанной математической модели или вручную оператором. На рис. 2 представлен общий вид управляемого устройства осевого нагружения, который содержит: пропорциональный электромагнит 1 с датчиком обратной связи 2, который крепится уголком 3 к основанию 4. Датчик усилия 5 дополняет информационно-измерительную систему и крепится уголком 6 к вращающемуся на оси 7 рычагу 8. С другой стороны рычага крепятся ролики 9, закрепленные осями 10, давящие на диск 11, закрепленный на валу 12. Ось рычага закреплена на цилиндре 13. Собирается такое мехатронное устройство при помощи винтов 14, 15 и 17 и гаек 16. Данная компоновка позволяет установить все перечисленные элементы без изменения габаритов корпуса.

Сущность способа, реализуемого в процессе работы управляемого устройства осевого нагружения заключается в плавном изменении величины осевого нагружения пропорциональным электромагнитом с регистрацией величины нагружения и перемещения сердечника электромагнита. При включении пропорциональный электромагнит через рычаг давит на закрепленный на валу диск. При этом встроенные в систему датчики позволяют отслеживать одновременно усилия на ротор и его осевые перемещения. Система функционирует по заданному математическому закону, а также величина осевого усилия на ротор может изменяться электронными регуляторами в реальном времени [4].

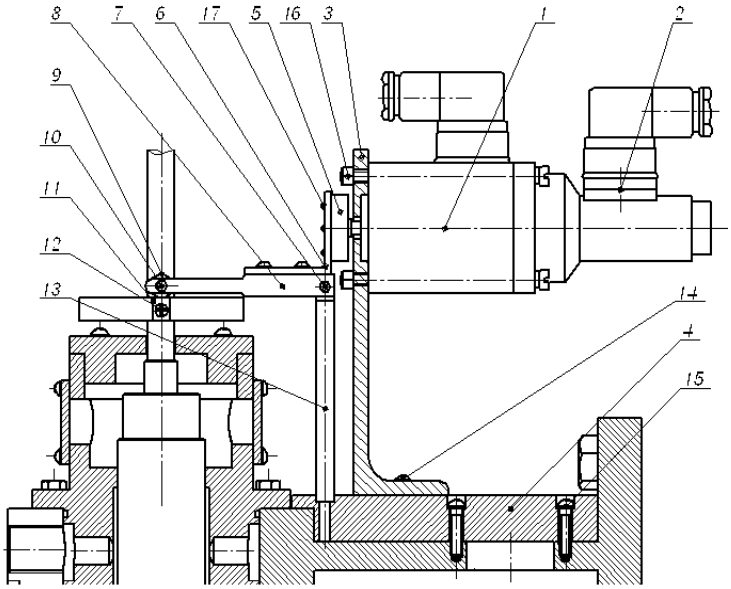


Рис. 2. Общий вид управляемого устройства осевого нагружения

Представленное устройство осевого нагружения обладает простотой конструкции и отсутствием необходимости внесения значительных изменений в общую компоновку роторной машины, позволяя реализовывать самый широкий спектр изменения осевой возмущающей силы. Предлагаемое устройство внедряется в информационно-измерительную систему и систему управления и позволяет расширить функционал нагрузочных устройств. Путем подачи на пропорциональный магнит управляющего сигнала возможно проводить динамическое нагружение ротора экспериментальной установки, при этом, используя известные зависимости между величиной управляющего сигнала и соответствующим усилием прижатия, возможно проводить математическое моделирование такого воздействия.

Регулирование такого магнита возможно, как по силе (рис 3а), так и по положению (рис. 3б). На вход, через потенциометр 1, подается напряжение на электронный усилитель 3, где происходит преобразование в соответствии со значением напряжения в электрический ток нагрузки. Электрический ток, протекая по обмотке катушки 5, создает электромагнитное поле, которое вызывает продольное смещение подвижного якоря 3 (рис. 3в) с силой, пропорциональной силе тока.

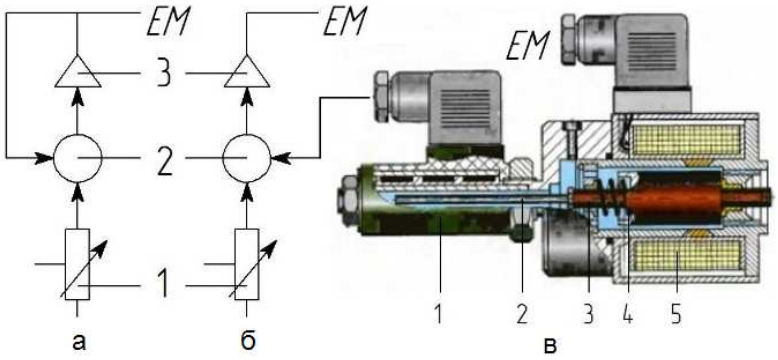


Рис. 3. Структурно-функциональная схема пропорционального электромагнита

Наличие обратной связи по току, значение которого сравнивается с заданным входным сигналом в узле суммирования, обеспечивает поддержание силы тока, а таким

образом, и силы, развиваемой якорем, на заданном уровне даже при изменении внешнего сопротивления якорю. Возврат якоря в исходное состояние при снятии управляющего сигнала осуществляется пружиной 4 [5,6].

На рис. 4 изображена система управления мехатронным устройством осевого нагружения, которая базируется на комплектующих фирмы National Instruments и программном продукте Labview.

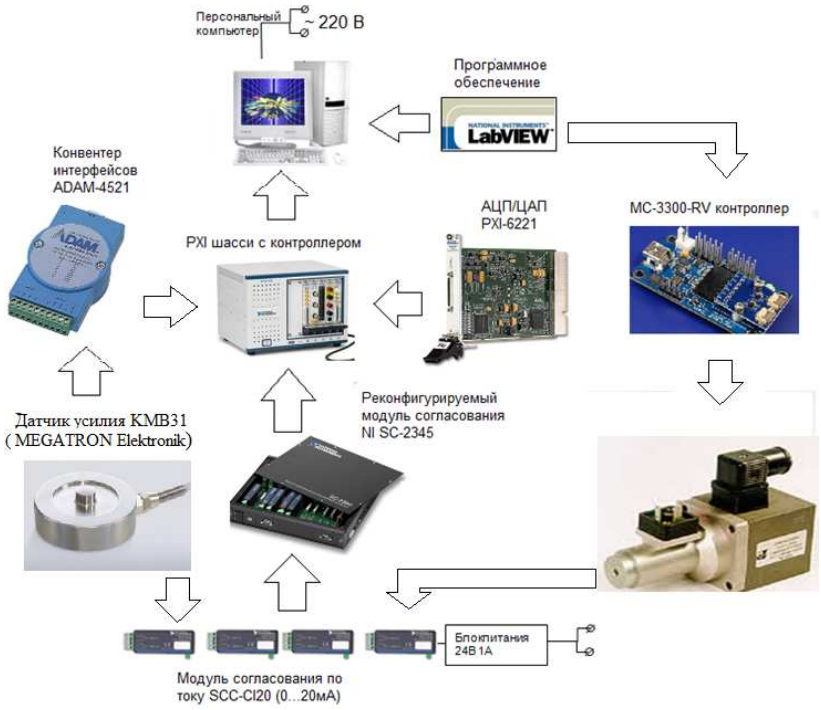


Рис. 4. Система управления устройством осевого нагружения ротора

Представленный в статье автоматизированный экспериментальный стенд с осевым нагружением на базе пропорционального электромагнита позволяет минимизировать временные затраты на проведение экспериментальных исследований, обладает гибкой и динамически изменяющейся системой нагружения, максимально приближенной к реальным процессам, обладает широким спектром автоматически изменяемых параметров эксперимента.

Работа выполнена в рамках проекта Министерства образования и науки Российской Федерации № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».

Список литературы: 1. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. - М.: Машгиз, 1963. - 244 с. **2.** Шмитт А. и др. Учебный курс гидравлики: Пропорциональная техника и техника клапанов. Том 2 / Пер. с нем. - Маннесманн Рексрот ГмбХ, 1986. - 258 с. **3.** Электромагнит пропорциональный типа ПЭМ10 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://electromagnit-ek.ru/spetsialnye-elektromagnity/pem-10. **4.** Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления. - СПб.: Профессия, 2003. - 752 с. **5.** ПЭМ10 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.elmagnit.ru/katalog/elektromagnity/spetsialnye-elektromagnity/pem-10. **6.** Медведев Ю.И. Курс лекций по теории автоматического управления. Часть 1: Учебное пособие. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. - 110 с.

ЛОКАЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ЗАКАЛКА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Веремейчик А.И., Батрак В.В., Желткович А.Е.
(БрГТУ, г. Брест, Беларусь)
Тел./ факс: +375-162-32-17-44; E-mail: vai_mrtm@tut.by

Abstract: *For hardening crushing tool to apply plasma hardening of the surface is proposed using the compressed moving plasma arc. The use of such a highly concentrated source of heating allows surface hardening of the product while only wearing his plots, excluding the hardening of the heart, thereby conserving plastic material properties.*
Keywords: *surface hardening, tool, microhardness, temperature, plasma arc.*

Для повышения ресурса работы режущего и дробильного инструмента используются различные методы [1–3]. Проведенные эксперименты позволяют выделить из этих способов поверхностное упрочнение деталей при помощи высокоинтенсивных источников нагрева, применение которых позволяет реализовать процесс упрочнения деталей лишь на незначительную глубину, оставляя пластичной сердцевину детали.

Цель работы состоит в изучении механизма разрушения детали для переработки древесных отходов мебельного и других производств и разработке соответствующих методов увеличения надежности и долговечности при помощи поверхностной плазменной закалки движущейся плазменной дугой.

Проведены исследования износа и упрочнения инструмента измельчителя для дробления древесных отходов. Деталь представляет собой усеченную пирамиду из конструкционной легированной стали 40Х. Внешний вид детали приведен на рис. 1.

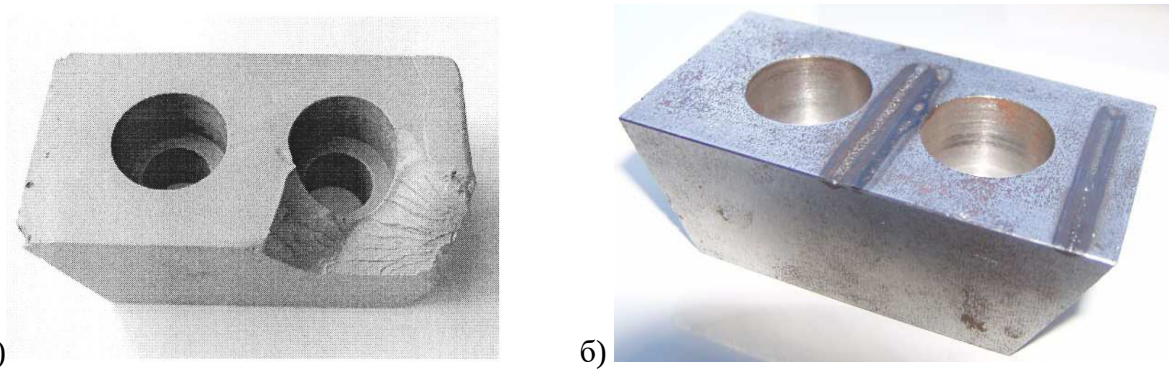


Рис. 1. Измельчители древесного сырья:
а) после эксплуатации при упрочнении объемной закалкой; б) с нанесенной плазменной дорожкой

В процессе изготовления деталь подверглась предварительной объемной закалке. Визуальные обследования показали ряд типичных дефектов – поверхностная коррозия металла, затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне (рис. 1, а).

Результаты проведенных экспериментов позволили установить, что объемная термозакалка не обеспечивает требуемой прочности детали. Для повышения износостойкости в процессе трения и увеличения сопротивляемости пластическому и хрупкому разрушению предлагается применить поверхностную плазменную термообработку детали как наиболее полно обеспечивающую оптимальное сочетание величины вязкости сердцевины детали с высокой поверхностной твердостью. Такое

упрочнение реализуется путем локальной закалки при помощи быстро перемещающегося высокоинтенсивного высококонцентрированного источника тепла – плазменной дуги, генерируемой плазмотроном постоянного тока мощностью до 1,4 кВт, и характеризуется рядом преимуществ:

– достаточно малой глубиной закалки (всего лишь в местах износа) до 0,7 мм при V=12 мм/с; повторно – лишь до 0,1 мм при V=30 мм/с;

– при такой закалке твердость поверхностного слоя заметно выше, чем при объемной закалке;

– отсутствие термических деформаций изготовляемой детали благодаря локальности и кратковременности взаимодействия плазмы с поверхностью металла.

Плазменная установка [4] состоит из плазмотрона постоянного тока, силового источника питания дуги, высокочастотного устройства поджига дуги, системы газоснабжения плазмотрона аргоном и азотом и системы водоохлаждения плазмотрона. Для перемещения плазмотрона с заданной скоростью создано специальное механическое устройство, реализующее плоскопараллельное движение упрочняемой детали относительно плазмотрона. Силовой источник обеспечивает горение дуги при напряжениях 14–35 В и токах до 30 А, а его напряжение холостого хода не превышает 60 В. При закалке различных участков деталей источник позволяет изменять ток от 5 до 30 А.

Плазменная закалка производилась при токах дуги I = 6–30 А и использовании в качестве плазмообразующего газа аргона, а в плазмотроне применено обжимающее дугу сопло с диаметром отверстия 1,2 мм. Скорость перемещения плазмотрона варьировалась от 10 до 30 мм/с. В результате проведенных экспериментов определены оптимальные параметры упрочнения, а именно скорость перемещения плазмотрона V=10–12 мм/с, причем ток дуги составляет I=26 А для плоской поверхности дробильного инструмента, а при закалке режущей кромки I=16 А и V=30 мм/с.

Для исследования свойств упрочненного поверхностного слоя применялись металлографический, фазовый, рентгеноструктурный анализы. Для определения воздействия влияния плазменной дуги на микроструктуру и свойства стали выполнен металлографический анализ, для которого были взяты образцы в форме параллелепипеда с нанесенной плазменной дорожкой. Микростроение материала определялось при помощи оптического металлографического прибора типа NEOPHOT–21 при увеличении закаленного участка в диапазоне 50–1600 раз. Фазовый состав обработанного поверхностного слоя определяли методом дифракции рентгеновских лучей дифрактометром D8DISCOVER серии 2.

Процесс закалки осуществлялся на экспериментальных образцах. Термообработка плазменной струей выполнялась при напряжении дуги U=34 В и скорости перемещения источника 11 мм/с.

Исследованы микротвердость поверхностного слоя в зависимости от расхода аргона, тока дуги, скорости перемещения плазмотрона. Определены зависимости микротвердости стали от скорости движения плазменной дуги по глубине поверхностного слоя. Типичная зависимость микротвердости по глубине при различных скоростях движения плазмотрона представлена на рис. 2. Результаты исследований показали, что значение микротвердости почти в 2 раза выше исходного. Наибольшая глубина упрочненного слоя достигается при V=11 мм/с, а уменьшение скорости движения плазменной дуги приводит к увеличению глубины упрочненного слоя.

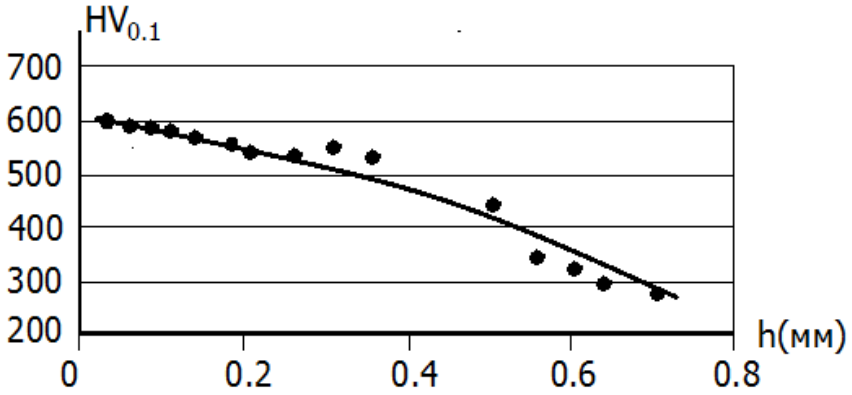


Рис. 2. Распределение микротвердости упрочненного слоя по глубине при V = 11 мм/с

Достигнуто увеличение микротвердости до 500–600 $HV_{0,1}$, причем толщина упрочненного слоя может изменяться в зависимости от скорости упрочнения от 0,4 до 0,7 мм. Кроме того, изучено влияние величины тока дуги на микротвердость и глубину закаленного слоя. Эти данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. Увеличение твердости в зависимости от глубины при различных токах

	Глубина h, мм	0,01	0,015	0,2	0,25	0,3	0,375	0,4	0,5	0,6	0,7
I=28 A	Твердость $HV_{0,1}$	590	580	575	585	580	575	570	515	500	410
	Коэффициент увеличения микротвер-дости	2,05	2,02	2,00	2,04	2,02	2,00	1,98	1,79	1,74	1,08
I=24 A	Твердость $HV_{0,1}$	560	500	490	470	450	390	340	310	290	295
	Коэффициент увеличения микротвер-дости	1,95	1,74	1,71	1,64	1,57	1,36	1,18	1,08	1,01	1,03

Как показали исследования, значительное влияние на формирование структуры материала поверхностного слоя и микроструктуру оказывает также среда, в которой горит дуга. При термообработке стали плазменной струей в защитной среде азота четко наблюдаются все три характерных слоя, которые видоизменяются при различных расходах защитного газа. Во внутренней зоне, плавно переходящей в исходный металл наблюдается преимущественная ориентировка зерен (текстура), которая возникает вследствие пластической деформации и аналогичной структуре ядра материала. Граница этой зоны соответствует глубине теплового влияния плазменной струи. Вторая зона состоит из равноосных зерен рекристаллизованного материала. Этот слой был подвержен расплавлению и при такой температуре произошел процесс перекристаллизации.

Поверхностный слой обработанной стали содержит дендритную структуру, возникающую в процессе перекристаллизации материала. Дендритная структура материала хорошо наблюдается при увеличении ×675, она возникла вследствие быстрого охлаждения нагретого материала. Обследование закаленных образцов показало, что увеличение тока дуги ведет к значительному расширению зоны теплового воздействия плазменной струи.

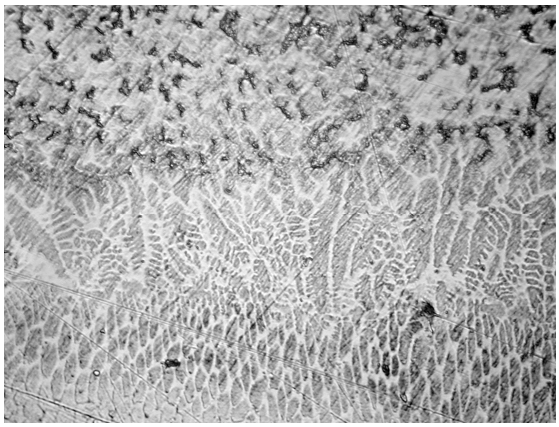


Рис. 3. Микроструктура стали при токе дуги I = 15 А (×675)

Проведены исследования фазового состава упрочненного слоя стали методом дифракции рентгеновских лучей. Сравнение фазового состава поверхностного слоя образцов, обработанных плазменной струей в защитных средах азота и аргона, показали значительное отличие.

Анализируя результаты рентгеноструктурных исследований, установлено, что при воздействии плазменной струи в защитной среде азота в фазовом составе стали образуются карбиды и нитриды железа – гексагональная фаза типа ε, что объясняется диффузионным насыщением азотом и углеродом исходного материала и происходящими химическими процессами.

Экспериментально подтверждена возможность закалки при наложении соседних дорожек друг на друга с расстояниями между их осями, равном 0,4 мм; при этом микротвердость составила 532–580 HV.

Проведено исследование температурных полей при закалке режущей кромки измельчителя. Для расчетов использовался конечно-элементный комплекс ANSYS. В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам созданной дискретной модели пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде конвекции. На всех поверхностях модели задавалась конвекция, т.к. температура плазменной струи в центре составляет около T_0=6000 °С. Так как тепловой поток плазменной струи распределяется по ширине пятна нагрева по закону, близкому к распределению Гаусса, то на нагреваемой поверхности коэффициент конвекции задавался различным по ширине пятна нагрева в соответствии с законом нормального распределения. В результате теоретических исследований для различных режимов поверхностной закалки получены распределения температурных полей.

Список литературы: 1. Спиридонов Н.В. и др. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. – Мн. «Вышэйшая школа». – 1988. – 158 с. **2.** Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 485 с. **3.** Кундас С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313 с. **4.** Сазонов М.И., Веремейчик А.И., Хвисевич В.М. Исследование свойств поверхностного слоя сталей при плазменной закалке // Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: матер. V Дальневосточной конф. с междунар. участием, Комсомольск-на-Амуре, 18-21 сентября 2018 г. / редкол.: А.И. Евстигнеев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 32–39.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ

Симкин А.З., Можаева Т.П., Проскурин А.С. *(БГТУ, г. Брянск, Россия)*
Тел./Факс: +7 (4832) 566211; E-mail: goa-bgtu@mail.ru

Abstract: *The basics of designing processes of quality management system (QMS) of the organization are considered. The integration of the IDEF0 model and the methodology of functional cost analysis (FSA) in the QMS for the correct design of processes, providing for rational structuring and justification of the costs of their operation is justified. The expediency of this approach to ensure the quality of QMS process management is argued.*
Keywords: *quality management system, process of the quality management system, IDEF0, functional-cost analysis of processes.*

Сегодня эффективное функционирование системы менеджмента качества (СМК) организации предусматривает, в том числе обеспечение качества проектирования ее процессов. Наличие большого спектра инструментов и технологий, позволяющих корректно спроектировать процессы СМК, свидетельствует о неослабевающем интересе ученых и практиков к данной проблематике.

Проектирование процессов как процедура идет по пути интегрирования инструментов (QFD, CE, DFMEA и пр.), позволяющих разработчику получить четкие ответы на следующие ключевые вопросы:

- «что?» – целевое предназначение процесса в СМК организации;
- «для чего?» – цель процесса, выраженная в показателях и индикаторах его результатов;
- «кто?» – руководитель процесса, отвечающий за его стабильность и эффективность;
- «где?» – пространственная идентификация процесса, определение места функционирования процесса;
- «когда?» – временная идентификация процесса, установление периода функционирования процесса.
- «почему?» – несоответствия в структуре процесса, влияющие на достижение результатов;
- «сколько?» – затраты на процесс, нахождение баланса между стоимостью и значимостью процесса.

В этой связи идентификация инструментов и технологий, позволяющих осуществить корректное проектирование процессов СМК организации, вызывает, несомненно, научный и практический интерес. Для решения данной проблематики перспективным является интегрирование методологии IDEF0 и функционально-стоимостного анализа (ФСА) для рационального структурирования и обоснования затрат на функционирования процессов.

Под процессом в стандартах [1, 2] понимают совокупность взаимосвязанных и (или) взаимодействующих видов деятельности, преобразующих входы в выходы в продукцию как результат процесса. Процесс протекает в соответствии с управляющими директивами, вырабатываемыми на основе целей деятельности, и наличием ресурсов (информационных, финансовых, материально-технических, человеческих), определяемых возможностями и ограничениями, создаваемыми другими процессами и внешней средой организации.

Взаимосвязанные и взаимодействующие процессы формируют систему – некое множество структурно и функционально взаимосвязанных элементов, образующих устойчивое единство, т.е. целостность. Всякий процесс является в то же время частью

другого, более обширного процесса, а его компоненты и подпроцессы, в свою очередь, могут изучаться как самостоятельные процессы, что подтверждает принцип иерархичности их строения. Отдельные уровни системы обуславливают определенные аспекты ее поведения, а ее целостное функционирование является результатом взаимодействия всех ее сторон, уровней [3].

Исходя из данного допущения, множество процессов задает некоторую структуру (от латинского *structure* – строение, расположение, порядок – совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих сохранение его основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях), в рамках которой реализуются функции. Функция выступает как сущность объекта, а процесс – как форма его проявления. Функция (от латинского *functio* – исполнение, осуществление) – описание деятельности, процесса или преобразования, которое определяет, что должно быть выполнено. В этой связи представляется целесообразным совмещение структурного и функционального подходы в проектировании процессов. Развиваясь, структура претерпевает качественные и количественные изменения. Если структура не соответствует функциям, то ее необходимо подвергать коррекции.

Традиционно для описания производственно-технических и организационно-экономических систем, которые могут быть представлены в виде совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих процессов, т.е. в виде сети процессов, разработаны специальные языки, среди которых наибольшее применение в настоящее время нашел IDEF0 [4]. IDEF0 применяется для создания функциональной модели, отображающей структуру и функции системы, а также протекающие в ней потоки информации и материальных объектов. Одной из задач IDEF0-методологии является описание двух типов моделей объекта: реального и эталонного, что является необходимым для реинжиниринга процессов, определяющих производство продукции (услуг).

Графическая визуализация процесса значительно упорядочивает его описание и способствует созданию целостной картины исследуемых функций, чего трудно добиться вербальными средствами. Каждая описываемая система содержит контекстную диаграмму верхнего уровня, обозначаемую как А–0 (А минус 0). Она содержит один блок, имя которого общее для всей системы. Стрелки на этой диаграмме отображают связь рассматриваемого объекта с внешней средой. Пример контекстной диаграммы А–0 приведен на рис. 1.

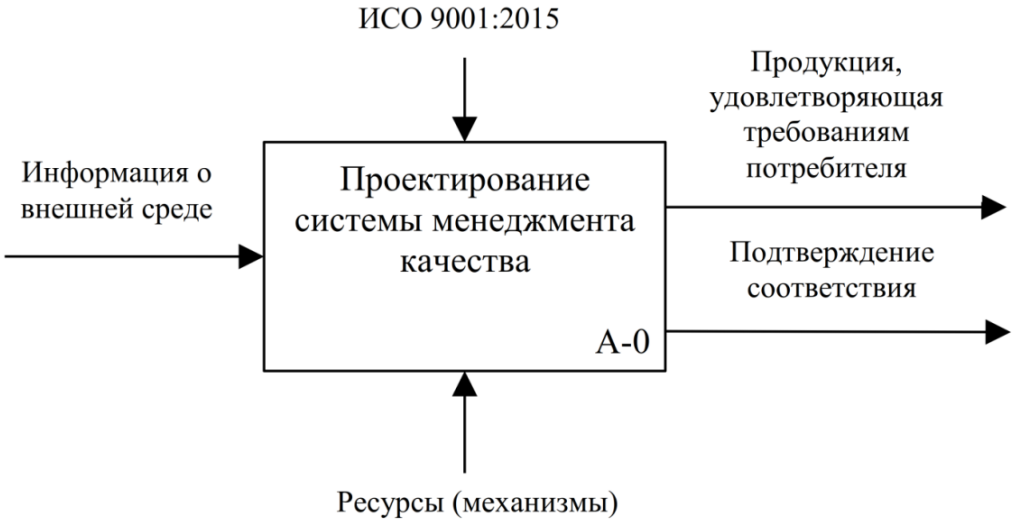


Рис. 1. Пример контекстной диаграммы А–0

Контекстная диаграмма позволяет получить информацию об интерфейсах лишь одного блока рассматриваемого процесса. С целью детализации информации о сущности процесса предполагается декомпозиция контекстной диаграммы на функциональные подпроцессы путем создания дочерних диаграмм. В свою очередь, каждый из подпроцессов дочерней диаграммы может быть декомпозирован и представлен дочерней диаграммой более низкого уровня (рис. 2).

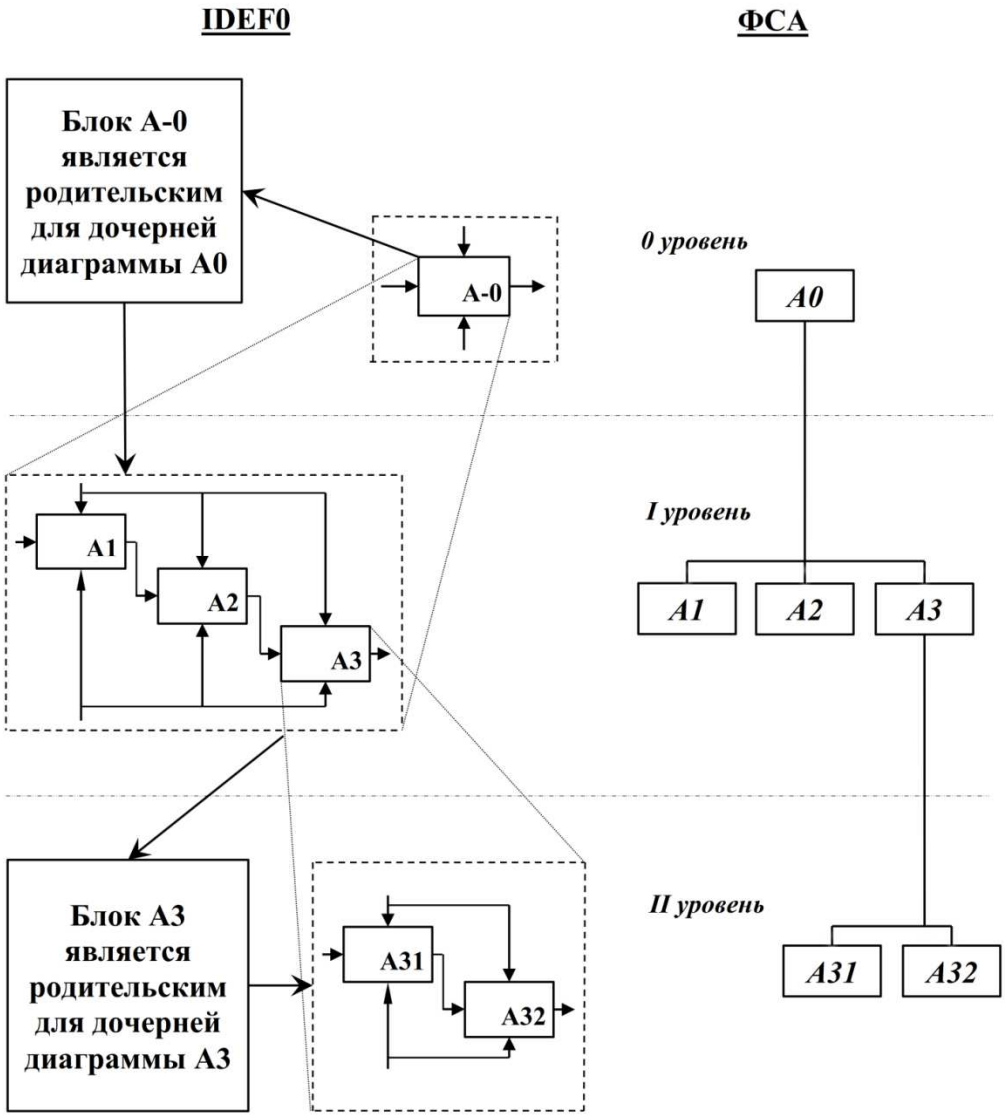


Рис. 2. Пример декомпозиции функциональной диаграммы А–0
на основе IDEF0-методологии и ее функциональная модель на основе ФСА

Корректно структурированные процессы позволяют, в частности:

- визуализировать деятельность по производству продукции (услуг) в виде модели процессов, отражающих идеальную, с точки зрения высшего руководства организации, взаимосвязь и взаимозависимость процессов;
- снизить у персонала организации уровень неопределенности представлений о месте и роли выполняемых ими процессов в увеличении ценности продукции (услуг);
- определить индикаторы, позволяющие персоналу, руководителям организации и всем заинтересованным лицам объективно оценивать результативность и эффективность процессов.

Задачу по оптимизации процессов путем выявления среди них и исключения дублирующих или малоэффективных функций, минимизации затрат на их исполнение решает функционально-стоимостный анализ. Привлекательным для совершенствования процессов СМК в методологии ФСА является основополагающий принцип – изъятие из исследуемого объекта (продукции, услуги, процесса и т.д.) элементов, не несущих должной функциональной нагрузки.

Построение функциональной модели процессов менеджмента на основе ФСА производится в табличной форме или в виде иерархической схемы, изображающей сгруппированные функции исследуемого объекта в виде уровней (ярусов), располагаемых слева направо или сверху вниз (рис. 2). Проведение ФСА применительно к процессам СМК может быть представлено следующим алгоритмом [5]:

1. Формулирование функций исследуемого процесса и их классификация с учетом произведенного структурирования на основе IDEF0, в частности: главная функция (контекстная диаграмма А–0) – определяет назначение процесса в целом; основная функция (функциональная диаграмма А0) – создает необходимые условия для осуществления главной функции; вспомогательная функция (дочерние диаграммы функциональной диаграммы А1, …, *n*) – способствует реализации основных функций.

2. Определение значимости функций – весомости группы функций (групповой весомости), находящихся на одном уровне функциональной модели, и относительной важности функций – весомости функций (уровневой весомости) по отношению к процессу анализа в целом.

3. Определение затрат, приходящихся на выполнение функций, в абсолютном и относительном виде. Затраты могут быть рассчитаны на основе известных в практике менеджмента методик.

4. Сопоставление количественных оценок функций с затратами на их исполнение с целью выявления несоответствий («зон дисбаланса»), т.е. превышения затрат на функции над их значимостью в структуре объекта (процесса) в целом.

5. Выявление и устранения причин несоответствия между значимостью (важностью), качеством и затратами.

Методология ФСА позволяет установить, где причинно-следственные связи процессов являются не корректно сформированными, что создает предпосылки для их совершенствования.

Проектирование процессов на основе интегрирования методологии IDEF0 и функционально-стоимостного анализа, несомненно, будет способствовать повышению их результативности и эффективности в СМК организации.

Список литературы: 1. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. **2.** ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. **3.** Горленко, О.А. Функциональная модель процессов менеджмента образовательной организации / О.А. Горленко, Т.П. Можаева, А.С. Проскурин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 12(73). – С. 87-92. **4.** Горленко, О.А. Процессный подход к менеджменту качества / О.А. Горленко, И.Г. Манкевич; под ред. О.А. Горленко. – Брянск: БГТУ, 2008. – 168 с. **5.** Можаева, Т.П. Функционально-стоимостной анализ в управлении кадровыми процессами предприятия / Т.П. Можаева, А.З. Симкин, А.С. Проскурин // Механика и машиностроение. Наука и практика: матер. междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: СПбФ НИЦ МС, 2018. – №1. – С. 105-109. **6.** Можаева, Т.П. Обеспечение качества кадровых процессов на основе применения функционально-стоимостного анализа / Т.П. Можаева, А.З. Симкин, А.С. Проскурин // Управление качеством: избрн. научн. труды XVIII Международ. научн.-практ. конф. (14-15 марта 2019 г., г. Москва, ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)»). – М: Пробел-2000, 2019. – С. 229-233.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКИМ ЗАТУХАНИЕМ И ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ В ДЕМПФИРУЮЩИХ СПЛАВАХ ЖЕЛЕЗА

Скворцов А.И., Мельчаков М.А. *(ВятГУ, г. Киров, Россия)*
Тел. +7 (8332) 74-24-91; E-mail: skvorcov@vyatsu.ru

Abstract: *Two models of micromechanism of magneto-mechanical damping are analysed. Parameter of viscous damping alloys of iron estimation.*
Keywords: *Damping alloys of iron, magnetic domains, mikromechanisms of magneto-mechanical damping, of viscous damping parameter.*

Введение. В работах [1 – 3] показано, что высокодемпфирующим сплавам Fe характерна крупнозернистая кристаллическая структура и крупнодоменная магнитная структура, а сильное внутреннее трение в них обусловлено, в основном, магнитомеханической природой. Благоприятную для высокого демпфирования доменную структуру в этих сплавах формируют термической, термомагнитной обработками [4 – 6].

Соотношения между магнитомеханическим затуханием и параметрами магнитных доменов в демпфирующих сплавах железа обычно обсуждаются в рамках микромеханизма магнитомеханического затухания, т.е. на структурном уровне, более тонком по сравнению с размером домена. В данном случае рассматриваются процессы, связанные с движением, эволюцией доменных границ.

Результаты и их обсуждение. Одним из микромеханизмов магнитомеханического затухания считается микротоковый механизм. Он заключается в том, что в проводящих металлических материалах, какими являются рассматриваемые ферромагнитные сплавы Fe, рассеяние энергии механических колебаний при движении доменной границы происходит по причине возникновения микротоков в ее окрестности. Эти микротоки возникают из-за вращения спинов внутри доменной границы при ее движении, чему соответствуют локальные изменения магнитной индукции.

Согласно работе [7], параметр вязкого затухания, обусловленный микротоками, определяется уравнением

$$\beta_т = nM_s/p,$$

где величина n равна, соответственно, 1 и 2 для 90° и 180° доменных границ, M_s – намагниченность насыщения домена, p – подвижность доменной границы:

$$p = 4/\mu_0^2\sigma M_s(h+4\Delta),$$

где μ_0 – магнитная постоянная, σ – удельная электропроводность, h – размерный параметр доменной границы, Δ – эффективная толщина доменной границы.

Если предположить, что вклад 90° и 180° доменных границ в затухание одинаков, основанием чему является вывод работы [8] о примерном равенстве вклада 90° и 180° доменных границ в мощность вихретоковых потерь, тогда

$$\beta_т = 1{,}5\mu_0^2 M_s^2(h+4\Delta)/4\rho \approx 0{,}38\mu_0^2 M_s^2(h+4\Delta)/\rho,$$

где ρ – удельное электросопротивление. Эта формула позволяет оценить параметр вязкого затухания для демпфирующих сплавов Fe. Оценочный расчет для сплава Х16 дает $\beta_т=6{,}3\cdot10^{-3}$ Н, что означает равенство параметра $\beta_т$ силе сопротивления магнитоэлектрической природы величиной $6{,}3\cdot10^{-3}$ Н перемещению доменной границы площадью 1 м^2 со скоростью 1 м/с.

Сильное внутреннее трение в высокодемпфирующих сплавах Fe, в частности, максимум магнитомеханического затухания на его амплитудной зависимости связаны с перестройкой доменной структуры при циклических колебаниях [9]. Перестройка сопровождается изменением площади 90° и 180° доменных границ, их взаимным превращением друг в друга при циклической деформации. Очевидно, что эти процессы, как и движение доменных границ, сопровождаются изменением магнитной индукции во времени, циркулированием микротоков. Реальная картина изменения доменной структуры

при ее перестройке, распределение при этом микротоков сложны и для их наблюдения требуются специальные методы.

Другим микромеханизмом магнитомеханического затухания считается деформационный механизм. Ф. М. Дунаевым предложен механизм рассеяния энергии за счет магнитострикционной деформации в движущейся доменной границе [10]. Магнитострикционной деформации соответствует параметр параметр вязкого затухания β_λ, независимый от электросопротивления. Оценочный расчет, проделанный в работе [11], дал значение β_λ, примерно такое же, как и параметра, обусловленного микровихревыми токами, $\beta_в$.

Следует отметить, что микротоковый механизм предполагает подтвержденный практикой процесс рассеяния энергии в виде тепла. А в работах [10, 11], посвященных деформационному механизму, не рассматриваются сопровождающие магнитострикционную деформацию в доменных границах конкретные механизмы, которые приводили бы к рассеянию энергии.

Обобщения. Из двух моделей микромеханизма магнитомеханического затухания, связанного с движением, эволюцией доменных границ: микротокового и деформационного, – наиболее соответствующий реальному микромеханизму магнитомеханического затухания является микротоковый, учитывающий, в частности, толщину доменных границ. При этом механические колебания вызывают в ферромагнетиках локальные изменения намагниченности путем смещения доменных границ, изменения конфигурации доменной структуры, площади и типа доменных границ. Движение, эволюция доменных границ, чему соответствует изменение магнитной индукции во времени, приводит к возникновению микротоков в их окрестности. Энергия токов рассеивается в виде джоулева тепла.

Использование более детальной формулы для параметра вязкого затухания, обусловленного микротоками, позволила сделать оценочный расчет этого параметра для демпфирующего магнитомягкого коррозионностойкого сплава Х16.

Список литературы: 1. Скворцов А. И., Кондратов В. М., Потехин Б. А., Борисов А. А. Связь магнитомеханического затухания с параметрами магнитокристаллической структуры в сплавах железа // Известия Академии наук. Серия физическая. 1997. Т. 61, № 2. С. 246–248. **2**. Скворцов А. И. Влияние структуры на демпфирующую способность и механические свойства сплавов железа с магнитомеханическим затуханием // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 5. С. 18–25. **3.** Скворцов А.И. Анализ неупругости в высокодемпфирующих сплавах Zn–Al, серых чугунах и сплавах железа с магнитомеханической природой внутреннего трения // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 5. С. 42–47. **4.** Скворцов А. И., Скворцов А. А. Влияние термомагнитной обработки на демпфирующие свойства магнитомягких сплавов железа // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. № 10. С. 14–19. **5.** Скворцов А. И., Мельчаков М. А. Демпфирующая способность и структура сплава Fe–15,4% Cr при различных температурах термомагнитной обработки и предварительного отжига // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 4. С. 22–25. **6.** M. A. Melchakov, A. I. Skvortsov, A. A. Skvortsov. Effect of Thermal and Thermal Magnetic Treatment on Damping Properties of Fe–Cr–Al Alloys // Solid State Phenomena, Vol. 265, pp. 611–614, 2017. **7.** О'Делл Т.Н. Ферромагнитодинамика. – М.: Мир, 1983. – 253 с. **8.** Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. – М.: Наука, 1992. – 272 с. **9.** Скворцов А. И. Роль кристаллической и магнитной структур в формировании высокого магнитомеханического затухания в сплавах железа // Физика металлов и металловедение. 1993. Т. 75, № 6. С. 118–124. **10.** Дунаев Ф.Н. О потерях энергии при перемагничивании ферромагнетиков // Физика металлов и металловедение. 1970. Т. 29, № 5. С. 937–946. **11.** Дунаев Ф.Н. О потерях энергии при перемагничивании ферромагнетиков // Физика металлов и металловедение. 1970. Т. 30, № 3. С. 666–668.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНОГО ПАРАМЕТРА КОНИЧЕСКОГО ГРОХОТА НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ

Скорынин Н.И., Малеев В.Б., Кудрявцев А.А. *(ГОУ ВПО «ДонНТУ», ДНР)*
Тел.: +38 (062) 3010339; e-mail: teormeh@fimm.donntu.org

Abstract: *The influence of the angular velocity of the conical screen on the beginning of the section with favorable separation conditions is described.*
Key words: *cone, rotation, separation, angular velocity.*

Разделение многокомпонентных смесей по крупности можно осуществлять различными способами [1]. Одним из них является использование наклонной вращающейся перфорированной поверхности. Процесс проваливания подрешётной частицы зависит от многих факторов [2]. Одним из них является угловая скорость конического грохота.

Относительное движение частицы по внутренней поверхности вращающегося конуса описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений [2]:

$$\left.\begin{aligned} &\ddot{\xi}-\xi\cdot\sin^2\alpha\cdot(\omega-\dot{\psi})^2+f\left[g\cdot\sin\alpha+\xi(\omega-\dot{\psi})^2\cdot\sin\alpha\cdot\cos\alpha\right]\cdot \\ &\cdot\frac{\dot{\xi}}{\sqrt{\dot{\xi}^2+\dot{\psi}^2\xi^2\sin\alpha}}+g\cdot\cos\alpha=0, \\ &\ddot{\psi}-2\frac{\dot{\xi}}{\xi}(\omega-\dot{\psi})+f\left[g\cdot\sin\alpha+\xi(\omega-\dot{\psi})^2\cdot\sin\alpha\cdot\cos\alpha\right]\cdot \\ &\cdot\frac{\dot{\psi}}{\sqrt{\dot{\xi}^2+\dot{\psi}^2\xi^2\sin\alpha}}=0. \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

Динамика процесса проваливания подрешётной частицы размером r_n, находящейся у щели с координатой ξ, через отверстие просеивающей поверхности показана на рисунке 1.

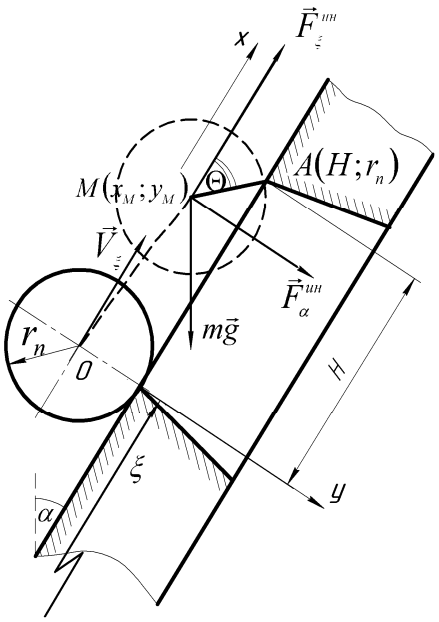


Рис. 1. Динамика процесса проваливания подрешетной частицы через отверстие просеивающей поверхности

К частице приложены силы:

$m\vec{g}$ - сила тяжести,

$\vec{F}^{ин}_{\xi}=-m\vec{a}_{\xi}$ - сила инерции вдоль просеивающей поверхности,

$\vec{F}^{ин}_{\alpha}=-m\vec{a}_{\alpha}$ - сила инерции в направлении, перпендикулярном образующей ротора.

Исследуя условие проваливания по размеру граничного зерна разделения, наибольший интерес представляют частицы, диаметр которых $d_n=2r_n$ близок, а в пределе даже равен ширине щели H. Для таких «трудногрохотимых» частиц встреча с противоположной кромкой щели (в точке A) неизбежна.

Наиболее благоприятное условие проваливания состоит в том, что сумма моментов относительно точки A сил, опрокидывающих частицу в щель ($M+$), больше суммы моментов сил, препятствующих проваливанию ($M-$), т.е.:

$$mg\cdot r_n\cdot\sin(\alpha+\theta)+F^{ин}_{\alpha}\,r_n\cdot\cos\alpha\geq F^{ин}_{\xi}\,r_n\cdot\sin\theta$$

или, после сокращения на r_n и подстановки $F^{ин}_{\xi}=ma_{\xi}$; $F^{ин}_{\alpha}=ma_{\alpha}$, получаем неравенство (2):

$$g \cdot \sin(\alpha+\theta) + a_\alpha \cdot \cos\theta \geq a_\xi \cdot \sin\theta \qquad (2)$$

где $a_\alpha = -\xi\dot{\psi}^2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha$; $a_\xi = \ddot{\xi} - \xi\dot{\psi}^2 \cdot \sin^2\alpha$.

Соотношение между моментами *M*+ и *M*- в зависимости от угловой скорости вращающегося конуса и от положения частицы в выбранной системе отсчёта приведено на рисунке 2.

Одним из путей увеличения количества подрешётных частиц с верхним граничным размером является увеличение протяжённости $\Delta\tilde{\xi}$ участка, на котором выполняется условие (2). Тем самым продлевается время грохочения при благоприятных условиях, т.е. повышается эффективность разделения.

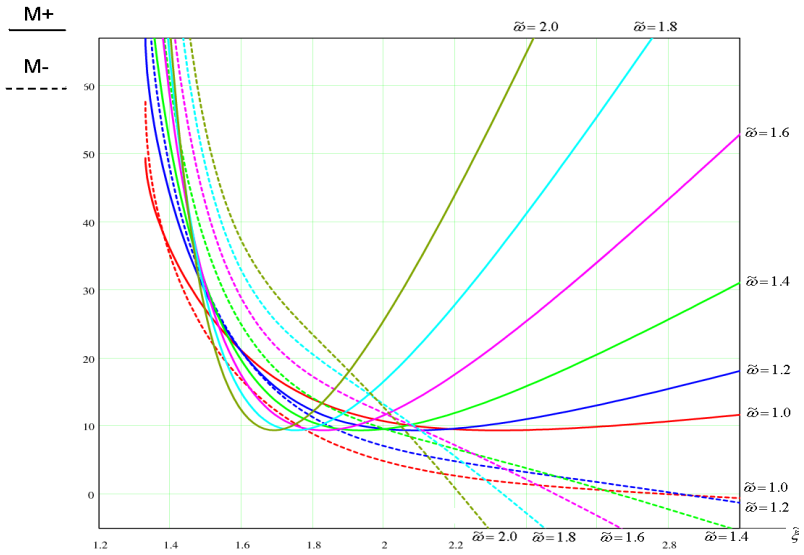


Рис. 2. Соотношение между *M*+ и *M*- в зависимости от угловой скорости конического грохота

Зависимость координаты $\tilde{\xi}+$ начала участка $\Delta\tilde{\xi}$ от угловой скорости конического грохота приведена на рисунке 3. Анализ графика на рисунке 3 показывает, что наиболее благоприятными с точки зрения эффективности сепарации являются малые значения угловой скорости $\tilde{\omega}$ (равные минимальной необходимой для восходящего движения частиц), а также значения более $3\tilde{\omega}$.При небольших угловых скоростях будут меньше динамические нагрузки на подшипники конического грохота. Это благоприятно скажется на долговечности установки. При больших значениях $\tilde{\omega}$ очевидно повысится производительность установки.

Предметом дальнейших исследований является изучение процесса разделения при значениях угловой скорости конического грохота более трёх минимальных.

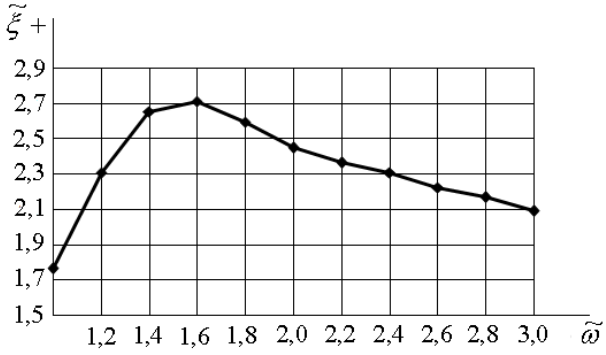


Рисунок 3 – Зависимость координаты $\tilde{\xi}+$ от угловой скорости конического грохота

Список литературы: 1. Авдохин В.М. Обогащение углей: учебник для вузов : в 2 т. Т. 1 : Процессы и машины / В. М. Авдохин ; В.М. Авдохин. - Москва : Горная книга, 2012.; **2.** Малеев В.Б., Журба В.В., Кудрявцев А.А., Малеев А.В. Дифференциальные уравнения относительного движения твёрдых частиц в поле центробежных сил. Вестник СевГТУ. Вып. 80: Механика, энергетика, экология: Сб. научн. тр. / Редкол. А.И. Бохонский (отв. ред.) и др.; Севастоп. нац. техн. ун-т – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 156 с.: ил.; **3.** В.В. Журба, Ф.Н. Булгаков, Б.Б. Зельдин, Л.Н. Горохова Баллистическое обогащение полезных ископаемых //Обогащение полезных ископаемых, Выпуск 35, 1985.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ

Тамаркин М.А, Тищенко Э.Э., Верченко А.В., Коханюк А.Г.
(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)
Тел. (863)2738725; E-mail: tehn_rostov@mail.ru

Abstract: *The article presents the results of studies of the process of waterjet cutting of steel billets. The processing process is described, its theoretical studies are carried out. The theoretical dependence for determining the roughness of the cut surface is obtained. The results of experimental studies of the process, confirming the adequacy of the theoretical dependence. Recommendations on process optimization in the conditions of modern production are given.*
Key words: waterjet cutting of blanks, surface roughness

Среди современных и перспективных методов раскроя заготовок из стали можно выделить метод гидроабразивной резки. Широкие диапазоны обрабатываемых толщин, возможность обработки практически любых по химическому составу сталей без изготовления специальной оснастки, высокая производительность, получение высокого качества поверхности реза, возможность обработки заготовок сложной геометрии, делает этот метод обработки наиболее востребованным в условиях современного заготовительного производства. Немаловажными преимуществами метода также можно считать отсутствие термического воздействия на материал, низкую сила резания, эрозионный характер разрушения, который не способствует развитию внутренних напряжений в зоне реза.

При гидроабразивной резке разрезание материала производится тонкой струей смеси воды и абразива, которые подаются с высокой (сверхзвуковой скоростью) и под высоким давлением. Процесс представляет собой эрозионное разрушение под действием рабочей струи, при котором мелкие частички абразива снимают микростружки с поверхности обрабатываемой заготовки, а вода эвакуирует их из зоны резания. В качестве абразива используют остроконечные измельченные минералы с величиной зерна от 0.1 до 0.3мм. В зависимости от обрабатываемого материала и толщины количество используемого абразива составляет от 100 до 600 г/мин. При производстве заготовок из сталей чаще всего применяют гранатовый песок - природный абразивный минерал, обладающий высокой прочностью, твердостью 7.5-8.0 по шкале Мооса и идеальной формой зерна. Чтобы гарантировать качество резки абразив не должен содержать крупных зерен и пыли.

Несмотря на очевидные преимущества и достоинства рассматриваемого метода получения заготовок процесс гидроабразивной резки изучен недостаточно. Анализ работ таких ученных как Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов, В.Ф. Бабанин, Ю.С. Степанов, М.А. Бурнашев, В.Д. Шапиро, Г.В. Барсуков, D. Arola, M. Ramulu, Y. Zhang, , J Chao, J. Zeng, Шпилев В.В, показал что существуют зависимости для определения размерных характеристик изделия, получаемого методом гидроабразивной резки. Описано влияние режимов резания на точность получения криволинейного профиля заготовки. Предложены возможности увеличения режущей способности, например, путем закручивания струи или дискретной подачей абразива. Однако формулы для определения качества поверхности реза в зависимости от основных технологических параметров обработки (давления струи, зернистости и расхода абразива, подачи сопла, физико-механических параметров материала и т.п.) отсутствуют. Отсутствие адекватных теоретических моделей формирования профиля шероховатости

поверхности реза не позволяет технологу выполнять оптимизацию процесса с учетом требований к заданной шероховатости.

При проведении теоретических исследований процесса гидроабразивной резки сталей выявлены закономерности взаимодействия абразивных частиц с поверхностью обрабатываемой заготовки. Исследовано влияние технологических параметров обработки на шероховатость поверхности реза, а также описан механизм формирования зон реза. По сечению реза при осуществлении процесса наблюдается неравномерность распределения шероховатости и образование так называемых зон гладкого и волнистого реза. Одна зона плавно перетекает в другую. Зона гладкого реза представляет собой равномерную гладкую поверхность с установившейся шероховатостью, а зона волнистого реза - волнистую структуру с выемками, которые представляют собой риски, направленные в сторону обратную направлению подачи режущей струи. Пропорциональность этих зон зависит от режимов обработки.

Основываясь на зависимостях для определения съема металла при единичном взаимодействии абразивного зерна при обработке детали свободным абразивом [1,2], получена зависимость для определения максимальной глубины внедрения абразивной режущей частицы:

$$h_{max} = DK_L \sin\alpha \sqrt{\frac{2P_{дин}\rho_ч}{3c\rho_{см}k_s\sigma_s}} \quad (1),$$

где $\rho_ч$ – плотность материала частиц, кг/м^3; k_s - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта, $P_{дин}$ – динамическое давление смеси, Па; $\rho_{см}$ – плотность рабочей смеси жидкости и частиц кг/м^3, D - диаметр частицы, м; K_L – коэффициент потерь, учитывающий расстояние от сопла до поверхности обрабатываемой детали; c – коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности, σ_s - предел текучести материала детали, МПа., α - угол встречи частицы абразива с поверхностью реза, град.

Получена формула для определения шероховатости поверхности при гидроабразивной резке:

$$Ra = 10{,}18 k_\alpha^{Ra} \sqrt{\frac{h_{max}R}{\sqrt{\lambda}}} \quad (2),$$

где k_α^{Ra} – коэффициент, учитывающий угол падения струи; R – радиус абразивных частиц, м; λ - интенсивность потока событий (число взаимодействий частиц абразивной среды с поверхностью детали в единицу времени на площади квадрата упаковки).

Подставив выражение для определения h_{max} в формулу (2) получим зависимость для расчета шероховатости, которая учитывает число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки λ [1,2]:

$$Ra = 10.18 K_\alpha^{Ra} \sqrt{2R^2 \cdot K_L \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{дин} \cdot \rho_ч}{\lambda \cdot 3 \cdot c \cdot \rho_{см} \cdot K_S \cdot \sigma_S}}} \quad (3).$$

Величина λ - это функция от подачи, количества абразива в режущей струе и глубины реза, на которой рассматривается воздействие частиц среды. Чем меньше подача сопла режущей головки, тем большее количество частиц абразива участвует в формировании шероховатости поверхности реза. При увеличении количества абразива в режущей струе растет и количество полезных соударений с поверхностью заготовки, а значит, улучшается шероховатость поверхности. От глубины измерения шероховатости зависит, какое количество зерен и с какой энергией будут

взаимодействовать с обрабатываемым материалом. Чем больше глубина измерения, тем меньшей энергией обладают частицы, и более грубой получается шероховатость поверхности. Величина λ определена экспериментальным путем [1,2].

Для подтверждения адекватности полученной теоретической зависимости проведен комплекс экспериментальных исследований процесса гидроабразивной резки.

В качестве оборудования использована 5-ти координатная установка для гидроабразивной резки «Flow» с числовым программным управлением. Для изготовления образцов использовалась сталь 30ХГСА в сыром и закаленном состоянии. Такую сталь часто применяют при изготовлении деталей летательных аппаратов.

Измерение шероховатости производили на цифровом профилометре Surtronic 25 фирмы Taylor Hobson. Статистическая обработка результатов исследований выполнялась с использованием программы прикладных и научных расчетов MathCad.

Проводились исследования влияния на шероховатость поверхности образца таких параметров как подача сопла, расход абразива, физико-механические свойства материала, толщина обрабатываемого материала.

При проведении экспериментальных исследований установлено, что на более твердых заготовках шероховатость поверхности стремительно возрастает при увеличении подачи, высота зоны волнистого реза преобладает над зоной гладкого реза. На закаленной стали сквозное разрезание материала прекратилось на более низких значениях подачи, в сравнении с «сырой». Такое явление можно описать падением энергетических параметров струи и эффектом «отражения». Соударяясь с более твердым материалом зерна материала интенсивнее разрушаются, а также большее количество зерен отскакивает в обратном направлении, не вызывая полезного взаимодействия, тем самым мешая следующим зернам попасть в зону резания.

На рис.1 приведена зависимость шероховатости поверхности от подачи при обработке стали 30ХГСА в закаленном состоянии. Сплошной линией показана теоретическая модель шероховатости поверхности, построенная с использованием формулы (3). Результаты экспериментальных исследований изображены точками с доверительными интервалами (доверительная вероятность 95%).

Данные экспериментов показывают, что при увеличении подачи сопла ухудшается шероховатость поверхности реза, растет отношение высоты зоны волнистого реза к зоне гладкого реза. Эксперимент проводился при ступенчатом увеличении подачи через каждые 15мм реза от 5мм/мин до величины, при которой прекращалось сквозное разрезание материала.

При проведении исследований предложен механизм образования зоны волнистого реза. При увеличении подачи, происходит увеличение угла внедрения частиц в материал детали за счет большего отставания режущей струи. При малых углах внедрения происходит съем металла, образование равномерной поверхности. С ростом угла количество отраженных частиц растет, уменьшается количество полезных взаимодействий с материалом. Отраженные частицы препятствуют процессу резания и являются преградой для вновь поступающих в зону резания частиц. При этом происходит непрерывное движение струи в направлении подачи. Угол внедрения растёт, и при достижении определенного отклонения струи, процесс сквозного пробития материала происходит вновь. При этом частицы, соударяясь друг с другом, отскакивают в сторону, и продвигаются в направлении обработанной поверхности, тем самым образуя глубокие борозды. При движении режущей струи по направлению подачи отклонение струи, увеличение угла атаки и вновь пробитие материала повторяется снова. Таким образом, образуется зона волнистого реза, рельеф которой похож на волны, состоящий из впадин и гребней.

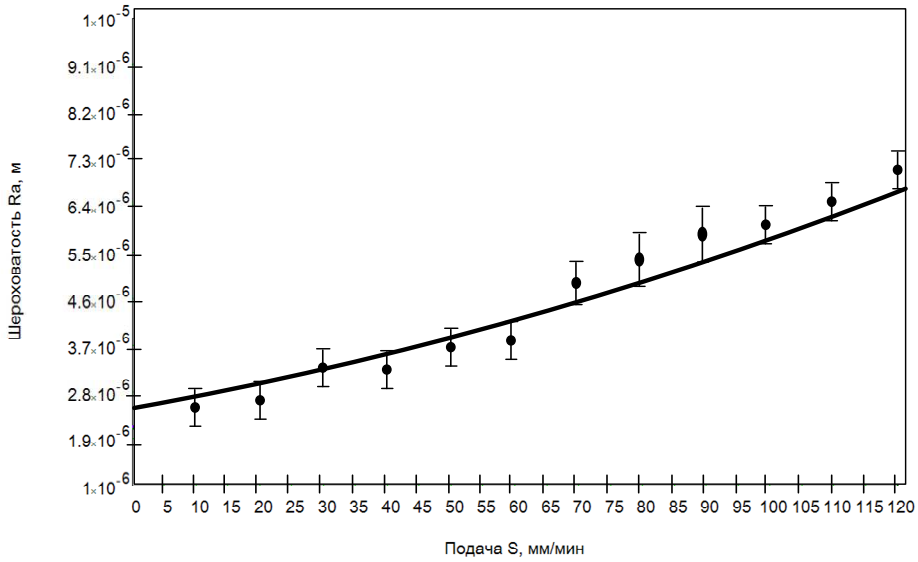


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности реза от подачи на глубине 10 мм

Сравнением теоретических и экспериментальных данных, показывает, что значения, рассчитанные по формуле (3), достаточно точно и адекватно описывают протекание процесса. Расхождение результатов не превосходит 15%.

На основании данных проведенных исследований появляется возможность выполнить оптимизацию процесса гидроабразивной резки по критерию наименьшей себестоимости обработки. Оптимальными режимами резания будут являться те, при которых будет обеспечиваться заданная шероховатость при наименьшей себестоимости реза.

Массив исходных данных будет формироваться в виде постоянных значений параметров обработки (исходная шероховатость, давление струи, длина реза, глубина измерения, размер абразивной частицы и др.) и переменных диапазонов подачи и расхода абразива.

Будем производить расчет числа полезных соударений λ. Затем подставляем эти значения в зависимость для определения шероховатости (3). Далее производим сравнение полученных и заданных значений шероховатости обработанной поверхности. Отсеиваем значения, при которых требования по заданной шероховатости не обеспечиваются. Осуществляем расчет себестоимости реза, и производим выбор тех значений параметров обработки, при которых себестоимость реза будет минимальна.

Применение методики оптимизации технологических процессов гидроабразивной резки прошло промышленные испытания в условиях Механического завода РВПК ПАО «Роствертол».

Список литературы: 1. Верченко А.В. Повышение эффективности технологических процессов гидроабразивной резки деталей: дис. … канд. техн. наук: 05.02.08 / Верченко Алексей Викторович. – Ростов-на-Дону, 2017 г.. – 128с. **2.** Верченко А.В. Исследование шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке / М.А. Тамаркин, А.В. Верченко // Вестник ДГТУ №2(89). – Ростов н/Д: ДГТУ, 2017. – с. 116-130.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Унянин А.Н., Михайлов А.В. *(УлГТУ, г. Ульяновск, Россия)*
Тел./Факс:+7 903 3205351; E-mail: a_un@mail.ru

Abstract: *Studies have been performed to solve the problem of reducing the degree of influence of technological information uncertainty on the process of assigning a mode and identifying the state of the machining process with multiple input and output parameters. Developed principles for the development of rules that are the basis of the knowledge base of expert systems. The difference between the actual and calculated values of the output parameters of the process, obtained during its monitoring, is used as the initial information for assigning the mode and determining the state of the process.*
Keywords:*machining process, expert system, condition, mathematical model, condition.*

Назначение рациональных режимов функционирования технологических процессов, в том числе в обрабатывающей промышленности, является актуальной задачей. Режим механической обработки определяет производительность процесса, качество и стоимость изготовленных деталей. Перспективным путем назначения режима механической обработки является расчет с использованием зависимостей (формул теории резания). Однако математические модели, описывающие взаимосвязь выходных параметров процессов механической обработки с входными, не всегда адекватно отражают эту взаимосвязь. Многие модели получены с использованием многочисленных допущений, не учитывают влияния ряда управляемых и неуправляемых факторов. Поэтому во многих случаях разность между расчетными и фактическими значениями выходных параметров составляет 20…30 % и более, а рассчитанный с использованием этих моделей режим будет далек от оптимального.

Выходные параметры процесса механической обработки изменяются во времени вследствие изменения неуправляемых факторов. Не являются постоянными, в частности, физико-механические свойства материалов обрабатываемых заготовок и режущих инструментов в одной, а тем более в различных партиях. Например, твердость шлифовальных кругов одной характеристики может колебаться в довольно широких пределах, особенно, если эти круги изготовлены на разных предприятиях.

Таким образом, чтобы процесс механической обработки являлся оптимальным в условиях неопределенности технологической информации и под влиянием контролируемых и неконтролируемых факторов различного рода, необходима его диагностика с целью определения управляющих воздействий, позволяющих регулировать процесс.

Задача диагностики и управления объектами, в том числе технологическими процессами, в условиях неопределенности технологической информации связана с проблемой распознавания образов, т.е. установлением вида или класса образа на основе его признаков. В области технической диагностики и управления известны два широко распространенных метода классификации и анализа образов: применение «словарей неполадок» и кластерный анализ [1, 2].

В последнее время получили развитие автоматизированные системы управления с элементами искусственного интеллекта, реализующие переход от сложных математических расчетов к использованию логических выводов на основе теории нечеткой логики, позволяющей максимально приблизиться к стилю мышления человека. Исследования в области металлообработки, выполненные в этом направлении, приведены в работах [3 – 6].

В смежных с металлообработкой отраслях создаются гибридные интеллектуальные компьютерные системы диагностики, сочетающие свойства традиционных систем,

использующих «жесткие» модели, и признаки интеллектуальных (в частности экспертных) систем, такие, как наличие базы знаний. Разработкой и созданием экспертных систем занимаются зарубежные и российскиеисследователи, являющиеся авторами работ [8 – 10 и др.]. В. В. Юркевичем [10] разработана экспертная система, позволяющая выявлять причины превышения допусков размеров детали при токарной обработке и предложить рекомендации по повышению точности. В работах Т. Д. Козловой разработана методика, позволяющая идентифицировать дефекты детали по геометрическим, цветовым и др. показателям [11, 12]. Однако методика основана на эмпирических данных.

Процесс, характеризующийся m выходными параметрами Y_i и k управляемыми факторами X_j, под действием возмущающих факторов систематического характера может перейти в состояние, характеризующееся выходными параметрами Y_i^o. Необходимо определить управляемые факторы X_j^1, обеспечивающее первоначальное состояние процесса (с выходными параметрами Y_i).

Если математические модели, связывающие выходные параметры и управляемые факторы, адекватно отражают технологический процесс, то можно разложить их в ряд Тейлора, исключить члены второго и более высоких порядков и ввести обозначения: $\Delta X_j = X_j^1 - X_j;\ \ \Delta Y_i = Y_i - Y_i^o;\ \frac{\partial Y_i}{\partial X_j} = b_{i\,j}$.

Если все выходные параметры требуется изменить на конкретную величину, получим традиционную систему m уравнений при k неизвестных, методика решения которых известна и сводится обычно к решению ступенчатой системы уравнений.

Знания экспертных систем наиболее часто представляют в виде правил [9]. Учитывая множество входных и выходных параметров процессов механической обработки, задача синтеза правил, описывающих все многообразие ситуаций, усложняется. Кроме того, правила указывают лишь направление, в котором следует изменять значения управляемых параметров (увеличивать или уменьшать), т.е. позволяют осуществить регулирование процесса лишь на качественном уровне, что затрудняет достижение оптимальных значений управляемых параметров. Работ, в которых рассматриваются вопросы синтеза правил для процессов с множеством входных и выходных параметров, каждый из которых может находиться на различных уровнях, не обнаружено.

Знания экспертных систем наиболее часто представляют в виде правил вида: ЕСЛИ (условие) – ТО (действие). Когда текущая ситуация совпадает с частью правил ЕСЛИ, выполняются действия, определяемые частью ТО.

Учитывая множество входных и выходных параметров процесса механической обработки, задача синтеза правил должна быть сформулирована следующим образом.

Пусть каждый из выходных параметров $Y_i,\ i = 1, \dots, m$ принимает конкретное значение из множества $\{y_{i1}, \dots, y_{i_{ni}}, \dots, y_{i_{pi}}\}$, т.е. состояние процесса описывается вектором $\bar{Y} = [Y_1, \dots, Y_m, Y_i = y_{i_{ni}}]$, $n_i \in [1, p_i]$.

Необходимо разработать модель, состоящую из правил вида:
ЕСЛИ $y_{1_{ni}}$ ЕСТЬ Y_1 И $y_{2_{ni}}$ ЕСТЬ Y_2 И … И $y_{m_{ni}}$ЕСТЬ Y_m, ТО x_j ЕСТЬ X_j, $\quad \forall j = 1, \dots, k$, где k – число входных параметров процесса (управляемых факторов).

Ниже представлена методика составления словарей состояний для процесса механической обработки, заключающаяся в целенаправленном моделировании различных состояний процесса (ситуаций) за счет варьирования входными параметрами, в том числе и управляемыми факторами X_j. В качестве признаков для идентификации состояния процесса используются выходные параметры Y_i.

На основе рекомендаций и нормативов назначают условия и режим процесса механической обработки, т.е. управляемые факторы $X_1, \dots, X_k$ получают конкретные (номинальные) значения $x_1^H, \dots, x_k^H$.

С целью моделирования различных ситуаций (состояний) процесса каждому управляемому фактору следует придавать различные значения, в том числе отличные от номинального x_j^H, причем каждым фактором следует варьировать на нескольких уровнях и использовать все возможные комбинации факторов. В частности, при варьировании на пяти уровнях каждый фактор примет значения:

$$x_j^H - \alpha x_j^H;\ \ x_j^H - \frac{\alpha}{2} x_j^H;\ \ x_j^H;\ \ x_j^H + \frac{\alpha}{2} x_j^H;\ \ x_j^H + \alpha x_j^H,$$

где α – коэффициент, характеризующий отклонение параметра от номинального значения.

Для получения всех возможных комбинаций управляемых факторов можно использовать традиционные матрицы планирования. Матрица для двух факторов, каждый из которых принимает три значения, имеет вид табл. 1.

Таблица 1. Матрица планирования при моделировании состояния процесса

№ точки плана	Значение управляемого фактора	
	X_1	X_2
1	$x_1^H - \alpha \cdot x_1^H$	$x_2^H - \alpha \cdot x_2^H$
2	$x_1^H - \alpha \cdot x_1^H$	x_2^H
3	$x_1^H - \alpha \cdot x_1^H$	$x_2^H + \alpha \cdot x_2^H$
4	x_1^H	$x_2^H - \alpha \cdot x_2^H$
5	x_1^H	x_2^H
6	x_1^H	$x_2^H + \alpha \cdot x_2^H$
7	$x_1^H + \alpha \cdot x_1^H$	$x_2^H - \alpha \cdot x_2^H$
8	$x_1^H + \alpha \cdot x_1^H$	x_2^H
9	$x_1^H + \alpha \cdot x_1^H$	$x_2^H + \alpha \cdot x_2^H$

Для каждой точки плана (при каждом сочетании управляемых факторов) следует определить выходные параметры, используя математические модели процесса, либо экспериментальным путем. В результате можно получить словарь состояний процесса по форме табл. 2.

Запись в m_j строке означает, что в случае, когда параметру Y_1 превышает номинальное значение y_1^H на $\beta/5 \cdot y_1^H$, …, параметр Y_m ниже номинального значения y_m^H на $\beta/2 \cdot y_m^H$ (β – коэффициент, характеризующий наибольшееотклонение выходного параметра от номинального значения), следует использовать управляющее воздействие, заключающееся в том, что значения управляемого параметра X_1 следует увеличить на $\alpha/2 \cdot x_1^H$, …, а X_k уменьшить на $\alpha \cdot x_k^H$.

Максимальное количество ситуаций не превышает числа точек матрицы планирования.

Если в словаре отсутствует ситуация, возникающая при функционировании технологического процесса, управляющее воздействие можно определить, ориентируясь на наиболее близкую ситуацию, а степень различия (сходства) ситуаций можно оценить, определяя Евклидово расстояние.

Таблица 2. Словарь состояний процесса механической обработки

№ ситуации (состояния процесса)	Выходные параметры, характеризующие процесс			Управляемые факторы		
	Y_1	…	Y_m	X_1	…	X_k
1 … m_j … n	$y_1^H + \frac{\beta}{5} \cdot y_1^H$	…	$y_m^H - \frac{\beta}{2} \cdot y_m^H$	$x_1^H - \frac{\alpha}{2} \cdot x_1^H$	…	$x_k^H + \alpha \cdot x_k^H$

В результате предложен оригинальный подход к разработке правил, являющихся основой базы знаний экспертных систем, предназначенных для диагностики и управления процессом механической обработки. Использование экспертных систем позволит решить задачу диагностики и управления объектами, в том числе технологическими процессами, в условиях неопределенности технологической информации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-47-730005.

Список литературы: 1. Химмельблау, Д. Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах. – Л . : Химия, 1983. – 351 с. **2**. Алиев, Р. А. Производственные системы с искусственным интеллектом / Р. А. Алиев, Н. М. Абдикеев, М. М. Шахназаров. – М.: Радио и связь. 1990. – 264 с. **3.** Бобырь, М. В. АСУ прогнозирования точностью обработки деталей / М. В. Бобырь, В. С. Титов, Н. А. Милостная // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 4. – С. 3 – 4. **4.** Бобырь, М. В. Интеллектуальная система управления подачей при обработке деталей резанием / М. В. Бобырь, В. С. Титов, А. Л. Беломестная // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – № 8. – С. 17 – 20. **5.** Джексон, П. Введение в экспертные системы. 3-е издание. – М.: «Вильямс», 2001. – 624 с. **6**. Залога, В. А. Диагностика процессов механической обработки с применением искусственных нейронных сетей: состояние вопроса / В. А. Залога, А. В. Гонщик, Р. Н. Зинченко // Вісник Сумського державного університету. Сер. Технічні науки. – 2012. – № 2. – С. 128 – 137. **7.** Игнатьев, А. А. Стохастические методы идентификации в динамике станков / А. А. Игнатьев, В. А. Каракозова, С. А. Игнатьев. – Саратов: Из-во СГТУ, 2012. – 128 с. **8.** Каракозова, А. В. (Гаврилова А. В.) Предпосылки создания экспертной системы поддержки процесса диагностирования шлифовальных станков // Инжиниринг техно 2014: Сб. трудов II международ. конф. – Саратов: СГТУ, 2014. – С. 230 – 235. **9.** Нейлор, К. Как построить свою экспертную систему. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 286 с. **10.** Юркевич, В. В. Экспертная система для токарной обработки // Вестник машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 73 – 75. **11**. Козлова, Т. Д. Режимы работы экспертной системы поддержки принятия решений / Т. Д. Козлова // Исследование сложных технологических систем: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2011. – С. 47 – 51. **12.** Козлова, Т. Д. Роль экспертной системы в организации мониторинга технологического процесса / Т. Д. Козлова // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2012. – С. 82 – 85.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ШАРИКОВИНТОВОЙ ПАРЫ ПРИВОДА НА БАЗЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ МОДУЛЕЙ

Федуков А.Г., Хандожко А.В., Польский Е.А.
(*ФГБОУ ВО «БГТУ», г. Брянск, Россия (4832) 58-82-89)*
E-mail: fedukov.lvdu@gmail.com)

Abstract: *The purpose of the research is to provide and upgrade the skills of special technological equipment manufactured with a wide range of unified modules.*
Key words: *accuracy, unified modules, ball-screw pair, linear guides, basing, installation, contact stiffness.*

Современное производство технологического оборудования все чаще использует готовые унифицированные модули. Сложился большой рынок таких модулей, как для механических систем, так и для систем управления. Основными производителями являются FANUC, SIEMENS, БалтСистем, HIWIN, SBC, THK, Микрон, Стерлитамак, DECKEL Rexroth Bosh, IKO и др.

Одним из распространенных объектов, создаваемых по этому принципу, являются линейные координатные оси на базе шарико-винтовой пары (ШВП). По сравнению с традиционными решениями, когда ходовой винт устанавливается в подшипники, монтируемые непосредственно в корпусе станка, сейчас все чаще используются подшипниковые опоры (рисунок 1). С их использованием реализуются основные схемы установки винта в опоры [1, 2]. Одной из самой распространенной схемой является применение односторонней жесткой (поз.1) и плавающей опоры (поз.2) (рисунок 1).

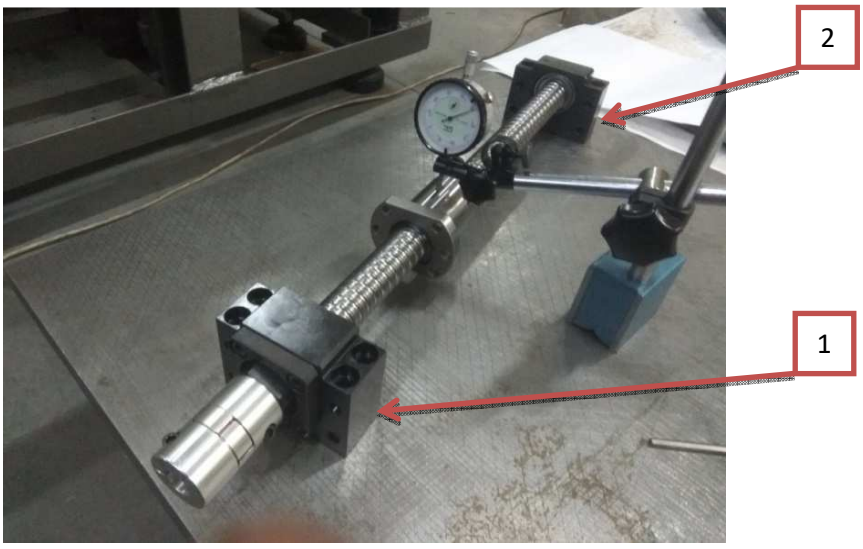


Рис. 1. Ходовой винт, установленный в подшипниковые опоры

Большинство методик проектирования таких модулей основаны на рекомендациях производителей [1, 2]. Это относится и к назначению параметров точности базовых плит, корпусов опор и их монтажа. Эти конструкторские параметры определяют в значительной мере эксплуатационные характеристики линейной оси в целом и винтовой передачи в частности. Одной из важнейших составляющих погрешности конструкции является разновысотность осей подшипниковых опор (рисунок 2).

Данный параметр зависит как номинальных размеров, так и контактной жесткости пары «корпус подшипника - базовая плоскость». Для обеспечения высокой точности

конструкции, точность замыкающего звена получают методом индивидуальной пригонки, использую шабрение, притирку и т.п. В других случаях исполнительные размеры рассчитывают, включая в этот расчет оценку контактной жесткости.

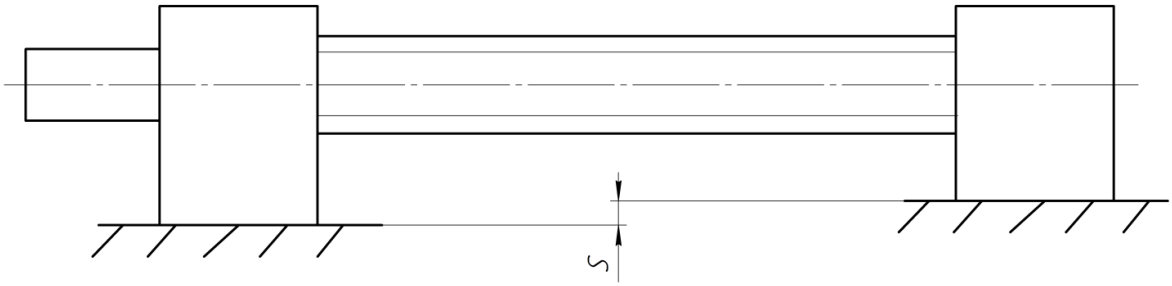


Рис. 2. Разновысотность подшипниковых опор

Номинальные размеры определяют, используя методики расчета размерных цепей. Для оценки деформаций стыков единой методики нет.

Контактная жесткость стыков определяет способность поверхностных слоев деталей, находящихся в контакте, сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать [3].

$$j = \frac{P}{y} \tag{1}$$

где: Р – удельная нагрузка, приходящаяся на геометрическую площадь контакта, у – контактные перемещения.

Для технических расчетов чаще применяют эмпирические зависимости. Исследованиям сближения в контактном слое посвящены работы К.В. Вотинова, И.Г. Горячевой, И.Т. Гусева, Н.Б. Демкина, Ю.Н. Дроздова, А.С. Иванова, В.В. Измайлова, И.В. Крагельского, З.М. Левиной, Д.М. Решетова, Э.В. Рыжова, А.П. Соколовского, А.Г. Суслова, Г.Е. Чихладзе, В.В. Шелофаста и др.

Чаще всего для определения контактного сближения используют формулу [3, 4]:

$$\delta = C\sigma^{m} \tag{2}$$

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 [3 – 5].

Дальнейшее развитие методики расчета получили в работах А.Г. Суслова [4], А.С. Иванова и В.В. Измайлова [5]. В них сделана попытка решений решать задачу теоретически, учитывая физико-механические свойства контактирующих поверхностей.

В работе [5] была предложена зависимость для сопряжения «вал – втулка» между сближением δ и давлением p в контактном слое, учитывающая параметры, известные конструктору на стадии проектирования.

$$\frac{\delta}{Ra} = C_0 \varepsilon \sqrt{\frac{\sigma}{\mathrm{E}}} \tag{3}$$

где $Ra = (Ra_1 + Ra_2)/2$, Ra_1, Ra_2 – средние арифметические высоты микронеровностей контактирующих поверхностей деталей; $E = 2E_1E_2/(E_1 + E_2)$ – 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). Эмпирические коэффициенты корректируют погрешности теоретической зависимости.

Для того чтобы понять, как контактная жесткость влияет на параметр точности были проведены исследования на представленном на рисунке 1 узле. Опоры подшипников со шлифованной опорной поверхностью и с установленным в них винтом крепят винтами

М10 с крутящим моментом 53 Н·м на базовой шлифованной плите. С помощью индикатора часового типа измерялись сближения в стыке. Схема измерения представлена на рисунке 3. Измерение проводились в трех точках жесткой плавающей опор.

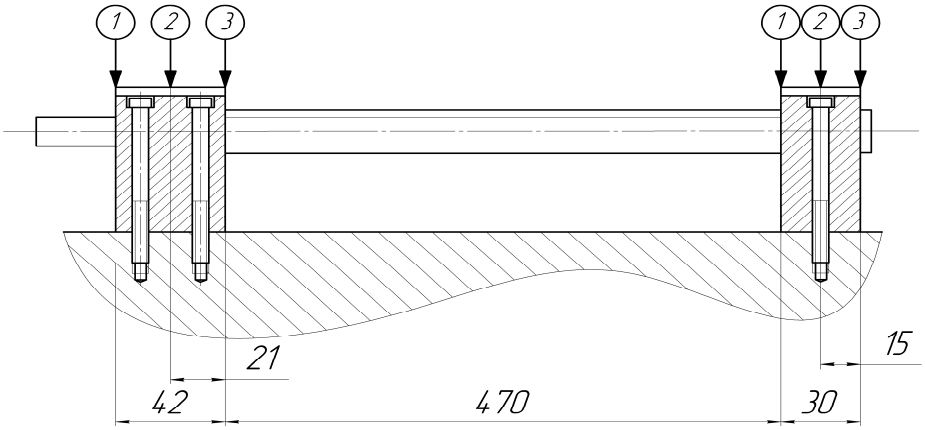
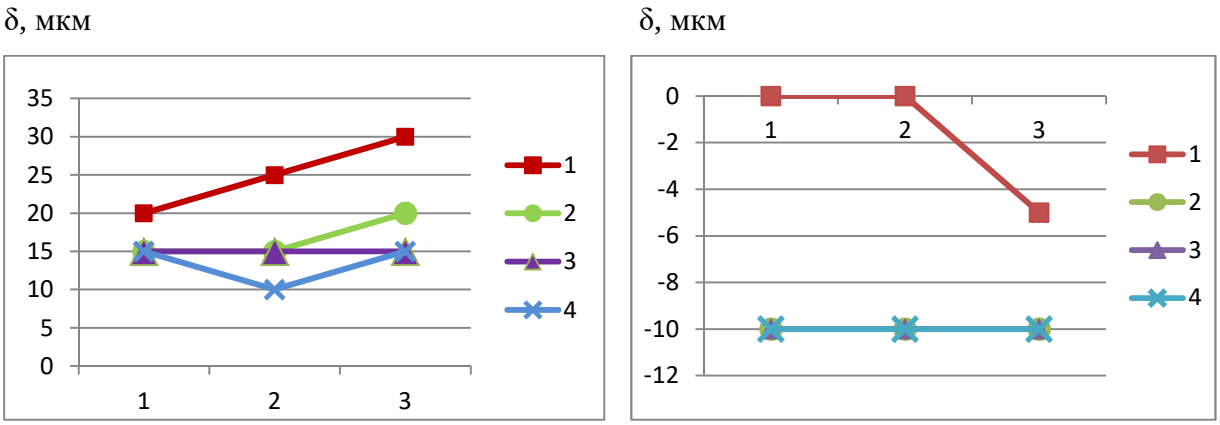


Рис. 3. Схема измерения

Деформации стыка для двух подшипниковых опор представлены на графиках (рисунок 4а и 4б). По оси абсцисс расположены точки измерения, а по оси ординат, сближение в мкм.



а) б)

Рис. 4. Деформации стыка: а) «жесткая подшипниковая опора - базовая плита» при воздействии нагрузки; б) «плавающая подшипниковая опора - базовая плита» при воздействии нагрузки

1 – положение опоры в измеряемых сечениях без нагрузки; 2 – деформации после первого нагружения опоры; 3 – деформации после второго нагружения опоры; 4 – деформации после третьего нагружения опоры.

Из графиков деформации можно утверждать, что максимальная величина сближения происходит при первом нагружении (разница между исходным положением линия 1 и линией нагружения 2). Величина сближения достигает 10 мкм и более.

При использовании подшипниковых опор с фрезерованной опорной поверхностью деформации резко растут, в принятой схеме монтажа их величина достигала 50 мкм. При повторных нагрузках (линии 3 и 4) в стыке, в основном, возникают упругие деформации, которые исчезают после снятия нагрузки. Их величина не превышает 2-3 мкм и ее нужно учитывать лишь для оборудования высокой точности.

При расчетах кроме разновысотности осей опор, необходимо учитывать и макроотклонения базовых поверхностей, которые характерны для деталей большой длины. Характер изменения формы оси винта при наличии макроотклонений в виде вогнутости или седлообразности показан на рисунке 5.

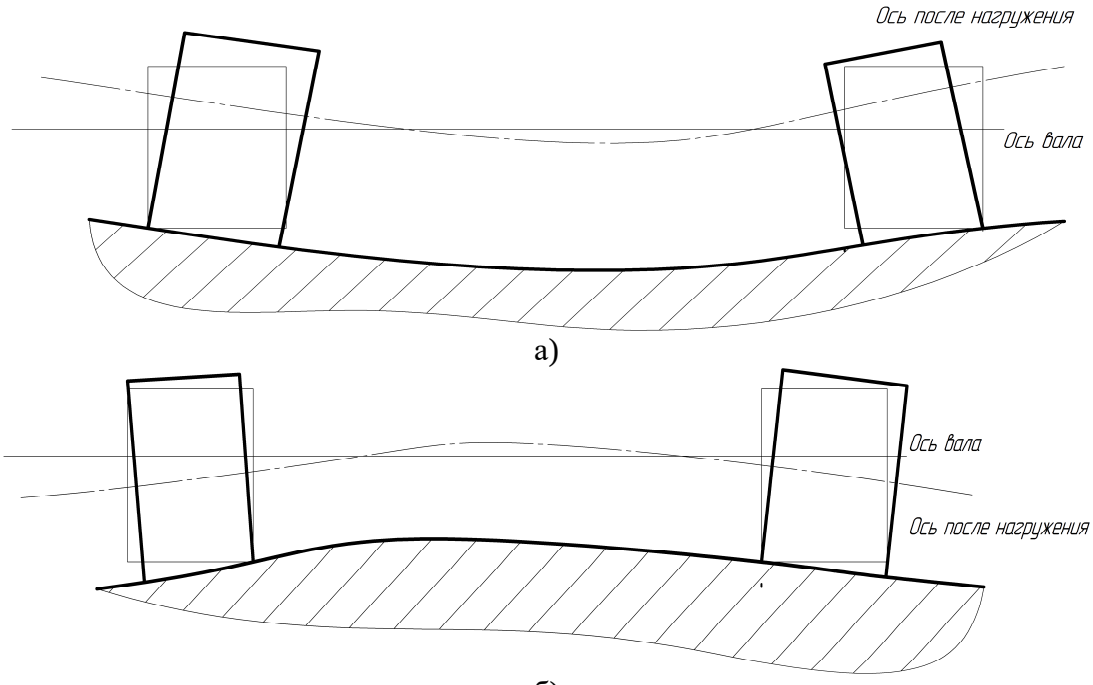


Рис. 5. Влияния макроотклонения на закрепление подшипниковых опор ШВП

Такое искажение формы винта приводят к деформации винта, которая ухудшает плавность хода, ведет к росту крутящего момента, создает погрешность шага, в том числе в пределах одного витка. По этим ухудшениям эксплуатационных характеристик можно в первом приближении регламентировать допустимые искажения оси винта. При этом в качестве одного из контролируемых выходных параметров удобно использовать величину крутящего момента холостого хода привода винта. По величине его отклонения можно судить о величине геометрических погрешностей конструкции.

Выводы. Методики проектирования модульного оборудования требуют существенной доработки и расширения. При расчете размерных цепей необходимо учитывать величины деформаций стыков, особенно для поверхностей большой протяженности, имеющих волнистость и макроотклонения. При проектировании линейных координатных осей технологического оборудования в качестве одного из критериев качества возможно использование постоянство величины крутящего момента холостого хода.

Список литературы: 1. Каталог компании «HIWIN» по производству шариковых приводов – С. 122. **2.** Каталог компании «SBC» по производству точных шариковинтовых пар катанного типа раздел В – С. 31. **3.** Коллектив авторов под ред. д-ра т.н. Д.Н. Решетова. «Детали и механизмы металлорежущих станков», т.1. М. «Машиностроение», 1972, стр. 664. **4.** Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.: ил. **5.** 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. – вып 1. –С. 75-83.

РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Фомич М. В., **Цымбалов Д.С., Яценко О.В.** *(Донской государственный технический университет)*
E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

Abstract: *The thermal destruction of electrically heated metal wires is considered with respect to nominal end extra-employment (extra-loads). Few appropriate mathematical models are constructed and investigated thoroughly. It is shown that under-load regimes of heated wire operation provide its long-life functionality. The only realistic mechanism of wire crash is self-accelerated evaporation of metal in previously thin zones. In the research both analytical and numeric techniques are used, as well as modern computer aided systems. Results obtained are interesting for electric equipment design and for educative purposes.*
Keywords: *heated wire, electrical heating, evaporation, destruction, load regime, reliability, mathematical modeling..*

Поскольку создание и эксплуатация ламп накаливания (ЛН) и электронагревателей (ЭН) сопряжены с множеством противоречивых требований, поиск оптимальных конструкторско-технологических решений является сложной инженерной задачей [1-3]. Сопутствующие проектированию множественные технические эксперименты повышают стоимость и увеличивают сроки проектирования. Поэтому на современном этапе развития техники и технологий большую роль в проектировании разнородных ЛН и ЭН играет математическое моделирование с привлечением компьютера [4-6].

В соответствии с представленными выше аргументами целью данной работы ставится реализация и исследование информационных моделей тепловой, а при необходимости и сопряженной механической, динамики нитей ЛН и ЭН применительно к процессам их разрушения при штатной эксплуатации, а также в экстремальных режимах.

Ее реализация осуществляется посредством решения следующих задач:

– углубленного изучения известных моделей тепловой динамики ЛН и ЭН в условиях, ведущих к их разрушению;

– выбора процессов, определяющих разрушение нагревательных элементов ЛН и ЭН в различных обстоятельствах, и конструирование адекватных информационных моделей;

– разработки эффективных алгоритмов анализа моделей термического разрушения нагревательных элементов с использованием современных пакетов компьютерной математики;

– интерпретации результатов компьютерных экспериментов с моделями и выработка практических рекомендаций для производителей и потребителей соответствующей продукции;

– обозначение приоритетных направлений совершенствования разработки.

Термомеханическое разрушение спиралей может происходить по различным причинам: 1) неправильно рассчитанный рабочий режим; 2) питание от источника электрической энергии с несоответствующими параметрами; 3) «старческое» или износовое разрушение – пришло время, и ресурс выработан, 4) экстремальные условия эксплуатации – недопустимые внешние механические и/или термические воздействия.

Соответствующие перечисленным сценариям информационные модели имеют различную вербальную формулировку. В частности, если питающее напряжение превышено настолько, что спираль нагревается до температуры плавления, затем

расплавляется и течет под действием гравитации. Поскольку нас интересует качественная картина, для числовых показателей в моделях будем использовать характерные значения.

Если пренебречь зависимостью теплоемкости металла (спирали) от температуры, а также температурой окружающей среды по сравнению с рабочей для спирали, модель разогрева имеет вид:

$$\frac{dT(t)}{dt} = A \cdot \frac{U(t)^2}{(1+T(t)/300)} - B \cdot T(t)^4 \ , \qquad (1)$$

где $T(t)$ – температура, t – время, $U(t)$ – напряжение питания; A и B – параметры модели. Соотношение параметров A и B, характеризующих соответственно скорость подвода и отвода тепла определяет при $U(t) = \text{const}$ установившуюся (при $t \to \infty$) рабочую температуру. Например, для бытовой ЛН

$$B = \frac{220^2}{2700^4 \cdot (1+2700/300)} \cdot A \approx 9.1 \cdot 10^{-11} \cdot A \ .$$

Абсолютные значения этих величин определяют характерное время установления теплового равновесия τ. Для рассматриваемого объекта его величина составляет ~ 0.1 с.

Оценим величины A и B. Первый способ состоит в отбрасывании второго слагаемого в правой части (1) и интегрировании редуцированного уравнения:

$$\frac{dT(t)}{dt} = A \cdot \frac{U(t)^2}{(1+T(t)/300)} \qquad (2)$$

от 0 до τ. Разрешая результат относительно A, получаем:

$$A = \frac{1}{U^2 \tau} \cdot (T + \frac{T^2}{600})\Big|_0^{2700} \approx 3.07 \ , \ B \approx 2.8 \cdot 10^{-10} \quad . \qquad (3)$$

Второй способ состоит в отбрасывании первого слагаемого в правой части (1), интегрировании другого упрощенного уравнения и нахождения:

$$B = \frac{1}{4 \cdot T^3 \tau} \approx 1.27 \cdot 10^{-10} \ , \quad A \approx 1.39 \ . \qquad (4)$$

Уточнить результат, можно, использовав среднегеометрические значения из приведенных вариантов:

$$A \approx 2.07 \ , \qquad B \approx 1.6 \cdot 10^{-10} \ . \qquad (5)$$

Эти значения будут опорными при проведении численного анализа моделей.

Для термического разрушения спирали ЛН при умеренном превышении напряжения над номинальным (в выбранном примере 220 В) необходимо выполнить два условия: 1) разогреть спираль до температуры плавления $T_{\text{пл}}$ = 3422 $^{\text{o}}$C и 2) дополнительно закачать в нее энергию $\Delta H_{\text{пл}}$ = 52 кДж/моль, чтобы осуществить фазовый переход. Отметим, что энергии фазового перехода достаточно для нагрева твердого вольфрама примерно на 2000 градусов. В модели это можно учесть, введя дополнительную динамическую переменную $\xi(t)$ ($0 \le \xi(t) \le 1$), характеризующую степень расплавления металла. Фактически она служит счетчиком тепла, закачанного в спираль после нагрева ее до $T_{\text{пл}}$:

$$\xi(t) = \frac{T(t) - T_{\text{пл}}}{2000} \quad . \qquad (6)$$

Сходная с (1) модель отвечает штатному или близкому к таковому функционированию ЭН. Однако отвод тепла от спирали осуществляется, главным образом, за счет вынужденной конвекции, а сама спираль поддерживается в

сравнительно холодном состоянии. Этим особенностям отвечает модель:

$$\frac{dT(t)}{dt} = C \cdot U(t)^2 - D \cdot T(t) \quad , \tag{7}$$

в которой интенсивность электрического нагрева и вынужденного конвективного охлаждения характеризуется коэффициентам C и D.

Экстремальным вариантом подобного разрушения спирали ЛН (из-за существенного перенапряжения) является ее разогрев до температуры испарения. В этом случае после нагрева спирали до температуры испарения (5555 К) требуется подвести к ней дополнительно энергию достаточную для нагрева вольфрама на 35 кК.

Принципиально, что закачать в спираль тепловую энергию – плавления или испарения следует за время падения спирали в гравитационном поле на величину Δx порядка толщины спирали (Δx ~ 50 мкм). Оценка соответствующего времени в рамках ньютоновской механики дает $\tau_{экстр}$ ~ 3 мс. Эта величина в 30 раз меньше, чем время выхода спирали на рабочий режим.

Практический интерес представляет ответ на вопрос, во сколько раз больше номинального должно быть экстремальное напряжение, чтобы вызвать: расплавление или испарение спирали.

Последовательно рассмотрим различные механизмы перегорания спиралей – «от старости», вследствие некачественной электросети (небольшое перенапряжение) и в нештатной ситуации, когда электропитание многократно превышает номинальное.

При сильном нагревании металла происходит его испарение со скоростью пропорциональной $e^{-\Theta/T}$, где Θ – т.н. характерная температура сублимации. Эту распространенную в молекулярной физике температурную зависимость удобно аппроксимировать степенными функциями T^n, $n > 1$. Обозначив исходную толщину спирали $X(t)$ получаем модель испарения вещества с поверхности спирали

$$dX(t)/dt = -\alpha \cdot [T(t)]^n, \tag{8}$$

где α – параметр, определяющий скорость испарения, $T(t)$ –текущая температура спирали.

Для температуры спирали в предположении, что напряжение постоянно справедливо следующее эволюционное уравнение:

$$dT(t)/dt = \beta - \gamma \cdot [T(t)]\, 4 / \ X(t) \,, \tag{9}$$

в котором параметры β и γ отвечают соответственно за подвод тепла электричеством и отвод излучением. Строго говоря, модель эксплуатационного разрушения спиралей (8), (9) соответствует только ЛН. Для ЭН уравнение (9) следует заменить на похожее:

$$dT(t)/dt = \beta - \varphi \cdot [T(t)] / X(t) \,, \tag{10}$$

где φ – параметр интенсивности для конвективного теплообмена. Однако здесь мы исследуем только модель старения спирали ЛН.

Найти аналитическое решение (8)-(9) или не получится вследствие существенно нелинейности системы. Однако найти приближенное решение позволяет следующий прием. При $t \to \infty$ обе величины $X(t)$ и $T(t)$ стремятся к нулю. Кроме того, логично предположить, что в этой системе $T(t)$ является быстрой переменной. Эти соображения позволяют заменить эволюционное уравнение (9) алгебраическим стационарным соотношением:

$$\beta - \gamma \cdot [\mathrm{T(t)}]\, 4 / \ \mathrm{X(t)} = 0. \tag{11}$$

После подстановки (11) в (9) последнее легко интегрируется. С учетом начальных условий $X(0) = X_0$, $T(0) = T_0$ это приближенное решение имеет вид:

$$X(t)=\left(X_0^{\frac{4-n}{4}} - \frac{4-n}{4}\cdot\alpha\cdot\left(\frac{\beta}{\gamma}\right)^{n/4}\cdot t \right)^{\frac{4}{4-n}} . \qquad (12)$$

Особенность этого решения (его вид представлен на рис. 1, а справедливость оно приобретает через некоторое время, когда температура подстраивается под текущую толщину спирали) такова, что при $n < 4$ спираль истончается за конечный период, в то время как при $n \geq 4$ она сохраняет конечную толщину сколь угодно долго. Нижние четыре кривые – ветви парабол, три верхние – гипербол, а разделяющая семейства экспонента (соответствует $n = 4$) не приведена.

На рис. 2 показана соответствующая данным рис. 2 динамика температуры.

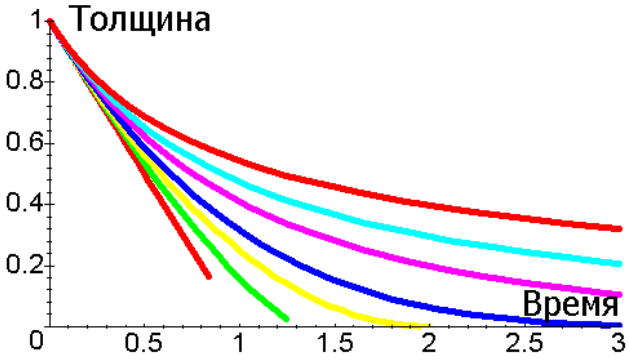


Рис. 1. Зависимость скорости истончения спирали ЛН от параметра n в модели (8), (11). Линии (снизу – вверх) соответствуют n = 0.01, 1, 2, 3, 5, 7 и 10. Прочие параметры модели выбраны равными единице: $\alpha = \beta = \gamma = X_0 = 1$

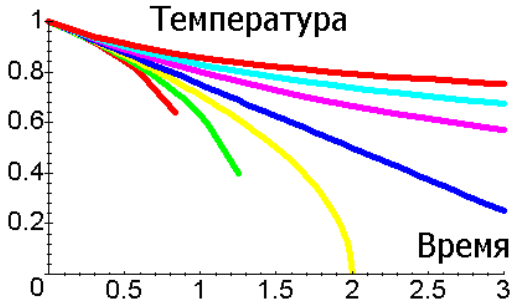


Рис. 2. Зависимость температуры спирали ЛН от параметра n в модели (8), (11). Линии (снизу – вверх) соответствуют n = 0.01, 1, 2, 3, 5, 7 и 10. Прочие параметры модели выбраны равными единице: $\alpha = \beta = \gamma = X_0 = 1$

Результаты проведенного эксперимента имеют следующее практическое толкование. При низких по сравнению с Θ температурах аррениусовский сигмоид адекватно приближается степенной функцией с большим чем 4 показателем степени. Соответствующая оценка получается, если безразмерную температуру T/Θ обозначить y, ее рабочему значению приписать значение y_0 и потребовать совпадения в точке y_0 как аррениусовского сигмоида $e^{-1/y}$, так и и его производной соответствующим значениям аппроксимирующей степенной функции $A\,y^B$. Решив полученную систему уравнений, получаем следующий результат:

$$B=\frac{1}{y_0}\ , \qquad A=(e\cdot y_0)^{-1/y_0}\ . \qquad (13)$$

При рабочей температуре спирали ЛН показатель B составляет ~ 10, что соответствует бесконечной продолжительности работы спирали вдали от Θ. По мере интенсификации нагрева может складываться ситуация $n < 4$, соответствующая конечному ресурсу изделия. Таким образом, если режим работы ЛН щадящий, она вечна в рамках рассмотренного механизма.

Все выводы справедливы и в отношении ЭН. Единственное отличие состоит в том, что динамка толщины спирали и ее температуры в такой системе прямо пропорциональны.

Поскольку же реальные ЛН и спирали ЭН отказывают программировано часто, рассмотрим более сложный механизм, приводящий к перегоранию через ускоренное

истончение спирали. Этот механизм основан на положительной обратной связи между локальным истончением спирали и ужесточением теплового режима соответствующего участка. Если обозначить величиной $X(t)$ толщину спирали в зоне дефекта, где она по каким-то причинам меньше, чем в соседних местах, модель самоускоренного истончения в этой точке принимает вид:

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\alpha \cdot T(t)^n \ , \qquad \frac{dT(t)}{dt} = \frac{\beta}{X(t)^2} \ , \tag{14}$$

где α и β – отвечают за интенсивность испарения вольфрама и степень роста локального тепловыделения при утончении спирали. Соответствующее начальным условиям $X(0) = X_0$ и $T(0) = T_0$ частное решение $T(X)$ имеет вид:

$$T(X) = \left(T_0^{n+1} - \frac{n+1}{\alpha} \cdot \beta \cdot \frac{1}{X_0} + \frac{n+1}{\alpha} \cdot \beta \cdot \frac{1}{X}\right)^{\frac{1}{n+1}} , \tag{15}$$

а его характер $T(X)$ показан на рис. 3.

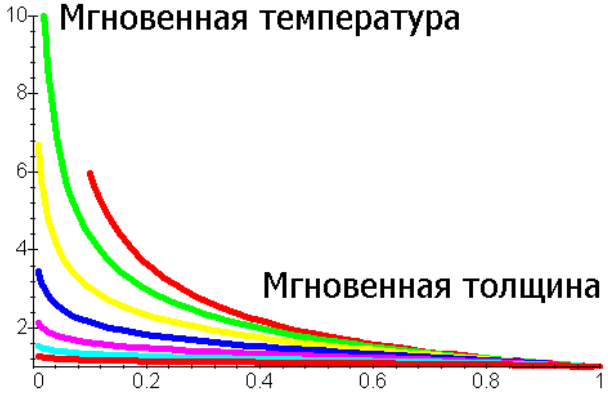


Рис. 3. Аналитическое решение задачи (14) средствами Maple при различных значениях параметра модели n: n = 0.5 (верхняя красная линия), 1 (зеленая), 2 (желтая) и т.д.

Характер приведенного на рис. 3 решения свидетельствует, что чем в более напряженном режиме находится участок спирали (т.е. параметр n в этой модели меньше по величине), тем интенсивней он утончается. Т.е., чем значительней первичный дефект, тем быстрее он прогрессирует.

Знание первого интеграла (15) системы позволяет путем численного интегрирования первого из уравнений (14) с подстановкой (15) определить время разрушения спирали для любых фактических параметров модели. В выбранном примере такое интегрирование уравнения

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\alpha \cdot \left(T_0^{n+1} - \frac{n+1}{\alpha} \cdot \beta \cdot \frac{1}{X_0} + \frac{n+1}{\alpha} \cdot \beta \cdot \frac{1}{X}\right)^{\frac{n}{n+1}} \tag{16}$$

показано на рис. 4.

Очевидно, при больших n это уравнение можно проинтегрировать приближенно, заменив на близкое при ($n \to \infty$):

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{n \cdot \beta}{X_0} - \alpha \cdot T_0^n - \frac{n \cdot \beta}{X(t)} \ , \qquad X(0) = X_0 \ . \tag{17}$$

Его общее решение выражается трансцендентной функцией $t(X)$, а ей обратная представима посредством функции Ламберта. Это решение (рис. 5), в частности, определяет предельный срок службы ЛН – при очень щадящей эксплуатации:

$$\tau \to 1 \ , \qquad (18)$$

если числовыми параметрами модели выбраны $\alpha = \beta = X_0 = T_0 = 1$.

Зависимость $\tau(n)$ представляется критичной для практики поскольку связывает срок службы ЛН с напряженностью ее эксплуатации, определяемой однозначно величиной параметра n. Ее вид показан на рис. 6. Отметим, что поскольку в данной модели мы «заморозили» ряд параметров ($\alpha = \beta = X_0 = T_0 = 1$) параметр n оставлен единственной мерой интенсивности накала спирали: чем больше значение n, тем напряженней условия функционирования.

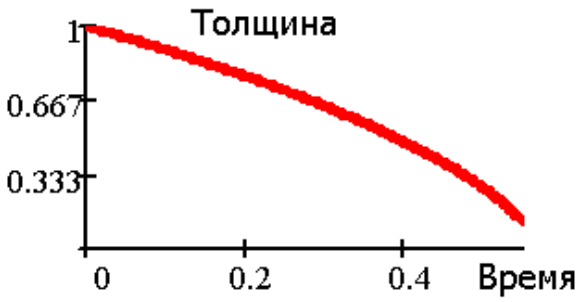


Рис. 4. Динамика испарения спирали ЛН вследствие тепловой неустойчивости согласно (15) и (16) средствами MathCAD при $n = 1$

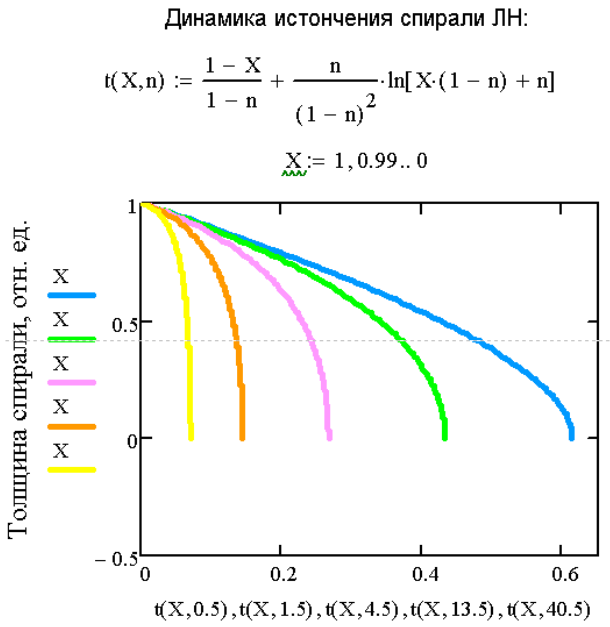


Рис. 5. Частное решение $X(t, n)$ задачи (17), полученное средствами Maple: n = 0.5 (синяя линия), 1.5 (зеленая), 4.5 (фиолетовая), 13.5 (красная) и 40.5 (желтая)

Для описания экстремального разрушения спиралей можно воспользоваться следующей моделью. Предположим, что радиационный теплоотвод от экстремально раскаленной спирали изначально равен предельной величине – при температуре плавления металла. При взрывном термическом разрушении и даже при быстром расплавлении величина этого теплоотвода значительно меньше подводимого джоулевого тепла. Поэтому динамика закачанной в спираль внутренней энергии E(t) дается уравнением:

$$\frac{dE(t)}{dt} = Q \ , \qquad (19)$$

где Q – электрическая мощность. Очевидно, быстрое расплавление произойдет при выполнении условия:

$$Q \cdot \tau \geq m\,(c\,T_{пл} + H_{пл}) \ , \qquad (20)$$

где $\tau \approx 30$ мс – время, необходимое для смещения спирали в гравитационном поле, c – теплоемкость материала спирали, m – ее масса, $T_{пл}$ и $H_{пл}$ – соответственно температура

плавления и теплота фазового перехода. Таким образом, данная модель является тривиальной и не заслуживает более подробного рассмотрения.

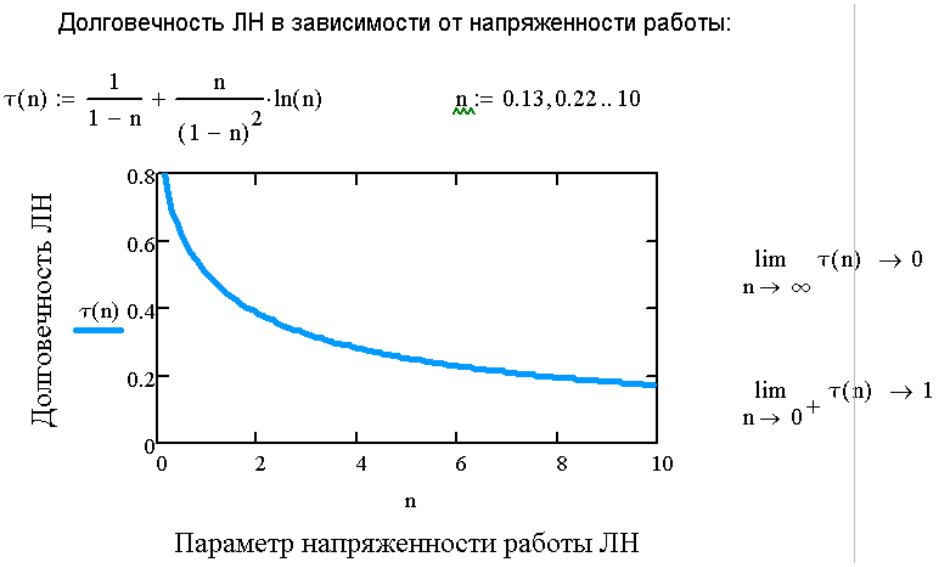


Рис. 6. Зависимость долговечности спирали накаливания τ от теплонапряженности рабочего режима *n*, вычисленная в MathCAD

Если же подводимая мощность столь велика, что достаточна для испарения спирали, к критериальной модели типа (20) следует добавить модель разлета цилиндрического облака паров с характерной температурой 5555 ^{0}C. Скорость разлета таких паров в вакуумированной колбе составляет ~ 700 м/с.

В данной работе сконструированы и проанализированы модели разрушения спиралей ЛН и ЭН как при нормальной эксплуатации, так и в экстремальных условиях.

Результаты анализа и практические выводы полностью соответствуют опыту эксплуатации подобных электроприборов.

Разработка предлагается к внедрению в учебный процесс университета для ряда технических специальностей бакалавриата и магистратуры.

Привязка к конкретным электроприборам и условиям их эксплуатации позволяет развивать дипломные проекты по рациональному проектированию и эксплуатации подобных устройств.

Список литературы: 1. Лампа накаливания: https://ru.wikipedia.org/ wiki/Лампа накаливания. **2.** Бареттер: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Бареттер. **3.** Электрические нагревательные элементы, ТЭНы, виды, конструкции, подключение и проверка: http://electrik.info/main/school/851-elektricheskie-nagrevatelnye-elementy.html. **4.** Амелькин В.В. Дифференциальные уравнения в приложениях. М.: Наука, 1987. 160 с. **5.** Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1972 592 с. **6.** Воржев В.Б., Жигулин И.Н. и др. Компьютерное моделирование электрических и тепловых процессов. Ростов н/Д.: Изд-во ДГТУ, 2013. 127 с.

РАЗРАБОТКА РАСКРОЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЕГО ОСНАЩЕНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Хейфец М.Л., Гайко В.А., Сенють Н.М. (*Президиум НАН Беларуси, г.Минск*)
Бородавко В.И., Грецкий Н.Л., Астапенко А.А.
(*ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, г.Минск)*
Тел.: +375 (017) 2840775; Факс: +375 (017) 2840375; E-mail: mlk-z@mail.ru

Abstract: *The analysis of methods for obtaining machine parts without forming tools was carried out. It is shown that the processes of additive production require, in addition to studying the technology of obtaining products from structural materials, developing information technologies for their modeling. The structure of the technological complex for layered synthesis of products is considered. Considered the formation of products of complex geometry, taking into account the use of a 5-axis manipulator in an automated cutting complex, computer design of sheet cutting processes and subsequent assembly.*
Keywords: *Technological complex, additive production, layer-by-layer assembly, LOM technology, 3D-printer.*

Введение. Повышению эффективности производственной деятельности служит создание комплексов технологических, транспортных, энергетических и информационных машин на основе новых аддитивных технологий и повышения производительности уже используемых [1-3].

В настоящее время зарождается новая эпоха производства – массовая *кастомизация,* характеризующаяся тем, что потребитель выступает в качестве дизайнера и инженера. Теперь по запросам потребителя можно непосредственно контролировать и управлять, а также изменять производственный процесс. В результате при системном анализе роста эффективности технологических комплексов необходимо рассчитывать не только удельную технологическую трудоемкость (себестоимость), приходящуюся на одно изделие, но и затраты по всему жизненному циклу изделия, особенно связанные с его кастомизированным маркетингом, проектированием, эксплуатацией, утилизацией и сокращением всевозможных логистических поставок [4-6].

Производство и адресная поставка кастомизированного изделия, с учетом внешней и внутренней логистики предприятия (в том числе и виртуального), можно дополнить проходящие этапы прогнозом на будущее, которое часто связывается с новой парадигмой *интеллектуального* производства, называемой *«Индустрия 4.0»*. Данный термин предложен немецкими компаниями на Ганноверской выставке технологий в 2011 г. для обозначения начала «эпохи четвертой индустриальной революции», связанной с промышленным интернетом вещей *(IIoT – Industrial Internet of Things)* [4, 5].

Разработка технологического оборудования, использующего потоки энергии. Разработка технологических комплексов начинается с анализа принципиальной схемы мехатронной системы, имеющей два контура управления, посредством прямой связи с внешней средой и обратной связи по результатам диагностики состояния объекта управления [1,3].

Выбор потоков энергии и материалов для послойного синтеза изделия осуществляется в зависимости от свойств материалов или их композиций,

геометрических характеристик поверхностей, их точности. При этом особое внимание уделяется фокусировке или распределению потоков в пространстве и во времени.

Анализ достижимости точности формирования поверхностей с позиций влияния плотности мощности применяемых концентрированных потоков энергии позволяет рекомендовать ряд источников энергии для использования в раскройном оборудовании [7, 8]. Практически непрерывный ряд по плотности мощности обеспечивают следующие технологические источники: газовое пламя и плазменная дуга; сварочная дуга и искровые разряды; непрерывный и импульсно-периодический лазеры. Особый интерес вызывают потоки абразивных частиц, реализующие при взаимодействии высоконапорной струи с поверхностью, процессы аналогичные изнашиванию и выкрашиванию при интенсивном трении и приработке.

Это обусловило, в зависимости от решаемых задач, достаточно активное применение в раскройном оборудовании: газопламенных, плазменных, электроискровых (эрозионных), лазерных источников энергии.

Выбор источников для раскройного оборудования определяется как толщиной и материалом листовых заготовок, так и точностью обработки.

Мехатронный технологический комплекс (рис.1) реализует прямую связь при управлении потоком энергии или материала послойно синтезирующего изделие, а обратную связь по состоянию формируемого слоя или обрабатываемой поверхности сформированного изделия [1, 3].

Рассматривается граф кортежей различных видов обработки проектируемого технологического оборудования и анализируются налагаемые связи: механические и электрические (привода и источники), электронные и программные (средства контроля и управления) в мехатронной системе [1-3]. В результате привод источника реализован в качестве многокоординатного манипулятора, а сам комплекс и его средства оснащения представляют собой мехатронную технологическую систему (рис.2).

Данный технологический комплекс позволяет производить как резку так и последующую послойную листовую сборку готового изделия посредством сварки по контуру плазменной сварочной головкой фирмы Kjellberg (рис.3).

Компьютерное проектирование процессов листового раскроя и сборки изделий. Для повышения качества поверхности формируемого изделия и снижения длительности процессов макетирования и производства с позиций видов и форм заготовок применяемых материалов рассмотрено рациональное разбиение на слои, с учетом оценки качества поверхности, зависящей от формы изделия.

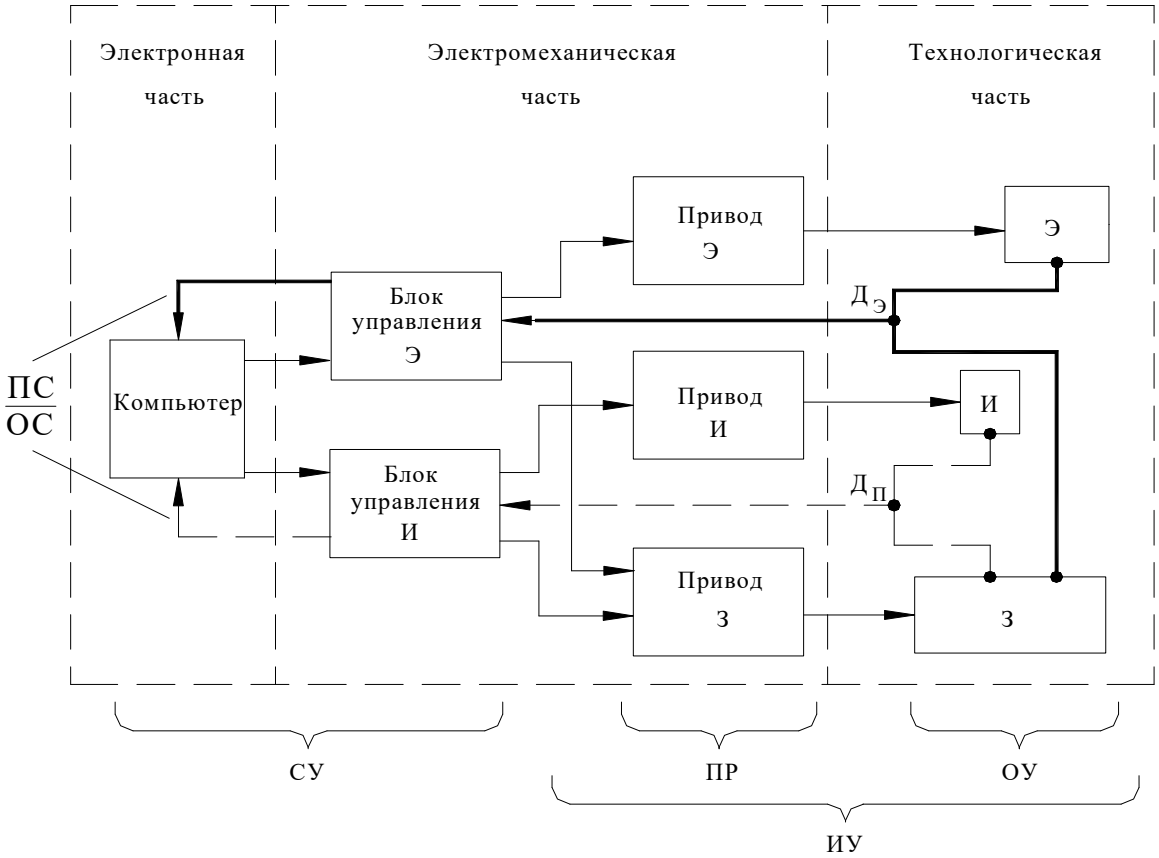
Анализ разбиения в различных методах послойного синтеза обеспечивает выбор наиболее рациональных процессов макетирования и производства конкретного изделия [7,8].

Рассмотрим схему алгоритма разбиения изделия на слои.

Она состоит из блоков:

1. Компьютерная модель изделия, включающая его геометрическое описание, определение критериев оптимальности конструкции путем выявления «мертвых» зон для потоков энергии или вещества, в которых достижение требуемых параметров качества поверхности проблематично.

2. Выделение слоя максимально возможной толщины h max с проверкой и корректировкой слоя, если он является последним. При этом рассматривается разбивка на слои одинаковой толщины и разными углами наклона кромок, вписанных в геометрический профиль, и неравномерной толщины различных слоев. Разбивка непосредственно влияет на геометрические параметры качества поверхности (Rmax, Rz, Ra и др.).



З – заготовка;
И – инструмент;
Э – концентрированный источник энергии;
$Д_П$ – датчик перемещений;
$Д_Э$ – датчик интенсивности потока энергии;
СУ – система управления;
ПР – приводы;
ОУ – объект управления;
ИУ – исполнительные устройства;
ПС – прямая связь;
ОС – обратная связь
Рис. 1. Структурная схема мехатронной системы

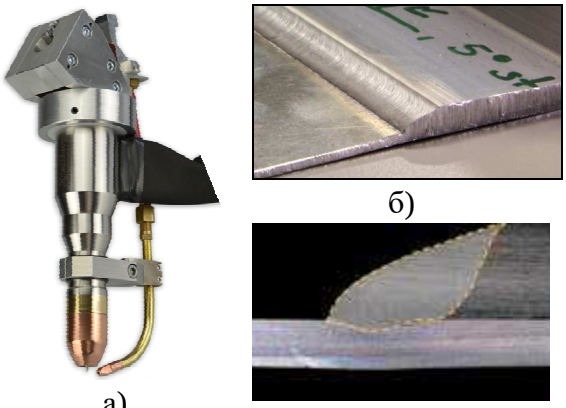
3. Оценка рельефа поверхности Rmax по периметру слоя осуществляется путем проверки параметров качества поверхности, получаемых в текущем слое.

4. Корректировка путем изменения толщины слоя с использованием коэффициентов понижения α производится при недопустимых параметрах рельефа поверхности (например: α = 3/4, 1/2, 1/4, ... - для LOM (Laminated Object Manufacturing) - технологии; α = 0,7...0,8 для SLS (Selective Laser Sintering) - технологии).

5. Присоединение слоя к предыдущему или подложке сопровождается проверкой сцепления текущего слоя с предыдущим по размеру площади перекрытия или скрепления слоев.

6. Проверка завершения синтеза изделия заканчивает цикл послойного «выращивания» и подсчитывает программными средствами общее количество слоев изделия.

Рис. 2. Технологический комплекс плазменного раскроя материала с манипулятором для резки и разделки кромок заготовок под углом



а) б) в)

Рис. 3. Оборудование для плазменной сварки: а) сварочная головка Kjellberg; б) послойная сварка изделия; в) сечение сварочного шва (информация с сайта www.kjellberg.de)

7. Верификация модели - завершающий этап компьютерного сопоставления «выращенной» модели и исходной.

Расчет общего количества слоев (блок 6) позволяет оценить эффективность процесса, выбираемого для послойного синтеза изделия заданной формы одним из предлагаемых методов. Верификация модели послойного синтеза (*блок* 7) дает возможность проверить удовлетворение требований к геометрическим параметрам качества сложнопрофильных поверхностей, заложенных в компьютерную модель изделия (блок 1).

Регулирование толщины слоя (блок 4) и угла «разделки» его кромок (блок2) позволяет управлять геометрическими параметрами качества сложнопрофильной поверхности (блок 3) и вносить корректировки в начальный выбор метода аддитивного производства.

Проверка сцепления слоев изделия в ряде случаев требует, помимо определения площади их перекрытия (блок 5), также анализа рельефа плоской или сложнопрофильной поверхности. Последний вариант обычно используется при нанесении оболочек или покрытий на послойно «выращенное» изделие.

Заключение. Таким образом, анализ современного состояния и перспектив развития аддитивных технологий компьютеризированного производства позволяет говорить о новой парадигме в его эволюции – «Индустрии 4.0».

В результате формируется и детализируется концепция «цифровой фабрики», в которой аддитивные являются определяющим звеном системы, включающим развитые подсистемы: 3D-проектирования и управления производством и потреблением, начиная от моделирования изделия, его материалов и компонентов в соответствии с новыми технологическими возможностями и заканчивая получением и эксплуатацией функционально ориентированного кастомизированного изделия.

Анализ методов получения деталей машин без формообразующей оснастки показал, что процессы аддитивного производства требуют, кроме изучения технологии получения изделия из конструкционных материалов, также разработки информационных технологий их моделирования.

Для технологии LOM (Laminated Object Manufacturing) - послойного формирования из листового материала, с целью обеспечения высокой точности геометрической формы, рекомендован алгоритм разбиения изделия на слои различной толщины, учитывающий разделку их кромок под углом.

Рассмотрено компьютерное проектирование процессов листового раскроя и послойной сборки, на примерах формирования изделий сложной геометрии, с учетом использования 5-координатного манипулятора в автоматизированном раскройном комплексе.

Список литературы: **1.** Теоретические основы проектирования технологических комплексов / под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2012. – 239 с. **2.** Конструирование и оснащение технологических комплексов / под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 316 с. **3.** Автоматизация и управление в технологических комплексах / под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 375 с. **4.** Витязь, П.А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П.А.Витязь, М.Л.Хейфец, С.А.Чижик // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2017, № 2. – С.54-72. **5.** Витязь, П.А. Состояние и перспективы развития технологических комплексов аддитивного производства изделий из композиционных материалов / П.А.Витязь, М.Л.Хейфец, С.А. Чижик // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017, № 7(73). – С.42-48. **6.** Чижик, С.А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий / С.А.Чижик, М.Л.Хейфец, С.А.Филатов // Механика машин, механизмов и материалов, 2014, №4(29). - С.68-74. **7.** Vitiaz, P.A. Laser-Plasma Techniques in Computer-Controlled Manufacturing / P.A. Vitiaz, M.L. Kheifetz, S.V. Koukhta. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2011. - 164p. **8.** Хейфец, М.Л. Оптимизация раскроя листовых материалов и послойной сборки изделий в аддитивном производстве / М.Л. Хейфец, В.И.Бородавко, А.М. Пынькин, Н.Л.Грецкий, В.Т. Сенють, С.В.Кухта, Д.В. Пуйман // Инженер. 2018, № 1(25) – 2(26). - С. 110-114.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Храмов А.В., Лексин Е. Н., *(ГК «ХАЛТЕК», г.Москва, Россия)*
Савельев К.С., Киселев Е.С. *(УлГТУ, г. Ульяновск, Россия)*
Тел. 8 960 376 05 52; e-mail: kec.ulstu@mail.ru

Abstract: *Provides an overview of common issues of introduction of polymer composites in aircraft design manufacturing parts of them. Considered the challenges and current research results and technological works on manufacturing parts made of composite materials*
Key words: *composite materials, carbon-filled plastics, especially manufacturing technology.*

Ужесточение требований к усталостной прочности, стремление к уменьшению массы, повышение устойчивости деталей и агрегатов летательных аппаратов (ЛА) и др. изделий высокоскоростного наземного и водного транспорта к коррозии, а также необходимость увеличения их срока службы вызывает все больший интерес машиностроительных предприятий к использованию в качестве конструкционных материалов композитов.

Так, в авиационной технике доля композиционных материалов (КМ) за период с 1994 по 2009 год выросла более, чем в 7 раз, и тенденция дальнейшего увеличения их доли в общей массе самолета сохраняется (рис. 1).

Несмотря на широкое применение композиционных материалов (прежде всего – с неметаллическими наполнителями) в таких высокотехнологичных отраслях производства как аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение и энергетика, вопросы разработки технологии и эффективного применения режущего инструмента для механической обработки заготовок из них пока остаются малоизученными. В настоящее время для изготовления деталей из композиционных материалов широко применяется традиционное металлообрабатывающее оборудование, не учитывающее особенности обработки резанием композиционных заготовок, что зачастую приводит к снижению качества продукции и падению производительности. Важнейшей проблемой, которую необходимо решать при обработке заготовок из композиционных материалов, является определение способа эффективного удаления сверхтонкой стружки из зоны обработки.

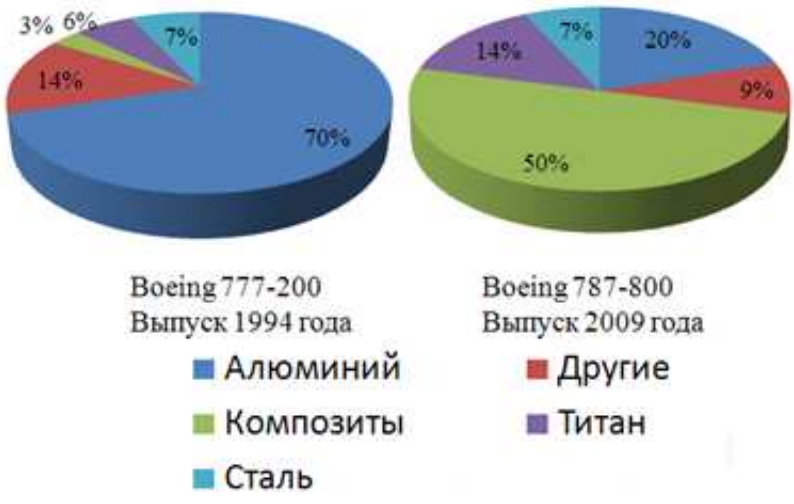


Рис. 1. Применяемые материалы в авиации (по массе) на примере самолётов фирмы Boeing [1]

Так, для одной из наиболее трудоемкой операции – фрезерования пазов, необходимо обеспечить использование всех преимуществ попутного и встречного фрезерования за один проход, снизить засорение стружкой и пылью обработанного паза и избежать наличия необработанных участков, что весьма не просто реализовать на практике с использованием металлорежущих станках.

Одной из самых сложных операций является изготовление точных отверстий в смешанных пакетах листовых заготовок из композиционных материалов и титановых или алюминиевых сплавов. В подавляющем большинстве случаев, усталостные разрушения ЛА происходят в зоне соединений, вследствие концентрации напряжений на кромках отверстий под крепеж. Волокнистая структура КМ обуславливает их более высокую, по сравнению с металлическими материалами, чувствительность к концентраторам напряжений, что предъявляет особые требования к качеству обработанных отверстий. Особенности агрегатно-сборочного производства авиационных конструкций, в том числе, из КМ исключают возможность использования для обработки отверстий под крепеж традиционного стационарного механообрабатывающего оборудования, ряда других технологических методов и средств, широко применяемых в механообрабатывающем производстве. Отверстия с требуемыми геометрическими, точностными и качественными параметрами выполняются в конструкциях, содержащих разнородные материалы: относительно "мягкие" алюминиевые сплавы и труднообрабатываемые материалы - титановые сплавы, высокомодульные углепластики, режимы раздельной обработки которых кардинально различны.

К инструментам для механической обработки заготовок из КМ с неметаллическими наполнителями, например стеклопластика и углепластика, из которых изготовляют сэндвич-панели, предъявляются высокие и разнообразные требования по усталостной прочности и эксплуатационным характеристикам. В процессе обработки заготовок из этих материалов наблюдаются расслоение, перегрев, образование заусенцев на изготовляемых деталях, абразивный износ режущего инструмента.

При разработке технологии изготовления деталей из КМ приходится учитывать свойства всех компонентов, входящих в их состав. Так, если выбрать слишком большую скорость резания, связующие смолы расплавятся и налипнут на режущую кромку, а при малой скорости резания не произойдет разрезания армирующих волокон. При сверлении отверстий такие материалы очень легко расслаиваются, а на выходе и входе в отверстие остаются трудноудаляемые заусенцы.

Обработка резанием заготовок из КМ обладает рядом особенностей, отличающих её от аналогичной обработки металлических заготовок. Это объясняется их специфичными свойствами и структурой обрабатываемых материалов. Особенности процесса резания композиционных материалов сводятся к следующему:

1. Относительная сложность получения высокого качества поверхности вследствие невысоких прочностных характеристик композиционных материалов, а также из-за их слоистой структуры.

2. Высокая твердость некоторых видов наполнителя.

3. Низкая теплопроводность КМ, что обуславливает слабый отвод тепла из зоны резания вместе со стружкой и в обрабатываемую заготовку.

4. Абразивное воздействие наполнителя. Наличие в зоне резания твердых составляющих приводит к абразивному износу инструмента.

5. Деструкция полимерного связующего при резании. В результате этого возникает механохимический адсорбционный износ инструмента.

6. Высокие упругие свойства материалов. Увеличение площади контакта

упругого композиционного материала с задней поверхностью инструмента, что приводит к повышению значений нагрузки со стороны задней поверхности.

7. При обработке заготовок из КМ образуются характерные дефекты поверхности (сколы, расслоения, прижоги), в связи с этим, при определении допустимого износа преобладает технологический фактор. Поэтому допустимый износ инструмента при обработке композиционных материалов всегда ниже, чем при обработке металлов.

8. Низкая теплостойкость некоторых составляющих композиционных материалов. При высоких температурах в зоне резания происходит выгорание связующего, на обработанной поверхности появляются прижоги. Поэтому обработка должна выполняться при меньших значениях температур в зоне резания. Это усугубляется еще и тем, что в большинстве случаев не допускается применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), т.к. многие составляющие композиционных материалов обладают таким свойством, как влагопоглощение.

Для уменьшения теплосиловой напряженности при обработке заготовок из смешанных пакетов листовых авиационных материалов (КМ+титановый сплав+алюминиевый сплав) в Ульяновском государственном техническом университете предложено вводить в зону формообразования новых поверхностей энергию ультразвуковых колебаний [3]. Спроектирована, изготовлена и смонтирована экспериментальная установка. Разработана и апробирована методика экспериментальных исследований. Предварительные расчеты контактной температуры и сил резания, а также экспериментальные исследования показали достаточно высокие перспективы этого метода обработки.

Несмотря на различия свойств разных марок композиционных материалов, их обрабатываемость по ряду критериев идентична. Её основные показатели: повышенная интенсивность износа режущего инструмента, в большей степени определяемая скоростью резания; качество поверхностного слоя, постоянство размеров в пределах допусков и другие параметры, определяющие эксплуатационные характеристики; сила резания и расходуемая на формообразование мощность. Поэтому целесообразно подразделять материалы по обрабатываемости на группы, и в дальнейшем при появлении новых материалов прогнозировать режим обработки на основе разрабатываемой классификации.

Анализ свойств и состава композиционных материалов позволяет выделить основные критерии, по которым их следует относить к той или иной группе обрабатываемости. Это, в первую очередь, тип связующего (термопластичный или термореактивный). Важным фактором является тип наполнителя или его состав (органический или неорганический), его физическая природа и свойства, и, наконец, структура наполнителя (волокнистый, листовой, порошкообразный и т.д.).

Обрабатываемость различных видов композиционных материалов отличается. Однако, в большинстве своем, такие материалы относят к классу труднообрабатываемых.

Перечисленные особенности обработки композиционных материалов показывают, что прямой перенос закономерностей процесса резания металлов на эти материалы недопустим. Соответственно, для оптимизации самого процесса резания композиционных материалов, достижения максимальной производительности и требуемого качества поверхности необходим специально подготовленный режущий инструмент, обладающий:

– высокой остротой режущего лезвия;

– повышенными физико-механическими свойствами инструментального материала;

– увеличенными требованиями к качеству подготовки режущих поверхностей и кромки;

– высокими технологическими показателями.

Следовательно, детального изучения требуют конструктивные особенности инструментов для обработки заготовок из композиционных материалов, свойства и технологические возможности инструментальных материалов для оснащения инструмента, параметры геометрии и микрогеометрии режущих элементов.

Как показывают выполненные опытно-промышленные апробации новых технологий изготовления деталей из перспективных конструкционных материалов, выполненные ГК "ХАЛТЕК", при обработке резанием заготовок из КМ необходимо использовать специальные инструменты, обладающие высокой устойчивостью к абразивному износу. К ним относятся, наряду с твердосплавными инструментами, инструменты из кубического нитрида бора (CBN) и поликристаллических алмазов (PCD). Альтернативу инструментам с режущими кромками из поликристаллических алмазов и их сравнительно высокой стоимостью, представляют инструменты из ультрамелкодисперсных твердых сплавов с алмазным покрытием и инструменты из минералокерамики.

По результатам проведенных исследований в ГК «ХАЛТЕК» были сделаны следующие выводы:

– От величины выбранной скорости резания зависит степень износа инструмента. Наиболее распространенные механизмы износа – абразивный износ и усталостное выкрашивание. Высокая скорость резания ведет к преждевременной поломке или откалыванию режущей кромки.

– Высокоскоростным режимам резания сопутствует увеличение температуры режущего инструмента и температуры в зоне контакта режущего инструмента с заготовкой. Вследствие этого скопившаяся пыль ведет к ещё большему засорению зоны возле режущей кромки и её износу.

Покрытие оказывает отрицательное воздействие на режущую кромку режущего инструмента при обработке заготовок из композитных материалов..

Конструкция инструмента для обработки композитных материалов на основе углепластика такова, что при обработке на заготовке не остается необработанных участков, покровного или основного слоя. По мере увеличения износа инструмента количество необработанных участков увеличивается. износа инструмента количество необработанных участков увеличивается.

Следует отметить, что в России практически отсутствует сколь либо существенный опыт и научная база по теме обработки композитных материалов. При изготовлении деталей ЛА применяются режущие инструменты, главным образом, зарубежного производства, а технологический процесс изготовления таких деталей имеет множество недостатков.

Как показали выполненные в ГК «ХАЛТЕК» исследования, хорошие перспективы для изготовления деталей из композиционных материалов имеет новая серия фрез SGS 20 CCR, а также инструменты из минералокерамики собственного производства.

Список литературы: 1. SGS Tool Company [Электронный ресурс] – http://sgstool.com/cms-assets/documents/91219-930043.sgs-composite-brochurev1212-lo-res.pdf; **2**. SGS Tool Company [Электронный ресурс] – http://www.sgstool.com/cms-assets/documents/80266-140802.composites-launch-9-10-12.pdf; **3.** Киселев Е.С. Разработка технологии сверления отверстий в пакетах из композиционных материалов /Е.С. Киселев, А.Н. Унянин, О.Г. Крупенников//Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: Материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции. Пермь: ПНИПУ, 2018, с. 147- 150.

ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ НА РОТОРНЫХ МАШИНАХ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ИНСТРУМЕНТОМ

Чернышев Е.А., Захарченко Н.А. (*ДонНТУ, г. Донецк, ДНР*)
E-mail: chernyshev81@mail.ru

Abstract: *This brief sketch deals with one special case of a processing method to press wire products' in rotor machines unless the following is taken into account. To the author's mind, this is an example of how very good-looking abstract idea is able to be rejected as soon as concretization takes place.*

Keywords: *rotor, sliding, processing, pressing.*

При анализе новых схем обработки на роторных машинах, которые позволяют существенно повысить производительность [1], одной из основных задач является выбор рациональной схемы, как с точки зрения ее конструктивной реализации, так и с позиции точности обработки. Ибо многие теоретически возможные абстрактные схемы технологического воздействия [2], которые не только имеют элементарную кинематику, но и реализуются простой конструкцией, к сожалению, не выдерживают даже первого критического анализа, как только речь идет о качестве обработки.

В данной статье рассмотрен вариант обработки давлением головок стержневых изделий, который имеет кинематику фрикционной передачи, но без проскальзывания, т.к. окружные скорости на начальной окружности ротора и на периферии инструментального диска равны между собой. Эта конструкция имеет то неоспоримое преимущество, что механизма рабочего хода, как такового, нет, ибо обработка осуществляется простым качением за счет вращения инструментального диска. Следует отметить, что данная схема была получена в результате кинематического синтеза на основе комбинирования элементарных движений [3], т.е. с использованием морфологического подхода – мощного метода поиска вариантов решений в инженерных задачах.

Определим рабочий угол, т.е. угол поворота ротора, на котором происходит обработка. Обратимся для этого к схеме на рис. 1, на которой обозначены: R_1 - радиус инструмента, R_2 - радиус начальной окружности ротора, h – высота выступающей проволоки (т.е. величина рабочего хода), α_{p1}, α_{p2} - соответственно рабочие углы для инструмента ротора, Ω_1, Ω_2 - угловые скорости инструмента и ротора.

Наглядно видно, что рабочий угол для инструмента определится следующим образом:

$$\cos\alpha_{p1} = 1 - \frac{h}{R_1}.$$

По условию равенства окружных скоростей

$$\alpha_{p2} = \alpha_{p1}\frac{R_1}{R_2}. \qquad (1)$$

Так как рабочий угол для ротора, очевидно, не может быть равен нулю, то всегда есть скольжение инструмента относительно заготовки, которое на рис. 2 обозначено s. Найти его не составляет труда:

$$s = R_2\left(1 - \cos\alpha_{p2}\right). \qquad (2)$$

Подставляя (1) в (2) и полагая радиусы равными, легко записать, что $s = h$, а это означает, что скольжение инструмента равно величине рабочего хода. Если посмотреть на этот факт с точки зрения обработки давлением, то инструмент вместо того, чтобы совершить вертикальное движение сверху вниз, скажем, на 5 мм, осуществит вдобавок движение в сторону на те же 5 мм. Разумеется, инструмент в действительности совершает только вращение, но относительно заготовки какая-либо элементарная площадка поверхности инструмента будет совершать именно вышеописанное движение. Нет нужды говорить о том, к какому результату это приведет.

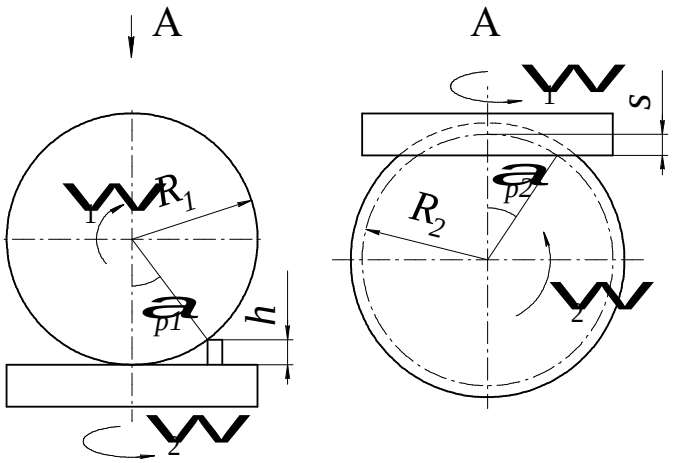


Рис. 1. Схема к расчету геометрических параметров ротора

Конечно, чисто математически мы имеем право записать, что $\lim_{\substack{R_2 \to \infty \\ R_1 = const}} s = 0$, но какова практическая сторона такой записи? Кроме того, радиус R_1 инструмента должен быть как можно бóльшим, чтобы угол, под которым начинается обработка, был существенно меньше угла трения, - иначе заготовка будет смята в сторону при качении. Например, для рабочего хода 5 мм этот радиус должен быть не менее 300 мм, и тогда совершенно ясно, что, избегнув смятия качением, заготовка будут смята относительным скольжением, ибо для того, чтобы скольжение не превышало, к примеру, допуск на круглость головки (порядка 0,5 мм) – хотя это тоже недопустимо большая величина, - радиус ротора должен быть 3 метра.

Таким образом, с точки зрения качества обработки данный способ формообразования в роторе имеет внутренне присущие противоречия, обусловленные как раз его кинематикой. Иначе говоря, кинематическая простота является только кажущейся, ибо приведённые рассуждения сделаны не более чем из геометрических соображений. Более того, с точки зрения кинематического синтеза такой способ обработки очень перспективен ввиду очевидных преимуществ конструктивного характера. И тем не менее он отброшен самым поверхностным анализом геометрии.

Как результат можно отметить, что привлекательная сторона абстрактного подхода к решению инженерных задач таит в себе то недопустимое, по мнению автора, упрощение, что методы, пригодные в одних условиях, переносятся в совершенно другие, которые могут не иметь ничего общего с первыми. Поэтому использование абстрактных схем должно сопровождаться критическим анализом конкретных особенностей того или иного решения.

Список литературы: 1. Кошкин Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии. - М.: Машиностроение, 1986. - 320 с. 2. Михайлов А.Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем. - Донецк: ДонНТУ, 2002. - 379 с. 3. Матвиенко А.В., Ищенко А.Л., Коваленко Т.В. Гибкие технологические системы на базе роторных машин// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Межд. сб. науч. тр. - Донецк: ДонГТУ, 2001. - Вып. 9. - С. 190 – 195.

ПСЕВДОПОЛЕЗНОСТЬ ТЕЗИСОВ НАУЧНЫХ ДОКЛАДОВ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ

Шабайкович В.А. *(Луцкий национальный технический университет, Украина)*
Тел./Факс: +38 (032) 7141115; E-mail: vik_shabajkin@ukr.net

Abstract: *As a result of this situation, many theses of scientific reports at conferences have lost their value. The main reason is the penetration of business into this scientific space. The usefulness of the abstracts should be determined by the value of the material submitted and the level of the conference. Now everything that is necessary to defend dissertations, to raise the image is published, laying the foundation not on the value of the material, but on verbal content, the authors' experience in chatter. Therefore, in addition to a hard review of theses, it is necessary to pay attention to their usefulness, novelty, practical value, the nature of the description of the material, etc. Pseudo-usefulness of theses should be eliminated due to correct writing of theses.*
Key words: theses, value, novelty, formation, utility.

Вступление. Как известно, конференция - это загодя запланированное, организованное собрание специалистов для обсуждения определенной проблематики с целью дальнейшего развития тематики. Научная конференция является формой организации научной деятельности, когда исследователи представляют и обсуждают свои работы. Затем начинается сбор тезисов, докладов и почти всегда оргвзносов. Тезисы (thesis – положение, утверждение) коротко формулируют основные положения [1], раскрывают актуальность, цель, задачи, методы, результаты и выводы. Это не план научной работы и не список основных ее положений, а краткий обзор проведенного исследования. Цель написания тезисов – кратко представить суть и результаты решения проблемы, чтобы сделать их доступными специалистам в данной отрасли. Если нет собственных идей по теме, то лучше вообще не писать никакие тезисы. Тезисы без научной новизны считаются рефератами.

Изложение материала.

Заданием тезисов является представление информации о собственных разработках с целью обнародования полученных результатов, установления приоритета, личного вклада автора, подтверждение достоверности результатов и отражение основного содержания научной работы и ее выводов, новизны и уровня, факта апробации или внедрения результатов и выводов научной работы, завершенность этапа исследования.

Недостаточно указать актуальность представленного материала, необходимо отметить его новизну и значимость по сравнению с известными, а также практическую ценность. Научной новизной полученных результатов, как известно, является конкретное неизвестное решение важной научно-технической проблемы, которая заключается в изучении физической сущности процесса, установлении и обобщении закономерных изменений его частей или создания теоретических основ их разработки. Это то, чего ранее не было в трудах, новый подход к решению известных проблем, новые методы и т.п. При определении новизны можно воспользоваться составлением отличительной части формулы изобретения «…отличается тем, что…». Научная значимость и новизна результатов подтверждаются использованием полученных результатов, а также полученными патентами.

Практическая ценность работы заключается в создании научной базы разработки принципиально новых процессов и высокоэффективного оборудования и оснащения, их методики при повышении показателей качества. Основным является описание механизма разработки научно-технического решения, который предусматривает описание ряда взаимосвязанных этапов: сбор информация, анализ ситуации, конкретизация задачи, установление прототипа, дополнительного эффекта, требуемых затрат, направление решения, экспериментальная проверка, опытное или производственное внедрение. Указываются недостатки прототипа, в первую очередь подлежащие исправлению.

Полезность тезисов докладов определяется ценностью представленного материала и уровнем конференции. В 2019 году в Украине планируется провести 1699 конференции, как правило – платных, т.е. 141,58 в месяц, 35,39 в неделю и 5,9 в день (!?). За 2009 – 2019

года в Украине было проведено 47959 конференций. Настоящий бизнес-макулатурный бум! Кому это нужно и какая от этого польза? Ответ очевиден. Поэтому возникает вопрос о ценности таких конференций с их тезисами, связанных в первую очередь с проникновением бизнеса в это научное пространство. Во многих случаях на организации конференций просто зарабатывают, остальное их вообще не интересует. Оргвзнос от 100 до пару тысяч гривен. Выходит мало того, что представляется интересная перспективная разработка, но за это должен заплатить сам автор, а не автору, как это принято во всем мире, но здесь иной подход - главное деньги.

Псевдополезность тезисов докладов закладывается еще в самом начале при допущении ошибок выполнения отдельных этапов. Чаще всего это несоответствие тематике конференции, отсутствие новизны и актуальности, всеобщность фраз, отсутствие полного описания полученных результатов, наличие плагиата, расплывчатость выводов. Встречаются названия тезисов, в которых не обозначена проблема, тезисы заменены рефератом, увеличение вступления за счет сокращения изложения основного материала, недостаточное поверхностное освещение темы тезисов, неконкретность, недопустимость включения политических бездоказательных высказываний и т.п.

Общее содержание основной части должно соответствовать теме исследования и служить ее исчерпывающим раскрытием. Изложение необходимо строить так, чтобы оно выглядело аргументированным, подаваемые суждения - взвешенными, логическая канва - продуманной.

Можно предложить перечень основных этапов написания тезисов доклада. Вначале следует продумать представляемую область проведенных исследований в рамках тезисов научного доклада, сформулировать рабочее название, структуру и полученные выводы. В рабочем названии и структуре должна быть отображена основная идея исследования. Тезисы должны иметь характер краткого утверждающего вывода с закономерностью обнаруженных научных фактов. Тема тезисов не должна быть многоплановой, она должна быть краткой, отвечающей их содержанию, тематике конференции. Часто тема корректируется после написания тезисов.

Написание тезисов доклада должно начинаться с формирования основного результата исследования, который представляется на конференцию, соответствия его тематике конференции, обоснования новизны, выбора названия тезисов, учета требований относительно актуальности, оформления, структуры тезисов, отдельных разделов, объема, раскрытия сущности, достаточности объема материала для описания представленных материалов, их доступность. Тезисы доклада должны иметь желательно УДК, ключевые слова, краткое введение, актуальность, цель, новизна, краткое описание полученных результатов, их оценка, вывод и тому подобное. Тезисы не должны быть многоплановыми. Желательно использовать методически рекомендованный алгоритм написания тезисов докладов для освещения своей научной разработки на конференции [2].

Описание представленного материала должно отвечать названию, быть аргументированным, логически связанным, раскрывать его сущность. Сущность материала должна быть выражена совокупностью признаков, достаточных для достижения научно-технического результата, которые имеют причинно-следственную связь с указанным результатом. Допускается использование рисунков, таблиц, формул. Рисунки должны быть помещены в объект «Надпись», размещенный в тексте. Один рисунок должен занимать не более 1/4 объема страницы. Формулы и обозначения обязательно должны набираться с помощью формульного редактора Microsoft Equation 3.0.

Классической структурой тезисов является постановка задачи, методы научного исследования, полученные результаты и выводы. Для облегчения написания качественных тезисов можно выбрать несколько подходящих аналогов, из которых установить прототип, т.е. лучшие тезисы, близкие по содержанию к создаваемым. Постановка задачи и цель должны быть актуальными, научными, а не инженерными, отвечать структуре тезисов, предлагать принципиально новое решение. Описывается теоретиче-

ское обоснование, методы сбора информации, полученные результаты, рекомендации, практическое применение, перспективы и т.п.

Блок-схема формирования тезисов научно-технического решения должна включать описание конкурирующих вариантов решений, их анализ и синтез, выбор оптимального по показателям качества и особенно предполагаемым затратам.

Указывается используемый метод: теоретический, эмпирический, общелогический или другой и инструменты исследования. Четко описываются результаты, полученные по конкретному вопросу указанного научного и практическое значения. Рисунки из-за занятия многого места в тезисах могут быть использованы только тогда, когда они раскрывают сущность исследования и замена их текстом нежелательна. При описании для упрощения понимания сущности можно использовать метатекст. Описывается сущность исследования с точки зрения новизны и полезности, приводится анализ результатов. Общими требованиями к описанию результатов исследования является точность, логичность, простота изложения, однозначность и строгость. Особо отмечается механизм полученного решения, в частности инновационного, его этапы [3].

К часто встречаемым ошибкам тезисов доклада можно отнести: несоответствие названия содержанию, реферативный характер, отсутствие указания актуальности, новизны, практической полезности, конкретики, отсутствие фактического материала, не раскрытие содержания, методики, материал состоит из общих фраз, необоснованных рассуждений, обобщений, не соответствие выводов содержанию, многоплановость, не оформленность согласно требованиям.

В связи с разнообразием требований к оформлению тезисов следует их унифицировать. Заглавие можно принять, как приведенное в начале. Чем оно короче, тем лучше. Текст тезисов выполняется объёмом 1-3 полные страницы А4 с круговыми полями 2 см., шрифтом Times New Roman 12 pt не ниже версии 6,0 с межстрочным интервалом 1,0 и абзацами с отступом 10 мм, между которыми непременно должна существовать логическая связь. Шрифт аннотации и списка литературы - 10 pt., придерживаясь алгоритма написания тезисов. При этом аннотация и заглавие должны быть как на русском, так и английском языках. Тезисы должны иметь следующие сокращенные элементы (можно без их заглавий): постановка проблемы, новизна, известные решения, представление основного материала, выводы и список литературы за последние 5 лет не больше пару пунктов.

Выводы. Тезисы докладов на конференцию можно сделать полезными в единственном случае, когда логически представляемый материал актуален и нов, является собственной разработкой без плагиата и представляет практическую полезность. В тезисах должна соблюдаться оптимальная сложность полученных результатов с четкостью, обоснованностью и доступностью изложения. Сделать тезисы полезными и просто и сложно: главное устранить влияние бизнеса - конференции должны быть бесплатными, принимать на конференцию следует лишь новые актуальные самостоятельные разработки, организовать настоящее рецензирование, искать заинтересованных внедрениями спонсоров, отслеживать внедрение опубликованных материалов, организовать премирование или другое поощрение наилучших тезисов докладов. К тому же просится резкое сокращение проведения бесполезных конференций с их тезисами.

Список литературы: 1. Хайчіна Ю.М. Методично рекомендований алгоритм написання тез доповідей. Методичні рекомендації. –Кременчуг 2014, 21 с. **2**. Берг Д.Б. Краткое руководство по написанию тезисов научного доклада: Методические указания / сост. Д.Б. Берг \ Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. - 33 с. http://www.ustu.ru/_Пособие &jf=y. **3**. Шабайкович В.А. Управління забезпеченням конкурентоспроможності продукції. – Луцьк: ЛНТУ, 2012. 284 с.

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ГЛУБИННОГО ОБОРА ПРОБ ИЗ СКВАЖИН МАЛОГО ДИАМЕТРА

Шажко Я.В., Шажко О.В., Ожегова Л.Д., Вишняк Ю.Ю.
(ГУ «ИФГП», г. Донецк, ДНР)
Тел./Факс: +38 (062) 3115285; E-mail: syarilo@mail.ru

Abstract: *The scheme of the pingassampler based on the Central (lobe) gate Is given the principle of obtaining samples using it. This device will solve two main problems in the study of the gas content of coal and rocks - sampling without collecting drilling fines in the course of movement of the pingassampler; minimizing the lost gas release during drilling.*
Key words: *pingassampler, gascontent, rock.*

Анализ существующих методов прямого определения газоносности угольного массива с применением специальных колонковых снарядов (керногазонаборников), которые тем или иным образом позволяют отбирать пробы угля, пород и газа в их естественном соотношении и определять содержание газа в керне, близкое к природному [1-2]. Благодаря относительной простоте опробования и обработки получаемых результатов, а также сравнительно небольшой стоимости проведения работ, они широко применяются во всех основных каменноугольных бассейнах. Отбор проб угля для определения природной газоносности производится следующими специальными керногазонаборниками, при перебуривании пласта скважинами не менее 74 мм.

1. Керногазонаборники с механическим устройством для герметизации угольного керна непосредственно после его отбора из забоя скважин при помощи механических клапанов расположенных в нижней и верхней частях керноприемника (герметические керногазонаборники типа ГКМ) [3-4]. В таком изолированном от внешней среды состоянии керн извлекают из скважин и отравляют в лабораторию для дегазации и анализа газа.

Герметические керногазонаборники типа ГКМ следует применять для опробования угольных пластов малой и средней крепости с большой скоростью газоотдачи при бурении скважин с выходом и без выхода на поверхность промывочной жидкости. К достоинству данного типа снарядов следует отнести то, что они позволяют наиболее полно сохранить газ. Недостатком их являются относительная сложность конструкции и, как следствие, низкий коэффициент срабатывания.

2. Керногазонаборники с «колоколом» (керногазонаборники КГН-3-58А, КГН-3-70/76, КА-61М, КГ-55-2М) [5-6], в которых над керноприемником имеется газосборник для улавливания газа, выделяющегося при выбуривании керна и его извлечении из скважины. Нижняя часть керноприемника этих приборов открыта при подъеме снаряда. Из газосборника газ извлекается или непосредственно после подъема прибора из скважины, или в лаборатории. В последнем случае керноприемник при разборке снаряда герметизируется: закрывается снизу колпаком, а сверху механическим клапаном. Окончательная дегазация пробы, находящейся в керноприемнике, производится в лаборатории.

К достоинствам снарядов этого типа относится более высокий по сравнению с герметическими керногазонаборниками процент срабатывания при относительной простоте конструкции и работы с ними. Недостатками их являются ограниченность применения в скважинах с полным поглощением промывочной жидкости, возможность частичных потерь газа в растворенном состоянии из газосборника и из керноприемника через нижний торец в процессе подъема керногазонаборника в скважине, а также на поверхности при герметизации керноприемника.

Однако обилие факторов [7], определяющих качество получаемых с его помощью проб и отсутствие надежных критериев в оценке представительности конечных результатов, приводит к выбраковке до 50% отбираемых проб и вводимый в прогнозные значения метаноносности коэффициент 1,3 на возможные потери газа при опробовании угольных пластов керногазонаборниками остается неизменным. Все работы с керногазонаборниками таких типов требуют длительного времени затрат времени на

выемку оборудования и его доставку в шахтную лабораторию.

В современных условиях работы в угольных шахтах необходима интенсификации процессов мониторинга газовой обстановки в призабойной зоне движущихся лав, особенно это актуально при прямом ходе, поскольку газовая обстановка неизвестна. Для ликвидации недостатков в существующих устройствах нами была разработана схема штыбогазонаборника, основанного на принципе центральном (лепестковом) затворе, аналогичного применяемого в фототехнике 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.

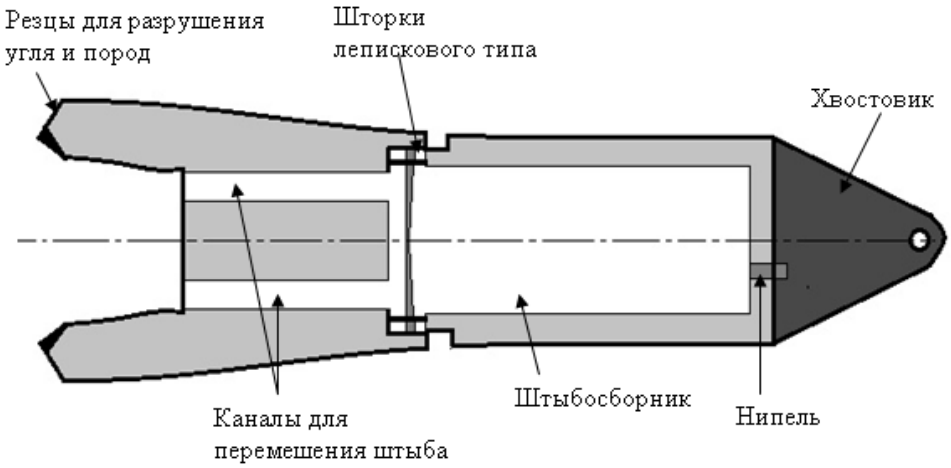


Рис. 1. Схема штыбогазонаборника с центральным (лепестковым) затвором

Принцип получения проб с помощью штыбогазонаборника. В процессе бурения при подходе к точке замера основная коронка бурового става заменяется на штыбогазонаборник, который досылается к груди шпура. При забуривании, штыб заполняет полость устройства (штыбосборник) по спецканалам. В дальнейшем происходит вращение бурового става в противоположном направлении и герметизация пробы в полости за счет центрального (лепесткового) затвора. После извлечения штыбогазонаборника из шпура, он подключается к измерительной аппаратуре за счет имеющегося в тыльной части ниппельного соединения с ниппелем Шредера. Данное устройство позволит решить две основных проблемы при исследовании газоносности угля и горных пород: - качественная отборка проб из локальных зон (без сбора буровой мелочи по ходу движения штыбогазонаборника); - минимизация потерянного газовыделения в процессе бурения.

Список литературы: 1. Сергеев И.В. Методика определения природного газового давления в угольных пластах. Краткий научный отчет / И.В. Сергеев. В.Г. Рыжков. – М. ИГД, им. А.А. Скотинского, 1963.– 106 с. 2. "Методы замера давления газа в угольных пластах". Тезисы докладов. - М. ИГД им. А.А. Скочинского, 1967, -105с. 3. Храменков В.Г. Бурение геологоразведочных скважин: учебное пособие / В.Г. Храменков, В.И. Брылин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 243с. 4. Пономарев П.П. Технические средства и технологии отбора керна высокого качества **при бурении скважин** / Пономарев П.П., Каулин В.А., Власюк В.И. – М. ООО «Геоинформцентр», - 2003. – 116 с. 5. Михайлова Н.Д. Техническое проектирование колонкового бурения / Михайлова Н.Д. – М.: Недра, 1985. – 200 с. 6. Пономарев И.И. Отбор керна при колонковом геологоразведочном бурении / И.И. Пономарев, В.А. Каулин – Л.: Недра, 1989. – 256 с. 7. Труфанов В.Н. Методика прогнозирования метанообильных зон углегазовых месторождений Восточного Донбасса / В.Н. Труфанов, М.И. Гамов, В.Г. Рылов, А.В. Труфанов // Материалы симпозиума «Неделя горняка» - М.: МГГУ. - 2001. - С. 106-118.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО МОДУЛЯ “МЯГКОЙ” ЭКЗОСКЕЛЕТОННОЙ АССИСТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Шахазизян Б.Г., Акопян Н.Г., Арутюнян М. Г. *(НПУА, Ереван, Армения)*
*Тел.:+374(93)998840; E- mail:*mharut@seua.am

Abstract. *A method is proposed for modeling a soft exoskeleton assistive system with active modules based on electroactive polymer-metal controlled actuators, which, if necessary, can have both flexible and rigid states. In the active mode of operation, the necessary strength, rigidity and developed forces are provided. The study used the well-known empirical dependence between the longitudinal deformation of the actuator and the voltage applied to it. The active module is modeled by an isotropic shell and is applied the theory of thin-walled shells of Laplace. The active module creates pressure on the human muscle, which can be several times higher than the atmospheric pressure, which is quite enough for its stimulation.*
Keywords: *exoskeleton assisting system, active module, controlled polymermetal actuators, the theory of thin-walled shells.*

Введение. В статье представлена “мягкая” экзоскелетонная ассистирующая система, которая по необходимости может иметь как гибкое, так и жесткое состояния, тем самым поддерживать и стимулировать деятельность мышц тела человека. Действие экзоскелетона основано на применении электроактивных полимерметалических актуаторов, управляемых с помощью контроллера. В жестком состоянии экзоскелетон может защищать организм человека и поддерживать работу мышц. При этом существенно упрощены конструкция и система управления известных экзоскелетонов с гидро- или пневмоприводами [1], уменьшена масса и понижена стоимость, а также облегчены сборка и производство, повышены скорость и эффективность их действия. В то же время, в активном режиме функционирования обеспечиваются необходимые прочность, жесткость и развиваемые усилия, мышечные нагрузки и контроль их стимуляции. Представлена методика расчета электроактивных полимерметалических модулей предложенной экзоскелетонной ассистирующей системы.

Структура экоскелетонной ассистирующей системы. Экзоскелетонная система (рис. 1) состоит из одеваемых на человека сегментов, на которые прикреплены активные модули 1, 2, представлющие собой закрепленные в кожухе сплетенные электроактивные полимерметаллические актуаторы, с возможностью управляемого удлинения и укорочения [2]. Последние могут приклепляться к бедренному и голенному сегментам пользователя, работают синхронно движениям ног, а также защишают их от внешних механических воздействий. Надеваемые сегменты экзоскелетона могут включать вспомогательные части, информационный блок, а также сегменты для ступни 3 с датчиками давления.

При этом существенно расширяются и улучшаются возможности управления экзоскелетнонной системы, поскольку используемые в ней электроактивные полимерметаллические актуаторы приводятся в действие непосредсвенным воздействием электричеких импульсов от источника питания, задаваемых контроллером. Благодаря их безинерционности модули непосредственно и мгновенно реагируют на управляющие электрические импульсы от контролера. При этом, достигаются требуемые жесткость и развиваемые усилия на любом участке одеваемых сегментов экзоскелетона, что расширяет его возможности и повышает эффективность действия.

В новом техническом решении существенно упрощается конструкция, благодаря чему удается избежать известных сложностей и недостатков, присущих конструкции и эксплуатации гидро - и пневмосистем.

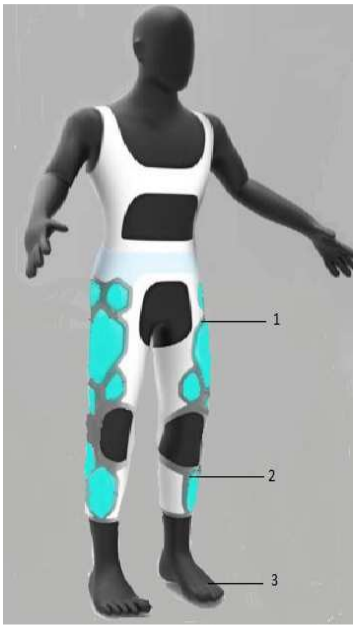


Рис. 1. ‘’Мягкая’’ экзоскелетонная система

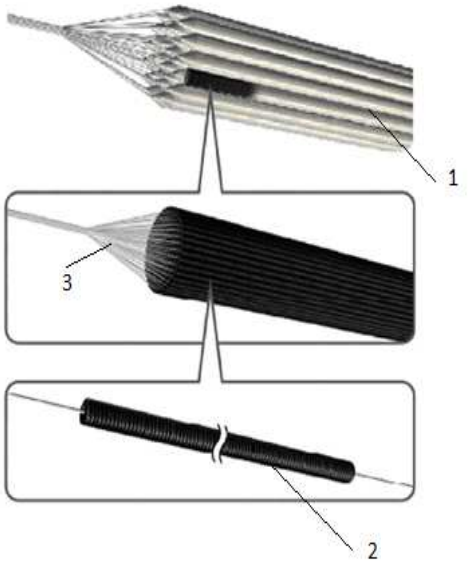


Рис. 2. Возможная структура электроактивного актуатора

Теоретические аспекты расчета электроактивных полимерметаллических актуаторов. Расчеты основываются на электромеханической модели сокращающихся электроактивных полимерметалических актуаторов [3-6]. Используемый в активных модулях актуатор 1 состоит из связки полимерметаллических композитных нитей 2 (рис. 2), которые в свою очередь находятся в электролитной закрытой системе 3 и приводится в действие воздействием электрического поля. Для желаемого воздействия на мышцы нужно задать значения необходимого электрического напряжения и законы их изменения для соответствующей активации и управления актуатором. Своим строением и принципом работы электроактивные полимерметаллические актуаторы аналогичны мышцам, с той лишь разницей, что мышечная система работает благодаря поочередным сокращениям пар мышц: агонистов и антагонистов, тогда как каждый полимерметаллический актуатор имеет возможность работать в двойном режиме – как сокращения, так и удлинения.

Из экспериментально полученных зависимостей, в нашем исследовании, наиболее целесообразно использование зависимости между продольной деформацией актуатора и электрическим напряжением, приложенным к нему [4, 6].

$$\varepsilon_k = \frac{(1-2\upsilon)cU_k^2}{2E} + \frac{\sigma_k}{E}, \qquad (1)$$

где $k = 1,\ldots,n$, n - число актуаторов активного модуля, ε_k - продольная деформация, ν - коэффициент Пуассона, E - модуль Юнга, c - электрическая емкость, σ_k - механическое напряжение в актуаторе, U_k - электрическое напряжение, приложенное к актуатору.

Соотношение между силой и механическим напряжением в актуаторе выражается следующей формулой [3]:

$$F_k = \left(\frac{(1-2\upsilon)q^2}{4cV_k^2} + \sigma_k\right)S_k \,, \qquad (2)$$

где F_k - сила, развиваемая актуатором, q - электрический заряд, V_k и S_k - объем и площадь поперечного сечения электроактивного актуатора.

Методика моделирования активного модуля. В описанной выше системе активный модуль, состоящий из скрепленных в кожухе электроактивных полимерметаллических актуаторов предлагается моделировать изотропной оболочкой и для нее применить безмоментную теорию тонкостенных оболочек, напряженное состояние которой описывается уравнением Лапласа [8]:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{\delta}\,. \qquad (3)$$

Здесь σ_m и σ_t - меридиональные и окружные механические напряжения в оболочке, ρ_m и ρ_t - соответствующие им меридиональные и окружные радиусы кривизны оболочки, p – давление на поверхности оболочки, δ – толщина оболочки. В нашем случае представляют интерес следующие две задачи: прямая - а) определение давления на мышцы со стороны активного модуля экзоксолетона, когда заданы законы изменения управляющего электрического напряжения и обратная - б) определение законов изменения управляющих электрических напряжений для обеспечения требуемого давления на мышцы.

Определение давления на мышцы со стороны активного модуля экзоксолетона. Расчет проводится при следующих данных [6]: υ = 0,426, E = $0{,}8 \cdot 10^9$Па, c = $1{,}8 \cdot 10^8$ Ф, q^2 = 1,167К^2[42].

Диаметр используемых в модуле полимерметаллических актуаторов: $d_k = 1{,}8$ мм. Он в состоянии развивать следующие величины сил сжатия и растяжения соответственно: $\mathrm{F_k^c} = 4{,}12$ Н и $\mathrm{F_k^p} = 2{,}26$ Н , $\mathrm{U_k} = 2$ В.

Напряжения и деформации в оболочке активного модуля рассчитываются учитывая площадь поперечного сечения использованных актуаторов : $\mathrm{S_k} = 2{,}54$мм^2 . При этом механические напряжения в актуаторе составляют:

$$\sigma_k^{\mathrm{c}} = \frac{4{,}12 \cdot 10^6}{2{,}54} = 1{,}62 \cdot 10^6(\text{Па}), \qquad \sigma_{\mathrm{k}}^{\mathrm{p}} = \frac{2{,}26 \cdot 10^6}{2{,}54} = 0{,}89 \cdot 10^6(\text{Па}).$$

Для определения деформаций актуатора используется формула (1).

Они соответствуют расчетным величинам напряжений сжатия и растяжения актуатора :

$$\varepsilon_{\mathrm{k}}^{\mathrm{c}} = 0{,}06 + 0{,}02025 = 0{,}062025, \qquad \varepsilon_{\mathrm{k}}^{\mathrm{p}} = 0{,}06 + 0{,}0011 = 0{,}0611.$$

Определяются σ_m и σ_t - соответственно меридиональные и окружные механические напряжения в оболочке: $\sigma_m = \sigma_t = E\varepsilon_k = 0{,}048 \cdot 10^9(\text{Па})$. Толщина δ тонкостенной оболочки активного модуля экзоскелетона определяется диаметром d_k волокна актуатора: $\delta = d_k = 1{,}8\,(\text{мм})$. При воздействии приложенного к актуаторам электрического напряжения, по формуле (3) определяется давление, которое воздействует на мышцу со стороны активного модуля. Давление существенно зависит от величин ρ_m и ρ_t - меридионального и окружного радиусов кривизны оболочки активного модуля экзоскелетона, определяемых в каждом конкретном случае индивидуально для каждого пациента, исходя из кривизны контактирующей с областью

активного модуля поверхности тела. В иллюстрационном примере принято: $\rho_m = 250$ мм, $\rho_t = 750$ мм.

В результате расчета получаем давление активного модуля на мышцы: p = 461 кПа.

Уместно заметить, что воздействие на мышцы не ограничивается нормальным давлением: в динамическом режиме благодаря трению сегмента экзоскелетона с поверхностью тела оно сопровождается касательными усилиями, также стимулирующими сокращения мышц. При нулевой кривизне, но достаточно тесном прилегании экзоскелетона к контактирующему участку тела могут возникать только касательные усилия.

Выводы. В статье определено давление на мышцу человека активным модулем « мягкой » экзоскелетонной системы, под воздействием приложенного к актуатору электрического напряжения. Пример расчета показывает, что полимерметалический актуатор, электромеханические свойства которого заданы, а диаметр составляет *1,8 мм* при приложении к нему электрического напряжения величиной в *2 В* развивает усилия: в *4,12 Н* – при его сжатии и *2,26 Н* - при растяжении. При этом, в актуаторе возникают механические напряжения величиной, равной *1,62 МПа* - при сжатии и *0,89 МПа* - при растяжении, а также имеют место соответствующие им линейные деформации: в *6,2%* -укорочения и *6,1%*- удлинения. При меридиональном и окружном радиусах кривизны, равных соответственно *250 мм*и *750мм* активный модуль создает *461 кПа* статического давления на мышцу, которое примерно в *5* раз превышает атмосферное давление, что вполне достаточно для ее стимуляции. Преимуществами концепции разработанного проекта являются широкие возможности подбора структуры экзоскелетонной ассистирующей системы и эффективность управления полимерметаллическими актуаторами благодаря их безинерционности, а также осуществление стимуляции мышечной активности механически воздействующими импульсами высокой частоты.

Работа выполнена в рамках проекта 18T-2D236, финансируемого Государственным комитетом по науке при Министерстве образования и науки Республики Армения.

Список литературы: **1.** Patent KR101815640B1, South Korea, 2017, Dong Chan. Soft exoskeleton apparatus. **2.** Bay L., West K., Sommer-Larsen P., Skaarup S. and Benslimane M. A conducting polymer artificial muscle with 12% linear strain: Adv. Mater., 2003, vol. 15, p. 310–313. **3.** Bowers T. Modeling, Simulation, and Control of a Polypyrrole-Based Conducting Polymer Actuator: submitted for the Degree of Master of Science at the Massachusetts Institute of Technology, 2004. **4.** Madden J., Vandesteeg N., Anquetil P., Madden P., Takshi A., Pytel R., Lafontaine S., Paul A. Wieringa P. and Hunter I. Artificial Muscle Technology: Physical Principles and Naval Prospects: IEEE Journal of Oceanic Engineering, July 2004, Vol. 29, No. 3, p. 706. **5.** Inzelt G. Conducting Polymers: A New Era in Electrochemistry, Springer, 2008. **6.** Carpi F., Smela E. Biomediacal Applications of Electroactive Polymer Actuators: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-0-470-77305-5, 2009. **7.** Sargsyan S. Dynamics of a lower limb exoskeleton with conductive polymer-metal actuators // Proceedings of State Engineering University of Armenia (SEUA). - 2013. -I.16, № 1.- pp. 59-66. **8.** Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ, 2010, 590 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИТОВ С РАССЛОЕНИЯМИ ПРИ ПОМОЩИ СРЕДСТВ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ

Щугорев В.Н., Подмазов Д.А.., Дуйшеналиев Т Б., Цой В.Э.., Щугорев А.В.
(Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия)
E-mail: Shchugorev.VN@gmail.com

Аннотация. Композиционные материалы находят широкое применение в различных областях техники. Они как правило имеют слоисто – волокнистую структуру. Низкая межслойная прочность композитов делает конструкции из них чувствительными к дефектам типа расслоений. Владение современными методами исследований физических свойств необходимо для глубокого понимания механики композитов. На данный момент широко разработаны эффективные методы оценки поведения конструкций из композиционных материалов для широкого спектра нагружения [1-3]. Однако до сих пор не существует сравнимых по эффективности методов расчета поведения конструкций из композита при ударе внешними объектами. Значительный интерес при проведении таких исследований представляет собой ***видеофиксация*** процесса нагружения и дальнейшее поведение объекта.

В процессе эксплуатации изделий из композитов возможны взаимодействия деталей и внешних элементов конструкций со сторонними объектами - ударное нагружение, статическое нагружение выше предельного состояния трещиностойкости а также царапины и надрезы внешнего слоя. Отслоение у внешнего слоя конструктивного элемента меняет свое начальное положение, что приводит к изменению функциональности детали.

Рис. 1. Классификация рассматриваемых расчётных моделей конструктивных элементов с отслоениями

Геометрическая схематизация элемента конструкции с отслоением представлена следующими объектами (рис. 1): стержень с отслоением (один из размеров объекта на порядок и более превышает два других размера, направление приложения внешних усилий – вдоль оси); балка с отслоением (конструктивная схема - стержень, работает на изгиб); пластина с отслоением (один из размеров мал по сравнению с двумя другими, серединная поверхность является плоскостью); оболочка с отслоением.

По характеру изменения параметров нагрузки во времени рассматривалось квазистатическое и циклическое нагружение, а также нагружение падающим грузом в предположении, что влияние скорости приложения усилий на свойства материала отсутствует(рис.1). Вид нагружения классифицировался как нагружение приложенными усилиями (мягкое); нагружение перемещениями (жёсткое). Для каждого из случаев формулировались критерии потери несущей способности. Для стержневого элемента с отслоением внешнего слоя это подрастание стрелы прогиба до критического значения, которое может быть назначено из эксплуатационных требований. Для балочных и оболочечных элементов, работающих на изгиб, принимались следующие критерии: величина стрелы прогиба балки превышает критическое значение (для случая мягкого (силового) нагружения); неограниченный рост дефектов, при котором балка разделится на две части (для случая, когда технические условия не предусматривают эксплуатацию элемента с таким типом нарушения целостности); значение эквивалентных напряжений превышает критическое (рис.2).

Данные задачи связаны с определением равновесных размеров отслоений. Основной способ вычисления равновесных размеров основан на подходе аналитической механики разрушения, предложенного В.В. Болотиным {1 Аналитическая механика разрушения предполагает вычисление и сравнение обобщённых сил, стремящихся увеличить размеры дефекта, а также сил сопротивления их росту.

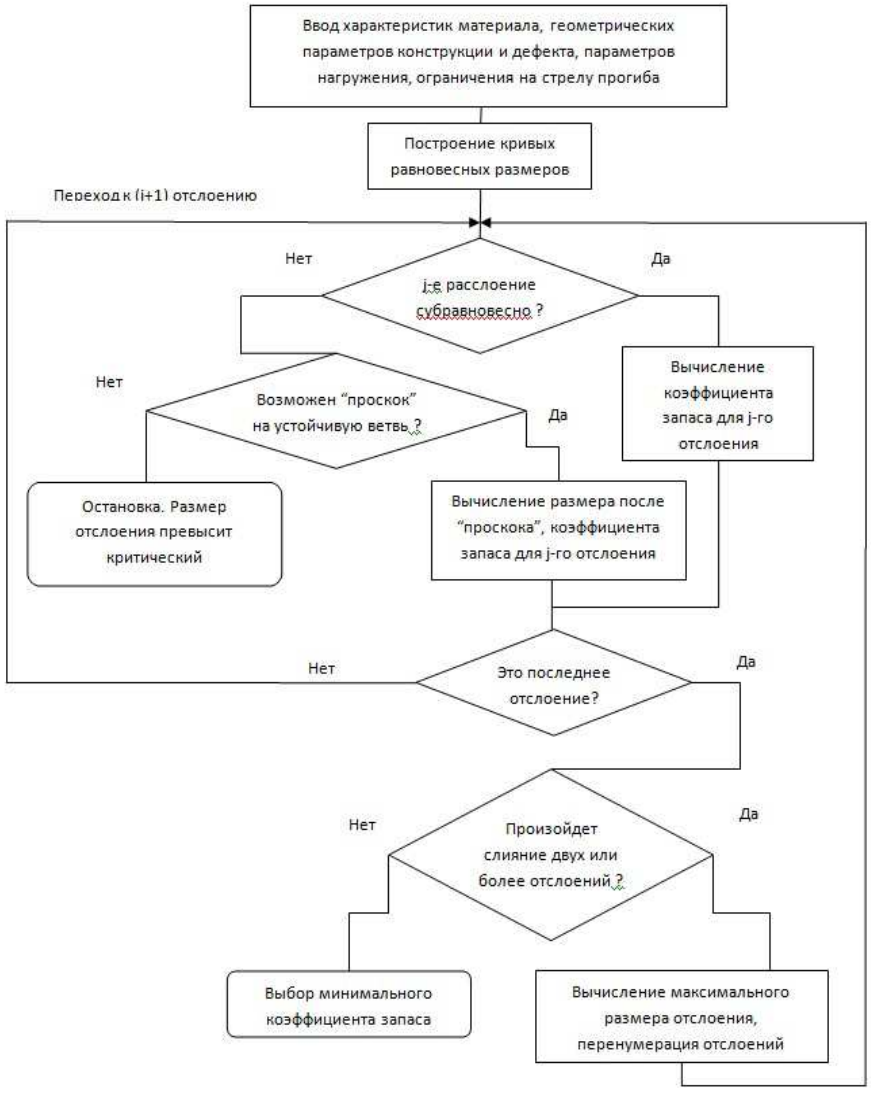


Рис. 2. Алгоритм оценки несущей способности элемента, содержащего расслоение при квазистатическом нагружении

Для исследования характера реакции композитов на ударное воздействия падающим грузом и визирования прогиба использовалась Action камера Go-Pro, позволяющая фиксировать процесс со скоростью до 240 кадров в секунду. [5]. Сопоставлено точное теоретическое решение и результаты, полученные экспериментально. Современные камеры позволяют фиксировать быстро протекающие процессы со скоростью до 1000 кадров в секунду (Sony RX-100 M 4). (Рис.3)

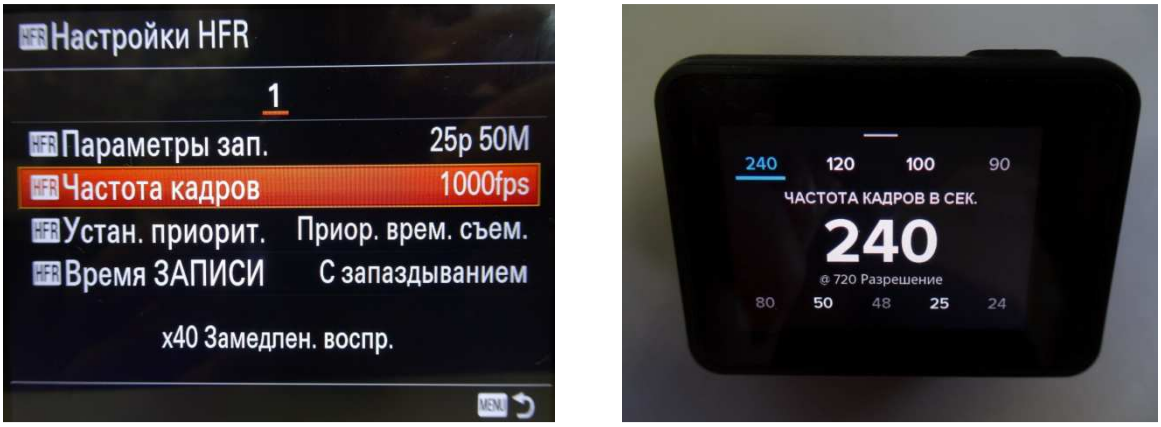


Рис.3. Частота кадров регистрации. (Sony RX-100 M4, GoPro 6)

При этом разрешение кадра видеоматериала составит. 1080 строк для некоторых моделей- GoPro 6. Таким образом за временной интервал между кадрами, объект движущийся со скоростью V=6 (м/с) (типичная скорость при низкоскоростном ударе) может сместиться на расстояние 0,025 м

Зависимость прогиба от энергии ударника U=240 Дж массой m=15 кг с равна 0,025 м. Вместе с тем скорость затвора меньше чем время между кадрами. Таким образом численное значение прогиба неоходимо оценивать в сравнении с размерами исследуемого объекта.

Для обработки видеоинфомации как правило используются программные средства- видеоредакторы. Они позоляют вамедлить или увеличить скорость видеосъемки и работать с отдельными кадрами. Разрешение в 720-1080 строк вполне достаточно для выделения отдельных кадров из видеоматериала. Отдельный кадр позволяет фиксировать прогиб балки.

Кинетическая энергия ударника переходит в потенциальную энергию деформирования балки Некоторая часть энергии при этом уходит на акустическое излучение, нагрев и вдавливание сферического индентера в поверхность балки и деструкцию поверхностных слоев.

Заключение (или Выводы)

1. Вышеприведенное исследование показывает, что применение скоростных камер в качестве фиксатора видеоинформации возможно после сопоставления масштаба исследуемого объекта, скорости протекающего процесса и изменение конфигурации системы за межкадровый промежуток времени.
2. Использование скоростной видео съемки со скорость до 1000 кадров в секунду позволяет фиксировать различные фазы поведения системы индентер–балка-трещина.

Список литературы: 1. Bolotin Vladimir V. Stability problems in fracture mechanics. - John Wiley & Sons, Inc. - 1996.-187 с. **2**. Щугорев В.Н. Трещиностойкость конструкционных элементов с расслоениями.// X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Избранные тезисы докладов. (Нижний Новгород, 24 – 30 августа 2011 г.). Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2011. С. 218-219. **3**. Динамика удара: Пер. с англ./Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др.-М.: Мир, 1985. **4**. .Касьянов К. Г., Щугорев В.Н., Подмазов Д.А, Никишин В.И. Исследование напряженно деформированного состояния в слоистой плите при низкоскоростном ударном нагружении.. // Материалы XXIV международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г. Горшкова.-МАИ.-2018.- С.228-229. **5**. GoPro 6 Black. Руководство пользователя. Hevk Advance. 2018г., 108 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ НЕКОНСЕРВАТИВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Щугорев А.В., Радин В.П., Чирков В.П., Щугорев В.Н. (*Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия)*
E-mail: Shchugorev.VN@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются методы определения критических значений неконсервативных нагрузок в задачах устойчивости механических системах с распределенными параметрами. На основе динамического подхода к задачам устойчивости излагается метод непосредственного интегрирования линеаризованного уравнения возмущенного движения и сведение задачи определения критических нагрузок к задаче минимизации некоторой комплексной функции нескольких переменных. В качестве второго метода иллюстрируется метод разложения решения уравнения возмущенного движения по формам собственных колебаний. Излагаются также основы применения метода конечных элементов к задачам исследования устойчивости при действии неконсервативных нагрузок. Методы иллюстрируются на классических задачах: устойчивость консольного стержня при действии потенциальной и следящей сил и устойчивость участка трубопровода с протекающей жидкостью. Анализируется точность и сходимость двух последних методов в зависимости от числа членов ряда и числа конечных элементов.

Разработка и развитие методов решения задач теории устойчивости конструкций связано с работами Эйлера. Как известно метод Эйлера основан на отыскании условий, при которых помимо исследуемой формы равновесия существуют смежные, близкие к исходной формы равновесия. Этот метод соответствует решению однородной краевой задаче с самосопряженными операторами. Такая методика была неоспоримой, пока Николаи [1] на примере известной задачи об устойчивости консольного стержня при действии крутящего момента, не показал, что при некоторых видах нагрузок форм равновесия, смежных с исходной, не существует, а потеря устойчивости выражается в смене положения равновесия движением (колебаниями) системы в окрестности этого положения равновесия. Такая ситуация имеет место в тех случаях, когда нагрузки, действующие на систему не обладают потенциалом, являются неконсервативными и, как следствие, задача об устойчивости сводится к динамической несамосопряженной краевой задаче. Метод Эйлера, являясь по существу статическим методом исследования устойчивости, в этих случаях становится неприменимым. Формулировку и обоснование динамического метода исследования дал В.В.Болотин в монографии [2]. В дальнейшем, кроме многочисленных журнальных статей, по теории устойчивости неконсервативных систем опубликован ряд монографий и учебников. Некоторые из них приведены в библиографическом списке [3-5].

Решение краевой задачи на собственные значения

Рассмотрим этот метод на примере консольного стержня длиной l, находящегося под действием постоянных по величине потенциальной и следящей сил. При действии только следящей силы имеем известную задачу Бека, которая в различных постановках решалась многими исследователями [3-5]

Метод разложения по формам собственных колебаний

Будучи точным в вычислительном отношении метод, основанный на решении трансцендентного уравнения , представляющего собой неявную зависимость характеристических показателей λ от параметров краевой задачи., связан со значительными трудностями из-за сложной структуры гиперповерхности, для которой

отыскиваются локальные минимумы, выбора начальных приближений и т.д. Эти трудности многократно увеличиваются при увеличении числа варьируемых параметров. В связи с этим более распространенным методом построения критических поверхностей является метод нормальных координат или метод разложения по формам собственных колебаний [2-5]. Вместо форм собственных колебаний может быть взята и другая система функций, удовлетворяющая граничным условиям, а также условиям полноты и ортогональности. Применение метода разложения по формам собственных колебаний сводит систему с распределенными параметрами к системе с конечным числом степеней свободы. Для исследования устойчивости систем с конечным числом степеней свободы имеется ряд критериев (критерий Рауса-Гурвица, критерий Зубова), позволяющих судить о расположении характеристических показателей на комплексной плоскости и строить границы областей устойчивости в пространстве параметров без вычисления самих показателей

Метод конечных элементов

В случае сложных механических систем (переменные сечения, сложные нагрузки и т.п.) становится целесообразным применение метода конечных элементов (МКЭ) [5-7]. Основной особенностью применения МКЭ для неконсервативных систем является необходимость учета виртуальной работы неконсервативных сил или неконсервативных составляющих нагрузок, если таковые имеются. Получим уравнения возмущенного движения в форме МКЭ на примере первой системы, рассмотренной выше , с применением вариационного принципа Гамильтона–Остроградского

$$\delta I = \int_{t_0}^{t_1} \delta(T - U - \Pi)\, dt + \int_{t_0}^{t_1} \delta' A_{nc}\, dt = 0 .$$

Здесь T – кинетическая энергия системы, U – потенциальная энергия упругой деформации, $\Pi = -A_c$ – потенциал внешних нагрузок, где A_c – работа потенциальных нагрузок и потенциальных составляющих неконсервативных нагрузок, $\delta' A_{nc}$ – виртуальная работа неконсервативных сил.

Из условия стационарности функционала $\delta I = 0$ и в силу произвольности вариаций отрезка времени $[t_0, t_1]$ и вариаций нормального прогиба δw на основании основной леммы вариационного исчисления получим уравнение Эйлера – Остроградского, которое для данной системы выполняет роль уравнения возмущенного движения с естественными граничными условиями. Для сведения этого уравнения к системе обыкновенных дифференциальных уравнений в форме МКЭ разобьем исходную стержневую систему на n конечных элементов. Число элементов n выбирается в зависимости от требуемой точности и конструктивных особенностей системы. Типичный k-й конечный элемент показан на рис. 1

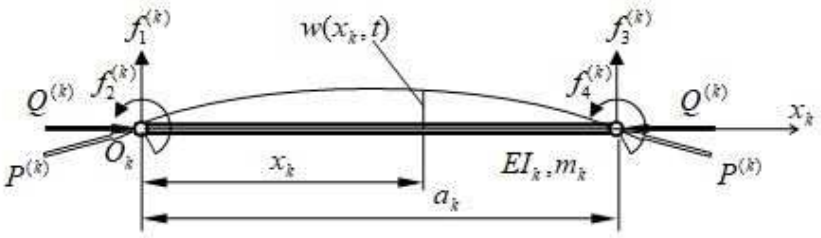


Рис. 1. Стержневой конечный элемент при плоском деформровании

Вычисления с использованием МКЭ показали следующее. Для первой системы (консольный стержень) использование даже всего двух конечных элементов дает возможность достаточно точно построить границу области устойчивости. Погрешности вычисления критических значений потенциальной и следящей сил при этом составляет 0,5%.

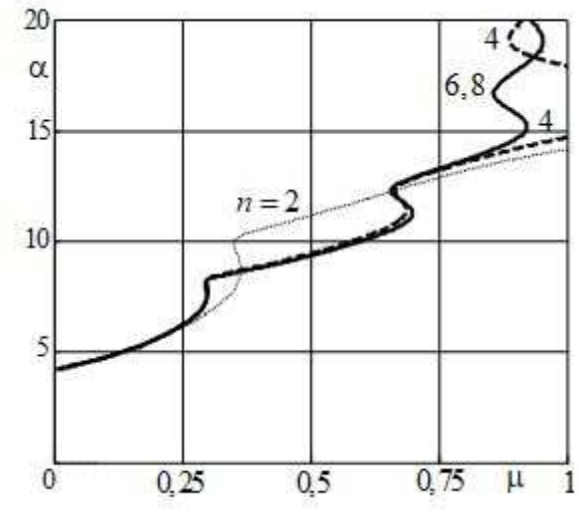


Рис. 2. Границы области устойчивости при различных значениях числа конечных элементов

На рис. 2 приведены результаты построения границы флаттера для второй задачи (устойчивость трубопровода). Сплошная линия (как и ранее) соответствует точному положению границы. Пунктирная кривая построена при $n=2$, штриховая – при $n=4$. Здесь положение границы несколько более чувствительно к числу конечных элементов. Кроме того наблюдается рост погрешности для малого значения n при возрастании относительной массы жидкости μ. Однако уже при $n=6$ и тем более $n\geq 8$ граница, построенная с помощью МКЭ, практически совпадает с точной границей флаттера.

Заключение

1. Изложенные в работе методы дают возможность исследовать устойчивость различных неконсервтивных механических систем, в частности, определять критические значения нагрузок, строить границы областей устойчивости, определять зависимости критических нагрузок от различных параметров.

2. Как показали исследования, методы разложения по собственным формам и метод конечных элементов, по крайней мере, в рассмотренных задачах показали весьма хорошую сходимость и удобство в численной реализации.

Список литературы: **1.** Николаи Е.Л. Труды по механике. Москва, Гостехиздат. 1955, с. 357–406.В.В. **2**. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. Москва, Физматгиз. 1961, 339 с.. **3**. Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. Москва, Наука. 1973, 400 с. **4**. Циглер Г. Основы теории устойчивости конструкций. М.: Мир, 1971. 192 с. **5**. Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П., Щугорев А.В. Решение неконсервативных задач теории устойчивости. М.: Физматлит, 2017. 240 с. **6**. Щугорев А.В. Влияние дополнительных связей на устойчивость упругой панели в сверхзвуковом потоке газа // X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Избранные тезисы докладов. (Нижний Новгород, 24 – 30 августа 2011 г.). Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2011. С/ 217-218 .**7**. Alshorbagy A.E., Eltaher M.A., Mahmoud F.F. Free vibration characteristics of a functionally graded beamby finite element method. Applied Mathematical Modelling. 2011, vol. 35, no.1, pp. 412–425.

УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПАР ТРЕНИЯ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Яковлева А.П. *(МГТУ им Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия)*
Тел. +7(916)686-07-48; E-mail: yakovleva525@mail.ru

Abstract. *A combined processing method for improving the performance features of machine parts (durability), that work under intense wear and high lubricated or boundary friction has been developed; a working installation based on a lathe has been developed. Research on resulting surface hardness and hardening depth variation under different combined processing conditions has been carried out. Surface roughness parameters have been calculated.*
Keywords: *durability, combined processing, endurance strength, regular microrelief, electromechanical processing, diamond burnishing.*

Повышение долговечности машин лимитируется, главным образом, долговечностью узлов и элементов трения. По данным [1, 2] 85…90 % машин выходят из строя по причине износа деталей, хотя за последние годы использование эффекта безызносности значительно расширилось.

В процессе изнашивания при трении скольжения, когда реализуются усталостное, коррозионное, адгезионное, эрозионное или другие виды поверхностных повреждений, важную роль играют структура и физико-механический комплекс свойств тонкого приповерхностного слоя материала, от которых зависит характер формирующихся при трении динамических структур, механизмы разрушения и кинетика изнашивания.

Большинство пар трения работают в условиях полусухого или трения со смазкой. Прочность граничной пленки смазки часто бывает недостаточной из-за высоких напряжений (удельных давлений) и температур при работе деталей, чтобы полностью разделить трущиеся поверхности. Разрыв смазочной пленки ведет к местному привариванию металла к поверхности инструмента в точках контакта и увеличению сил трения [3, 4]. В последнее время много работ по видам смазки [3, 5], однако во всех случаях лучшая смазка обеспечивает снижение сил трения только на несколько десятков процентов.

Простым и эффективным способом, увеличивающим долговечность трущихся деталей, является нанесение на контактирующие поверхности регулярных (РМР) или частично-регулярных микрорельефов (ЧРМР) в виде смазочных микрокарманов [6, 7]. Такие поверхности обладают лучшими, по сравнению с обычными поверхностями, эксплуатационными характеристиками. Поэтому актуальной является задача по разработке технологических методов, позволяющих создать на поверхности трения регулярные микрорельефы, разделить трущиеся поверхности смазочной пленкой и создать резерв для повышения износостойкости и усталостной прочности.

На основании вышесказанного была разработана технология комбинированной обработки. Сущность комбинированной обработки заключается в последовательном выполнении электромеханической обработки (ЭМО) и алмазного выглаживания [8-10]. С помощью этой технологии представляется возможным осуществить технологическое управление геометрическими характеристиками рабочих поверхностей цилиндрических деталей [9, 10].

В работе была создана экспериментальная установка, состоящая из универсального токарного станка, источника питания, закалочного устройства, системы

токоподвода и системы охлаждении зоны закалки, специального приспособления для алмазного выглаживателя на которой отрабатывались режимы комбинированной обработки [11, 12].

В экспериментальной установке совмещены несколько операций: механическая, упрочняющая, отделочная обработки. Эти обработки проводят в едином технологическом цикле (за 1 операцию).

Комбинированная обработка осуществлялась на следующих режимах:

- Электромеханическая обработка: сила тока – 1400….2000 А; напряжение - 4 В; давление ролика-электрода – 300 Н; скорость вращения детали – 1,1…3,2 м/мин; подача – 1…3,5 мм/об.
- Алмазное выглаживание: давление алмазного выглаживателя – 200…250 Н, подача 0,02 мм/об, скорость вращения - 45 м/мин, радиус алмазного выглаживателя – 1 мм.

Для исследования были выбраны образцы из сталь 40Х диаметром 14 мм, длиной 120 мм и предварительно проточенными до Ra 3,2 мкм.

В работе были исследовано изменение твердости поверхностного слоя и глубины упрочнения от режимов комбинированной обработки (таблица).

Таблица 1. Зависимость твердости и глубины упрочненного слоя от режимов ЭМО

№ опыта	I, А	S, мм/об	V, м/мин	Чис. проход.	Hv	глубина h, мм	Материал
1	1500	1,5	1,1	1	660	0,5	40Х
2	1900	1,5	1,1	1	760	0,7	
3	1900	1,5	1,4	1	750	0,7	
4	1900	2,0	1,4	1	710	0,65	
5	2800	1,5	3,0	1	650	0,95	
6	2800	2,0	3,0	1	770	0,65	

Как видно из таблицы твердость на поверхности образцов составляет HV_5 660…770 при твердости сердцевины HV_5 270, глубина упрочненного слоя h 0,5…0,95 мм.

Твердость поверхности, распределение твердости по глубине и глубина упрошенного слоя зависят от режимов обработки. Определяющими факторами являются сила тока (I) и скорость вращения детали (V).

Увеличение силы тока в пятне контакта приводит к повышению температуры как на поверхности, так и по глубине, что способствует росту глубины закаленного слоя. Однако, при этом развивается электроэрозийный процесс, ухудшается шероховатость поверхности. Сила тока более 2400 А вызывает оплавление стали и перенос металла с детали на ролик-электрод. Продолжать использовать такой ролик-электрод нельзя, требуется восстановление рабочей поверхности путем зачистки или переточки.

Явление оплавления возможно при малых скоростях вращения детали (менее 1 м/мин). Увеличение скорости до 3,5 м/мин снижает толщину слоя почти в два раза, при этом твердость на поверхности несколько увеличивается. Рациональными скоростями для получения толщины слоя h 0,6 - 0,8 мм является V = 1,1…1,7 м/мин.

Величина продольной подачи формирует волнистый рельеф закаленного слоя на границе с основным металлом. Учитывая, что изотермы в полубесконечном теле

представляют собой полуокружности, то для получения равномерного по глубине слоя рекомендуется применять продольную подачу менее половины толщины рабочей части ролика-электрода (S 1 или S 2 на рис. 1). При подачах, равных толщине ролика возможно появление незакаленных полос (S 3 на рис. 1). Величина подачи более половины толщины ролика способствует неравномерной глубине упрочненного слоя.

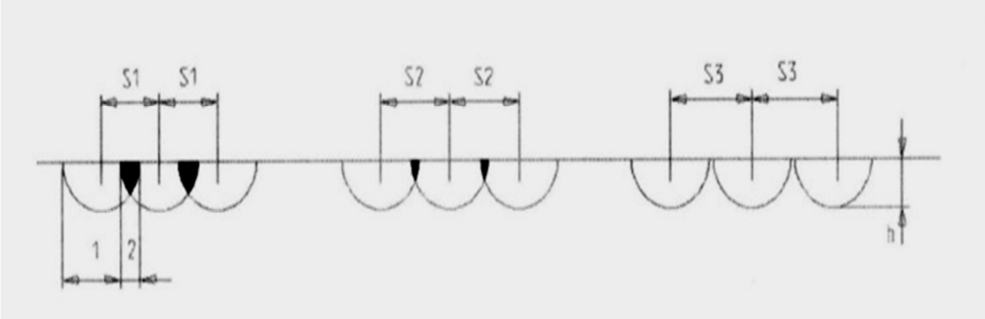


Рис. 1. Влияние величины подачи на глубину упрочнения и величину зон вторичной закалки: 1 – упрочненная зона, 2 – зона вторичной закалки

Для протекания стабильного процесса нагрева металла необходимо плотное прилегание ролика к заготовке, что обеспечивается прижатием ролика с определенным усилием. В конструкции державки предусмотрен упругий элемент, позволяющий поддерживать заданное усилие. Усилие прижатия ролика, обеспечивающее эффективность процесса упрочнения, составила Р 200…500 Н. При меньшем усилии возможно искрообразование исключающее обработку. Усилия свыше 500 Н приводят к выдавливанию металла из зоны нагрева в стороны. На поверхности появляется волнистость, значительно ухудшающая шероховатость. Эффективная сила, обеспечивающая плотный контакт и деформацию поверхностного слоя, находится в диапазоне от 200 до 300 Н.

В разработанной технологии обработка осуществляется за несколько переходов: механическая обработка, закалка определенного участка на заданную глубину и затем, отделочная обработка.

После алмазного выглаживания увеличивается твердость поверхности, улучшается микрорельеф, в области вторичной закалки образуются масляные карманы (рис.2, 3).

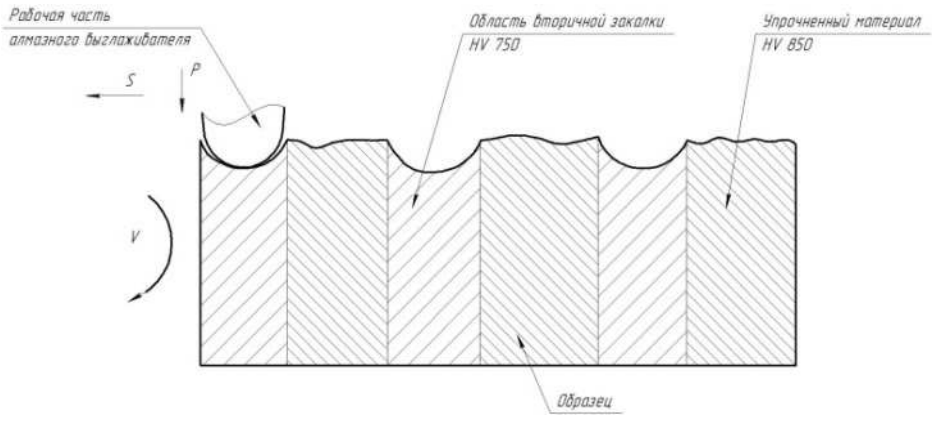


Рис. 2. Модель получения масляных карманов после комбинированной обработки

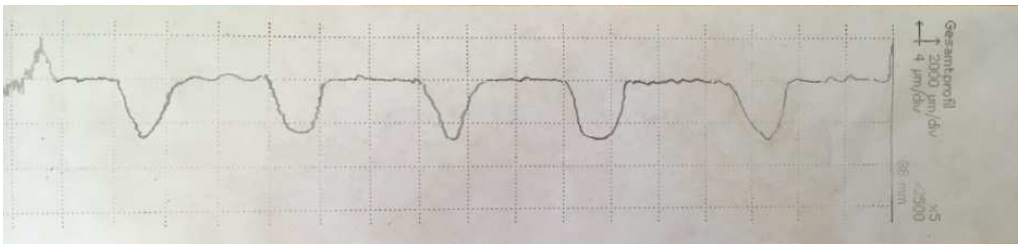


Рис. 3. Профилограмма поверхности образца после комбинированной обработки

Таким образом, разработан метод комбинированной обработки для повышения эксплуатационных показателей деталей машин (износостойкости), работающих в условиях интенсивного износа и трения со смазкой или граничного трения; разработана экспериментальная установка на базе токарного станка. Проведены исследования твердости поверхностного слоя и глубины упрочнения в зависимости от режимов комбинированной обработки.

Комбинированная обработка является перспективным методом повышения износостойкости и усталостной прочности и может быть рекомендована для применения в условиях единичного производства для малых предприятий и ремонтных мастерских.

Список литературы: 1. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн./Под ред. И.В. Крагельского, В.В.Алисина. - М.: Машиностроение, 1978, кн..1,2. 400 с, 358 с. **2.** Гаркунов Д.Н. Триботехника: конструирование, изготовление и эксплуатация машин / изд. МСХА, 2002 632 с**. 3.** Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин –М.: Машиностроение, 2000, 320 с. **4.** Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Ч. 1, 2 – К.: Наук. думка, 1987 –602 с. **5**. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. М: Машиностроение, 1982. 245 с. **6.** Vasilev A.S. Controlled Forming of Machine Components Operating Characteristics. // Procedia Engineering, 2016, no. 150, pp. 975–979. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.073**. 7.** Kondakov A.I. Productivity as Measure of Multiproduct Metal Processing Production Efficiency. Procedia Engineering, 2016, Vol. 150, pp. 987–991. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.151. **8.** Федорова Л.В, Федоров С.К., Иванова Ю.С., Ломпас А.М. Технологические основы повышения износостойкости деталей электромеханической поверхностной закалкой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 9 (690). С. 85-92. **9.** Яковлева А.П. К вопросу о снижении износа в узлах трения // Авиационная промышленность. -2017. -№4. – С. 35-37. **10.** Яковлева А.П. Эффективность применения комплексирования на токарных станках с ЧПУ. // Справочник. Инженерный журнал. – 2018. -№11. –С 36-40. DOI: 10.14489/hb.2018.11.pp.036-040. **11.** Яковлева А.П. Исследование свойств поверхностного слоя стальных деталей, упрочненных электромеханической обработкой // Авиационная промышленность. 2014. №2. С. 31–33. **12.** Yakovleva A.P. Improving the Durability of Machine Parts Using a Combined Method. // Materials Science Forum, 2019, Vol. 946, pp 37-41. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.946.37.

BIO-ELECTROGRAPHY APPLICATION IN RESEARCH AND TEACHING AT DONNTU

Dzhura S.G., Chursinov V.I., Yakimishina V.V.
(SEIHPE "Donetsk National Technical University", the DPR)
Tel. +380 (62) 301-08-25. E-mail: dzhura@inbox.ru

Annotation: *The state and prospects of application of bio-electrography and gas-discharge visualization technology are examined in the paper. Their advantages and topicality of the innovation technology to be applied in the DPR are also shown.*
Key words: *gas-discharge visualization technology (GDV), GDV-bio-electropgraphy method, innovation technology, distance learning.*

Introduction. Distance learning has been widely spread recently. It is getting more and more popular as it makes it possible for all population categories – from the disabled to the professionals who would like to get their second degree- to get a degree. Besides, the distance learning helps solve many problems set to the DPR's education system by the government, namely to implement the principle of lifelong education and retraining, etc.

The paper examines some topical for the Donetsk Region problems, shows they ways to solve them by joint efforts of the DPR's core ministries and boards through new innovation methods implementation.

Problem statement. Distant learning, like any other education form, has some problems which need to be solved. The insufficient direct contact between a teacher and a student is among them. It is the most important aspect of the problem under research. There is a lack of teacher's control of student's understanding of new material. Whether the student has grasped the issue becomes clear only after the test taken by the student at the end of a block.

The problem could be solved by the gas-discharge visualization chamber (GDV-chamber) introduced into the distant learning. The camera registers student's reaction on the material perception and allows correcting teacher's activity based on the obtained data.

Research goal is to widen the range of communication of the system "teacher-student" due to the invisible range (the so-called recipient's aura) registered by the GDV-chamber. The glow jumps mark understanding (the range widening) or missing (the range narrowing). The glow jump growing shows any material portion adoption.

GDV technology. The GDV-method is computer processing of different object glow images in high strength electromagnetic fields. The electric current weak impulse runs through the object (a person's finger) for tens of microseconds during the recording and causes photon and electron emission from the object surface in the form of an electric discharge. The discharge glow is registered by the special chamber and analyzed by powerful programs. The information on the body system and organ state based on the principles of the modern European and traditional Chinese medicine is formed. The image obtained for the fingers is processed and approximated on the entire body field and delivered visually in different views (fig.1). The information is processed on the server and it allows constant updating and using the latest version. The recording data base is kept on the secure server and can be accessible for any computer [1].

It takes about a minute to take off the information, and its processing is done instantly. A trained user can easily interpret the obtained results after that. The GDV-device Internet programs print the detailed conclusion. The recording process is absolutely harmless and can be done repeatedly. Periodic GDV-grams making helps look after the health state and watch the effect of different impacts: from medicine and medical manipulations to mental and physical load and training. Numerous tests have shown the GDV method high sensitivity.

The Conference in GDVtechnologies. The authors have participated in the international scientific and practical conference "On the Threshold of Future Discoveries" hosted by Kuban State University. It was timed to the 120th anniversary of the Honoured Inventor of Russia S.D. Kirlian who was the first in the world to patent the GDV-method. There were representatives of key scientific schools and GDV- devices producers from Russia, researchers from Great Britain and Holland at the conference. Scholars from the USA, Israel and Australia joined the participants via the Internet. We were the only representatives from DonNTU and the DPR. The conference was reported by the mass media of the RF [2]. We made the presentation on the GDV-technologies in education (a fragment from the book "The Universe Ethic Algorithms" [3] which was awarded by the diploma of the "Prize Winner of the All-Russian Contest of Scientific Publications" [4]) and gave the book to Prof. K. G. Korotkov (the author of the computer method and the corresponding GDV- diagnostics device [5]). In response he gave us the "Bio-well"device (we had used the device of other producer). We express our sincere gratitude to Prof. Korotkov and invite all interested in the issue to join our research in the field.

Fig. 1. GDVsnapshot of individual's field in three projections

The GDV-device application in pedagogic

According to N.K. Roerich's pedagogic principles a student is to live with a teacher in one room for some time. Some waves similar to induced currents will be induced in the student. That is both the student and the teacher will have the same frequency generated waves. Not only understanding of the material but also some principles (including ethic ones) are at issue. E.I. Roerich wrote: "Education without bringing up generates big and small criminals". The modern system of distant learning can't help the teacher bring up his student. It, like the entire Internet, fulfills a destructive function – it provides knowledge without bringing up. The contradiction is to be solved. The author has described some approaches to the solution in a number of his theoretical and practical papers. They were tested at some international conferences and special scientific publications.

The research hypothesis is that students' aura or radiation parameter changing being the reaction on perceptible material in the distant learning system is the index of the degree of the material understanding and learning. So the teacher can modify his activity. Thus the research made during delivering the courses "Mathematical Methods and Models" and "Energy Mathematical Tasks" to electrical engineering students showed that students' reaction on the material under study could be registered by the GDV-chamber [3].

Students' radiation parameters are changed depending on the degree of understanding of the material. The distant course teacher can modify his activity. The registered radiation

indices analysis according to the students' reaction types and recommendations as to the application of the data in pedagogic issued for the teachers are promising trends in the future research.

Fig. 2. From left to right – Prof. K. G. Korotkov (the author of the GDV-device), E.G. Korobova, the Director of the first ever museum of the Kirlians, Dr. S.G. Dzhura (the DPR). Prof. K. G. Korotkov has the book "The Universe Ethic Algorithms" in his hands. S.G. Dzhura thanks Prof. K.G. Korotkov for the GDV-device given to him at the conference and aimed at making further research at DonNTU (the DPR)

Conclusions. The GDV-method examined in the paper allows working not only with the so-called "alive objects", but also making analysis of the metal fatigue, earthquake, volcanic eruption, and mine explosion forecasting. It can work as a lie detector and do many other things including certified methodologies to identify individuals inclined to law breaking developed by the RF Home Office. It can be also introduced in the DPR. DonNTU's psychologists have already joined our research. We will also report our groundwork at the Scientific Board of the National Roerich's Committee in Moscow to coordinate the work with all stakeholders (enthusiasts, research institutions and GDV-devices producers). The hypothesis on installation of mini-GDV-cameras on new mobile phones in the nearest future was expressed at the mentioned above conference. This will make it possible to become familiar with the new technology and to know for sure what kind of person we talk to. It will be irrational to buy the devices and telephones abroad as the technology originated in Russia and we have every reason to implement it for the benefit of the Big Russian World. Energy object nondestructive check, medical permit to work for heat station controllers and other officers is one of the most promising research aspects. The special method to fight the criminal world has also been studied. Implementation of the technology into research institutions and organizations would provide benefit to the DPR and entire Russian World. All persons concerned can become familiar with the device operation in room 1.220 of DonNTU.

References: 1. Bio-well. The official site of the company which produces the GDV-devices. [E-resource]. Access mode: https://www.bio-well.com/ru/home.html **2**. In the World of Wonderful Discharges. Scientific and Practical Conference timed to Semen Kirlian's jubilee. TV "Russia", Kuban. [E-resource[. Access mode: https://www.youtube.com/watch?v=X09HSRZcYfc **3**. S.G. Dzhura. The Universe Ethic Algorithms. – Saarbruken: LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 393-405 p. [E-resource]. Access mode: http://www.roerich.com/iic/russian/ovs/dzhura_book_rus_2014_.pdf **4.** The Diploma of the All-Russian Contest of Scientific Publications. [E-resource]. Access mode: http://roerich.com/iic/russian/ovs/_dipl_kniga_2016_.jpg **5.** K.G. Korotkov. GDV Bio-electrography Method at the Current Stage. StPb, 2017. – Access mode: http://www.phantastike.com/other/metod_grv/zip/

MATHEMATICAL ASPECTS OF SPRING BALANCING IN ROBOT MANIPULATORS

Ghazaryan S.D.[1], Harutyunyan M.G.[2], Arakelian V.H.[3]
[1] (NPUA, Yerevan, Armenia) *Tel.: +374(044)228840;*
E- mail: sarik.ghazaryan@polytechnic.am
[2] (NPUA, Yerevan, Armenia) *Tel.: +374(093)998840; E- mail:* mharut@seua.am
[3] (INSA-Rennes, Rennes, France) *Тел.: +33(0)223238492*
E- mail: vigen.arakelyan@insa-rennes.fr

Abstract. *Several approaches for static balancing by cylindrical tension springs in robot manipulators with rotating links are considered and systematized. The modeling mathematical aspects for each spring static balancing approach are presented, corresponding conceptual schemes of their implementations are given, the advantages and disadvantages, as well as prospects for their application are shown.*
Key words: *robot manipulator, rotating link, gravity balancing, cylindrical spring, counterweight, pantograph.*

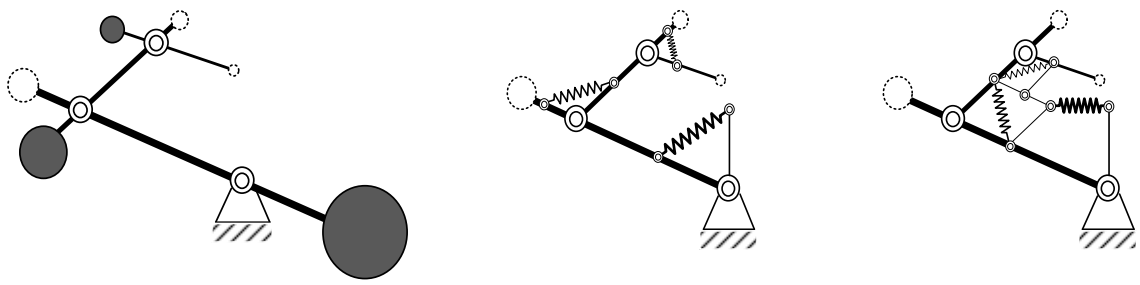
Introduction. The planar and spatial manipulators are mostly the leverage mechanisms, which links, being connected by rotating kinematic pairs, mainly work as rotating links.

These mechanisms work in static and dynamic modes, and the balancing of their links plays a significant role in their optimal design [1-16]. Early studies have shown the advantages of the statically balanced systems working in dynamic modes [12]. Many methods of balancing the systems are known, but the special requirements to their small sizes, portability and low energy consumption limit their selection.

The static balancing of manipulators is usually achieved by application of counterweights, springs or additional auxiliary mechanisms (Fig. 1) [1-5,7-9,14,15].

Implementing the masses balancing, the counterweights reduce the distances of gravity centers of links from their axes of rotation, in particular, equate them to zero [1-2]. Implementing the power balancing, the springs realize the compensation of the gravity moments caused by the distances of gravity centers of links from their axes of rotation, and the spring stiffness is calculated from the system static balancing condition [3-7]. Additional parallel mechanisms bring the center of the system mass to a point which changes its position according to a given law [7-9].

The tension and compression cylindrical springs have leadership in the methods of static balancing of leverage mechanisms, thanks to their ability to develop great forces with small sizes and masses [1-16].



a) *b)* *c)*

Fig. 1. Principles of the system links balancing:
a) by counterweights, b) by springs, c) by springs and additional links

The mathematical approaches to balancing of rotating links. Several spring balancing methods for a rotating arm of leverage mechanisms have been proposed [10-16]. In Fig. 2, links *1* and *2* are connected by rotational kinematic pair *O*. The link *2* is fixed vertically, and the link *1* rotates relative to it. The position of the link 1 is defined by rotating angle φ (see Fig. 2a). At the free end of link *1* a point mass *3* due to a another link of the manipulator is located.

a) *b)*

Fig. 2. Rotating link example: a) without balancing, b) with balancing

The gravitational forces act on the system, the total moment of which is determined as

$$M_g = (0{,}5m_1 + m_3)gl_1 sin\varphi, \quad (1)$$

where m_1 is the mass and l_1 is the length of the link *1*, m_3 is the point mass *3*, g is the gravitational constant.

To balance the system, the cylindrical tension spring *4* with a linear characteristic is connected according to the way on Fig. 2b. This approach effectiveness has been shown in the early works of the authors [10-12,16]. Since the spring has an initial length l_{s0}, the rotating range of link *1* narrows down $\varphi \in [\varphi_0; 2\pi - \varphi_0]$. If there are no other limitations, so:

$$\varphi_0 = arccos((l_{OA}^2 + l_{OA}^2 - l_{s0}^2)/2l_{OA}l_{OB}), \quad (2)$$

where l_{OA} is the distance from spring *4* fastening on link *1* point *A* to point *O*, l_{OB} is the distance from spring *4* fastening on link *2* point *B* to point *O*.

The gravitational moment of the balanced system is determined as

$$M_g = ((0{,}5m_1 + m_3)l_1 + 0{,}5m_4 l_{OA})gsin\varphi, \quad (3)$$

where m_4 is the mass of the spring *4*.

The force developed by the cylindrical tension spring is equal to

$$F_s = F_0 + k\Delta l_s = F_0 + k(l_s - l_{s0}), \quad (4)$$

where k is the stiffness coefficient, F_0 is the pre-tensioning force, Δl_s is the working elongation, l_s is the working length of the spring *4*:

$$l_s = \sqrt{l_{OA}^2 + l_{OA}^2 - 2l_{OA}l_{OB}cos\varphi}\ . \quad (5)$$

The balancing moment is defined as

$$M_b = F_s l_{OA} sin\beta = F_s l_{OA} l_{OB} sin\varphi / l_S = (k + (F_0 - kl_{s0})/l_S) l_{OA} l_{OB} sin\varphi. \quad (6)$$

The unbalance of the system is defined as the difference between the gravitational and balancing moments:

$$M_{unb} = \big((0{,}5m_1 + m_3)l_1 + 0{,}5m_4 l_{OA}\big)gsin\varphi - (k + (F_0 - kl_{s0})/l_S) l_{OA} l_{OB} sin\varphi. \quad (7)$$

This equation contains several unknowns: k, F_0, l_0 and m_4,l_{OA} and l_{OB}, by determining or specifying of which the solutions are chosen to balance the system.

The maximum elongation of the spring is $l_{smax} = l_{OA} + l_{OB} - l_{S0}$ (see Fig. 2b). For each type of cylindrical spring, depending on its material, processing, and other characteristics, there is a certain value of the tensile factor: for example, $k_{eff} \approx 0{,}6 - 0{,}8$, so l_{s0} or l_{OA} and l_{OB} can be determined from the condition:

$$l_{s0} = k_{eff} l_{smax} = k_{eff}(l_{OA} + l_{OB} - l_{s0}) = k_{eff}(l_{OA} + l_{OB})/(1 + k_{eff}). \quad (8)$$

For the other unknown values determination, the mathematical approaches are disclosed.

Mathematical notifying and mutual background notions of the spring characteristics. The approach is to determine the physical (geometry, mass) (Fig. 3) and force (stiffness, pretension) (Fig. 4) characteristics of the cylindrical spring [10] and mutually express them.

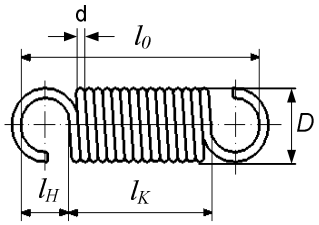


Fig. 3. Cylindrical tension spring

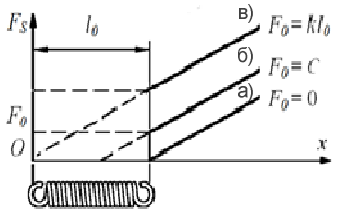


Fig. 4. Power characteristics of the spring: a, b) - non-zero and c) - zero free lengths

The initial length, mass and stiffness of the spring are determined from the following expressions:

$$L_w = \pi(nD + 2l_H), \qquad l_{s0} = 2l_H + l_K = 2l_H + nd,$$
$$m_4 = 0{,}25\rho L_w \pi d^2, \qquad k = Gd^4/8nD^3, \tag{9}$$

where d is the wire diameter, D is the average diameter of the helix, n is the number of active windings, G is the material shear modulus, ρ is the material density, L_w is the wire length, l_H is the hook diameter, l_K is the length of the spring active area.

In view of (9), the spring mass is expressed. $$m_4 = \rho\pi L_w\sqrt{knD^3/2G} \tag{10}$$

After substitutions, we obtain the expression of the unbalance of moments as

$$M_{unb} = ((0{,}5m_1 + m_3)l_1 + 0{,}5l_{OA}\rho\pi L_w\sqrt{knD^3/2G})gsin\varphi - \\ -(k + (F_0 - kl_{s0})/(\sqrt{l_{OA}^2 + l_{OA}^2 - 2l_{OA}l_{OB}cos\varphi}))l_{OA}l_{OB}sin\varphi. \tag{11}$$

The next outlined approaches are based on further mathematical modeling, simplification and implementation of the last expression.

The approach with integral approximation. When the spring has a non-zero free length ($F_0 \neq kl_0$) (see Fig. 4), the unbalance of the system is determined from the condition

$$M_{unb} = \int_{\varphi_i}^{\varphi_f}(M_g - M_b)d\varphi, \tag{12}$$

where φ_i and φ_f are the initial and final values of the rotating angle of the link [5,10].

After integrating and equating M_{unb} to zero, we get a quadratic equation as:

$$ak + b\sqrt{k} + c = 0. \tag{13}$$

This determines the required spring stiffness

$$k = ((-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/2a)^2, \text{ on condition that: } (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/2a > 0\ . \tag{14}$$

The approach with a special zero free length spring applying. Subject to the condition ($F_0 = kl_0$) [6,10,16], the expression (11) will be simplified:

$$M_{unb} = \left((0{,}5m_1 + m_3)l_1 + 0{,}5l_{OA}\rho\pi L_w\sqrt{knD^3/2G}\right)gsin\varphi - kl_{OA}l_{OB}sin\varphi. \tag{15}$$

The exact static balance of the link is achieved [5]. As in the previous case, the stiffness coefficient is determined from the quadratic equation, but without prior integrating.

The hybrid balancing approach. Certainly, zero free length spring ensures the best solution in terms of the portability of the designed manipulator, but obtaining of such a spring is associated with certain technological difficulties. There are several approaches to bring a spring of non-zero free length to the characteristics of the first, but exist also hybrid methods of balancing a partial unbalance of the spring-balanced rotating link with the help of additional links and corrective mass (Fig. 5) [13,14,16]:

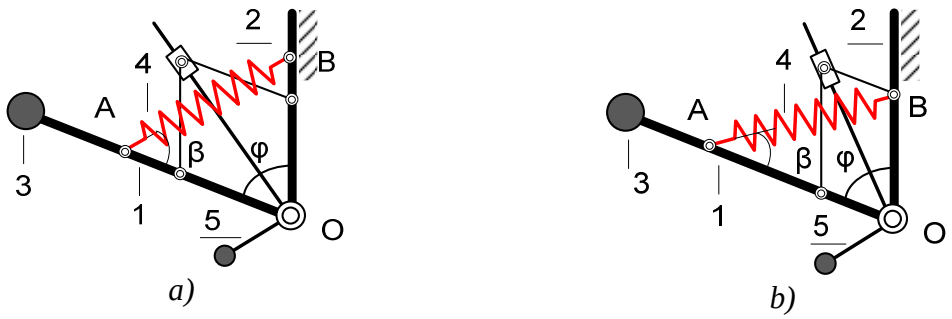


Fig. 5. Universal counterbalance correction of static imbalance of the rotating link: a) - isosceles and b) - arbitrary

a) *Isosceles triangular schema*. A possible realization is shown in Figure 5a [13]. Provided that $l_{OA} = l_{OB} = r$, so the triangle *AOB* is isosceles, the equation (11) takes the form

$$M_u = ((0{,}5m_1 + m_3)l_1 g + 0{,}5rg\rho\pi L_w\sqrt{knD^3/2G} - kr^2)sin\varphi - (F_0 - kl_{s0})rcos0{,}5\varphi \quad (16)$$

By adding a rectangular double-arm lever to the system, centered on the link *1* rotating axis, with a slider and an equilateral pantograph at the one end of the arm and with a counterweight at the other (Fig. 5a), then partial system unbalance can be compensated by choosing the mass of the counterweight and lever of its connection.

b) *Arbitrary triangular schema*. A possible realization is shown in Fig. 5b [14]. The previous isosceles scheme has disadvantages at the link's large angles rotating: the balancing spring has an undesirable large stroke; therefore, we propose a balancing scheme with a non-isosceles triangle *AOB* and, accordingly, with a non-equilateral pantograph, which performing the balancing corresponding to expression (11) (Fig. 5b).

Regardless to the application of one of the above described approaches, for exact static balancing, in mathematical calculations it should be taken into account the cylindrical spring mass dependence on its rigidity (10) [10, 11,16].

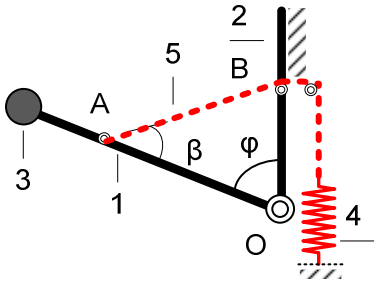


Fig. 6. The rotating link layout balancing

The approach with the balancing spring arranging. The application of power characteristics of springs in above described designs has high practice, but there are some difficulties associated with physical characteristics of springs: the determination of spring mass and initial length, the necessity of the counterweights for correction of mass unbalance, the definition of pantograph sides' ratio. Therefore, by connecting the spring with a cable *5*, and removing it from the balancing zone (Fig. 6), we can achieve to a force action, without spring physical presence there [16].

Then, replacing expression (3) by expression (1), we defined the unbalance of the system as

$$M_u = (0{,}5m_1 + m_3)l_1 gsin\varphi - (k + (F_0 - kl_{AB0})/l_s)l_{OA}l_{OB}sin\varphi, \quad (17)$$

where l_{AB0} is the initial distance between points *A* and *B*.

For the components F_0 and l_{AB0}, we have two cases: a) $F_0 - kl_{AB0} = 0$ - if there are limitations for $\varphi \in [\varphi_0; 2\pi - \varphi_0]$, where $\varphi_0 = arccos((l_{OA}^2 + l_{OA}^2 - l_{AB0}^2)/2l_{OA}l_{OB})$, b) $F_0 = 0$ and $l_{AB0} = 0$ - if there are no limitation for $\varphi \in [0; 2\pi]$, and we get an indifferent balance throughout the entire rotating range of link *1*.

Conclusions. The stated approaches of the rotating link static balancing provide both partial and full gravity balancing of the links of a manipulator by using cylindrical springs

with any characteristic, as well as perform the correction of acting gravitational moments unbalance, which is important when necessary to dose it.

The presented methods as well as the constructive schemes of their implementation were used by the authors in the conceptual design of the models of balanced exoskeletons, orthoses and assisting devices based on manipulation mechanisms.

Acknowledgment: *The work was performed in the framework of the project 18T-2D236, funded by the State Committee on Science under the Ministry of Education and Science of the Republic of Armenia.*

Bibliography: 1. Ciupitu, L.; Simionescu, I.; Lee, C.-C. Static Balancing—An Overview. In Proceedings of the First Asian Conference on Mechanism and Machine Science 2010, Taipei, Taiwan, 21–25 October 2010; pp. 250084-1–250084-8. **2.** Arakelian V, Smith MR. A historical review of the evolution of the theory on balancing of mechanisms. In: Ceccarelli M, editor. Proceedings of the International Symposium on History of Machines and Mechanisms HMM 2000; Dordrecht: Kluwer Academic; 2000. p. 291-300. **3.** Herder J.L. Energy-free systems, Theory, conception and design of statically balanced mechanisms // Ph.D. thesis, Delft University of Technology. - 2001. P.248. **4.** Riele FLS, Herder JL. Perfect static balance with normal springs. Proceedings ASME Design Engineering Technical Conferences; Pittsburg, CA; 2001 Sep 9-12. Paper No. DETC2001-DAC21096. **5.** Agrawal S., Fattah A. Gravity-Balancing of Spatial Robotic Manipulators // Mechanism and Machine Theory. - 2004.- Vol.39, No.12.-P.1331-1344. **6.** Agrawal A., Agrawal S. K. Design of Gravity Balancing Leg Orthosis Using Non-Zero Free Length Springs // Mechanisms and Machine Theory. - 2005.- Vol. 40, Issue 6.- P. 693-709. **7.** Ciupitua Liviu, The weight forces balancing of the industrial robots' arms // PhD thesis, "POLITEHNICA" University of Bucharest. - 2002.-P.57. **8.** Cho C, Kang S. Design of a static balancing mechanism with unit gravity compensators. In: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation; San Francisco, CA; 2011 Sep 25-30. p. 1857-1861. **9.** Deepak SD, Ananthasuresh GK. Static balancing of spring-loaded planar revolute-joint linkages without auxiliary links. In: Proceedings of the 14th National Conference on Machines and Mechanisms; Durgapur: NIT; 2009 Dec 17-18. p. 37-44. **10.** Arakelian V., Ghazaryan S. Gravity balancing of the human leg taking into account the spring mass // Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR). - Brussels, Belgium, 12-14 September, 2006- P. 630-635. **11.** Arakelian V., Ghazaryan S. Improvement of balancing accuracy of robotic systems: Application to leg orthosis for rehabilitation devices // International Journal of Mechanism and Machine Theory, Elsevier,-2008.- 43(5).- P. 565-575. **12.** Ghazaryan S.D., Arakelian V.H., Harutyunyan M.G. Dynamic analysis of statically balanced powered leg orthosis // Proceedings of Engineering Academy of Armenia (PEAA). - Yerevan, Armenia, 2008.-V5, No.3, P.420-423. (Rus.) **13**. Sargsyan S.A., Ghazaryan S.D., Arakelyan V.H., Harutyunyan M.G. The Counterweight correction and regulation of spring balance of rehabilitation devices // Proceedings of Engineering Academy of Armenia (PEAA). - Yerevan, Armenia, 2010.-V7, No.2, P. 338-341. (Rus.) **14.** Ghazaryan S.D., Sargsyan S.A., Harutyunyan M.G., Arakelyan V.H. The universal counterweight correction of rotatinging link spring balance // Proceedings of Engineering Academy of Armenia (PEAA). - Yerevan, Armenia, 2011.-V8, No.1, P. 152-155. (Rus.) **15.** V. Arakelian. Gravity compensation in robotics. Advanced Robotics, 30(2), pp. 79-96 (2016) **16.** Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G., Arakelyan V.H. Design aspects of human movement assistance-rehabilitation means // Proceedings of the 1st International Conference MES-2018 Mechanical engineering solutions. Design, Simulation, Testing and Manufacturing. September 17-19, 2018, Yerevan, Armenia.

TO THE QUESTION OF COMPARATIVE STUDIES OF DRILLING EFFICIENCY FOR SMALL DIAMETER BOREHOLES WITH TWO DIFFERENT DRILLING METHODS

Gritsaenko Anton J. ***(****Research Institute of mining mechanical engineering named M. Fedorov, Donetsk)*
+38(071)379-23-51, woosterstring@gmail.com
Borshevskiy Sergey V., Kononychin Sergey V. Kupenko Ivan V. ***(****Donetsk National Technical University)*
Тел./+38(071)334-89-31, +38(071)314-47-93, +38(071)-405-53-97, E-mail:
borshevskiy@mail.ru, ksv1944@mail.ru, ivk1978@gmail.com

The very concept of roller-cone drilling in the 20th century most of experts associate with the rotation of a roller-cone, installed on console pin, which is mounted on a console leg of the bit body. Such construction of a roller-cone drill bit has disadvantages due to the limited stiffness of such structure, which causes unacceptable vibrations of the drilling machine and the impossibility of using it in fractured rocks [1]. It is known, that using a single-cone roller bits have found wide application in the North Caucasus [2]. The main feature of these drilling bits in the presence of only one roller-cone cutter mounted on a single console leg of bit body. The principle of operation of these drilling bits is used by us in the prototype of the bit selected for comparison to the proposed method of drilling.

In this paper considered method of operating a roller-cone drill bit, that allows to transfer axial force directly to the roller-cone cutter, and a vertically mounted roller pin is used as a point of support for the roller-cone cutter, that helps to convert the moment of rotation of the drill bit body around the borehole axis to the distructive moment of roller-cone cutter tooth impact into another borehole plane. In addition discussed in this paper operation method of the roller-cone drill bit allows us to develop a design of a roller bit for drilling holes with a diameter of less than 76 mm.

Drilling with a single-cone drill bit showed its advantage over the tricone drill bit in drilling speed more than 1.9 times. Drilling energy intensity is about two times lower and dispersion of longitudinal vaibrationes on average less than 20 times. And this result obtained with approximately the same technological indicators. These studies can be used to develop a small-diameter drill bit with behavior like in hydro pulse drilling, but all forces forms on borehole bottom. This can be called a new method of drilling with direct transformation of drill bit rotation into impact pulses at borehole bottom. The positive moment of new method lies in increase of borehole bottom working square in 3 times due to transition from the bottom to spherical one.

References: 1. Harlashkin K., Kononyihin S., Manakin A. Odnosharoshechnoe doloto [Single-cone drill bit] / patents.su. 02.03.2019. Available at: http://patents.su/2-859588-odnosharoshechnoe-doloto.html. **2.** Zubarev A., Matveev I., Ryizhikov Yu. (1971) Odnosharoshechnyie dolota [Single-cone drill bit]. Moscow: Nedra.

TO THE QUESTION OF COMPARATIVE STUDIES OF DRILLING EFFICIENCY FOR SMALL DIAMETER BOREHOLES WITH TWO DIFFERENT DRILLING METHODS

Gritsaenko A.J., *(Research Institute of mining mechanical engineering named M. Fedorov, Donetsk, Ukraine),* **Borschevskiy S.V.,. Kononychin S.V, Kupenko I.V.** (*Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine)*

Abstract: *The method of drilling reviewed in this paper is not quite correct to call a roller-cone cutter drilling, despite the fact that it uses a roller-cone cutter. The very concept of roller-cone drilling in the 20th century most of experts associate with the rotation of a roller-cone, installed on console pin, which is mounted on a console leg of the bit body. Such construction of a roller-cone drill bit has disadvantages due to the limited stiffness of such structure, which causes unacceptable vibrations of the drilling machine and the impossibility of using it in fractured rocks (Harlashkin et. al.). This paper presents results of a study for new way of drill bit working, based on the transformation of drill bit body rotational moment into impact moment in different planes. Due to this forces transformation compared with tricone drill bit of the same diameter was achieved increase in the drilling rate by 1.9 times and reduction in the level of vibrations by five times with almost the same operational parameters. Method of drilling obtained in the study is recommended for small diameter boreholes drilling.*

It is known, that using a single-cone roller bits have found wide application in the North Caucasus when drilling the Upper Cretaceous sediments (Zubarev et. al., 1971).

The main feature of these drilling bits in the presence of only one roller-cone cutter mounted on a single console leg of bit body. When drilling, on roller teeth (carbide inserts) arises cutting components the loads, as they move away from the roller-crown during rolling. The principle of operation of these drilling bits is used by us in the prototype of the bit selected for comparison to the proposed method of drilling.

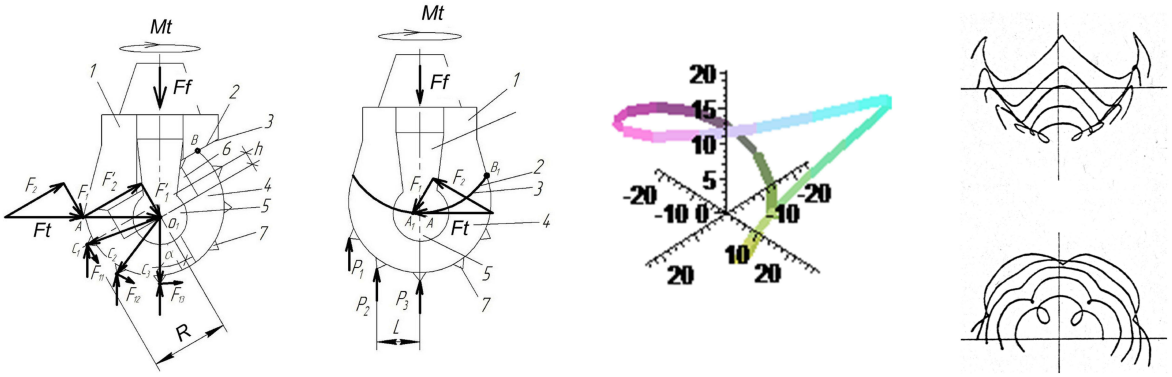
In this paper considered method of operating a roller-cone drill bit, that allows to transfer axial force directly to the roller-cone cutter, and a vertically mounted roller pin is used as a point of support for the roller-cone cutter, that helps to convert the moment of rotation of the drill bit body around the borehole axis to the destructive moment of roller-cone cutter tooth impact into another borehole plane. In addition discussed in this paper operation method of the roller-cone drill bit allows us to develop a design of a roller bit for drilling holes with a diameter of less than 76 mm. The method proposed for consideration in this paper is protected by a previously security document, partly as a roller-cone bit with a vertical pin (Zubarev et. al., 1971).

The term “vertical pin” is used as a distinctive feature of the new method of the roller cone tooth impact on the surface of the borehole, or a well, and a new method of transmitting axial force to the borehole bottom.

MATERIALS AND METHODS

As the object of this research accepted drill bit, that implements the new, two-bearing method of its operation. There is a schematic diagram in Figures 1a and 1b of a such single-cone drill bit. Figure 1a is a straight view, Figure 1b – view from the side. In drill bit 1a, there are two types of contacting surfaces: 1) flat surfaces between the housing 1 (body of the drill bit) with an inclined surface 2 and the end surface 3 of the roller-cone cutter 6; 2) spherical surfaces between the outer surface of the vertical pin 5 and the inner surface of the roller cutter 6. The drilling bit works as follows. The axial force from the bit body 1, through its inclined end surface 2 is transmitted directly to the end part 3 of the roller cutter 6. The vertical pin 5, obviously vertically mounted in the bit body, is used as the bearing point of the bit body for the roller-cone cutter, which helps to transform bit body rotation moment to another plane and allows to create a destruction on the face of bore-

hole. A coupling 6 with an external thread and an internal spherical surface that holds the roller cutter on the spherical surface of the vertical pin 5 is screwed into the roller cutter 4. The cutter is reinforced with hard-alloy teeth 7.



a b c d

Fig. 1. Schematic diagram of a single roller drill bit with vertical pin: a – schematic diagram, straight view; b – side view; c – trajectory of hard-alloy teeth per one body rotation; d – trajectory of teeth that located on one forming hemisphere of the roller, straight view (upper) and view from above (lower)

The feed force F_f is transmitted through the inclined end surface of the drill bit body 2 to the end part 3 of the hemispherical roller cutter 6 and its teeth 7, and after that on the surface of borehole face (Fig. 1). Hard-alloy teeth 7 keep the roller cutter from rotating with the bit body as it rotates due to the rock in borehole face and its resistance forces P_1, P_2, and P_3. To the roller bit body 1 applied torque. After that bit body with its inclined surface end affects on the end surface of the roller cutter along the line AB. Torque can be represented as the product of the force F_t on the shoulder AO_1, $M_t = F_t \cdot AO_1$. Force F_t can be decomposed into two components F_1 perpendicular to the inclined end surface of the roller cone, $F_1 = F_t \cdot \sin Q$ and F_2 along with this surface, $F_2 = F_t \cdot \cos Q$. The roller cutter is kept from displacement along inclined end surface of the bit body with its spherical surface in contact with the spherical surface on the pin with center at point O_1. The effect of force F_1 on the shoulder AO_1 creates the moment of impact of the cone on the face, which is redistributed by roller teeth, at points C_1, C_2, C_3 on its surface. If M_{rol} – rolling moment of teeth on borehole rock surface than $M_{rol} = \sum F_{1i} \cdot C_1O_1$. When the drill bit body rotates, the force F_1 from point A moves to point A_1, (Fig. 1b), and the force F1 moves to another row of teeth on the outer surface of roller. This creates an additional moment of impact of the teeth on the surface of the borehole face from their rolling over the rock surface: $M_{rol} = P_{str} \cdot P_2P_3$.

In Figure 1c are shown the trajectory of one teeth for a full turn of the drill bit body, obtained by calculations and mathematical modeling in Maple software. In Figure 1d shown the projections of the paths of the teeth on the bottomhole.

In Figure 2 is shown a vertical pin roller drill bit, that consist from following elements. Hemispherical shape roller 1, drill bit body 2 with inclined end surface, vertical pin 3 with spherical bearing surface 4, nut coupling 5, angular contact ball bearing 6, outer surface of spherical bearing 7, nuts 8 and 9. The roller head is reinforced with hard alloy teeth 10.

Drill bit works as follows. The action of the force P is transmitted through the inclined end part of the drill bit body 1 to the end part of the hemispherical roller cutter 2 thru teeth 10 on the surface of the borehole rock face. The intrusion of the teeth 10 into the bottom of borehole rock to the unwanted depth is prevented by the forces P_1, P_2, P_3 and P_i, that holding the roller cone from rotation with the drill bit body during its rotation. Torque M_t is applied to drill bit body 2 to rotate it.

Torque is applied by the incoming part of the inclined end surface of the bit body to the end surface of the roller cutter along the line AB (Fig. 1a). Torque can be represented as the product of the force F_t on the shoulder AO. Force F_t can be decomposed into two components F_1 perpendicular to the inclined end surface of the cone and F_2 along this surface. The roller cutter is prevented from moving by the hinge of the trunnion with the center at the point O. The force F_1 is redistributed to the teeth that are in contact with the face at the points C_1, C_2, C_3. At each of these points, moments destroying the rock bottom effect equal to the product of forces at these points on the shoulders of OC_1, OC_2, OC_3 act on the face. When turning the bit body, point A moves in a circle (Fig. 1b), and the force F_1 moves to another row of teeth. Figure 1c shows the trajectory of one of the teeth, obtained by calculation.

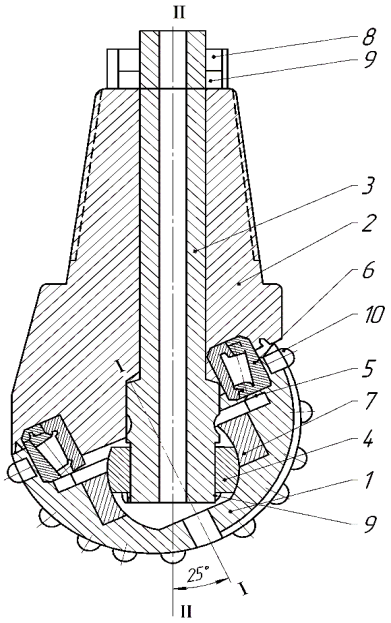


Fig. 2. Single roller drill bit

Figure 3 shows the traces of teeth left on the bottom, obtained at the bottom when drilling with chisels with vertical and inclined trunnions. The tracks of the teeth on the bottom coincide with the calculated trajectories of the teeth left by the chisels with the vertical and inclined trunnions. Traces of teeth significantly differ from each other.

Figure 4 present fragments of the waveforms obtained by strain gauge measurements when conducting experimental studies.

The drilling was carried out on a drilling test stand successively at first with 76 mm in diameter single cone vertical pin drill bit SH-76 on the rock sample with strength $f = 8$ from the scale of professor M.M. Protodyakonov. Studies were conducted using a two-factor experiment. At the same time, technological and dynamic process parameters were recorded. The mechanical drilling rate V was determined by measuring the segment of well drilled in the limestone block and the time spent on drilling: $V = h / t$, m/min. Penetration depth of the drill bit per one body revolution $h = V / \omega$, mm per revolution. if N – electrical power spent on drilling than energy intensity of the drilling $E = 60 \cdot N / V$, MJ/m. Force moment $M = N / V$, Nm, D – drill bit vibration dispersion and f – the first harmonic frequency of longitudinal vibrations, Hz. This parameters was determined by waveforms recorded obtained via strain gauge sensors.

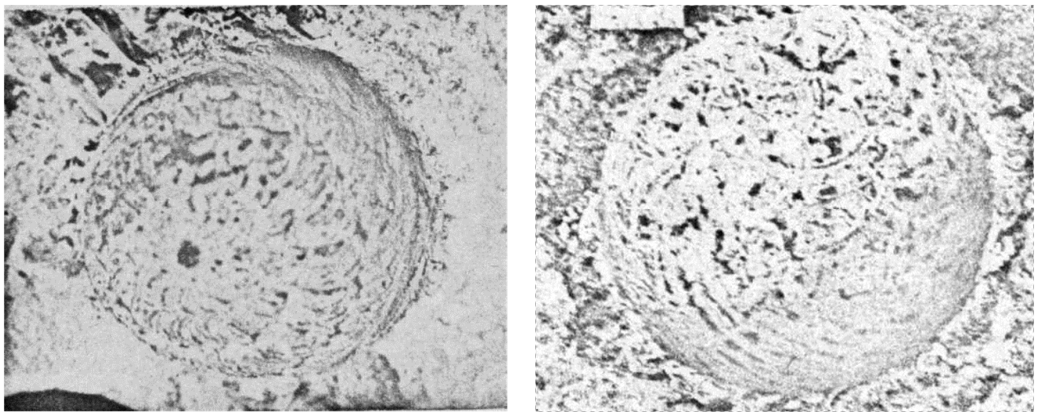
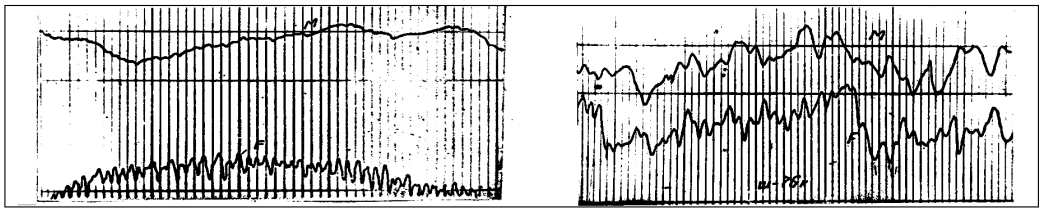

a b

Fig. 3. Traces of teeth roller-cone on the borehole bottom: a – drill bit with a vertical pin; b – drill bit with an inclined pin



a b

Fig. 4. Waveforms fragments: a – roller-cone drill bit with vertical pin; b – tricone drill bit

Natural and coded values of experiment factors variations are given in table 1.

Table 1. Natural and coded values of experiment factors variations

Variation factors, coded and natural values		Factor levels			Variation interval
		–1	0	+1	
X_1	F – drill bit feed force into borehole,	20	40	60	20
X_2	ω – drill bit rotation frequency, rpm	100	200	300	100

The planning matrix and the results of the experiment are shown in Table 2 and Table 3.

Table 2. The study results of drilling process technological indicators for single-roller drill bit with vertical pin SH-76

№	Coded symbol		V_1, m/min	V_2, m/min	h_1, m m/rev	h_2, m m/rev	N_1, kW	N_2, kW	E_1, MJ/m	E_2, MJ/m	M_1, N m	M_2, N m	D	f, Hz
	X_1	X_2												
1	–1	–1	0.100	0.068	1.00	0.58	3.3	3.4	2.03	3.00	0.31	0.33	924	16
2	–1	0	0.081	0.070	0.41	0.32	4.1	3.2	2.98	2.75	0.19	0.15	519	12
3	–1	+1	0.153	0.117	0.51	0.39	5.8	5.6	2.23	2.9	0.17	0.19	359	27
4	0	–1	0.115	0.125	1.15	1.25	5.2	5.4	2.52	2.7	0.49	0.51	571	18
5	0	0	0.214	0.236	1.07	1.18	7.4	7.6	2.10	2.7	0.35	0.36	453	25
6	0	+1	0.364	0.328	1.21	1.09	10.6	10.4	1.73	1.9	0.34	0.33	437	31
7	+1	–1	0.150	0.128	1.50	1.28	8.4	7.4	3.36	3.5	0.80	0.70	594	17
8	+1	0	0.217	0.276	1.09	1.38	8.4	8.5	2.32	1.9	0.40	0.41	531	32
9	+1	+1	0.444	0.300	1.48	1.00	9.9	7.0	1.45	1.40	0.32	0.22	468	30

The regression equations for a single roller-cone drill bit are as follows (1):

$$V_1=0{,}219–0{,}077X_1+0{,}085X_2+0{,}0455X_1X_2+0{,}055X_1^2+0{,}0176X_2^2 ,$$
$$V_2=0{,}460+0{,}10825X_1–0{,}08142X_2–0{,}02513X_1X_2+0{,}0336X_1^2+0{,}0661X_2^2,$$
$$V_3=7{,}545+2{,}0167X_1+1{,}35X_2–0{,}45X_1X_2–1{,}516X_1^2+0{,}33354X_2^2 ,$$

V_4=4,718+0,203X_1–0,0878X_2–0,158X_1 X_2+0,65X_1^2–0,0017X_2^2, (1)
V_5=0,3417+0,1258X_1–0,1308X_2–0,085X_1X_2–0,0475X_1^2+0,0825X_2^2,
V_6= 448,47–34.8334X_1–137,5 X_2+109,75 X_1X_2+78,85 X_1^2+57,85 X_2^2,
V_7=13,56+3,67X_1+8,17X_2+0,25X_1X_2+12,6X_1^2+0,167X_2^2,

where V_1 – drilling rate, V_2 – deepening of drill bit in one turn, V_3 – drilling process power consumption, V_4 – energy intensity of drilling process, V_5 – torque moment on the drill bit body, V_6 – first harmonic dispersion of vibrations, V_7 – vibration frequency at the first harmonic.

Table 3. The study results of drilling process technological indicators for tricone drill bit

№	Coded symbol		V_1, m/min	V_2, m/min	h_1, mm/rev	h_2, mm/rev	N_1, kW	N_2, kW	E_1, MJ/m	E_2, MJ/m	M_1, N m	M_2, N m	D	f, Hz
	X_1	X_2												
1	–1	–1	0.05	0.05	0.48	0.53	2.9	3.1	3.63	3.51	0.29	0.31	2480	14
2	–1	0	0.08	0.08	0.40	0.42	4.9	5.1	3.72	3.69	0.25	0.26	6570	21
3	–1	+1	0.12	0.11	0.39	0.37	7.9	8.4	4.05	4.58	0.26	0.28	15400	33
4	0	–1	0.07	0.06	0.67	0.57	5.6	5.2	5.02	5.47	0.56	0.52	700	9
5	0	0	0.08	0.08	0.41	0.41	6.7	6.9	4.96	5.05	0.34	0.35	1184	13
6	0	+1	0.14	0.15	0.48	0.49	9.3	9.5	3.88	3.88	0.31	0.32	11100	19
7	+1	–1	0.08	0.07	0.83	0.70	5.6	5.2	4.05	4.46	0.56	0.52	5500	19
8	+1	0	0.13	0.13	0.63	0.65	8.1	9.3	3.89	4.33	0.41	0.47	22100	32
9	+1	+1	0.16	0.16	0.54	0.53	12.2	11.2	4.49	4.20	0.41	0.37	22550	39

The regression equations for tricone drill bits are as follows (2):

V_1=0,092+0,02X_1+0,039X_2+0,006X_1X_2+0,005X_1^2+0,0051X_2^2,
V_2=0,460+0,108X–0,08y–0,025X_1X_2+0,0336X_1^2+0,066X_2^2,
V_3=6,97+1,61X_1+2,57X_2+0,29X_1X_2–0,21X_1^2+0,342X_2^2, (2)
V_4=4,718+0,2032X_1–0,0878X_2–0,1582X_1X_2–0.65X_1^2–0.0017X_2^2,
V_5=0,3639+0,0906X_1–0,0675X_2–0,0304X_1X_2–0,0334X_1^2+0,0508X_2^2,
V_6=6803,1+900,8X_1 + 3345,8X_2 –4041,2X_1X_2 + 4723,0X_1^2 – 3711,9X_2^2,
V_7= 13,56+3,67X_1+8,17X_2+0,25X_1X_2+12,67X_1^2+0,17X_2^2.

According to the regression equations (1) and (2), were plotted graphs of each measured technological parameter of both drill bits versus the feed force, Figures 5 and Figures 6.

On Figures 5 are shown graphs of the drilling rate, bit deepening per one revolution of bit body, power consumption of drilling process for each studied drill bits. Also shown energy intensity of drilling, drill bit torque moment, dispersion and frequency of longitudinal vibrations for single-roller and tricone drill bits in dependency from the feed force at the same bit rotation frequency ω = 300 rpm. Feed force varied from 20 kN to 60 kN.

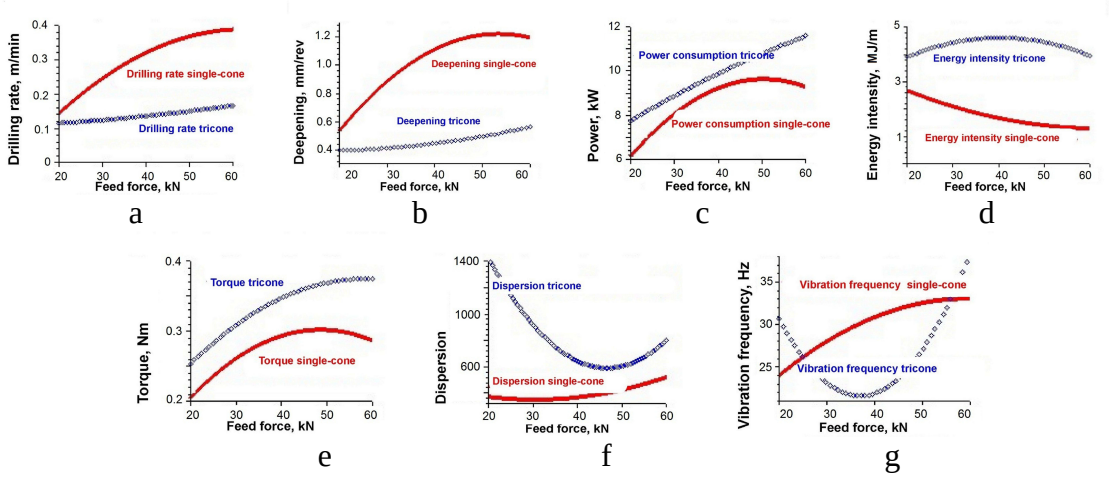


Fig. 5. Technological indicators changes for drilling with single-cone and tricone drill bits, in dependency from feed force

In full feed force range the drilling rate of single roller-cone drill bit changed from V=0.10 m/min at F = 20 kN, to V = 0.38 m/min at F = 60 kN. For tricone drill bit the drilling rate in this feed force range of variation also varied from V = 0.10 m/min to V = 0.17 m/min (Fig. 5a).

Deepening of a single cone drill bit for one rotation of the bit body shown on Figure 5b. With feed force increase, it also increased from h = 0.055 mm with feed force F = 20 kN to h = 0.122 mm with feed force equal to 60 kN. The depening for one revolution of tricone drill bit with increasing feed force decreased from h = 0.063 mm with feed force F = 20 kN to h = 0.032 mm with feed force F = 60 kN.

Drilling process power consumption for a single-cone drill bit shown on Figure 5c. With feed force increase it grows from N = 6.1 kW (feed force F = 20 kN) to N = 9.5 kW (F = 50 kN). Further increasing of feed force dose non cause the power consumption grows. When drilling with tricone drill bit, the increase in feed force of drill bit movement to borehole bottom causes a uniform increase in power consumption from N = 7.7 kW with feed force F = 20 kN to power consumption N = 11.8 with feed force F = 40 kN.

Drilling energy intensity shown on Figure 5d. For a single cone drill bit, the energy intensity decreased from E = 2.8 MJ/m to E = 1.4 MJ/m. For tricone drill bit with increasing feed force the energy intensity also increased from E = 3.7 MJ/m (F = 20 kN) to E = 4.6 MJ/m (F = 40 kN). Further feed force increasing to F = 60 kN reduced the power consumption of drilling to E = 4.0 MJ/m.

The change in the drill bit body torque for drilling with a single-cone drill bit in dependency from feed force can be traced on Figure 5e. The torque of single roller-cone drill bit with feed force increase also increases from M = 0.20 Nm at F = 20 kN to M = 0.30 Nm at F = 50 kN where it reaches its maximum value, and then the growth stops. Torque change in dependency from feed force can be traced on Figure 5e. The torque on trione drill bit with increasing feed force also increases from M = 0.25 Nm at = 20 kN to M = 0.38 Nm at F = 60 kN and reaches its maximum value.

Variation of the longitudinal vibration dispersion when drilling with single-cone and tricone drill bits is shown on Figure 5f. The dispersion value for single-cone drill bit with feed force F = 20 kN is D = 390. Increase in the feed force value to F = 60 kN led to increasing of dispersion for single-cone bit to D = 550. The dispersion of tricone bits with feed force of F = 20 kN is D = 14000. Increasing the feed force to F = 48 kN reduced the level of vibrations to D = 7000. Further increase in the feed force led increasing in the dispersion of the tricone bit to D = 8100.

Dependence in frequency change of longitudinal vibrations when drilling with single-cone and tricone drill bit is shown on Figure 5g. Vibration frequency single-cone drill bit elements at feed force F = 20 kN is f = 24 Hz. Increase in the feed force to F = 60 kN caused an increase in the frequency of the longitudinal vabrations to f = 34 Hz for single-cone drill bit. Frequency of longitudinal vibrations for tricone drill bit with feed force F = 20 kN is f = 31 Hz. Increasing feed force F to 38 kN reduced the frequency of longitudinal vibrations to f = 22 Hz. Further increase of feed force for tricone drill bit to 60 kN results in increase of the longitudinal vibrations frequency to the value f = 38 Hz.

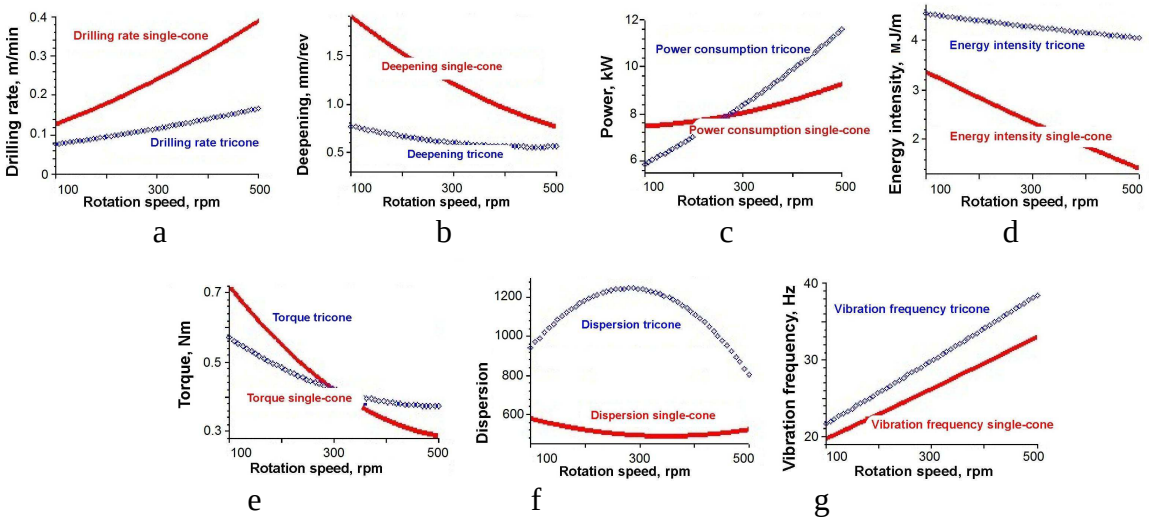


Fig. 6. Dependencies in changes of technological indicators when drilling with single-cone and tricone drill bits with different rotation frequency.

According to the regression equations (2), dependence graphs of each measured technological parameter for both drill bit types are plotted on Figures 6. Shown graphs of drilling rate, drill bit deepening per revolution, drilling power consumption, power intensity of drilling, drill bit torque, dispersion and frequency of longitudinal vibrations for single-cone and tricone drill bits in dependencies from rotation frequency.

In full rotational speed variation range, the drilling rate of a single-cone drill bit increased, as shown on Figure 6a, from V = 0.13 m/min at rotation frequency ω = 100 rpm, to drilling speed V = 0.38 m/min at rotation frequency ω = 300 rpm. For the tricone bit the drilling rate in this rotational speed range variation was between V = 0.08 m/min at ω = 100 rpm and V = 0.17 m/min with rotation frequency ω = 300 rev/min.

Single-cone drill bit deepening in one body rotation is shown on Figure 6b. With an increase in rotation frequency it decreased from h = 1.9 mm at rotation frequency ω = 100 rpm up to h = 0.8 mm at rotation frequency ω = 300 rpm. Deepening for one revolution of three-cone bit body with increasing in rotational speed are decreased from h = 1.0 mm at rotation frequency ω = 100 rpm to h = 0.3 mm at rotation frequency ω = 300 rpm.

Power consumption for drilling with single-cone drill bit is shown on Figure 6c. With increasing in feed force it increased from N = 7.5 kW at rotation frequency ω = 100 rpm to the value N = 9.3 kW at rotation frequency ω = 300 rpm. When drilling with a tricone drill bit, an increase in the bit rotation frequency causes a uniform increase in power consumption from N = 5.8 kW at rotation frequency ω = 100 rpm to power consumption of N = 11.9 kW at rotation frequency of ω = 300 rpm.

Graphs of drilling power intensity with increasing rotational speed from ω = 100 rpm to ω = 300 rpm are shown on Figure 6d. For a single-cone drill bit, the drilling power

intensity decreased from E = 3.35 MJ/m to E = 1.50 MJ/m. For tricone drill bit, the energy intensity decreased from E = 4.5 MJ/m to E = 4.0 MJ/m.

Torque change character when drilling with a single-cone bit in dependency with rotational speed in range from ω = 100 rpm to ω = 300 rpm can be seen on Figure 6e. The torque on single-cone drill bit decreases with an increase in rotational speed from M = 0.72 Nm at frequency of ω = 100 rpm to M = 0.28 Nm at frequency of rotation ω = 300 rpm. Torque on tricone drill bit with an increase in rotational speed from ω = 100 rpm to ω = 300 rpm also decreases from M = 0.57 Nm at rotation frequency ω = 100 rpm to M = 0.40 Nm at rotation frequency ω = 300 rpm.

Dispersion of longitudial vibrations for single-cone drill bit is shown on Figure 6f. With increasing rotational speed from ω = 100 rpm to ω = 300 rpm it decreased from D = 580 to D = 530. Dependence curve has extremal caharcter, its minimum value D = 500 is reached at the rotation frequency ω = 220 rpm. For tricone drill bit the dependence of dispersion of longitudinal vaibrations from drill bit body rotation frequency is also extremal. Its maximum value, D = 12500 achieved at drill bit rotation frequency ω = 200 rpm. At minimum rotation frequency, the dispersion of the tricone bit reaches the value D = 8000 and at maximum rotation frequency of the bit ω = 300 rpm it increases to D = 12000.

Dependence of change in longitudinal vibrations frequency from rotation speed of the drill bit body for single-cone and tricone bits are shown in Figure 6g. Vibration frequency of single-cone drill bit elements for rotation frequency of ω = 100 rpm is f = 19 Hz. Increase in the rotation frequency to ω = 300 rpm caused increasing in frequency of the longitudinal vibrations of a single-cone drill bit to f = 32 Hz. Frequency of longitudinal vibrations of tricone drill bit at rotation frequency ω = 100 rpm is f = 22 Hz. Increasing the frequency of drill bit rotation to ω = 300 rpm raises the frequency of longitudinal vibrations f = 38 Hz.

CONCLUSIONS. Drilling with a single-cone drill bit showed its advantage over the tricone drill bit in drilling speed more than 1.9 times. drilling energy intensity is about two times lower and dispersion of longitudinal vaibrationes on average less than 20 times. and this result obtained with approximately the same technological indicators: power consumption, drilling energy intensity, torque, deepening per revolution and the frequency of vibrations. these studies can be used to develop a small-diameter drill bit with behavior like in hydro pulse drilling, but all forces forms on borehole bottom. this can be called a new method of drilling with direct transformation of drill bit rotation into impact pulses at borehole bottom. the positive moment of new method lies in increase of borehole bottom working square in 3 times due to transition from the bottom to spherical one.

References: 1. Harlashkin K., Kononyihin S., Manakin A. Odnosharoshechnoe doloto [Single-cone drill bit] / patents.su. 29.03.2019. Available at: http://patents.su/2-859588-odnosharoshechnoe-doloto.html. **2.** Zubarev A., Matveev I., Ryizhikov Yu. (1971) Odnosharoshechnyie dolota [Single-cone drill bit]. Moscow: Nedra.

EXPERIMENTAL STUDYING VPO-3000 MACHINE DRIVE WITH ESTABLISHING SIMILARITY CRITERIA

Karsakova A. Zh. (KSTU, city of Karaganda, Kazakhstan)
Тел.8(701)4509194, E-mail:karsakova84@mail.ru

Abstract: *The article deals with the problems that arise when working track renewal machines VPO-3000. In order to reduce dynamic loads on the drive and to increase the lifespan of the machine, it is proposed to use a hydraulic drive. In order to confirm the effectiveness of the hydraulic drive, it is necessary to carry out experimental studies. In connection with the possible occurrence of a large number of parameters in the process of planning and carrying out the experiment, it is advisable to use the similarity theory and the dimensional analysis that allow reducing the number of the parameters studied.*
Keywords: *engine, vibration plate, hydraulic drive, experiment, track equipment, repair of roads, motor, similarity theory, machine.*

The VPO-3000 machine is designed to carry out a set of final works on technological processes of road maintenance and new construction.

The main working bodies of the VPO3-3000 machine for compacting the ballast prism of the rail-and-sleeper grate are a tamping unit and slope seals that include drive-driven vibrating plates and mechanisms that serve for mounting the plates relative to the rail-and-sleeper grate in the working and transport position. Calculations of vibration plates (Figure 1) are made for the purpose of selecting rational geometric parameters of wedges 6, 7, speed and power parameters of vibration coordinated with the speed of the working movement of the machine (performance), defining traction resistances, defining characteristics of vibrodrive 5, forces acting in the system “vibration plate-ballast”, evaluation of strength properties of structural elements, etc. [1].

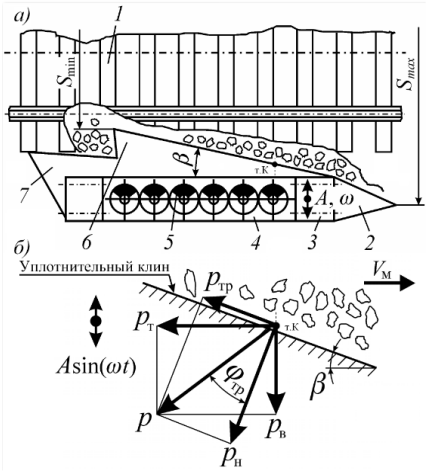


Fig. 1. Vibration pressing of the ballast layer: *a* – under the sleepers with a vibration plate with the continuous movement along the track: *1* – rail-and-sleeper grate; *2* – forepart; *3* – spring kits; *4* – body; *5* – unbalance vibration exciter; *6*, *7* – first and second sealing wedges; *b* – reactive components of the ballast pressure on the vibration plate wedge surface at points $p_т$, $p_{тр}$, $p_н$, $p_В$.

The vibration plate implements the principle of vibratory pressing the ballast layer by sealing, for example, the first wedge 6 located at the angle of attack β to the direction of translational motion. Unbalanced vibration exciter 5 with continuous movement of vibrating plate 4 along track 1 generates a driving force directed across the track axis. Since the vibration plate is suspended on elastic spring sets 3 there appears vibration on the sealing surface of the first 6 and second 7 wedges, as well as forepart 2 with the angular frequency ω, rad/s and amplitude *A*, m. With continuous movement of the vibration plate with the speed V_m for the account of the angle of attack β there is manifested the wedge effect. If the initial width of the capture zone between the right and left vibration plates is S_{max}, then after passing the forepart and the first wedge it will be S_{min}. The left vibration plate is not conventionally shown here.

The trajectory of the point movement on the wedge surface is in the form of a sinusoid. We consider the process to be stationary, therefore, the initial phase of the trajectory is equal to zero. Since the vibration plate moves with the constant speed V_m, m/s, the vibration

process proceeding within the time *t*, s is proportional to the uniform increase in the *x* coordinate, m along the track from the conditional point *0*.

The wedge moves the surface of the ballast in each cycle by the S_T value, m. It occupies the positions shown by the conventionally inclined dash-dotted *i-1*, *i*, *i+1* lines. When the boundary is shifted, the ballast is pressed. Since the ballast exhibits elastic properties, when a wedge is separated from it, elastic recoil occurs at the speed V_b, m/s.

To excite vibrations of the vibration plate, there is used an unbalance vibrator built into the body with the driving force directed across the track (Figure 2). Let's make the equation of the vibration plate motion for the elastic-viscous model "vibration plate-ballast". The restoring force in system (1.1) will be [2]:

$$V = -(k_n + k_{bs}^{упл})y\,; \tag{1.1}$$

where $k_n, k_{ns}^{упл}$ are coefficients of the vibration plate suspension and ballast rigidity, N/m. The forces of resistance (1.2):

$$W = -(b_n + b_{fs}^{упл})y'\,; \tag{1.2}$$

where $b_n, b_{fs}^{упл}$ are coefficients of resistance of the suspension and ballast, N/m s.

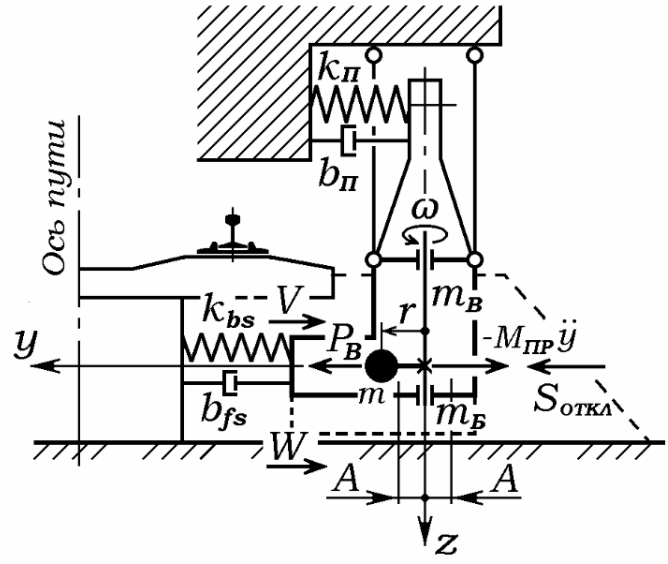


Fig. 2. Computational model for determining the amplitude of the vibration plate vibrations

The driving forces in the system will be the coercive force and the forces of the unloading S_{def}. The maximum coercive force of the vibration plate (1.3):

$$P_0 = km_i r_i \omega^2 \tag{1.3}$$

where *k* is the number of debalances that is even for the vibrator of directional vibrations;

m_i is the debalance mass, kg;

r_i is eccentricity, m,

ω is the angular speed, rad/s (for vibration plates of VPO-3000 machine ω = 154 rad/s; for VPO-3-3000C-3-3000 ω = 220 rad/s).

The disadvantage of the VPO-3-3000 machine is the electric motor-vibrator pair, there are formed large dynamic loads on the drive. To reduce dynamic loads, and as a result of increasing the motor potential, we propose to use a drive. It is necessary to determine the parameters of the mode in case of a hydraulic drive. To do this, it is necessary to carry out an experiment to verify the effectiveness of the hydraulic drive. There are the following experiment plans: one-factor plan; multifactor classic plan; multifactor factorial plan.

A factor is a measured variable that takes certain values at some time. In the experiment, each factor can take one or several values [3]. In connection with the variety of factors, we use the similarity theory to reduce the number of independent values.

The theory of dimensions is used to reduce the set of variables in theoretical analysis and experiment. In the transition from ordinary physical values to complex-type values, the number of variables is reduced, the experiment will be influenced by non-individual factors of values and its whole complex, that is, the interconnections of values will appear more clearly.

There are most frequently used multifactor experiments of factor plans. The factor plan of the experiment should be preceded by the work for adoption of restrictions on factors, selecting the main level of the factor, determining the interval and steps of variation.

The main parameters of the mode and design of the vibration plate are mass m, amplitude A, angular speed ω, resistance σ, plate area S, specific gravity γ, acceleration g, maximum driving force of the vibration plate P.

In the research work when considering complex problems, solutions should be found that would establish the appropriate patterns between the corresponding processes and phenomena. To obtain proper results there are carried out necessary experiments [4, 5]. According to the experiment, we obtain eight fundamental variables. Then the general equation can be written as follows

According to the experiment we obtain eight fundamental variables. Then the general equation can be written down in the following form (1.4):

$$P = \overline{P}(m, A, \omega, S, \sigma, \gamma, g); \quad (1.4)$$

By the Buckingham theorem, this functional relationship can be expressed in terms of dimensionless combinations of values.

To begin with, we will express the dimension of the variables with respect to three basic units: amplitudes L, mass M, and time θ. For the basic values the dimensional formulas are given in Table 1.

Table 1. List of dimensional formulas for basic variables

No	Variable name	Designation	Unit	Dimensional formula
1	Mass	m	kg	M
2	Amplitude	A	M	L
3	Angular speed	ω	1/s	θ^{-1}
4	Resistance	σ	N/m^2	$M\,\theta^{-2}L^{-1}$
5	Area	S	m^2	L
6	Specific weight	γ	N/m^3	$M\,\theta^{-2}L^{-2}$
7	Acceleration	g	m/s^2	$L\theta^{-2}$
8	Force	P	$kg\ m/s^2$	$M\,L\,\theta^{-2}$

Now let us suppose that between these values there is the following relation:

$$P = \varphi(m^{\alpha}, A^{\beta}, \omega^{\gamma}, S^{e}, \sigma^{d}, \gamma^{f}, g^{k}). \quad (1.5)$$

Let's substitute dimensions from Table 1 instead of the dimension symbols:

$$\varphi = [M^{\alpha}, L^{\beta}, \theta^{-\gamma}, L^{2e}, (M\theta^{-2}L^{-1})^{d}, (M\theta^{-2}L^{-2})^{f}, (L\theta^{-2})^{k}] = ML\theta^{-2}; \quad (1.6).$$

In order to make this equation uniform relative to the dimensions, there must be fulfilled the following relations for the exponents (1.7, 1.8, 1.9):

$$\text{for M: } 1=\alpha+d+f; \quad (1.7)$$

$$\text{for L: } 1=\beta+2e-d-2f+k; \quad (1.8)$$

$$\text{for } \theta\text{: } -2=-\gamma-2d-2f-2k. \quad (1.9)$$

Now we have three equations with seven unknown values. Let's simplify them by means of excluding α, β, γ. Then $\alpha=1-d-f$, $\beta=1-2e+d+2f-k$, γ=2– 2d– 2f– 2k.

Substituting these realtions for the exponents in formula (1.2), we obtain formula 1.10:

$$\varphi = [m^{(1-d-f)}, A^{(1-2e+d+2f-k)}, \omega^{(2-2d-2f-2k)}, S^{e}, \sigma^{d}, \gamma^{f}, g^{k}]. \quad (1.10)$$

By means of unifying the members with the same exponents, it is easy to make dimensionless combinations (1.11):

$$\left[\left(\frac{A\sigma}{m\omega^2}\right)^d\left(\frac{A^2 g}{m\omega^2}\right)^f,\left(\frac{S}{A^2}\right)^e,\left(\frac{g}{A\omega^2}\right)\right]=-\frac{P}{mA\omega^2}. \quad (1.11)$$

The eight initial variables of the problem have given us five dimensionless combinations. Using the dimensional analysis, we have transferred from usual physical values to the complex type values.

The fundamental variables have been transformed into three dimensionless values (1.12, 1.13, 1.14).

$$\frac{A\sigma}{m\omega^2}\times\frac{m\omega^2}{A^2\gamma}=\frac{\sigma}{A\gamma}; \qquad k_1=\frac{\sigma}{A\gamma}; \quad (1.12)$$

$$\frac{S}{A^2}\times\frac{m\omega^2}{A^2\gamma}=\frac{Sm\omega^2}{A^4\gamma}; \qquad k_2=\frac{Sm\omega^2}{A^4\gamma}; \quad (1.13)$$

$$\frac{g}{A\omega^2}\times\frac{m\omega^2}{A^2\gamma}=\frac{mg}{A^3\gamma}; \qquad k_3=\frac{mg}{A^3\gamma}. \quad (1.14)$$

According to the plan of the experiment, the plan of the factor experiment has eight experiments and includes all possible combinations of levels of the three factors. The graphic image of the plan is presented in the form of a cube.

The coordinates of the center of the cube are the average value of dimensionless values (1.15, 1.16, 1.17).

$$k_{1cp}=\frac{\sigma_{cp}}{A\gamma_{cp}}; \quad (1.15)$$

$$k_{2cp}=\frac{Sm\omega_{cp}^2}{A^4\gamma_{cp}}; \quad (1.16)$$

$$k_{3cp}=\frac{mg}{A^3\gamma_{cp}}. \quad (1.17)$$

We determine the minimum and the maximum value of the dimensionless values (1.18, 1.19, 120, 1.21, 1.22, 1.23):

$$k_{1\min}=\frac{\sigma_{\min}}{A\gamma_{\max}}; \quad (1.18)$$

$$k_{2\min}=\frac{Sm\omega_{\min}^2}{A^4\gamma_{\max}}; \quad (1.19)$$

$$k_{3\min}=\frac{mg}{A_{\min}^3\gamma_{\max}}. \quad (1.20)$$

$$k_{1\max}=\frac{\sigma_{\max}}{A\gamma_{\min}}; \quad (1.21)$$

$$k_{2\max}=\frac{Sm\omega_{\max}^2}{A^4\gamma_{\min}}; \quad (1.22)$$

$$k_{3\max} = \frac{mg}{A^3 \gamma_{mun}}. \quad (1.23)$$

According to these data we build the coordinates of the cube vertices.

1. $(k_{1max}, k_{2min}, k_{3min})$; 2. $(k_{1min}, k_{2min}, k_{3min})$; 3. $(k_{1min}, k_{2max}, k_{3min})$; 4. $(k_{1max}, k_{2max}, k_{3min})$; 5. $(k_{1max}, k_{2min}, k_{3max})$; 6. $(k_{1min}, k_{2min}, k_{3max})$; 7. $(k_{1min}, k_{2max}, k_{3max})$; 8. $(k_{1max}, k_{2max}, k_{3max})$.

The geometric interpretation of the full factor experiment 2^3 is a cube, the coordinates of the vertices of which specify the conditions of the experiments. If the center of the cube is placed at the point of the main level of factors, and the scales along the axes are selected so that the interval of variation is equal to one, there will be the cube shown in Figure 3. The cube defines the experimental area, and the center of the cube is its center (Figure 3).

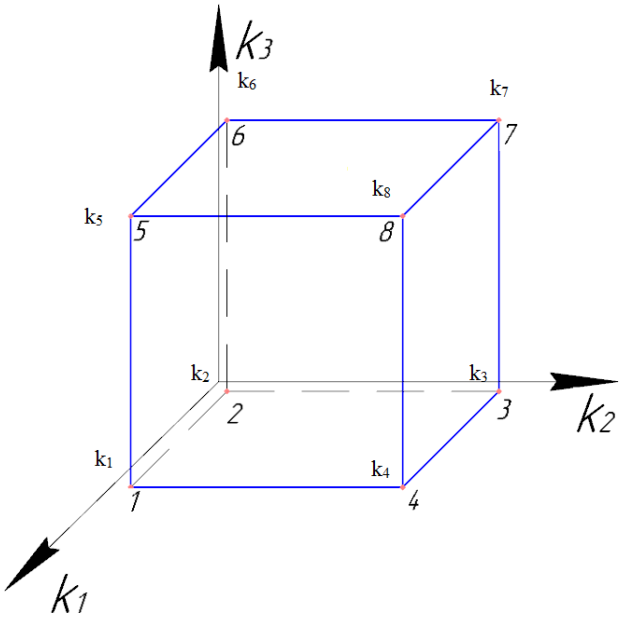


Fig. 3. Geometric interpretation of the full factor experiment 2^3

At the department there is considered the issue of replacing the electromechanical drive of the track renewing and alining machine VPO3-3000 with the hydraulic drive.

References: 1. Track machines: Textbook for universities of railway transport/S.A. Solomonov, M.V. Popovich, V.M. Bugaenko, et al.; Ed. S.A. Solomonov. - M .: Zheldorizdat, 2000. - 756 p. **2.**Tsykunov Yu.I. Layer-by-layer ballast compaction // Track and track facilities. - 2005. – No. 9. - P. 14-17. **3.** Adler Yu.L., Markova E.V. Experiment Planning. M., 1970. **4.** Basics of scientific research: Monograph/A.S. Kadyrov, I.A. Kadyrov; Karaganda State Technical University. - Karaganda: KSTU Publishing house, 2015. **5**.Schenk H. Theory of engineering experiment. M.: Mir, 1972. – 381 p.

DEVELOPMENT OF MATERIALS BASED ON STEELS OF AUSTENITIC CLASS AND CERAMICS FOR APPLICATION OF WEAR-RESISTANT COATINGS

Panteleenko F.I., Okovity V.A., Panteleenko A.F. *(Belarusian National Technical University)*
Tel / Fax: (017)293-92-23; E-mail: scvdmed@bntu.by

Abstract: *Nickel-based Ni-Cr-B-Si-C nickel-based powders and their mixtures have been widely used to form wear-resistant gas-thermal coatings. Nickel-based self-fluxing alloys have a high complex of properties. They have a low melting point, are processable, flux well and build up in air, have high wear resistance. Coatings of self-fluxing alloys, depending on the alloy grade, can have a hardness of 180 HB to 65 HRC. Along with the indisputable advantages of self-fluxing alloys on a nickel base, there are a number of serious drawbacks that significantly reduce the effectiveness of this technology: brittleness, crack resistance, wear resistance, workability, economic factors often limit the use of nickel-based materials. When only wear is determining the life of a part, nickel powders should be replaced with cheaper iron-based powders, including powders based on austenitic steels, which are the most popular intermediate products of powder metallurgy. Analysis of the state of the issue of obtaining and applying self-fluxing powder materials allowed us to offer a fundamentally new concept of creating self-fluxing powders based on austenitic steel.*
Key words: *nickel-based powder, brittleness, crack resistance, wear resistance, workability, economic factors, self-fluxing powder, austenitic steel*

Introduction. Along with the indisputable advantages of self-fluxing alloys on a nickel base, there are a number of serious drawbacks that significantly reduce the effectiveness of this technology [1]:

1. High sensitivity to technological modes of coating deposition. The required complex of properties of the coating is retained only while maintaining the homogeneous fine-dispersed structure of the original powder. Even a slight overheating dramatically reduces the quality of the coating.

2. The low crack resistance when applying self-fluxing nickel-based alloys to steel parts is due to the high coefficient of linear expansion during heating (14.4-16.2) 10-6K-1.

3. High cost due to the use of expensive nickel base metal. The high complex of protective properties of coatings is often excessive. Their use is justified only for the conditions of simultaneous exposure to wear, aggressive media and high temperatures. When determining the service life of the part is only wear, nickel powders should be replaced with cheaper ones, including iron-based powders.

4. The complexity of the subsequent machining.

5. High coefficient of friction in conditions of dry sliding friction, coatings are prone to setting and tearing.

Thus, the structure, brittleness, crack resistance, wear resistance, machinability, economic factors often limit the use of nickel-based materials. When only wear is determining the life of a part, nickel powders should be replaced with cheaper iron-based powders, including powders based on austenitic steels, which are the most popular intermediate products of powder metallurgy [2].

An analysis of the state of the issue of obtaining and applying self-fluxing powder materials allowed us to offer a fundamentally new concept of creating self-flux-based powders based on austenitic steel[3,4].

1. The elements boron and silicon or boron alone are introduced into the surface layer of each particle by diffusion at a certain depth, in certain quantities and with the condition of providing the required phase composition, due to which they must be provided:

a) implementation of the effect of contact eutectic melting between the boron containing the surface of the particle and the deposited product, between the surface of the particle and the core;

b) self-fluxing, high processability of the powder and increased strength of adhesion with the deposited product;

c) elimination of the carbon monoxide carbon monoxide on receipt of the powder;

d) the resulting boride and carboboride phases should improve the tribological characteristics of the deposited coatings.

2. Low-cost powders based on austenitic steels or machining waste are used as starting materials, which makes it possible to obtain 3-5 times cheaper self-fluxing powders compared to nickel powders.

3. Provides 1.5–2 times better mechanical machinability of the deposited coatings than coatings of nickel alloys.

And so, on the basis of the foregoing, it can be concluded that the replacement in the powder mixture of carbide ceramics and self-fluxing self-fluxing nickel-based powder with self-fluxing powder based on austenitic steels (similar in properties) will significantly improve the properties of the resulting wear-resistant coating and will increase the abrasive wear resistance, reduce porosity while maintaining hardness and significantly reduce the cost of coating.

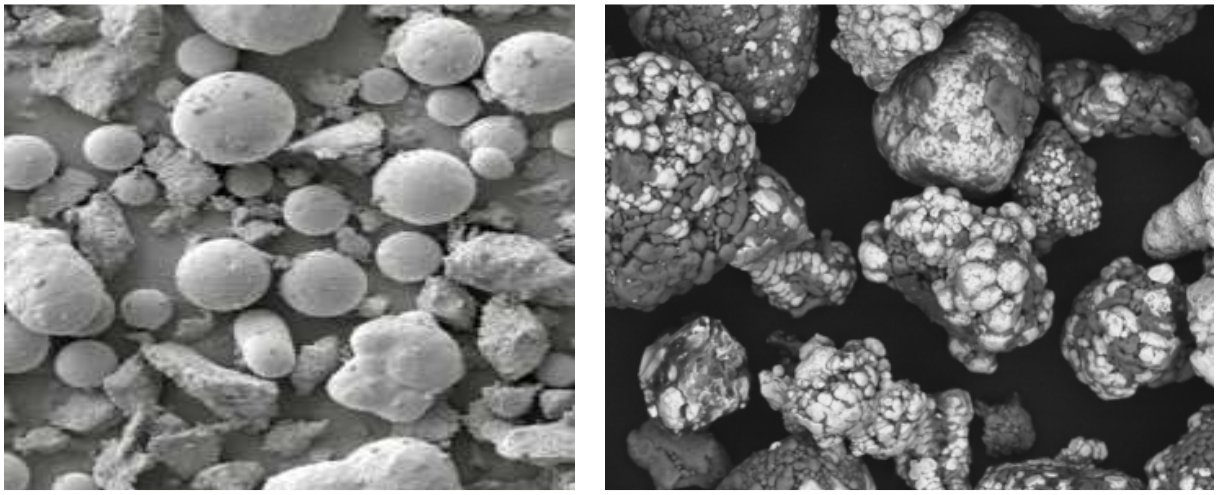
Materials based on steels of austenitic class and ceramiks. High ductility and toughness of the plasma coating is a significant factor in increasing wear resistance. Increased hardness drastically reduces ductility and toughness, leading to brittle fracture. The complex of properties of a nickel-aluminum compound includes wear resistance at the level of tungsten carbide alloys, good adhesion strength and ductility at the level of nickel-chrome alloys, with higher heat resistance, good mechanical workability. The introduction of nickel-aluminum powder in the gas-thermal spraying system increases the ductility and viscosity of the coating, with a slight decrease in hardness. It contributes to the formation of a high adhesive strength at the interface base coating, since it contributes to the plastic relaxation of stresses arising due to an inconsistent change in the volumes of the coating materials and the substrate during heating and cooling[5-7]. Powder properties are listed in Table 1. The morphology of the particles of the initial powders is shown in Figure 1**.** Adding carbide ceramics and a self-fluxing powder based on austenitic steels to a powder mixture of a more low-melting, ductile and heat-resistant nickel-aluminum component will significantly improve the properties of the wear-resistant coating, increase the abrasive wear resistance, decrease porosity and increase adhesion strength. and heat resistance.

Table 1. Hardness, density and particle size distribution of powders

Brand powder	Hardness, HRC	Bulk density, g / cm3	Particle size distribution, microns
Tungsten carbide	60-65	8,12	10-50
ПР–Х18Н15	32–38	3,48	45-100
Nickel-aluminum	26–30	2,79	10-50

Coatings from a mixture of tungsten carbide, self-fluxing powder based on austenitic steels and nickel-aluminum were obtained by flame spraying on a UPTR-86 installation on a carbon steel substrate 45. Powder consumption — 4.5 kg / h; acetylene pressure, oxygen and compressed air respectively 0.1; 0.9 and 0.16 MPa; their consumption is 1.8; 0.1 and 0.5 m3 / h, spraying distance-0.15 m. The percentage ratio of powders in the mixture was selected on the basis of experiments (table 2). Porosity studies were performed on an Epiguant automatic structural analyzer. The porosity of the coatings was determined on the etched sections with an increase of 200 times. The hardness of the coatings was measured according to the

Rockwell method on the TK2M instrument on a scale "C" in accordance with the requirements of GOST 20017-74. Coatings were tested for abrasive wear by friction on fixed abrasive particles according to the standard procedure GOST 17367-71. The test results are shown in Table 2. Analyzing the test results shown in Table 2, we select the following percentage ratio in the mixture of powders - tungsten carbide powder (30 wt.%), Self-fluxing powders based on austenitic steels of the ПР–Х18Н9; ПР–Х18Н10; ПР–Х18Н15 (40-50 wt.%), Nickel-aluminum powder (20-30 wt.%). At this percentage, the characteristics of the obtained wear-resistant coatings correspond or exceed analogues.



a b

Fig. 1. The morphology of the particles of the original powders : a-mixture tungsten carbide - ПР–Х18Н15 (×500); b-nickel-aluminum(×200)

References: 1. Panteleenko F.I., Lyubetsky S.N. Self-fluxing iron-based powders for protective coatings // Vesc i AN BSSR. Gray FTN, 1991. - №3. P. 22-27. **2.** F. Panteleenko, V. M. Konstantinov, I. B. Sorogovets Features of diffusive mass transfer upon receipt of self-fluxing iron-based powders for surfacing and spraying // Rheophysics and thermal physics of non-equilibrium systems. -Ch.2. Kinetic processes in condensed matter: Proceedings of the International Workshop School (May 1991). - Minsk: ANK In-t heat and mass transfer them. AVLykova AN BSSR. - 1991. - P.89-93. **3.** F. Panteleenko Development of effective methods for obtaining wear- and corrosion-resistant metal coatings on machine parts by means of thermal spraying, surfacing and XTO. Sat nauch.tr .. Gas-thermal methods of applying protective coatings. - Chelyabinsk, 1986. SPI-MATI. PM program. - P.71-75. **4.** Panteleenko F.I., Olekhnovich V.S., Bashlak S.D. and others. Restoration and hardening of parts of internal combustion engines // Problems of surface treatment of machine parts by concentrated energy flows: Abstracts of reports. ntk - Minsk, BelNIINTI, 1988. -C.120-121.5. F.I. Panteleenko, S.N. Lyubetsky Self-fluxing powders and wear-resistant coatings from them. - Minsk: BelNIINTI, 1991-59s. **5.** Panteleenko, F.I. Development of a composite material based on multifunctional ceramics for plasma spraying / Panteleenko FI, Okovity VA, Devoyno OG, Astashinsky VM, Okovity VV , Moscow, 2015.-Issue 2..- P.43-47. **6.** Okovity, V.A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / Okovity VA, Panteleenko AF // “Processing of metals”, Novosibirsk, 2015.-№2 (67) .- C.46-54. **7.** Okovity, V.A. Production of composite ceramic material for gas-thermal spraying / Okovity V.A., Devoyno OG, Astashinsky V.M., Okovity V.V. // “Science and Technology”, BNTU - Minsk. - 2017.Vyp.3.- P.193-199.

THE FORMATION OF COLLECTIVE RELATIONS IN THE STUDENTS GROUP

Prihodchenko Katherine Ilyinichna *(Professor of the Sociology and political science Department, (Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR)*
Kaverina Olga Gennadievna *(Head of English Language Department Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR)*
Тел. 071-353-78-2, E-mail: kaf_engl-2017@mail.ru

Abstract: *the paper deals with formation of collective relations in the students group. The factors of collective relations are defined. The types of leaders in collective of students are singled out. The characteristic features of a person belonging to a leader are determined and analyzed by a lot of researchers. The distinction between a leader and manager are clarified. The conclusion deals with the upbringing of a person in a collective as the direct reflection of the society development.*

Nowadays productivity of any professional performance (administrative, productive and teaching) considerably depends upon the strength of a collective, so every leader is eager to organize a collective of like-minded persons. The questions connected with the functioning of groups, collectives, anti-collectives are of great interest for native and foreign researchers (A.S. Makarenko, S.T. Shatsky, N.A. Bogachkina, B.L. Ktrichevsky, A.K. Dusavitsky, B.S. Nemov and others). Models of collective formation, the questions of a group development into a collective and issues of leadership have been described by a range of authors (A.V. Petrovsky, L.I. Umansky, A.G. Kirpichnik, A.N Lutoshkin and others). K.D. Ushinsky paid a leading role a collective in the process of upbringing and education. P.Bolonsky and A.Lunacharsky were interested in the collective from the point of view of its upbringing force. I. Beh investigated a collective formation as the process of creating a unique situation for personal upbringing. American researches T.Deel, A.Kennedy created a conception of corporate culture. But M.Kuber pointed out the irrational character of a corporate culture definition. The readiness for taking responsibility is claimed to be one of the leading features of a successful person. The conception of individual responsibility includes: positive world view, motivation for aim achieving, the active desire for problem solving, and perceptional attitude for a partner in group.

According to S.Shatsky and N.Bogachkina, a group is a unity of one or more persons, connected with the definite system of mutual relations, common values and rules. The inseparable components of each group are common rules, joined activity. In accordance with the quantity of persons the scientists single out micro groups, small and big groups. It is necessary to point out that every person needs emotional contact, so there are micro groups, consisting of two or three persons, connected with mutual informal relations. The main characteristic features of these groups are the feeling of friendship, sympathy, mutual understanding or common affairs. Social and big social groups have influence upon a concrete person, with the help of small groups.

Any social group is characterized with the interaction of two components – integration (unity) and differentiation (separation). Unity is directed to the counteraction for conflicts and situations threatening the group existence as an integrity unit. Differentiation is oriented towards the specialization of group members relations based on their role difference.

According to the view of a specialist in the field of social psychology and psychology of a person R.S.Nemov, the collective relations in group are connected with the following factors:

1. ethics (the relations is based on general human moral values and rules);
2. the feeling of responsibility (every number of a collective demonstrates readiness for private responsibility for everybody's activity, not depending upon the belonging for a given collective, revealing discipline, demanding attitude for himself\herself, for words and actions, also a capacity for adequate evaluation of different achievements);

3. a capacity for communication (revealed in the skills of building up healthy relation not's only with the members of own collective but also with the members of other groups and collectives, lending a help if it is necessary;

4. collectivism (care for every member, counteraction for conflict activity);

5. trust (interrelations among the members of a collective must be trustful);

6. organizational skills (interchangeability, universal character of each member of a collective, four distribution of duties, quick solution of problematic situations and etc.);

7. informational access (clear understanding of goals and tasks (final and intermediate) of a joint activity);

8. effectiveness of performance (qualitative solution of tasks) [3].

The theory of upbringing collective was aimed at integration of upbringing and education, taking into account labour activity. Analyzing Makarenko`s work, the form of pedagogical process under investigation implies the formation of definite mutual relations within the collective of students. These relations are practically the same as ones in human collective. The scientist considered that a collective is a form, instrument and method of upbringing simultaneously [5, P.215].

The collective development depends upon the performance dynamics and relations, action correspondence, demand unity for each member of a collective (Latin collectivis – gathering).

In modern literature the notion 'collective' is used in two meanings:

a) any organized group of people with common tasks for achieving a common goal (for example, a collective of an enterprise);

b) highly organized group of people.

So, a collective is a solid group of people united on the basis of a joint activity, obeyed the demands and aims of this society. In 'Dictionary of Russian Language' (after A.Evgenyev) the following definition of a collective is given: a collective is a group of people united with common activity, common interests. The foreign scientists F.Harris and B.Morgan suggested ten characteristic features which are essential for learning-upbringing collective, united with the next features [4, P.57]:

- understanding yourself and your place in a collective;
- the level of communication system and a language of communication;
- the appearance of a person;
- customs and traditions of different nationalities;
- the feeling of time, relation to it and its usage;
- mutual relations between the members of a team;
- values and rules of behavior;
- the world view of each member of a collective;
- development, self-relation, self-perfection of a person;
- professional and corporative ethics and motivation.

The group management and self-management have an effect on psychology and behaviour of separate group members. It is usually fulfilled with the help of officially appointed persons-leaders and unofficial persons, having an authority and are considered to be informal leaders. As the practice shows, an official leader and an informal leader is seldom one and the same person, but we can't withdraw this variant as well.

The investigators consider the following types of leaders:

- a leader-organizer;
- a leader-motivator;
- a leader- an intellectual;
- a leader- a creator of emotional mood [2].

An authority of a group leader is usually strong and unquestionable as the authority of an official leader. A leader is necessary for a group, as he can raise up, motivate and manage the group members. The necessity of a leader is also defined with the fact that each group can be characterized and regulated with two systems of relations: business and private. If one of this system is not regulated, and if the relations in one system contradict the ones being in the second system, the

result will be that the group won't be able to function at an appropriate level and will never be highly effective [4]. This circumstance demands the presence of an inofficial leader together with an official one. The ideal is the condition, when a manager is determined as a leader. It influences the rate and level of friendly relations in group, psychological climate, interrelations.

A lot of researches made an attempt to reveal the characteristic features of a person, belonging to a leader. According to G. Andreeva, the establishment of the relations between a person and a group depend upon the other circumstances, sometimes upon a case.

These relations are connected with the capacity of a person, having admission for definite resources and obtaining corresponding qualities, to attract attention at the moment being when it is necessary for a group.

The following distinctions can be observed between a leader and a manager:

1) a leader cares about the interpersonal relation regulation, but a manager is interested in the process of a problem solution and task achievement;
2) the sphere of a leader activity is limited with a small group size which he also belongs, but a manager interacts not only with a small group but also with the authoritative organizations;
3) the leader is revealed by chance, according to the desire of group members, a manager is appointed or elected;
4) as a rule a manager is appointed for a definite period of time, but a leader is unstable position, any moment he\she can be replaced;
5) the system of sanctions of a manager is more clear and defined in comparison with a leader;
6) the procedure of taking a decision by a leader is simpler than by a manager [3]. In the process of group management a leader or a head of a group (manager) can use different means of psychological influence, which in combination defines the style of a leadership. Style is a functional difference, the way of fulfilling something, differentiating with particular actions.The researchers usually single out three styles: authoritative, democratic and liberal.

The authoritative style presumes the power of a leader towards the members of a group. While taking decisions, a leader uses the principle of solving a problem, according to his\her own points of view, a leader conducts a systematic control over the subsidiaries [1].

The democratic style is a characteristic feature of a leader who is inclined to take into account the opinions of the members of a group, advice with them, attract to management.

The liberal style can observed when a manager really isolates from the duties and delegates them to other members of a group. The practice of investigation of the effectiveness of each style of a leadership shows that the most admittable is the combination of these types in accordance with the level of group development and real situations where a group is at definite period of time. So, to sum up, the upbringing of a person in a collective is the direct reflection of the society development. At the present moment in complex social situation it is not simple for a young person to adapt for circumstances of a real life.

When he or she ignores a collective a person finds himself\herself in a vacuum that considerably puts some obstacles and brakes for future development.

The integrity of common interests as a human value being a system of interpersonal relations is the main factor of forming public being of a person, development of unique character. The eager for constant development adds to formation of constructive communication, exchange of personal sense in a group, collective as social systems.

References: 1. Andreeva, G.M. Social psychology: manual for higher educational establishments\ G.M. Andreeva. – M.: Aspect Press, 2001. – 290p. – URL: http://elibrary.bsu.az\books_163\N_5.pdf (30.03.2018). **2.** Nemov, R.S. Psychological conditions and efficiency criteria of the collective\ R.S. Nemov. – M.: Znania, 1982. – 64p. **3.** Prichodchenko E.I. Formation of corporate culture as a pedagogical creativity \E.I. Prichodchenko\\International electronic conference "Actual issues of development of professionalism of a teacher in modern conditions" Donetsk, 02.10.2017. donridpokonf.tilda.ws\section2. **4.** Dictionary of the Russian language in four volumes (editor in chief A.P.Evgenev). – M.: The Russian Language, 1988.

PEDAGOGICAL INNOVATION: CONTEMPORARY DEMAND

Prikhodchenko Y.I., Kapatsina N.N. *(SEIHPE «DONNTU», Donetsk)*
Tel.:071-306-89-14, Email:kapanata77@gmail.com

Abstract. *Fast growing information technology caused the necessity of the search for innovative approaches to the development of the pedagogical innovation. This particular phenomenon is a feature of different countries' educational systems. The definition of the term "pedagogical innovation" has naturally entered the scientific glossary and it can be found in different languages: French (innovation educative), German (pedagogishe neuerung), Russian (педагогическое новаторство), etc.*

Key words: *pedagogical innovation, innovative studies, pedagogical creation work, innovative experience.*

It is widely known in the scientific research the there is a number of definitions for the term pedagogical innovation. According to V. Okon, a famous Polish scientist, it is the theaters' activity which is headed for the advance in didactic and upbringing experience via own innovatory ideas. The context of this term can involve the content, method, pedagogical technologies, and also, mode of study and upbringing. Innovation is connected with the necessity of raising creativity to the higher level as well as all levels school perfection, which is the factor for the pedagogical creation work. C. Baranskiy pointed out that pedagogical innovation is the implementation and the spread of the innovation within the concrete educational institution. It is also the implementation and the distribution of the pedagogical innovations which are already known but they haven't been implemented in this particular institution. Let's pay attention to the definition given to this term by the Academician S. Goncharenko: "Pedagogical innovation can be realized in the form of activity of the probe, experimental author's school."

Alongside there is the term "innovative experience". It is considered to be absolutely new to the teacher experience; it outgoes the known scientific knowledge. It is characterized by the system reorganization of a teacher's activity; as a result the considerable rise in efficiency of teaching is achieved. Innovative experience of a particular teacher, his non traditional method of teaching and innovation, peculiar individuality of his project doesn't always finds appreciation in educational sphere. Sometimes years are needed to give way to the pedagogical innovation. The teachers who possess such characteristics are always in search for the newest methods of teaching. They appear to be uneasy for educational management and the whole bureaucratic system, as they do not agree with bureaucratic instructions and demands which, as a rule, slow down innovative processes. At the same time, it is necessary to pin out that these teachers become happy and more determined in case they are supported and understood. In accordance to this, let's underline a specific significance of the new pedagogical thinking that can be called the basis and at the same time the key to the development of the innovative creation idea. This is it that breaks the stereotypes, rejects out of date pedagogical doctrines, which are deeply coalesced into the educational process. The backward models are incorporated into standard and programme-methodical documents. These models retard the development of the pedagogical innovation. It should be mentioned that the new pedagogical thinking is

such a powerful tool that awakens the professional creation work of a teacher and simultaneously fortifies his creation potential.

Such an aura of joyful pedagogical effect was observed in the Pavlyshskaya secondary school that was headed by an outstanding scientist and teacher of the XX century Sukhomlinskiy for 22 years. “We deal with the most complicated, the most valuable, the dearest that exists in life – the human. His life, health, mind, character, will, citizenship and intelligence, his role in life, his happiness depends on us, our skillfulness, artistry and wisdom”. It seems as if in these words the philosophy of the new pedagogical thinking was focused. High hopes and thorough ideas pinpoint scientific and pedagogical creation work of A. Zakharenko, the head teacher of secondary school in Sakhnovshchina in 1966-2002. This school was known as the author’s school while Alexandr Anatolievich was still alive. It was a creative workshop set up by the innovative teacher. Realized theoretical feasibility studies, his contemplations and everyday pedagogical impact was directed to the formation of a cooperative stuff that must possess such important moral values as likeability, the common target, kindness, absorbedly, creation work, hard work, the ambition to be the sample for children. Nine basic values were defined by the pedagogical stuff of the school: Human, Knowledge, Family, Motherland, Social Justice, Labour, Culture, Peace, Mercy, Earth. To form the feeling of humanity, empathy, tolerance, honour, love, friendship, patriotism as a system of values which should be introduced into life and behavioral norm. It was the direction in which the teachers of Sachnovshchina school were working. The main thing to realise the method is to establish the human values. This is the basis which is leaned onto in times of shifting values and their system being the subject to paramount changes in the society. Consequently, the combination of high moral values, kindness, charity, love, patriotism and ambition, efficiency and responsibility influenced the formation of a unique pedagogical system of A. Zakharenko. The terms implied into the pedagogical science by the scientist have become really wide known, among them are: “pedagogy of a particular action”, “pedagogy of the family – the elixir for psychic and physical health”, “pedagogy of the eternal mantle of generations is the source for the formation of the patriotism”, etc.

Pedagogical innovation is the core of the monography of the academician I. Zyazyun. According to the author, in the process of the pedagogical interaction the basis of which is the new pedagogical thinking radical ideas, innovative creation work are born. This, in its turn, strengthens and opens both spiritual and intellectual powers that enrich the didactics process, converting it into the creative, dynamic one, making impact on the development of all the participants of the educational process (teachers and students). In such a process new upbringing and method systems are developing, innovative technologies, forms and methods of creative cooperation of all the participants of this continual process are appearing.

We consider it necessary to point out that pedagogical innovation is closely connected with the term innovation studies. Unfortunately, insufficient level of pedagogical culture and underestimation of the importance of scientific research results in Pedagogy, Psychology and other sciences resulted in the misconception of the terms and consequently, in some misimplementation in practical work. Thus these actions can’t be referred to as innovative. There quite a lot of examples of considering hard work, responsible attitude to the educational process or gained experience as an innovation project.

We think that the development of innovative processes requires a system approach. It should be taken into account that the pedagogical innovation studies are an important direction in pedagogical science. Its target is to study the processes and tendencies in the renovation of the pedagogical activity, principles and laws.

A classification of pedagogical innovations is to be done in the work of the pedagogical stuff while practicing new methods. Innovations in education are known to be organized according to the directions, with the specification for the spheres of the application, the scope of reformations and innovative potential, the appreciation of the predecessor's activity, the level of anticipation, forecasting effort and planning (here, we mean awaited planned innovations and sudden ones). Also, the area of the pedagogical knowledge should be mentioned: didactic innovations, upbringing innovations, technological innovations.

Lately, the effort of some researches to oppose the term pedagogical creation work to pedagogical excellence is observed. The efforts to define which one out of the two definitions is the main are made. Such way of interpretation of the terms can be seen as an erroneous and unpromising. The dialectic interconnection, interconditionality and interinfluence tend to broaden the creation horizons and implementation of radical projects.

This predetermines the necessity to continue and at the same time to begin the pedeutological research according to the aim and peculiarities of the modern and continual development of teachers' creation movement, psychological and social needs in innovative pedagogical actions (according to J. Deve), the principles for the innovation studies, craving innovative strategies in teacher's training, his continual professional growth, self-perfection and self-development.

References: 1. Pedeutologia. Cz.Banach//Encyclopedia pedagogiczna XXI wieku. T.IV P. Wydawnietwo "Zak", Warszawa, 2005. – s.301-306. **2.** Lewowciki T. O tozsamosci, kondycij i powinnosciach pedagogik: Warszawa – Radom. Institut Technologii Ekspoloatacji – Panstwowy Institut Badawczy/ 2007 – 283s. **3.** Lewowciki T. Problemy ksztalcenia I pracy nauczycieli. Warszawa – Radom. Institut Technologii Ekspoloatacji – Panstwowy Institut Badawczy/ 2007 – 283s. 4. Kwiatkowska H. Pedeutologia. Podrcznik. – Wydawnitstwo Academickie i Profesjonalne:Warszawa. 2008. – 260s. 5.Гончаренко, С. Український педагогічний словник// С. Гончаренко – К.: «Либідь», 1997. – с. 233-234. 6. Сухомлинський, В.О. Сто порад учителям// В.О. Сухомлинський. Том ІІ. – Кит: «Радянська школа», 1976. – 420с. 7. Академік із Сахнівки/ за ред. проф. А.І. Кузьмінського – Черкаси. – Вид-во ЧНУ Імені Б.Хмельницького – 2008. – С.161-162. 8. Зязюн, І. Освітні технології у вимірах педагогічної рефлексії // І. Зязюн/ Світло, 1996 - №1 – С.5-7. 9.Приходченко К.І. Творчий потенціал учителя як основа його педагогічної майстерності: навч. посібник / К.І. Приходченко. Донецьк, 2011. – 180 с.

LA CONCENTRATION DU LACTOSERUM AU VID AVEC RECTIFICATION PAR LA DISTILLATION PAR ETAPES DES ACIDES ORGANIQUES

Solonari S.T., Vutcariova I.I., Rusu M.I.*, Balan G.K. *(Institut de Physique Appliquée, Chisinau, République de Moldova, *Institut de Chimie, Chisinau, République de Moldova)*
Tel. +373 (022) 731744; E-mail: solonari@phys.asm.md

Abstract: *In the report the results of experimental research of whey concentration with gradual rectification of organic acids are presented. The experimental stand was developed and assembled. The FT-IR diagrams are presented; the experimental parameters of the process of concentration in incomplete vacuum and gradual distillation were obtained.*
Key words: *whey, concentration, rectifying by step distillation, organic acids.*

Dans le développement scientifique, la recherche du procédé d'obtention d'acides organiques par fractionnement par distillation était considérée comme une méthode de traitement moderne.

Dans la plupart des cas, la distillation est utilisée pour traiter des liquides (en les séparant des composants moins volatils) ou pour séparer des mélanges de liquides ayant des points d'ébullition différents. Dans notre cas, nous obtenons les solutions d'acide lactique nécessaires, le mélange d'acide lactique et d'acide acétique.

Cette méthode est relativement peu coûteuse.

Dans les conditions du procédé de distillation en solution, il existe trois manières : à la pression atmosphérique (distillation fractionnée simple); sous pression réduite (distillation sous vide) ; avec de la vapeur [1].

Un appareil simple (figure 1) de distillation comprend un récipient de distillation, un condenseur de vapeur (condensation de la vapeur) et un récepteur distillé [2]. Le récipient de distillation, en fonction du point d'ébullition des substances distillées, est chauffé dans un bain avec de l'eau, de l'huile, de l'air ou du sable. Pour garantir le débit requis, la température dans le bain de distillation doit être supérieure de 30 degrés à la température de la vapeur. Le banc d'expérimentation est équipé de deux instruments de mesure de pression : le manomètre (figures 1, 4) indique la pression de travail de l'agent de travail avant l'éjecteur (pompe à eau en verre, fig.1, 8), le manomètre à vide (fig.1, 5.) de la solution traitée (lactosérum).

Lors du processus d'évaporation, trois phases de l'effervescence du lactosérum ont été observées. Ce qui permet de séparer trois composants environnementaux. Alors que le premier composant est distillé du mélange, la température de distillation reste constante. L'augmentation soudaine de la température indique le début de la distillation du composant suivant avec une température d'ébullition plus élevée. Par conséquent, le peuplement a été modifié pour le fractionnement par condensation par distillation progressive jusqu'à la concentration en lactosérum en scellant le peuplement expérimental à l'aide de deux vannes du récipient collecteur de condensat (figures 1, 7).

Les paramètres technologiques qui déterminent le processus de condensation des produits laitiers liquides sont la température et la durée. Du point de vue de la préservation des propriétés natives du composant de lactosérum, il est souhaitable d'avoir la température de condensation minimale, qui est principalement déterminée par une pression incomplète de la chambre à vide [3].

Dans le traitement du lait, le lactosérum d'acide lactique, un sous-produit liquide à haute teneur en précieuses protéines biologiques, minéraux et vitamines, qui jusqu'à présent ne sont pas utilisés par les humains, est formé. La solution pour le traitement du lactosérum est nécessaire pour traiter plus complètement et utiliser le lactosérum pour produire des denrées alimentaires et des aliments pour animaux à l'avenir.

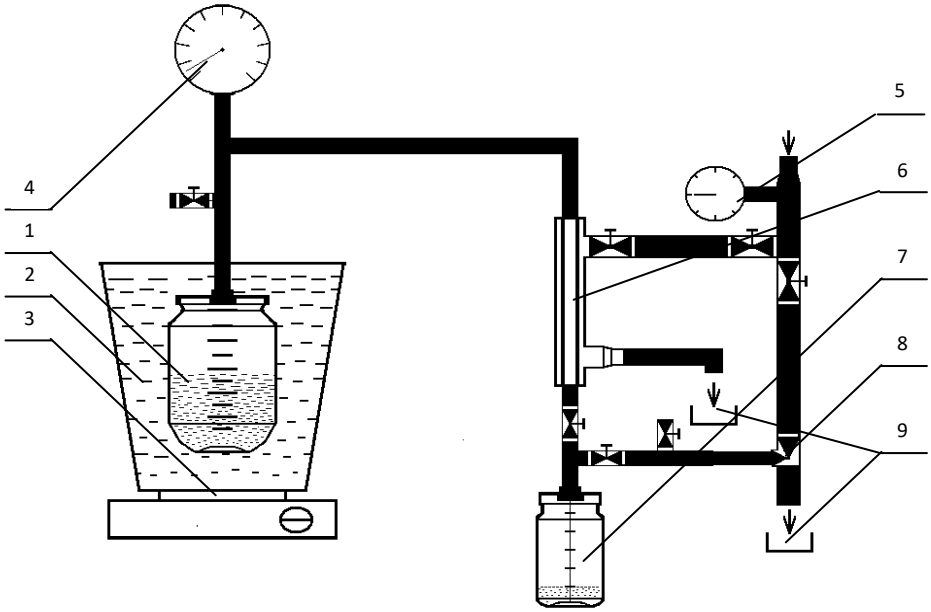


Fig. 1. Schéma du support expérimental: 1 - Cuve d’évaporation ; 2 - bain à remous; 3 - chauffage électrique ; 4 - manomètre à vide ; 5 - manomètre ; 6 - refroidisseur (échangeur de chaleur de type tuyau dans le tuyau; 7 - récipient de récupération des condensats; 8 - éjecteur (pompe à eau en verre); 9 – drainage

Le support expérimental comprend les composants suivants (Figure 1.) : un récipient d’évaporateur de 1 litre (1), un bain d’eau chaude de 6 litres (2), 200, 400, 800 W et 1 kW appareil de chauffage (3) ; manomètre à vide OBV1-100; manomètre DM-06063 (5) ; refroidisseur (échangeur de chaleur dans la conduite) (6) ; récipient de récupération des condensats, volume 250 ml (7).

Étapes pour préparer les expériences : vérifier l'étanchéité du contour sous vide jusqu'à 4 kPa. Une pression de vide incomplète est maintenue entre 4 et 14 kPa pendant 24 heures; remplir la solution traitée dans un récipient d’évaporation ; réduire la pression du système ; remplir le bain chaud avec de l’eau ; le début de l'ébullition. L'aspect des premières gouttes de condensat dans le collecteur de condensat dénote l'évacuation de l'air de l’installation ; arrêter l'éjecteur.

Comme objet de recherche, du lactosérum fermenté contenant 7% de matière sèche a été prélevé (Figure 2.). Lors du processus de condensation, on obtient le lactosérum plus concentré avec une teneur en matière sèche de 12% (Figure 3.). Le processus de condensation a révélé la formation de gaz qui ont révélé la présence insignifiante d'acide carbonique qui s'est décomposé en augmentant la température en eau et en dioxyde de carbone, ce qui a entraîné une augmentation de la pression dans le récipient d'évaporation jusqu'à 14 kPa. Dans le processus de condensation avec le broyage du lactosérum fermenté dans un volume de 500 ml lors de la première étape, on a obtenu 100 ml d'acide acétique à 4% (figure 4.) et le second distillé à 1% (figure 5.), tout l'acide acétique (jusqu'à 5%), qui y était contenu avant le traitement thermique, a été séparé du lactosérum par fractionnement.

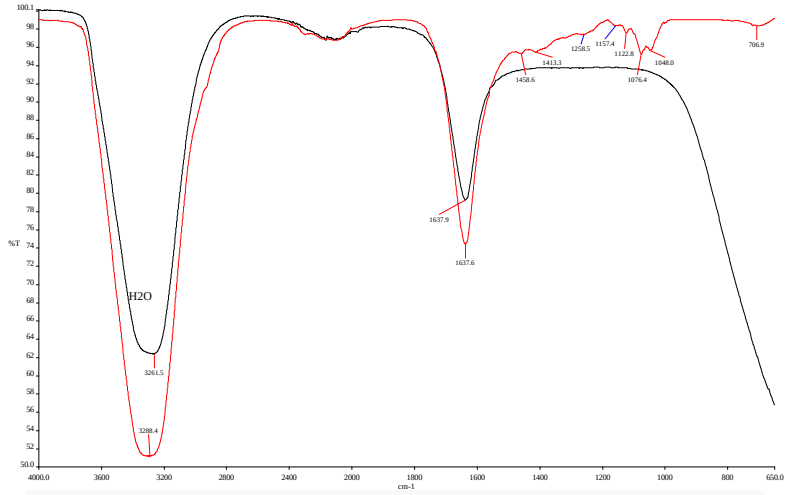


Fig. 2. Spectrogrammes FT-IR: le lactosérum initial; H_2O

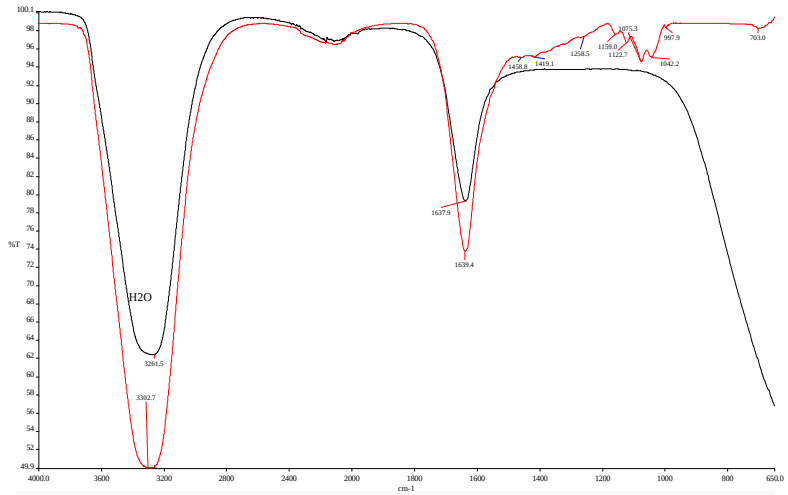


Fig. 3. Spectrogrammes FT-IR: lactosérum concentré; H_2O

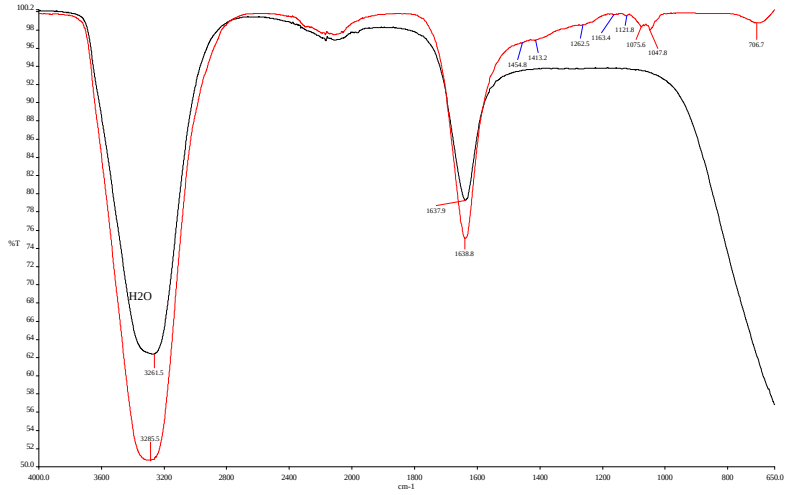


Fig. 4. Spectrogrammes FT-IR: le premier lactosérum distillé; H_2O

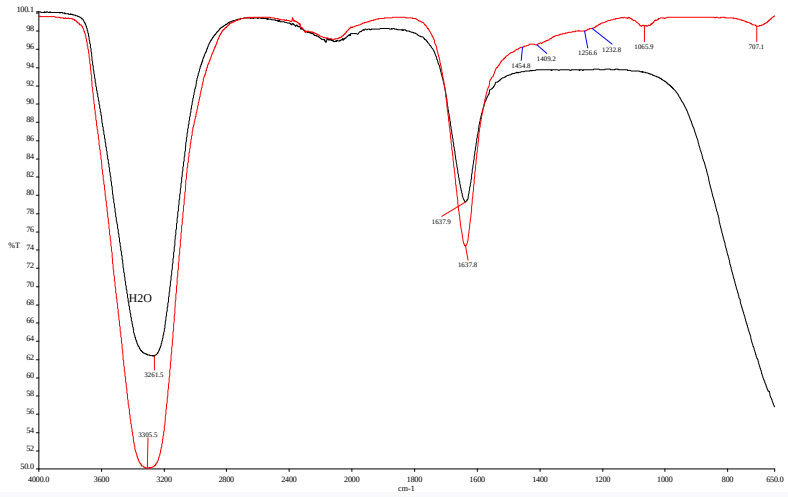


Fig. 5. Spectrogrammes FT-IR: le deuxième distillat de lactosérum; H_2O

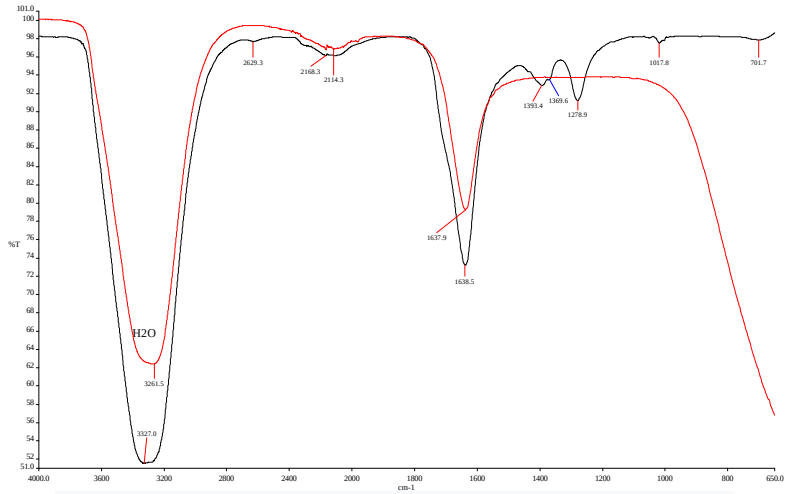


Fig. 6. Spectrogrammes FT-IR: 6% de vinaigre; H_2O

L’étude du processus de condensation du lactosérum avec distillation par étapes présente un intérêt pour la possibilité d’augmenter la teneur en acide lactique de la composition de lactosérum fermenté avec élimination de l’acide acétique. Détermination de l'influence des paramètres d'évaporation sur l'efficacité du procédé de rectification à l'acide lactique et à l'acide acétique, détermination des régimes de concentration et de rectification. Les résultats sont intéressants du point de vue du fractionnement des acides organiques lors de la condensation du lactosérum. Le procédé de distillation après distillation fractionnée est une des pistes prometteuses (figures 4. et 5.) Ce qui permettra d’obtenir des acides organiques rectifiés par distillation à la vapeur, composants importants des matières premières laitières.

Références: 1. E. I. Mouratova, O. V. Ziouzina, O.B. Chouniaïeva, Biotekhnologuia organitcheskikh kislot i belkovykh preparatov - Tambov: Izdatel’stvo Tambovskogo Gossoudarstvennogo Tekhnitcheskogo Ouniversiteta, 2007, 80 s. ISBN 978-5-8265-0655-4. **2.** V.A. Yermolaïev, N.A. Komarova, M.G. Kourbanova Intensifikatsia protsessa vakououmnogo obezvojivania molotchno-belkovykh prodtukty, / Khranenie i pererabotka sel'khozsyr'ia, №2, 2012 S.8-11, ISSN 2072-9669. **3.** V.A. Yermolaïev, O.N. Ivanenko, M.V. Oniouchev, Razrabotka temperatournykh rejimov vakououmnogo kontsentrirovania moloka, // Vestnik krasnoïarskogo gossoudarstvennogo agrarnogo ouniversiteta: Krasnoïarski Gossoudarstvenny Agrarny Ouniversitet (Krasnoïarsk), №9, 2016, s. 121-127, ISSN: 1819-4036.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОСФЕРЫ В КОНТЕКСТЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

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

Abstract: *Processes of technosphere intellectualization are characterized by the exponential growth of the various components of nootechnosphere. These processes can be interpreted as an important stage in the universal evolution of the Universe.*
Key words: *Technosphere, nootechnosphere, exponential growth, intellectualization.*

Введение. Одним из наиболее примечательных явлений в формировании и трансформации современной техносферы является стремительный процесс ее интеллектуализации. На первый взгляд кажется, что это следствие некоторого труднопредсказуемого и довольно хаотичного всплеска интенсивной компьютеризации, наблюдаемой на протяжении нескольких последних десятилетий. Но более детальный анализ показывает, что эти процессы носят вполне предсказуемый экспоненциальный характер (см., например, работы [1-4]) и, более того, являются проявлением более общих закономерностей универсальной эволюции, различные проявления и особенности которой рассмотрены, например, в работах [5-10].

Закон Мура и оценка темпов экспоненциального роста. Впервые на экспоненциальные процессы в развитии техносферы инженерное сообщество обратило особое внимание в середине 1960-х годов в начальный период развития интегральной цифровой электроники, когда один из основателей и руководителей фирмы Интел опубликовал статью, в которой показал, что наиболее целесообразным и вполне достижимым на текущем этапе развития является ежегодное удвоение числа транзисторов в интегральной микросхеме. В середине 1970-х годов он существенно откорректировал свои оценки: реальные темпы технического прогресса в действительности позволяли получать удвоение только каждые 2 года. В последующем в качестве наиболее типичного периода удвоения в компьютерных технологиях стали принимать 18 месяцев. Эти оценки и явились в дальнейшем самыми характерными в подавляющем большинстве случаев, когда требовалось определить темпы того или иного процесса экспоненциального роста. Но в долгосрочной перспективе (десятилетия) относительно небольшие изменения в значении периода удвоения дают в действительности расхождения на порядки и, следовательно, не могут служить достаточно надежным инструментом оценки и прогнозирования процессов развития. В работах [1] и [4] показано, что существенно более адекватными и точными являются оценки, привязанные к более длительными интервалам. Оптимальным является 20-летний интервал, который позволяет большинство характерных процессов экспоненциального роста в компьютерных технологиях с достаточной точностью представить целочисленным значением (в основном в диапазоне от 1 до 6-ти), соответствующим количеству десятичных порядков роста. Для обозначения таких показателей целесообразно использовать обозначение J, визуально напоминающее экспоненту. В этом случае обозначение J2, например, будет обозначать экспоненциальный рост на 2 десятичных порядка (т. е. в 100 раз) за 20 лет. Для того, чтобы данная система обозначений имела универсальный характер и могла использоваться для обозначения самых различных экспоненциальных процессов, целесообразно допустить возможность использования в общем случае дробных индексов (значение J1,5 будет обозначать рост на 1,5 порядка за 20 лет) и интервалов, отличных от 20-летних. В последнем случае принятое значение интервала в годах указывается в скобках после соответствующего обозначения: J1(200) будет означать рост на 1

десятичный порядок за 200 лет. Такая система обозначений позволяет достаточно эффективно систематизировать все процессы экспоненциального роста, проводить их сравнительный анализ и прогнозирование на их основе.

Закономерности экспоненциального роста в компьютерных технологиях. В общем случае наблюдается также и такая закономерность: чем более интенсивным является соответствующий экспоненциальный процесс – тем более коротким является интервал сохранения данных темпов роста. И наоборот: более медленные процесс сохраняют стабильными свои темпы на протяжении существенно более длительных интервалов. Одним из таких относительно медленных, но удивительно стабильных процессов является нарастание общего количества компьютерных систем, темпы которого начиная с 1950-х годов определяются значением J2 (рис. 1). Стабильность этого процесса на протяжении уже более чем полувека и отсутствие физических и прочих ограничений в обозримой перспективе позволяет предположить аналогичные темпы роста как минимум и в следующие 50 лет, что во многом определит и позволит прогнозировать ход процессов интеллектуализации техносферы в последующие десятилетия и, возможно, столетия.

Рис. 1. Стабильное нарастание (со скоростью J2) общего количества компьютерных систем в мире начиная с 1950-х годов (линия 1) и населения планеты (линия 2): к концу 2010-х годов количество компьютерных систем превысило численность населения и продолжает стабильно расти, увеличиваясь в 10 раз каждые 10 лет, что позволит примерно к 2050 году выйти на соотношение «тысячи компьютерных устройств на каждого жителя Земли»

Более быстрым (J3), но существенно более ограниченным во времени является процесс нарастания степени интеграции интегральных микросхем, который, собственно, и является основным проявлением классического закона Мура (рис. 2). Автор этого закона в свое время не рисковал прогнозировать данные темпы роста более чем на десятилетие, но каждые 10 лет уже многократно продлевал срок его действия. Учитывая, что технологический предел уже почти достигнут (единицы нанометров, что соизмеримо с размерами атомов), то, по всей видимости, темпы нарастания снизятся уже в ближайшее десятилетие.

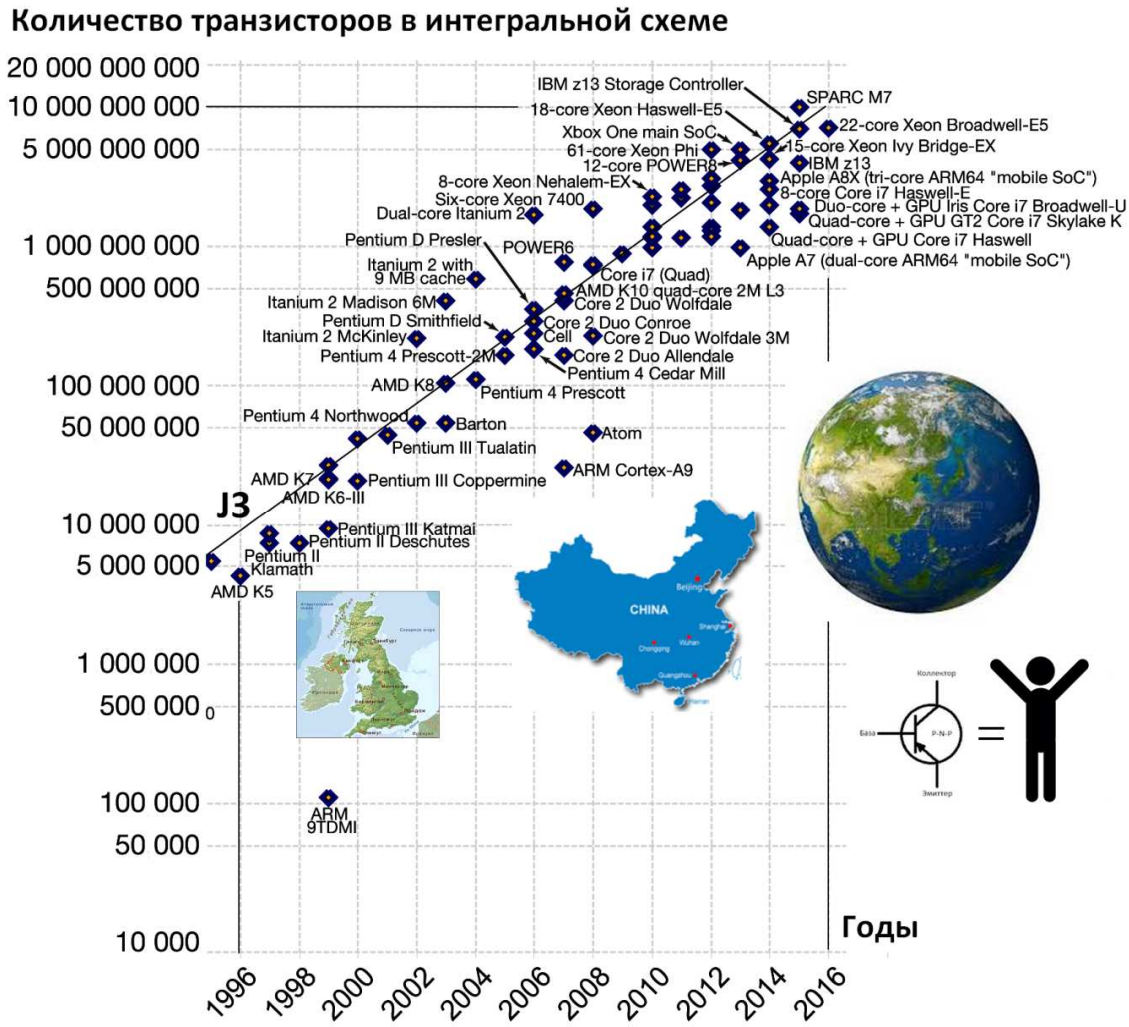


Рис. 2. Закон Мура в действии: экспоненциальное нарастание (со скоростью J3) сложности и, соответственно, степени интеграции интегральных микросхем

Еще более быстрыми темпами роста характеризуются нарастание степени интеграции интегральных микросхем (рис. 3) и производительности компьютерных систем практически всех классов (рис. 4). В последнем случае чрезвычайно интенсивный рост производительности со скоростью на 5 порядков за 20 лет (J5), отмечавшийся с начала 1990-х годов, уже в 2014 году вопреки большинству прогнозов стал замедляться до скорости J3, что, по сути, явилось одним из проявлений соответствующих периодических закономерностей [2, 3]. Но характер роста по-прежнему остался экспоненциальным. Такой переход от одной экспоненциальной кривой к другой целесообразно обозначить как каскадный экспоненциальный рост JJ, что в данном конкретном случае будет выглядеть как J5-J3. В случае, если существенным моментом является дата начала и/или завершения действия соответствующих закономерностей, то в обозначение может быть также добавлено и это значение. Например, в случае описания динамики роста производительности мы получим следующее обозначение: J5-2014-J3. Если считать, что только с 1992 года начал наблюдаться максимально быстрый рост производительности, то соответствующее обозначение получит вид 1992-J5-2014-J3.

В целом следует отметить, что с начала 1990-х годов до середины 2010-х годов отмечались чрезвычайно интенсивные экспоненциальные процессы роста всего того, что можно назвать ноотехносферой [4] – интеллектуальной составляющей техносферы.

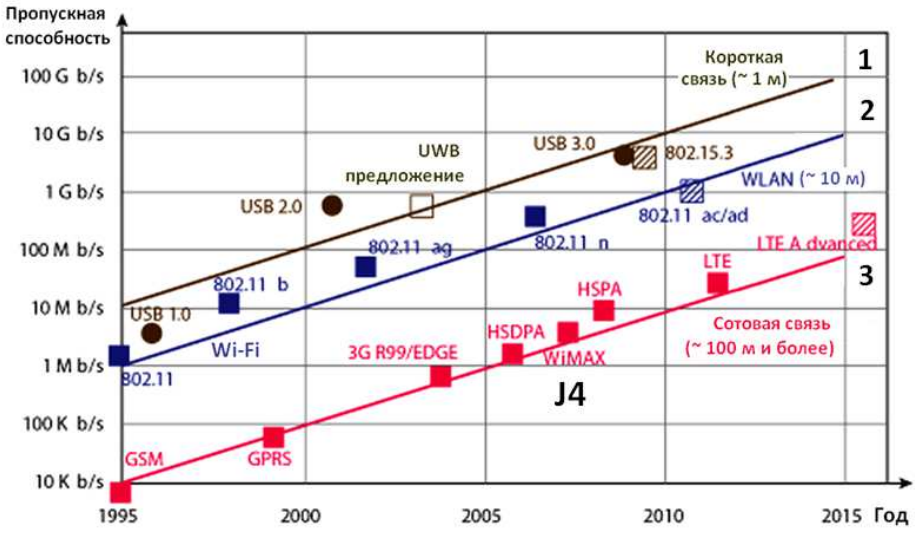


Рис. 3. Периодическая система стремительного нарастания связности ноотехносферы: пропускная способность различных видов компьютерной связи начиная с середины 1990-х годов нарастает со скоростью J4 (1 – проводная «ближняя» связь, 2 – беспроводная «ближняя» связь, 3 – беспроводная «дальняя» связь)

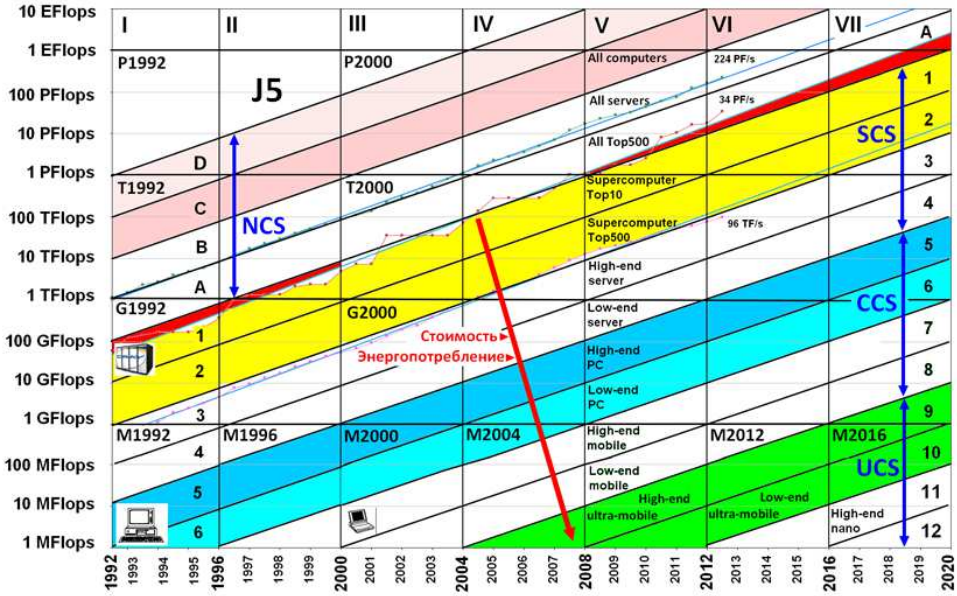


Рис. 4. Периодическая система роста производительности компьютерных систем различных классов: с самого начала 1990-х годов наблюдаются чрезвычайно высокие темпы роста (J5), которые только к концу 2010-х годов стали замедляться (наиболее вероятным является замедление до J3)

Интеллектуализация в контексте универсальной эволюции. Понятие техносфера сформировалось в 1920-е годы и прочно вошло в научный лексикон в середине XX века в ходе научно-технической революции, которую можно рассматривать также и как первую волну формирования ноотехносферы, в ходе которой, в частности, сформировалась первичная компьютерная и телекоммуникационная глобальная инфраструктура, которая затем на рубеже столетий превратилась фактически в единую информационно-компьютерную систему, характеризующуюся беспрецедентно высокой степенью связности, целостности и сложности. При этом продолжается экспоненциальный рост по всем этим

показателям, означающий, по сути, экспоненциально нарастающую интеллектуализацию техносферы. Очень важно при этом отметить, что эти процессы в действительности имеют глубокие корни и могут рассматриваться как очередной этап универсальной эволюции, определяющей развитие не только современной цивилизации, но и всего живого на Земле, а также – практически всей Вселенной. Об этом, в частности, свидетельствует выявленная совсем недавно экспоненциальная динамика нарастания размеров и сложности генома [11, 12], общая продолжительность которой определяется примерно в 10 млрд лет (рис. 5).

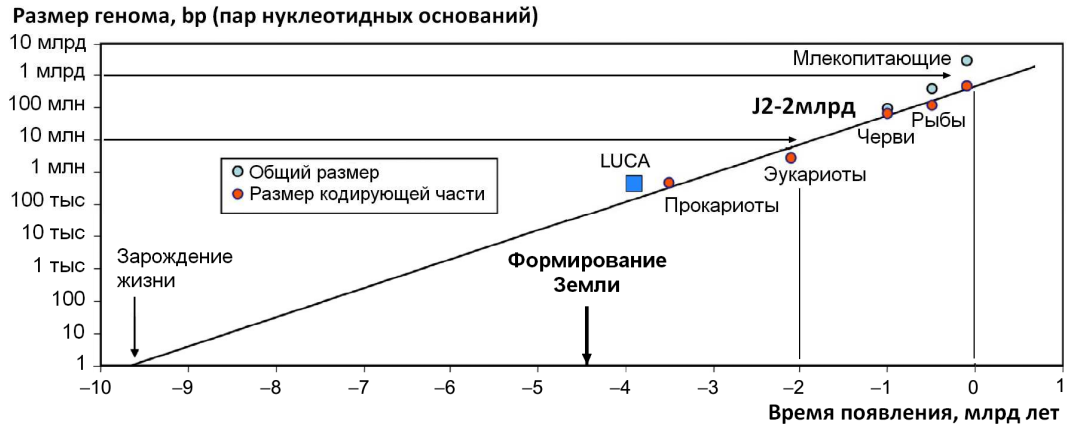


Рис. 5. Экспоненциальный рост сложности генома на протяжении 10-ти млрд лет (со скоростью на 2 порядка каждые 2 млрд лет) как одно из наиболее важных проявлений универсальной эволюции (по данным работ [11] и [12])

Заключение. Таким образом, выявленные закономерности экспоненциального роста позволяют рассматривать наблюдаемые в настоящее время процессы интеллектуализации техносферы как закономерные проявление универсальной эволюции Вселенной.

Список литературы: **1.** Аноприенко А.Я. Закономерности развития компьютерных технологий и обобщенный закон Мура // Вестник Донецкого национального технического университета, №2 (2), 2016. С. 3-17. **2.** Аноприенко А.Я. Системодинамика техносферы: технический прогресс и нооритмы // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, 2016. № 1(10)-2(11). – С. 31–61. **3.** Аноприенко А.Я. Пятая волна индустриализации и третья промышленная революция // Вестник Донецкого национального технического университета, №1 (1), 2016. С. 3-12. **4.** Аноприенко А.Я. Системодинамика ноотехносферы: основные закономерности // «Системный анализ в науках о природе и обществе». – Донецк: ДонНТУ, 2014, №1(6)-2(7). С. 11-29. **5.** Русский космизм: Антология философской мысли. — М.: Педагогика-Пресс, 1993. – 368 с. **6.** Витол Э. А. Интеллектуализация техники – главный вектор современной эволюции // Философия и космология, 2013. С. 65-92. **7.** Моисеев Н.Н. Универсальный эволюционизм (Позиция и следствия) // Вопросы философии, 1991, № 3. С. 3–28. **8.** Моисеев Н.Н. Универсум. Информация. Общество. — М.: Устойчивый мир, 2001. - 200 с. **9.** Назаретян А. П. Интеллект во Вселенной: истоки, становление, перспективы. Очерки междисциплинарной теории прогресса. М.: Недра. 1991. 222 с. **10.** Назаретян А. П. Универсальная (Большая) история: версии и подходы // Историческая психология и социология истории, 2/2008. С. 5–24. **11.** Sharov A. Genome increase as a clock for the origin and evolution of life // Biology Direct, 2006, 1:17. - 10 p. **12.** Gordon R., Sharov A. Habitability of the Universe before Earth. Volume 1. Academic Press, 2018. 559 p.

SIMULATION OF THE STRENGTH PROPERTIES OF LATTICE STRUCTURES, PRODUCED BY THE METHOD OF THREE-DIMENSIONAL PRINTING

Samarkin A.I.[1], Samarkina E.I.[2], Mikushev V.M.[3], Plohov I.V.[4] *([1] Department of Mechanical Engineering, Pskov State University, Pskov, Russia, [2] Department of Mechanical Engineering, Pskov State University, Pskov, Russia, [3] The Faculty of Physics of St. Petersburg State University Saint-Petersburg State University Saint-Petersburg, Russia, [4] Head of the Department of electric drive and automation systems Pskov State University Pskov, Russia)*
E-mail: alexsamarkinru@gmail.com, ElenaSPsk@gmail.com, v.mikushev@spbu.ru, igor_plohov@list.ru

Abstract. *When using three-dimensional printing, parts of the structure are made a lattice. On the one hand, it improves printing performance and reduces material consumption, on the other hand, it confronts the designer with a number of problems in terms of assessing the strength properties of such areas. The authors propose to simulate the properties of the lattice regions precisely using an electronic model and calculate, for example, the Young modulus, in order to use a surrogate solid substitute material for modeling in the future, which simplifies the calculations. As a result, the authors obtained dependencies for calculating the parameters of the substitute material for some types of lattices (square and with holes).*
Keywords: *three-dimensional printing, lattice structure, mechanical properties, FEA, CAE.*

INTRODUCTION

At present, additive technologies are increasingly being used, among which one of the most accessible is three-dimensional printing by the method of layer-by-layer deposition - Fused deposition modeling (FDM) [1-3]. The question of the mechanical characteristics of the prototypes thus obtained has not been sufficiently studied [4]. We only note that for their full analysis it is necessary to simulate the extrusion of molten plastic and the composite material structure obtained by printing (see Fig. 1) [5].

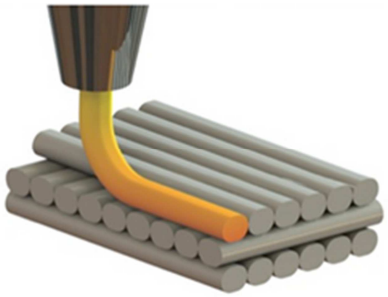


Fig. 1. FDM Printing Material Structure (From https://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/02/mat.png)

Often also used are anisotropic models and “worst approximation” models - isotropic with artificially lowered characteristics. Further, when modeling the actual printed material, we will use the latter option.

It is not always wise to print prototypes, pouring the entire volume of the model with plastic in one piece. Numerous cellular structure generators are used (for example, Lattice Commander in Autodesk Netfabb) [6-8]. Obviously, the properties of the lattice regions differ from the properties of continuous material. It is also obvious that modeling the behavior and properties of such gratings under load is directly difficult.

Thus, the problem arises of modeling the properties of lattice regions and taking into account their influence on the strength of the product as a whole in a more productive way than directly modeling the geometry of the cells.

To achieve this goal it is proposed:

- Form a library of surrogate materials equivalent in mechanical properties to lattice structures.

- Identify the main types of gratings.
- Model the properties of gratings by forming a model for strength calculations.
- Parameterize the model to automatically recalculate its geometry and lattice characteristics.

We make several assumptions and simplifications necessary for further exposition:

- Suppose that lattice regions can be considered homogeneous, consisting of some virtual (possibly anisotropic) solid material.
- Suppose that the material of the edges of the lattice is isotropic, obeying Hooke's law.
- In this article, we will consider only the plane (two-dimensional) lattices.

METHODOLOGY AND MODELING TOOLS

There are several finite element modeling tools that support parametric models and have tools to support numerical experiments. At the time of writing, the authors have a trial version of the Comsol program complex. To conduct an experiment, it is necessary to go through a number of steps, in particular: determine the dimension of the model (2d - flat), set the parameters defining the study, generate a parameterized geometry, select the material of the model components, set the boundary conditions and loads, form a grid, determine the type of analysis (stationary), adjust the solver, carry out the calculation and analyze the results, which is enlarged shown in Fig. 2 [9-11].

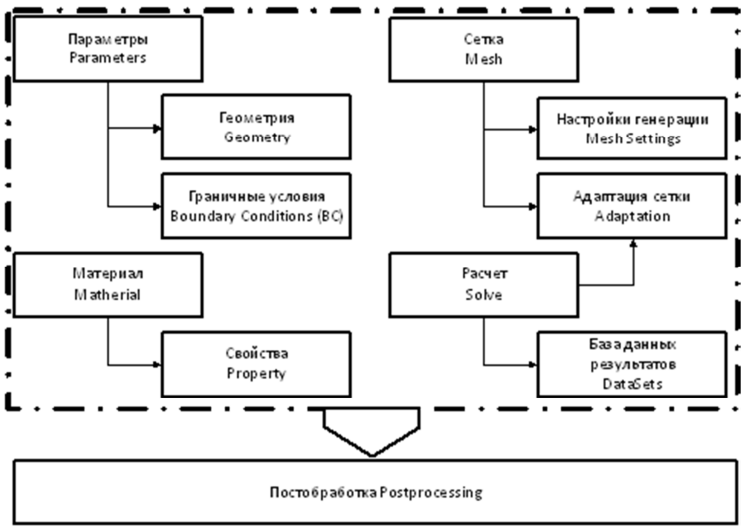


Fig. 2. Parametric modeling properties of the region of the lattice

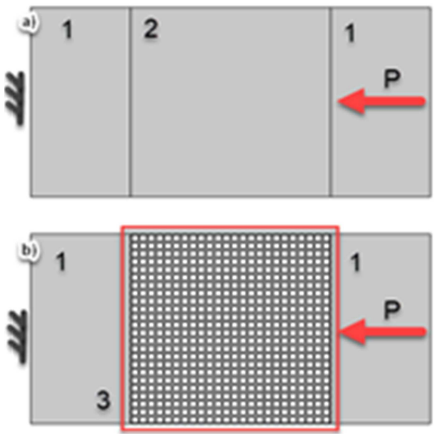


Fig. 3. Scheme of calculations

To calculate the strength characteristics of the lattice region, we model a well-known setup for determining Young's modulus and material strength (Fig. 3) [12, 13].

Two samples of material (a) - homogeneous, b) - lattice, regions 2 and 3, respectively) are placed between the jaws (1).

The left side of the jaws is fixed, the load is applied to the right.

All dimensions of the geometry of the model, the magnitude and angle of application of the load are parameterized. Since the parametric modeling itself is quite obvious, we consider only the parameterization of the lattice (Fig. 4).

An area of solid material is created.

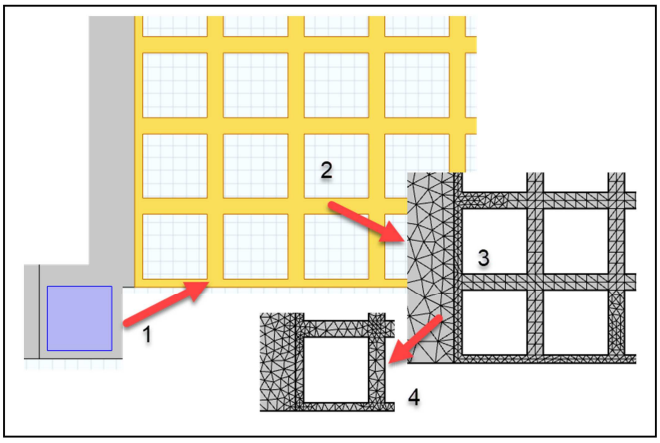


Fig. 4. The formation of the lattice region. 1 - cavity figure, 2 - array, 3 - primary mesh, 4 - adapted mesh

1. The geometry of a single cavity is created (from the simplest - a rectangle or circle, to complex)
2. The dimensions of the cavity are calculated so as to fill the area of the material a specified number of times with given wall thickness.
3. There is the possibility of transformation of the cavity (for example, its rotation - also in a parameterized way)
4. An array of cavities is formed, which is removed from the region of the material.
5. A primary grid is built, which is further adapted in the necessary areas to clarify the result.

Note that Comsol allows you to automatically change the model parameters to obtain a series of results at the output (Parametric Sweep)

We assume that the main properties of plastic products have the following meanings (as shown in Table 1):

Table 1. Mechanical characteristics of plastic ABS (according by [14])

Параметр/Parameter	Значение/Value
Модуль Юнга/Elastic Modulus (MPa)	2300
Модуль Пуассона/Poisson's ratio	0.33
Плотность/Density (g/cm3)	1.04

NUMERICAL MODELLING

We set the following initial parameters: the region of the material is 30x30 mm, and the thickness is 10 mm. Boundary load is compressive, 1000 N by modulus.

The number of cavities horizontally and vertically: 10,15,20,25 (without rotation).

Wall thickness (relative to cavity size): 0.05, 0.1, 0.15, 0.2.

Measured is the horizontal displacement of the loaded (right) side of the sample for a continuous and lattice region.

Table 2. The relative error in the adaptive refinement of the grid (partially given)

№	Cells count K	Relative wall thickness t	Relative error err
1	10	0.1	0.676%
2	10	0.5	0.824%
…			
11	25	0.5	0.853%
12	25	0.2	1.358%

Adaptive mesh refinement with a scaling factor of 1.7

We estimate the convergence of the results by analyzing the relative error during grid adaptation (see the appendix). In the parameter variation range, the relative error does not exceed 1.409%, which indicates the good convergence of the results.

Since the cross-sectional dimensions and the load on the lattice and solid sample are the same, we can estimate the change in Young's modulus through the ratio of the displacements of the solid and the main sample, since according to Hooke's law $\Delta l=(PL)/(ES)$, where Δl – deformation of material sample, L – is it's length, P – loading value, S – cross-sectional area, E – Young's modulus.

The displacement of the solid sample is the same and is $\Delta l_1=36.710\ 10^{-3}$ mm. The deformations of the lattice sample are presented in Table 3.

Table 3. Deformation of the lattice region under load when changing mesh parameters

Cells count K	Relative wall thickness kwall	Total displacement (mm)
10	0.1	0.187281
15	0.1	0.187277
20	0.1	0.187281
25	0.1	0.187275
10	0.15	0.121889
15	0.15	0.121874
20	0.15	0.121853
25	0.15	0.121849
10	0.2	0.088729
15	0.2	0.088527
20	0.2	0.088438
25	0.2	0.088359

Since, in fact, a solid sample is replaced with a reduced one proportional to the cell wall thickness and since the wall thickness is set relative to the cell size and the cells completely fill the computational domain, it is obvious that the number of cells when the sides of the cavity are parallel to the loading does not affect the displacements (we neglect here the question of cell wall stability). The averaged data are shown in the Table 4 below.

Table 4. Deformation of the lattice region under load when changing mesh parameters

Relative wall thickness kwall	Relative deformation dl2/dl1	The calculated Young's modulus of lattice field MPa
0.1	5.103	450
0.15	3.320	692
0.2	2.412	953

In a first approximation, the dependence can be considered linear and the decrease in Young's modulus is inversely proportional to the doubled coefficient of wall thickness with respect to the starting material.

On the other hand, the wall thickness coefficient determines the volume of the material left, that is, in fact, the actual cross-sectional area. Thus, in the limit when the wall thickness does not leave a cavity (kwall=0.5 the deformations become equal. At the same time, the larger the

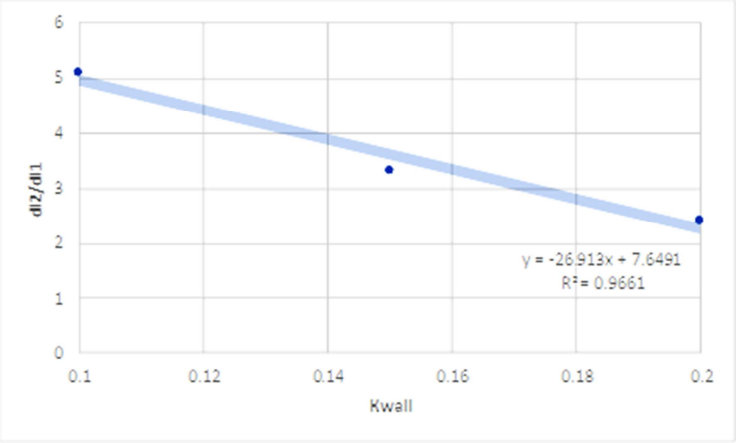


Fig. 5. The dependence of the relative displacements of the samples on the coefficient of wall thickness

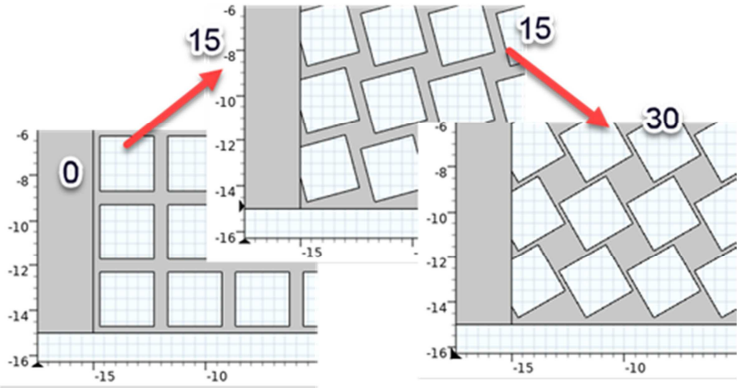


Fig. 6. Examples of grids with rotated cells

cell size and the thinner the wall, the greater the influence of the deflection of the walls in the transverse direction, which explains the deviation of the dependence on a straight line.

Let's consider several grids with more complex geometry.

Firstly, we will perform the calculation under the conditions of the previous problem when the rectangular cavity is rotated by an angle of 0.10 and 20 degrees. See examples of grids in the figure below.

Based on the simulation results (a total of 36 possible combinations was obtained, a table of results was obtained (see repository). The table 5 contains the results of calculations in the form of displacements and the values of Young's modulus for all combinations of factors. After calculating the multiple regression equation, it was found that the number of cells is statistically insignificant, therefore finally get the formula 1 and Table 5:

Table 5. Calculation of Young's modulus of a lattice sample (Young's modulus of solid material 2300 MPa)

N=36	**R2adj=0.99**		
	b	**Std.Err.of b**	**p-value**
Intercept	-141.347	16.22240	0.000000
kwall	5647.500	99.34151	0.000000
ang1 (deg)	-9.075	0.49671	0.000000

$$E_2=-141.35+5647.5\times kwall-9.075\times ang1, \quad (1)$$

where E_2 – calculated Young's modulus of the cellular sample, kwall – relative cell wall thickness, ang1 – cell rotation angle (in degrees).

When the cell is rotated, the walls of the structure work both in compression and in bending, since they receive an additional bending load (from the obvious relations it follows: if the number of cells is K, then the load is proportional to one wall P/2K, and taking into account

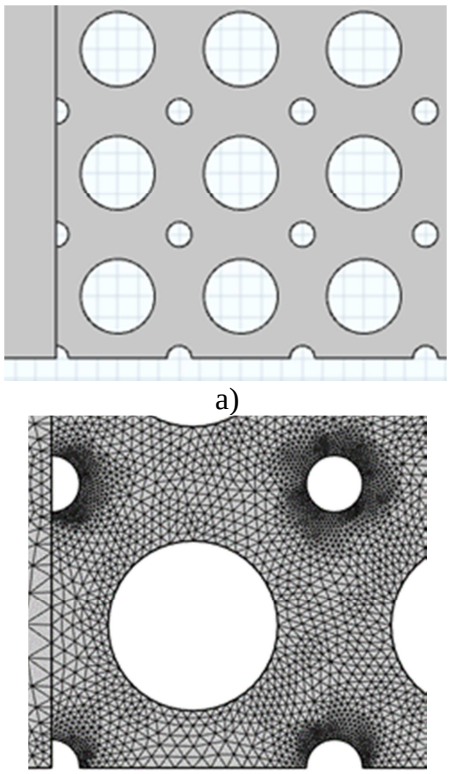
the rotation of the cell, the longitudinal load will be proportional P/2K cos(ang1) and transverse - P/2K sin(ang1)). This explains the minus sign for the angular component in the model.

Consider in a similar way a sponge-like mesh formed by circles of different diameters located in the center and corners of a square tile.

The mesh area is filled with square cells (see Fig. 7), the diameters of the holes are set relative to the size of the indicated squares (see Fig. 3).

Define the radius of the central hole as 0.2, 0.3, and 0.4 of the cell size, and the corner ones as the wall thickness earlier. The grid may be as shown in Fig. 7.

Then (we present the results without detailed calculations):



a)

b)

Fig. 7. The structure formed by holes of different diameters (a) and the grid (b)

Table 6. Calculation of the Young's modulus of a mesh sample with holes (Young's modulus of solid material 2300 MPa) (Young's modulus of solid material 2300 MPa)

N=36	**R2adj=0.99**		
	b	**Std.Err.of b**	**p-value**
Intercept	2606.79	27.5159	0.000000
kwall	-3915.83	127.374	0.000000
khole	-4184.17	63.6870	0.000000

$$E_2=2607-3916\times kwall-4184\times khole, \quad (2)$$

where E_2 – is the calculated Young's modulus of the lattice sample, kwall – is the relative radius of the corner holes, khole – is the relative radius of the central hole of the cell (the actual values of the radius are obtained by the formula $r = k \times a$, where a – is the size of the mesh cell), according to the meaning of the problem khole<0.5.

THE DISCUSSION OF THE RESULTS

Lattice structures, as noted in the introduction, are not fundamentally new, but their targeted use can be very useful [1].

As a result of finite element modeling, it was possible to obtain relatively simple formulas for calculating the Young modulus of the above grids.

Due to this, it is possible to replace the lattice region with a virtual continuous material, which allows one to increase the calculation to 5-10 time.

Improving the speed of modeling in itself, although useful, is not an end in itself. The ability to control the strength of the material allows in some cases to abandon the use of topological optimization tools and, moreover, generative (generative) design. Instead of forming complex and unnatural geometry with the indicated methods, it is enough to fill the areas with lattice grids of known parameters.

CONCLUSION

In this paper, we consider relatively simple flat grids. The mosaic theory allows us to say that there are 8 variants of regular lattices, and the number of irregular flat lattices is almost infinite, not to mention volumetric structures.

In this work, only the Young's modulus is considered, moreover, under conditions of pure tension or compression. Even under these conditions, when the cells rotate, nonlinear material reactions occur.

The article does not use other calculation methods than the finite element method, although thin bridges, generally speaking, should be calculated as membranes, taking into account the effect of stability loss and also phenomena at the points of their intersection.

The use of lattice structures can be expanded, since they affect not only strength, but also, for example, thermal conductivity, acoustic conductivity.

Thus, the presented work can be considered as the beginning of a series of studies carried out in the interests of the enterprises of the Pskov Electrotechnical Industrial Cluster and ZETO CJSC (Velikiye Luki) in particular. The authors also thank the Comsol Russia representative office for providing the trial version of Comsol. Full versions of the material presented in the article are available in the GitHub repository at: https://github.com/Alex-Samфarkin/Don2.

References: **1.** Аддитивные технологии учебное пособие. / Рудской А. И., Попович А. А., Григорьев А. В., Каледина Д. Е. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2017. – 251 с. с. **2.** Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке производства наукоемких изделий учебное пособие. / Сухочев Г. А., Коденцев С. Н., Смольянникова Е. Г. – Воронеж: Воронежский гос. технический ун-т, 2013. – 128 с. с. **3.** 3D printing and additive manufacturing : principles and applications. / Chua C. K., Leong K. F. – The 5th edition of Rapid prototyping : principles and applications. изд. – Singapore ; New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2017. – xxx, 426 pages с. **4.** Domingo-Espin M., Travieso-Rodriguez J. A., Jerez-Mesa R., Lluma-Fuentes J. Fatigue Performance of ABS Specimens Obtained by Fused Filament Fabrication // Materials (Basel). – 2018. – Т. 11, № 12. **5.** Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing. / Gouge M., Michaleris P. – Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, 2018. – xviii, 275 pages с. **6.** Autodesk. Tech Preview: About Lattice Commander. – 2019. – URL: https://knowledge.autodesk.com/support/netfabb/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/NETF/files/GUID-7C5857A1-501E-406B-9632-6EEBD603FE29-htm.html2019). **7.** Autodesk. Tutorial 1 - Create a Lattice Component. – 2019. – URL: https://knowledge.autodesk.com/support/netfabb/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/NETF-Utility-Optimization/files/GUID-2E81D456-D077-45EF-B0F7-FCA22F041F95-htm.html. **8.** Пойнт. НОВАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ МОДУЛЯ LATTICE COMMANDER В СОСТАВЕ NETFABB ULTIMATE //. – 2018. **9.** Comsol multiphysics geometry creation and import. / Mayboudi L. – Duxbury, MA: Mercury Learning and Information, 2019. – pages cm с. **10.** The finite element method : basic concepts and applications with MATLAB, MAPLE, and COMSOL. Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences. / Pepper D. W., Heinrich J. C. – Third edition. изд. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, 2017. Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences. – xviii, 609 pages с. **11.** Tabatabaian M. COMSOL 5 for engineers // Book COMSOL 5 for engineers / Editor. – Dulles, Virginia: Mercury Learning and Information, 2016. **12.** Теория упругости. / Тимошенко С. П. Г. Д. – Москва, 1975. **13.** Сопротивление материалов [учебник]. / Беляев Н. М. – Изд. 15-е, перераб., репр. изд. изд. – Москва: Альянс, 2014. – 607 с. **14.** eFunda. ABS. – 2019. – URL: https://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=ABS&MinorID=6.

СОДЕРЖАНИЕ

Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н.
ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛИРУЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ ……..……..……..……..……. **6**

Акимова А.А., Горшков А.А., Ломовской В.А.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЯДЕР РЕЛАКСАЦИИ В УРАВНЕНИИ БОЛЬЦМАНА ПРИ ОПИСАНИИ ДЕФЕКТОВ МОДУЛЯ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ПИКАМ ПОТЕРЬ НА СПЕКТРАХ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ……..…… **9**

Акинцева А.В.
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПОМОЩЬЮ КОНЦЕПЦИИ DIGITAL TWIN ……... **16**

Ан И-Кан, Беляев Д.В.
ПЕРЕДАЧИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТЕЛ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРИВОДОВ СО СПЕЦИФИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ……..……..…… **20**

Антипин В.А., Степанова Е.А.
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ …… **23**

Антуфьев Б.А., Белашова И.С., Горшков А.А., Коровайцева Е.А., Ломовской В.А.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОЯВЛЯЕМЫХ НА СПЕКТРАХ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ……...……..…… **26**

Байков А. В., Мугандин В.К., Ефимов В.Г.
НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ..……..……..……..……..……. **30**

Баранов А. В., Рыкунов А.Н.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ С МАЛЫМИ СЕЧЕНИЯМИ СРЕЗА НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОДНОЛЕЗВИЙНЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ……..…….. **33**

Бахадиров Г.А., Цой Г.Н., Набиев А.М.
МАШИНА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОЖЕВЕННОГО ПОЛУФАБРИКАТА ……..……. **35**

Белов О.А., Белова Е.П.
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ……..…… **39**

Борзов Д.Б., Сизов А.С., Басов Р.Г.
ПРОЦЕДУРА ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ ПРОЦЕССОРОВ В

МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ…….. **41**

Борзов Д.Б., Сизов А.С., Басов Р.Г.
АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЯ ЗАГРУЗКИ ПРОЦЕССОРОВ В МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ……... **45**

Бохонский А.И.
ИДЕИ В НАУЧНОМ ТВОРЧЕСТВЕ И УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ……. **48**

Бохонский А.И.
ЭНЕРГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТИПА “РАЗГОН−ТОРМОЖЕНИЕ” ДВИЖНИЕМ ОБЪЕКТА ……..……..…….. **50**

Бохонский А. И., Мозолевская Т. В.
ДОСТИЖЕНИЕ УСЛОВИЯ ЭКСТРЕМУМА ВОСТАНОВЛЕННЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ …… **54**

Буленков Е. А.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ РОТОРНЫХ МАШИН И ЛИНИЙ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0…….. **57**

Бурлаков И.А., Костюков А.А., Петров П.А., Бач Ву Чонг
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИИ НА НАПРЯЖЕНИЕ ТЕКУЧЕСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ТИТАНА ВТ1-0……. **58**

Бутенко В.И., Шаповалов Р.Г.
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСО- И ЗАДИРОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЁВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСИСТЕМ ……..……..……... **62**

Витренко В.А., Киреев А.Н., Киреева М.А.
КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И АГРЕГАТОВ ……... **67**

Гаврилова Л.А., Чучманова Л.Д.
ВАРИАНТЫ МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ ДЛЯ УСТАНОВОК КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА СКВАЖИН…….. **70**

Геворгян Г.А., Воробьев Р.А., Филиппов А.А., Пачурин Г.В.
ВЫБОР СТАЛИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОПРАВКИ ДЛЯ ПРОШИВКИ И ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ БЕСШОВНЫХ ТРУБ... **73**

Герасимов А. В., Кирпичников А. П.
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ БЕСКОНЕЧНОГО СОЛЕНОИДА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СТЕРЖНЕМ ПОСТОЯННОЙ ПРОВОДИМОСТИ …….. **77**

Герасимова М.С., Семенов А.Н.
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СООСНОСТИ СТАТОРНЫХ УЗЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ …… **81**

Голубев В.С., Вегера И.И., Чернашеюс О.
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА …….…….. **84**

Горобец И.А., Ященко А.А.
СЕНСОРНОЕ УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОКАРНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ ……. **88**

Гусаров С.В., Подболотов К.Б., Хорт Н.А.
ОГНЕУПОРНЫЕ ВИБРОЛИТЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ СОДЕРЖАЩИХ ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ И ФОСФАТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ..… **90**

Гусев Е.Л.
РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОМПОЗИТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ …… **97**

Гусев Е.Л., Черных В.Д.
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ РАСШИРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ……. **101**

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Косякова И.М.
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ И ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛАЗЕРОМ ПОКРЫТИЙ …… **106**

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С., Пилецкая Л.И.
ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ …….. **112**

Дуйшеналиев Т.Б., Хроматов В.Е., Цой В.Э., Щугорев В.Н.
УРАВНЕНИЕ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ……..……..……..…… **117**

Дьяченко О.В., Кардаполова М.А., Николаенко В.Л.
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ АЛЮМИНИЯ …… **123**

Егоров П.В., Чупраков М.В., Гиммельберг А.С., Шарапова Н.Е., Эрнандес А.Д.
РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПРОГРАММ CSOFT…….. **126**

Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А., Пономарев И.А.
ДИСПЕРСИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ 30Н8Х6М3СТЮ, ПОЛУЧЕННОЙ **131**

НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ……..

Ермишкин В.А., Кириллова В.М., Минина Н.А., Кулагин С.П.
ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОДХОДА ……. **135**

Ермишкин В.А., Кулагин С.П., Минина Н.А., Соловьева Ю.Б.
КРИОМЕХАНИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В9…... **140**

Заплетников И.Н., Кириченко В.А., Громов С.В.
ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩАЯ ПАНЕЛЬ
ДЛЯ ШУМОЗАЩИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ МАШИН.…… **144**

Звягинцева А.В.
АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ХРОМИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ…….. **148**

Звягинцева А.В.
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОГО ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА ……..…….…….…….…… **151**

Зиякаев Г. Р., Пашков Е. Н.
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ НЕУРАВНОВЕШЕННЫХ РОТОРОВ……. **155**

Ибраева Н.Р., Бейсембаев К.М., Нокина Ж.Н.
НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ В БАЗАХ МНОГОМЕРНЫХ КЛАССИФИКАЦИЙ ГОРНЫХ МАШИН……... **158**

Иванов И. Ю., Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А.
ОЦЕНКА ВЫЕМОЧНО-ПОГРУЗОЧНЫХ ФУНКЦИЙ КАРЬЕРНЫХ ЭСКАВАТОРОВ…….. **162**

Ивченко Т.Г., Лыхманюк Е.О., Андреева А. А.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ… **165**

Ивченко Т.Г.
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОХЛАЖДЕНИЯ …….……. **169**

Игнаткина Е.Л., Гутаревич В.О., Бридун М.В.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК С МОНОРЕЛЬСОМ ШАХТНОЙ ПОДВЕСНОЙ ДОРОГИ.… **173**

Игнатов А.В., Мозгин С.А.
МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ АНАЭРОБНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ ……..... **178**

Калинин А.В.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ТАРНО ШТУЧНЫХ ГРУЗОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ ……. **184**

Каракозов А.А., Парфенюк С.Н., Ткаченко Е.И.
РАЗРАБОТКА СКВАЖИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БУРЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ШЕЛЬФА …….. **188**

Кириченко В.В., Костенко А.В.
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА ГАЗОВЫХ ПРОМЫСЛАХ …… **192**

Климук А.С., Острейко И. А., Янович Д. Л.
РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ……. **194**

Ковалева А.А., Петрешин Д.И.
АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ……. **199**

Коваленко В.И., Луцик М.М.
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ..……... **202**

Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Телиман И. В., Шестаков В. С.
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРАХ …… **206**

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…….. **209**

Кругликов П.А., Кондуров Е.П., Смолкин Ю.В., Сухорукова Е.А.
АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ: ПРОГНОЗЫ И ВОЗМОЖНОСТИ …..…….…….…….…….…… **214**

Курбанов Х.К., Керимов Б.М., Гурбанова М.Х., Ходжаев Дж.Н.
ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКОСТЕЙ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ…. **219**

Ладоша Е.Н., Фомич М. В., Цымбалов Д.С.
РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ В СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ……..…….……... **222**

Ладоша Е.Н., Холодова С.Н., Цымбалов Д.С., Яценко О.В.
РЕГУЛЯРНЫЙ И БИОИНСТИРИРОВАННЫЙ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ В РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗАХ.……. **228**

Лапаева И.В., Горобец И.А.
НЕОБХОДИМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ……. **232**

Лахин А.М., Михедова Н.В., Дьяченко Е.А.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ ……. **234**

Лихачева Т.Е., Малахов А.Ю., Перекрестова В.А., Гагиев Х.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН НА ПОРШНЕ АВТОМОБИЛЯ …….. **247**

Лукичев А.В., Матвиенко С.А., Стрельник Ю.Н.
К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗНОСА ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ …….……..…….……. **244**

Лысенкова С.Н., Кубрак Я.А., Добровольский Г.И.
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИС «АРХИВАРИУС» НА ОСНОВЕ МЕТОДА TVO (общая ценность возможностей)……... **253**

Макаров В.Ф., Волковский А.А., Горев П.В., Поликарпова К.Н.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СКОРОСТНОМ ПРОТЯГИВАНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ..…… **257**

Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А., Горбунов А.С.
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗУБЧАТОГО ВЕНЦА ПОСЛЕ СУПЕРФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННЫМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ…… **262**

Макаров В. Н., Макаров Н. В., Бельских А.М., Арсланов А.А., Пешкова И.Д.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОВИХРЕВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ..…….……..…….…… **268**

Макаров В.Н., Макаров Н.В., Лифанов А.В., Матеров А.Ю., Пешкова И.Д. Арсланов А.А.
XXV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА», ТРАДИЦИЯ В ЧЕТВЕРТЬ ВЕКА МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ТУРБОМАШИН ДЛЯ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ… **272**

Макаров В. Н., Макаров Н.В., Угольников А.С., Арсланов А.А. Пешкова И.Д.
ТЕХНОЛОГИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВОВ ОПАСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ…..…… **276**

Малахов Р.В., Степанова Е.А.
ПЕРЕРАБОТКА НЕФТИ ….……..……..……..……... **280**

Меркулов В.С.
ВЛИЯНИЕ ОДНООСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФАЗОВУЮ

ДИАГРАММУ ГЕМАТИТА ……. **283**

Мещеряков В.Н. Пикалов В.В. Бойков А.И. Евсеев А.М.
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА ……..…… **286**

Мирошниченко С.В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВ ИЗ АРХИТЕКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТИПА СЕРДЕЧНИК-ОБОЛОЧКА МЕТОДОМ ДВУХСТОРОННЕГО РЕВЕРСИВНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ……. **288**

Михайлов А.Н.
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ ДОНЕЦКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ТЕХНОЛОГОВ-МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ……..……..……..…….. **291**

Михайлов А.Н., Михайлов В.А. Кравчук Ю.А.
ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ФУЛЛЕРЕНОВОЙ САЖИ И РАЗДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПО ПЛОТНОСТИ…….……..……..…… **306**

Михайлов А.Н., Пичко А.П., Михайлов Д.А., Михайлов В.А., Колодяжный А.А., Шейко Е.А.
МЕТОДИКА НАПРАВЛЕННОГО ПОИСКА РАЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ ВАРИАНТОВ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГТУ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ…….…… **311**

Неструев Д. С., Конотопченко А.А., Дюбрюкс С.А.
ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ “КЛИЕНТ-СЕРВЕР” МЕЖДУ ПЭВМ И МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМОЙ…….. **318**

Павлыш В.Н., Зайцева М.Н.
ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ……..……..…….. **322**

Павлыш В.Н., Перетолчина Г.Б.
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕГАЗАЦИИ ПРИ ЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА….. **326**

Павлыш В.Н., Пшекоп В.Ю.
ФОРМИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ НА ФОНДОВЫХ РЫНКАХ……. **330**

Петряева И.А., Базаров А.В., Романенко Р.К.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С ПОКРЫТИЯМИ……..……..……..……..……... **334**

Поветкин В.В., Аринова Д.Б., Букаева А.З.
АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОЛЕНЧАТОВОГО ВАЛА ПРИ ЕГО МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ……..……..…….. **337**

Поветкин В.В., Бектибай Б.Ж., Аринова Д.Б., Букаева А.З.
РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ЦЕНТРОБЕЖНО – ГИРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ОБЪЕМНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ (ЧАСТЬ 1) ……..……..……... **343**

Поветкин В.В., Орлова Е.П., Аринова Д.Б., Букаева А.З.
РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ЦЕНТРОБЕЖНО – ГИРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ОБЪЕМНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ (ЧАСТЬ 2) ……..……..……... **350**

Покровский А.И.
ГАРМОНИЗАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ НА МЕТАЛЛОПРОКАТ - ОБЪЕКТИВНАЯ НЕОБХОДИМОСТЬ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ СНГ. ОПЫТ БЕЛАРУСИ……..…… **358**

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Полуянович И А.
ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА…… **362**

Прейс В.В.
ЛЕВ НИКОЛАЕВИЧ КОШКИН – ОСНОВОПОЛОЖНИК НАПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИ ПРОИЗВОДСТВ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ РОТОРНЫХ ЛИНИЙ ……..……..……... **367**

Рахутин М.Г., Сурина Н. В., Мнацаканян В.У.
САПР РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА……..……..……. **371**

Розоринов Г.Н., Архиереева Е.Г.
НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ……..……..……..……..……. **373**

Рябичев В.Д., Витренко В.А.
ПОЛУЧЕНИЕ ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБОРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ…… **379**

Савин Л.А., Сытин А.В., Тюрин В.О.
УПРАВЛЯЕМОЕ ОСЕВОЕ НАГРУЖЕНИЕ РОТОРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВ НА БАЗЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ……..……..……..…… **382**

Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Веремейчик А.И., Батрак В.В., Желткович А.Е.
ЛОКАЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ЗАКАЛКА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ……..……..…… **386**

Симкин А.З., Можаева Т.П., Проскурин А.С.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ……..……..……..……..……. **390**

Скворцов А.И., Мельчаков М.А.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКИМ ЗАТУХАНИЕМ И ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ В ДЕМПФИРУЮЩИХ СПЛАВАХ ЖЕЛЕЗА…….……..…….……..…….. **394**

Скорынин Н.И., Малеев В.Б., Кудрявцев А.А.
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНОГО ПАРАМЕТРА КОНИЧЕСКОГО ГРОХОТА НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ…….……..…….……..……. **396**

Тамаркин М.А, Тищенко Э.Э., Верченко А.В., Коханюк А.Г.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ…….……. **398**

Унянин А.Н., Михайлов А.В.
ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ……. **402**

Федуков А.Г., Хандожко А.В., Польский Е.А.
ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ШАРИКОВИНТОВОЙ ПАРЫ ПРИВОДА НА БАЗЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ МОДУЛЕЙ……. **406**

Фомич М. В., Цымбалов Д.С., Яценко О.В.
РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ……. **410**

Хейфец М.Л., Гайко В.А., Сенють Н.М., Бородавко В.И., Грецкий Н.Л., Астапенко А.А.
РАЗРАБОТКА РАСКРОЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЕГО ОСНАЩЕНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ…… **417**

Храмов А.В., Лексин Е. Н., Савельев К.С., Киселев Е.С.
ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ…….……..…….. **422**

Чернышев Е.А., Захарченко Н.А.
ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ НА РОТОРНЫХ МАШИНАХ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ИНСТРУМЕНТОМ…….……..…… **426**

Шабайкович В.А.
ПСЕВДОПОЛЕЗНОСТЬ ТЕЗИСОВ НАУЧНЫХ ДОКЛАДОВ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ…….……..……..…… **428**

Шажко Я.В., Шажко О.В., Ожегова Л.Д., Вишняк Ю.Ю.
ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ГЛУБИННОГО ОБОРА ПРОБ ИЗ СКВАЖИН МАЛОГО ДИАМЕТРА…….……..……..……. **431**

Шахазизян Б.Г., Акопян Н.Г., Арутюнян М. Г.
МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО МОДУЛЯ “МЯГКОЙ” ЭКЗОСКЕЛЕТОННОЙ АССИСТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ…….…….. **433**

Щугорев В.Н., Подмазов Д.А.., Дуйшеналиев Т Б., Цой В.Э.., Щугорев А.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИТОВ С РАССЛОЕНИЯМИ ПРИ ПОМОЩИ СРЕДСТВ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ……. **437**

Яковлева А.П.
УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПАР ТРЕНИЯ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ……. **443**

Dzhura S.G., Chursinov V.I., Yakimishina V.V.
BIO-ELECTROGRAPHY APPLICATION IN RESEARCH AND TEACHING AT DONNTU…….. **447**

Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G., Arakelian V.H.
MATHEMATICAL ASPECTS OF SPRING BALANCING IN ROBOT MANIPULATORS……. **450**

Gritsaenko Anton J., Borshevskiy Sergey V., Kononychin Sergey V. Kupenko Ivan V.
To the question of COMPARATIVE STUDIES OF DRILLING EFFICIENCY FOR SMALL DIAMETER BOREHOLES WITH TWO DIFFERENT DRILLING METHODS……. **455**

Gritsaenko Anton J., Borshevskiy Sergey V., Kononychin Sergey V. Kupenko Ivan V.
To the question of COMPARATIVE STUDIES OF DRILLING EFFICIENCY FOR SMALL DIAMETER BOREHOLES WITH TWO DIFFERENT DRILLING METHODS……. **456**

Karsakova A. Zh.
EXPERIMENTAL STUDYING VPO-3000 MACHINE DRIVE WITH ESTABLISHING SIMILARITY CRITERIA……. **464**

Panteleenko F.I., Okovity V.A., Panteleenko A.F.
DEVELOPMENT OF MATERIALS BASED ON STEELS OF AUSTENITIC CLASS AND CERAMICS FOR APPLICATION OF WEAR-RESISTANT COATINGS…….. **469**

Prihodchenko Katherine Ilyinichna, Kaverina Olga Gennadievna
THE FORMATION OF COLLECTIVE RELATIONS IN THE STUDENTS GROUP.. **472**

Prikhodchenko Y.I., Kapatsina N.N.
PEDAGOGICAL INNOVATION: CONTEMPORARY DEMAND……... **475**

Solonari S.T., Vutcariova I.I., Rusu M.I.*, Balan G.K.
LA CONCENTRATION DU LACTOSERUM AU VID AVEC RECTIFICATION PAR LA DISTILLATION PAR ETAPES DES ACIDES ORGANIQUES……. **478**

Аноприенко А.Я.
ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОСФЕРЫ В КОНТЕКСТЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ…….. **482**

Samarkin A.I., Samarkina E.I., Mikushev V.M., Plohov I.V.
SIMULATION OF THE STRENGTH PROPERTIES OF LATTICE STRUCTURES, PRODUCED BY THE METHOD OF THREE-DIMENSIONAL PRINTING…… **487**

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аверченков В.И. 6
Акимова А.А. 9
Акинцева А.В. 16
Акопян Н.Г. 433
Ан И-Кан 20
Андреева А. А. 165
Аноприенко А.Я. 482
Антипин В.А. 23
Антуфьев Б.А. 26
Аринова Д.Б. 337, 343, 350
Арсланов А.А. 268, 272, 276
Арутюнян М. Г. 433
Архиереева Е.Г. 373
Астапенко А.А. 417
Базаров А.В. 334
Байков А. В. 30
Баранов А. В. 33
Басов Р.Г. 41, 45
Батрак В.В. 386
Бахадиров Г.А. 35
Бач Ву Чонг 58
Бейсембаев К.М. 158
Бектибай Б.Ж. 343
Белашова И.С. 26
Белов О.А. 39
Белова Е.П. 39
Бельских А.М. 268
Беляев Д.В. 20
Бойков А.И. 286
Борзов Д.Б. 45
Бородавко В.И. 417
Бородихин С.А. 131
Бохонский А. И. 54, 48 50
Бридун М.В. 173
Букаева А.З. 337, 343, 350
Буленков Е. А. 57
Бурлаков И.А. 58
Бутенко В.И. 62
Вегера И.И. 84
Веремейчик А.И. 386
Верченко А.В. 398
Витренко В.А. 67, 379
Вишняк Ю.Ю. 431
Волковский А.А. 257
Воробьев Р.А. 73
Ворожцова Н.А. 262
Гаврилова Л.А. 70
Гагиев Х.В. 247
Гайко В.А. 417
Геворгян Г.А. 73
Герасимов А. В. 77
Герасимова М.С. 81
Гиммельберг А.С. 126
Голубев В.С. 84
Горбунов А.С. 262
Горев П.В. 257
Горобец И.А. 88, 232
Горшков А.А. 9, 26
Грецкий Н.Л. 417
Громов С.В. 144
Гурбанова М.Х. 219
Гусаров С.В. 90
Гусев Е.Л. 97, 101
Гутаревич В.О. 173
Девойно О.Г. 106, 112
Добровольский Г.И. 253
Дубяго М.Н. 362
Дуйшеналиев Т Б. 437, 117,
Дьяченко Е.А. 234
Дьяченко О.В. 123
Дюбрюкс С.А. 318
Евсеев А.М. 286
Егоров П.В. 126
Еремин Е.Н. 131
Ермишкин В.А. 135, 140
Ефимов В.Г. 30
Желткович А.Е. 386
Зайцева М.Н. 322
Заплетников И.Н. 144
Захарченко Н.А. 426
Звягинцева А.В. 148, 151
Зиякаев Г. Р. 155
Ибраева Н.Р. 158
Иванов И. Ю. 162
Ивченко Т.Г. 165, 169
Игнаткина Е.Л. 173
Игнатов А.В. 178
Каплун В.О. 209
Каракозов А.А. 188
Кардаполова М.А. 106, 112, 123
Керимов Б.М. 219
Киреев А.Н. 67
Киреева М.А. 67
Кириллова В.М. 135
Кириченко В.А. 144, 192
Кирпичников А. П. 77
Киселев Е.С. 422
Климук А.С. 194
Ковалева А.А. 199
Коваленко В.И. 202
Колодяжный А.А. 311
Комиссаров А. П. 162, 206
Комиссарова Т.Н. 209
Кондуров Е.П. 214
Конотопченко А.А. 318
Коровайцева Е.А. 26
Костенко А.В. 192
Костюков А.А. 58
Косякова И.М. 106
Коханюк А.Г. 398
Кравчук Ю.А. 306
Кругликов П.А. 214
Кубрак Я.А. 253
Кудрявцев А.А. 396
Кулагин С.П. 135, 140
Курбанов Х.К. 219
Лагунова Ю. А. 162, 206
Ладоша Е.Н. 222, 228
Лапаева И.В. 232

Лапковский А.С. 112
Лахин А.М. 234
Лексин Е. Н. 422
Лифанов А.В. 272
Лихачева Т.Е. 247
Ломовской В.А. 9, 26
Лосев А.С. 131
Лукичев А.В. 244
Луцик М.М. 202
Луцко Н.И. 112
Лысенкова С.Н. 253
Лыхманюк Е.О. 165
Макаров В. Н. 268, 276, 272
Макаров В.Ф. 257, 262
Макаров Н. В. 268, 276, 272
Малахов А.Ю. 247
Малахов Р.В. 280
Малеев В.Б. 396
Матвиенко С.А. 244
Матеров А.Ю. 272
Мельчаков М.А. 394
Меркулов В.С. 283
Мещеряков В.Н. 286
Минина Н.А. 135, 140
Мирошниченко С.В. 288
Михайлов А.В. 402
Михайлов А.Н. 291, 306, 311
Михайлов В.А. 306, 311
Михайлов Д.А. 311
Михедова Н.В. 234
Мнацаканян В.У. 371
Можаева Т.П. 390
Мозгин С.А. 178
Мозолевская Т. В. 54
Мугандин В.К. 30
Набиев А.М. 35
Надуваев В.В. 6
Неструев Д. С. 318
Николаенко В.Л. 123
Нокина Ж.Н. 158
Ожегова Л.Д. 431
Орлова Е.П. 350
Острейко И. А. 194
Павлыш В.Н. 322, 326, 330
Парфенюк С.Н. 188
Пачурин Г.В. 73
Пашков Е. Н. 155
Перекрестова В.А. 247
Перетолчина Г.Б. 326
Петрешин Д.И. 199
Петров П.А. 58
Петряева И.А. 334
Пешкова И.Д. 268, 272, 276
Пикалов В.В. 286
Пилецкая Л.И. 112
Пичко А.П. 311
Поветкин В.В. 337, 343, 350
Подболотов К.Б. 90
Подмазов Д.А. 437
Покровский А.И. 358
Поликарпова К.Н. 257
Полуянович И А. 362
Полуянович Н.К. 362
Польский Е.А. 406
Пономарев И.А. 131
Прейс В.В. 367
Проскурин А.С. 390
Пшекоп В.Ю. 330
Рахутин М.Г. 371
Розоринов Г.Н. 373
Романенко Р.К. 334
Рыкунов А.Н. 33
Рябичев В.Д. 379
Савельев К.С. 422
Савин Л.А. 382
Сазонов М.И. 386
Семенов А.Н. 81
Сенють Н.М. 417
Сизов А.С. 41, 45
Симкин А.З. 390
Скворцов А.И. 394
Скорынин Н.И. 396
Смолкин Ю.В. 214
Соловьева Ю.Б. 140
Степанова Е.А. 23, 280
Стрельник Ю.Н. 244
Сурина Н. В. 371
Сухорукова Е.А. 214
Сытин А.В. 382
Тамаркин М.А. 398
Телиман И. В. 206
Тищенко Э.Э. 398
Ткаченко Е.И. 188
Тюрин В.О. 382
Угольников А.С. 276
Унянин А.Н. 402
Федуков А.Г. 406
Филиппов А.А. 73
Фомич М. В. 222, 410
Фролов Е.Н. 6
Хандожко А.В. 406
Хвисевич В.М. 386
Хейфец М.Л. 417
Ходжаев Дж.Н. 219
Холодова С.Н. 228
Хорт Н.А. 90
Храмов А.В. 422
Хроматов В.Е. 117, 209
Цой В.Э. 117, 437
Цой Г.Н. 35
Цымбалов Д.С. 222, 228, 410
Чернашеюс О. 84
Черных В.Д. 101
Чернышев Е.А. 426
Чупраков М.В. 126
Чучманова Л.Д. 70
Шабайкович В.А. 428
Шажко О.В. 431
Шажко Я.В. 431
Шаповалов Р.Г. 62
Шарапова Н.Е. 126
Шахазизян Б.Г. 433
Шейко Е.А. 311
Шестаков В. С. 206

Щугорев А.В. 437
Щугорев В.Н. 117, 437
Эрнандес А.Д. 126
Яковлева А.П. 443
Янович Д. Л. 194
Яценко О.В. 228, 410
Ященко А.А. 88
Arakelian V.H. 450
Balan G.K. 478
Borshevskiy S. V. 455
Chursinov V.I. 447
Dzhura S.G. 447
Ghazaryan S.D. 450
Gritsaenko A. J. 455
Harutyunyan M.G. 450
Kapatsina N.N. 475
Karsakova A. Zh. 464
Kaverina O. G. 472
Kononychin S. V. 455
Kupenko I. V. 455
Mikushev V.M. 487
Okovity V.A. 469
Panteleenko A.F. 469
Panteleenko F.I. 469
Plohov I.V. 487
Prihodchenko K. I. 472
Prikhodchenko Y.I. 475
Rusu M.I. 478
Samarkin A.I. 487
Samarkina E.I. 487
Solonari S.T. 478
Vutcariova I.I. 478
Yakimishina V.V. 447

XXVI международная
научно-техническая конференция

«МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА»

Сборник трудов

ISSN 2079-2670

Компьютерная верстка сборника – Петряева И.А.

Пописано к печати 01.09.2019.	Формат 60x84 $^{1}/_{16}$	Бумага XEROX
Ризографическая печать	Усл. печ. л. 17,59	
Уч.-из. л. 19,35	Тираж 100 экз.	Заказ № 1

Издательство ЧП “Технополис”
Свидетельство о внесении в государственный реестр субъекта
издательского дела ДК № 1221 от 05.02.2003.
283001, г. Донецк, пр. Дзержинского 1
Тел. +38 062 305-01-04
E-mail: *mntk21@mail.ru*