



XXIX МНТК МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

Сборник трудов XXIX международной  
научно-технической конференции



2022

2022 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  
Донецкий национальный технический университет  
Донской государственный технический университет  
Казахский национальный университет имени Аль-Фараби  
Камчатский государственный технический университет  
Луганский национальный университет им. В. Даля  
Московский государственный технический университет им. Н.Э Баумана  
Национальный политехнический университет Армении  
Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева  
Санкт-Петербургский горный университет  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Севастопольский государственный университет  
Усинский и Воркутинский филиалы Ухтинского государственного технического университета  
Научно-исследовательский центр по проблемам отраслевого машиноведения при Ташкентском  
государственном техническом университете им. А.Р. Беруни  
СПТК им. маршала инж. войск А.В. Геловани, АО «Феодосийский оптический завод»  
ОАО НИИ «Изотерм», ЧП «Технополис»

# **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА**

**Сборник трудов**

**XXIX  
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**12 - 18 сентября 2022 г. в городе Севастополе**



**Донецк-2022**

**ББК К5я54**  
**УДК 621.01(06)**

Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2022 г. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – 374 с.

**ISSN 2079-2670**

В сборник включены материалы XXIX 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 - 2022»*

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 3 от 24 июня 2022 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. +7 (949) 3060879

E-mail: [mntk21@mail.ru](mailto:mntk21@mail.ru)

<http://konf-sev.donntu.ru>

**ISSN 2079-2670**

© Авторы статей, 2022 г.

© ДонНТУ, 2022 г.

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

**Сопредседатели:** Ректор ДонНТУ, к.т.н., профессор **Аноприенко А.Я.** (ДНР); 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:** нач. отдела ИМАШ РАН, д.т.н., проф. **Базров Б.М.**; директор ООО «ГЭМЗ» **Байчоров А.А.**; профессор ГИУА, д.т.н. **Баласанян Б.С.**; профессор ИМ и СС АН РУ, д.т.н. **Бахадиров Г.А.**; директор ММИ УрФУ, д.т.н., проф. **Блинков О.Г.**; проректор по научной работе ДонНТУ, д.т.н., проф. **Борщевский С.В.**; профессор СевГУ, д.т.н. **Бохонский А.И.**; зав. кафедрой СевГУ, д.т.н., проф. **Братан С.М.**; ген. директор АО «ФОЗ» **Буряк В.Ю.**; профессор ИТА ЮФУ, д.т.н. **Бутенко В.И.**; зав. кафедрой, д.т.н., проф. **Буялич Г.Д.**; профессор ТГУ, д.т.н. **Вайнер Л.Г.**; зав. кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., проф. **Васильев А.С.**; д.ф.-м.н., проф. **Варюхин В.Н.**; проректор ЛНУ им. В. Даля, д.т.н., проф. **Витренко В.А.**; зав. кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., проф. **Галиновский А.Л.**; зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., профессор **Гусев В.В.**; профессор ОИФТПС ЯНЦ СО РАН, д.т.н. **Гусев Е.Л.**; зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Гутаревич В.О.**; секретарь Научно-технического союза машиностроения Болгарии **Дамянов Д.**; профессор КазАТУ, д.т.н. **Данияров Н.А.**; проректор АГУ, д.т.н., проф. **Делба В.В.**; зав. кафедрой ДонНУЭТ, д.т.н., проф. **Заплетников И.Н.**; зав. кафедрой ДонГТУ, к.э.н., доц. **Зинченко А.М.**; вед. научн. сотр. ИМЕТ РАН, д.ф.-м.н. **Ермишкин В.А.**; проректор ДонНТУ, к.т.н, проф. **Каракозов А.А.**; профессор БВТА, д.т.н. **Керекеш Т.**; профессор УГТУ, д.т.н. **Киселев Е.С.**; зав. кафедрой КамчатГТУ, к.т.н., доц. **Костенко А.В.**; проф. Волгодонского филиала НИЯУ «МИФИ», д.т.н. **Кравченко П.Д.**; гл. научн. сотр. ОАО «НПО ЦКТИ», д.т.н. **Кругликов П.А.**; зав. кафедрой УГГУ, д.т.н., проф. **Лагунова Ю.А.**; профессор ДГТУ, д.т.н. **Лебедев В.А.**; зав. кафедрой ТУМ, д.т.н. **Мазуру С.**; декан СПГУ, д.т.н., профессор **Максаров В.В.**; профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н. **Мальшева Г.В.**; ректор ДГТУ, д.т.н., проф. **Месхи Б.Ч.**; председатель Международного союза машиностроителей, зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Михайлов А.Н.**; к.т.н., профессор **Навка И.П.**; инженер **Недашковский А.П.**; зав. кафедры РГАТУ им. П.А. Соловьева, д.т.н., проф. **Непомилуев В.В.**; профессор кафедры ТМ СевГУ, д.т.н. **Новоселов Ю.К.**; зам. директора ММИ УрФУ, д.т.н., проф. **Овчинникова В.А.**; профессор Портсмутского университета **Оливер Т.**; зав. кафедрой СНИУ им. Академика С.П. Королева, д.т.н., проф. **Павлов В.Ф.**; зав. кафедрой БГТУ, д.т.н., проф. **Петрешин Д.И.**; директор УФ УГТУ, д.ф.н., проф. **Пичко Н.С.**; проректор ППИ, д.т.н., профессор **Плохов И.В.**; профессор КазНУ им. Аль-Фараби, д.т.н. **Поветкин В.В.**; профессор 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. **Проккофьев А.Н.**; зав. кафедрой СПбПУ, д.т.н., профессор **Радкевич М.М.**; проректор ДонНТУ, к.т.н. **Рязанов А.Н.**; профессор ОГУ им. И.И. Тургенева, д.т.н. **Савин Л.А.**; первый проректор ВГТУ, д.т.н., проф. **Сафонов С.В.**; декан ДонНТУ, к.т.н., доц. **Селивра С.А.**; декан РГАТУ им. П.А. Соловьева, д.т.н., проф. **Семенов А.Н.**; профессор КубГАУ им. И.Т. Трубилина, д.т.н. **Серга Г.В.**; профессор ВГУ, д.т.н. **Скворцов А.И.**; 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. **Тамар-**

**кин М.А.;** декан ТУМ, д.т.н., проф. **Тока А.;** профессор ГТУ, д.т.н. **Турманидзе Р.С.;** профессор ИТМ УлГТУ, д.т.н. **Унянин А.Н.;** профессор Сызранского филиала СГТУ, д.т.н. **Усов В.П.;** профессор БГТУ, д.т.н. **Хандожко А.В.;** Директор ИПФ НАН Беларуси, профессор, д.т.н. **Хейфец М.Л.;** профессор НИУ «МЭИ», д.т.н. **Хроматов В.Е.;** доцент КамчатГТУ, д.ф.-м.н., доц. **Царенко С.Н.;** зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Шабаев О.Е.;** НПО «Искра», д.т.н., проф. **Шайдурова Г.И.;** профессор Азербайджанского ТУ **Шарифов З.З.;** профессор ТГУ, д.т.н. **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. **Горобец И.А.**

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

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

### **Уважаемые дамы и господа, дорогие друзья и коллеги!**

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

В связи с этим, на этой встрече предусматривается особое внимание уделить вопросам создания и применения прогрессивных, специальных и нетрадиционных технологий. Нам необходимо рассмотреть насущные проблемы техники, связанные с механизацией и автоматизацией производственных процессов, а также с созданием прогрессивного оборудования. Здесь будут затронуты вопросы проектирования и применения прогрессивных инструментов, управления качеством промышленной продукцией, сертификации, метрологии, диагностики и эксплуатации технологических систем, создания информационных и наукоемких технологий. Приоритетными направлениями на нашей конференции будут также вопросы, нацеленные на развитие процесса профессионального образования в системе Евразийского образовательного пространства. А также множество других важнейших вопросов науки и техники нам предстоит обсудить, а именно связанных с развитием машиноведения, инженерии материалов, нанесения нетрадиционных покрытий, моделирования, расчетов сложных технических систем, специальной техники и технологий техносферы, горного и нефтегазового дела, экологии и экономики. Этим основным и другим вопросам 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 итог 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 XXIII 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 стран ЕАЭС и других стран, широкому обмену информации научно-технического характера, а также дадут необходимый творческий импульс для дальнейшего развития машиностроения и техносферы.

**С наилучшими пожеланиями**

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

## АНАЛИЗ РАЗМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ОБДИРОЧНО-ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ЧУГУНА

Азимова Н.Н., Бедоидзе М.В., Купцова И.С., Милев И.Ю., Русяков Д.В.

(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg\_v\_yatcenko@mail.ru

**Abstract:** A mathematical analysis of the metal dust size distribution with respect to LALLS-technique is performed. It is found that dust investigated obeys the five-parametric distribution. The error in size distribution determination is estimated.

**Key words:** grinding, iron dust parameters, LALLS-technique, multimodal distribution.

Пыль, образующаяся при обдирочно-шлифовальной обработке металлов, не только снижает качество обработки, но вредит здоровью человека и загрязняет природную среду. Для предотвращения негативного воздействия используют различные аспирационные системы [1], эффективность которых достигается предварительным аэродинамическим расчетом. Основу последнего составляют законы аэромеханики и геометрия улавливаемых частиц. Поэтому знания геометрии технологической пыли актуальны для целей эффективного пылеулавливания.

Целью данного исследования ставилась разработка математических методов для корректного определения размерно-массовых параметров чугунной пыли, образующейся в процессе обдирки-шлифования. Результаты предполагается использовать для нормализации воздушной среды в металлообрабатывающих цехах.

Первичный анализ размерных характеристик металлической пыли удобно проводить с помощью LALLS-аппаратуры. Соответствующие результаты выводятся в виде интегральной и дифференциальной функций распределения (рис. 1), а также как набор некоторых интегральных показателей (рис. 2).

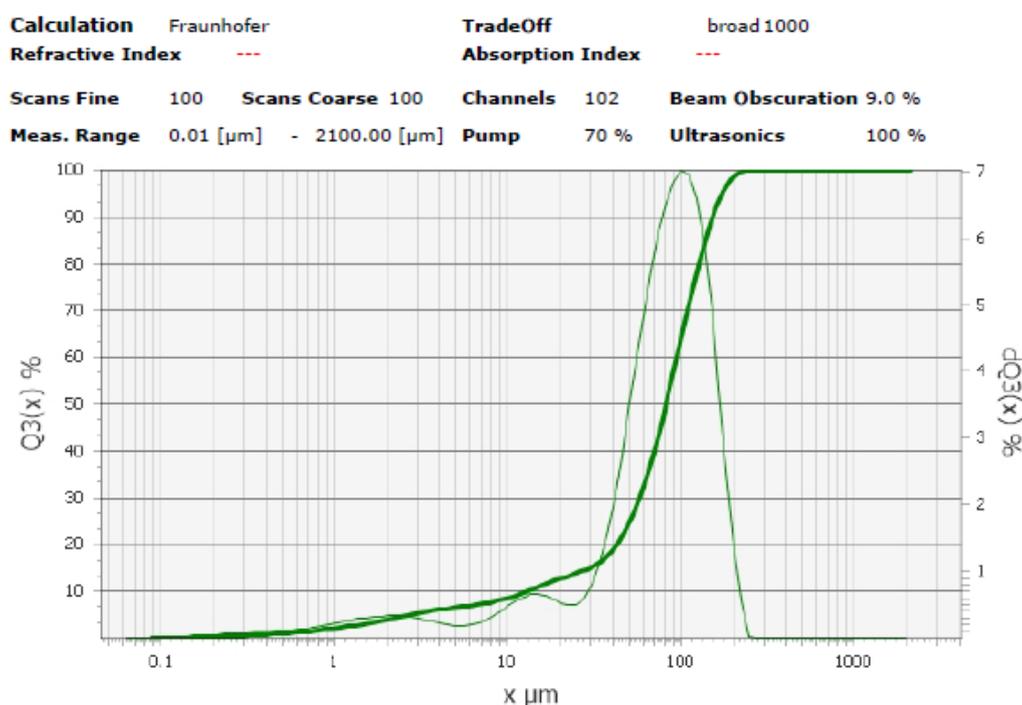


Рис. 1. Распределение частиц чугуна по размерам

Приведенное на рис. 1 распределение относится к т.н. многомодальным. Если каждая мода (из трех в данном случае) характеризуется единственным параметром, а еще

два отвечают за вклад мод в общее распределение, оказывается, что моментных данных, приведенных на рис. 2, существенно недостаточно для уверенной параметрической идентификации совокупной функции распределения. Ситуацию позволяет исправить прием, известный как регуляризация – т.е. использование априорных сведений о характере анализируемого распределения. Известно, что при пылеобразовании путем однократного отщепления от макро-образца должны получаться частицы, размер которых подчиняется экспоненциальному распределению. В нашем случае логично предположить сочетание трех параллельно действующих механизмов однократного отщепления с различным характерным размером отделяемых частиц.

<b>Arithmetic Mean</b>	84.31 $\mu\text{m}$	<b>Span</b>	$(d_{90}-d_{10})/d_{50}$	1.69	<b>D[4,3]</b>	84.3 $\mu\text{m}$
<b>Geometric Mean</b>	57.78 $\mu\text{m}$	<b>Mean/Median</b>	0.97			
<b>Quadratic Mean</b>	97.72 $\mu\text{m}$	<b>Mode</b>	102.89 $\mu\text{m}$			
<b>Spec.Surface</b>	5,602.0 $\text{cm}^2/\text{cm}^3$	<b>Median</b>	81.792 $\mu\text{m}$			
<b>d10</b>	0.20 $\mu\text{m}$	<b>Span</b>	$(d_{90}-d_{10})/d_{50}$	1.69	<b>D[4,3]</b>	84.3 $\mu\text{m}$
<b>Geometric Mean</b>	57.78 $\mu\text{m}$	<b>Mean/Median</b>	0.97			
<b>Quadratic Mean</b>	97.72 $\mu\text{m}$	<b>Mode</b>	102.89 $\mu\text{m}$			
<b>Spec.Surface</b>	5,602.0 $\text{cm}^2/\text{cm}^3$	<b>Median</b>	81.792 $\mu\text{m}$			

Рис. 2. Интегральные характеристики распределения частиц чугуна по размерам

Математически такая модель выражается формулой:

$$p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) = \frac{1-(\alpha_2+\alpha_3)}{D_1} \cdot e^{-\frac{x}{D_1}} + \frac{\alpha_2}{D_2} \cdot e^{-\frac{x}{D_2}} + \frac{\alpha_3}{D_3} \cdot e^{-\frac{x}{D_3}}, \quad (1)$$

где  $D_1 - D_3$  характерные размеры частиц во фракциях, а  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  – доля частиц, принадлежащих ко второй и третьей фракциям соответственно.

Особенности прибора *FRITSCH Analysette 22* в том, что на выход поступают значения

$$Q(x) = \frac{\int_0^x p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) x^4 dx}{\int_0^\infty p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) x^4 dx} = \frac{\int_0^x p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) x^4 dx}{24((1-(\alpha_2+\alpha_3))D_1^4 + \alpha_2 D_2^4 + \alpha_3 D_3^4)} \quad (2)$$

и

$$P(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) = \frac{p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) x^4}{24((1-(\alpha_2+\alpha_3))D_1^4 + \alpha_2 D_2^4 + \alpha_3 D_3^4)}, \quad (3)$$

существенно отличные от интересных для наших целей  $p(x)$  и  $F(x)$ . Нахождение параметров модели  $D_1 - D_3$ , а также  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  в такой ситуации сводится к оптимизационной задаче [2]:

$$Q(D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) \equiv \sum_{i=1}^{\infty} (\lg(Q(x_i)) - \lg Q_i)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $x_i$  – размер частиц  $Q_i$  – доля частиц с размером меньшим или равным  $x_i$ .

Практическое найти искомые параметры модели можно двумя способами. Первый состоит в решении переопределенной системы уравнений

$$\begin{cases} \lg(Q(x_i)) - \lg Q_i = 0 \\ i = 1, 2, 3 \dots \end{cases}, \quad (5)$$

а второй – в решении системы отвечающей необходимому условию экстремума [3].

Однако реализация обоих алгоритмов затруднена спецификой интеграла в числителе (2). Стандартная процедура Рунге – Кутты оказывается непригодной для численного взятия интеграла в столь широких пределах. Проблему удалось решить, вычислив  $Q$  аналитически и получив результат в замкнутом виде:

$$\begin{aligned}
Q(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) = & (1 - (\alpha_2 + \alpha_3)) \left( 1 - \frac{(24D_1^3x + 24D_1^4 + 12D_1^2x^2 + 4D_1x^3)e^{-\frac{x}{D_1}}}{24D_1^4} \right) + \\
& + \alpha_2 \left( 1 - \frac{(24D_2^3x + 24D_2^4 + 12D_2^2x^2 + 4D_2x^3)e^{-\frac{x}{D_2}}}{24D_2^4} \right) + \\
& + \alpha_3 \left( 1 - \frac{(24D_3^3x + 24D_3^4 + 12D_3^2x^2 + 4D_3x^3)e^{-\frac{x}{D_3}}}{24D_3^4} \right) \quad (6)
\end{aligned}$$

После этого, процедуры (5)-(6) приобретают устойчивость и позволяют получить решение. Его свойства таковы, что подавляющее большинство частиц относятся к мелкой фракции, доли процента к средней и лишь ничтожная часть – к крупной. Результат в виде синтезированной дифференциальной функции распределения  $p(x)$  приведен на рис. 3. Количественное отличие от первичных данных рис. 1 связано с отсутствием в данных рис. 3 надлежащей нормировки.

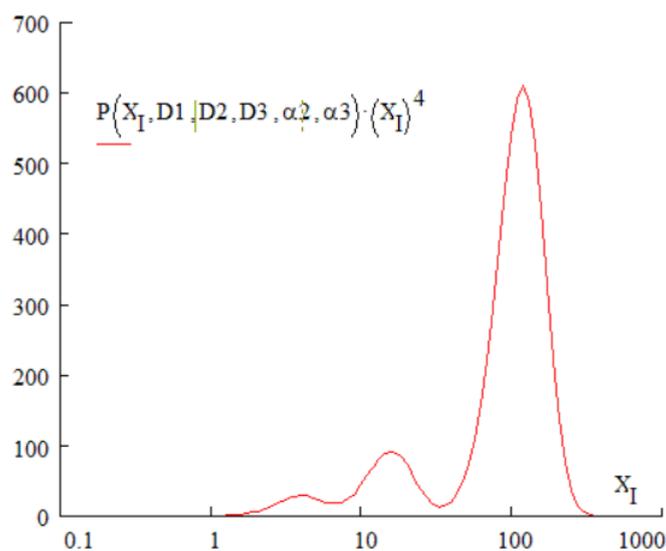


Рис. 3. Распределение частиц чугуна по размерам: синтезированная дифференциальная функция распределения

Результаты выполненных авторами исследований сводятся к следующему:

- предложен метод идентификации многомодальных распределений пылевых частиц по размеру;
- методика успешно апробирована на трехфракционных образцах чугунной пыли, полученной в процессе обдирочно-шлифовальной обработки;
- предложенная методика идентификации функции распределения дорабатывается авторами в целях автоматизации анализа размерных характеристик технологической пыли.

**Список литературы:** 1. М.Г. Зиганшин Проектирование аппаратов пылегазоочистки. – М.: Экопресс, 1998. – 505 с. 2. Minoux, M. Mathematical Programming: Theory and Algorithms. – New York: John Wiley, 1986. – 489 p.

## РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДРЕВЕСНОЙ ПЫЛИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Азимова Н.Н., Русялков Д.В., Шаповалов Д.А., Чеченев А.В.

(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Тел: +7 (951) 5180020; E-mail: denis\_shapov94@mail.ru

**Abstract:** A new mathematical approach for dust size distribution analysis with respect to wood drilling is proposed. It is found that dust investigated obeys the one-parametric exponential distribution. The technique elaborated may be embraced to different dusts investigations.

**Key words:** wood dust, drilling, one-parametric exponential distribution.

Древесная пыль, образующаяся при сверлении древесины, не только ухудшает качество обработки, но наносит ущерб здоровью человека и загрязняет окружающую среду. Чтобы исключить ее негативное влияние используют циклоны [1], действие которых основано на конкуренции инерционных и аэродинамических сил. Эффективность циклонов обеспечивается аэродинамическим расчетом, исходными данными которого выступает геометрия улавливаемых частиц. Вследствие существенной неоднородности технологической пыли (см. рис. 1) ее геометрические характеристики имеют статистическую природу, что выдвигает жесткие требования к корректности их осреднения. Поэтому достоверные научные данные о геометрии такой пыли крайне актуальны для рациональной организации пылеулавливания.

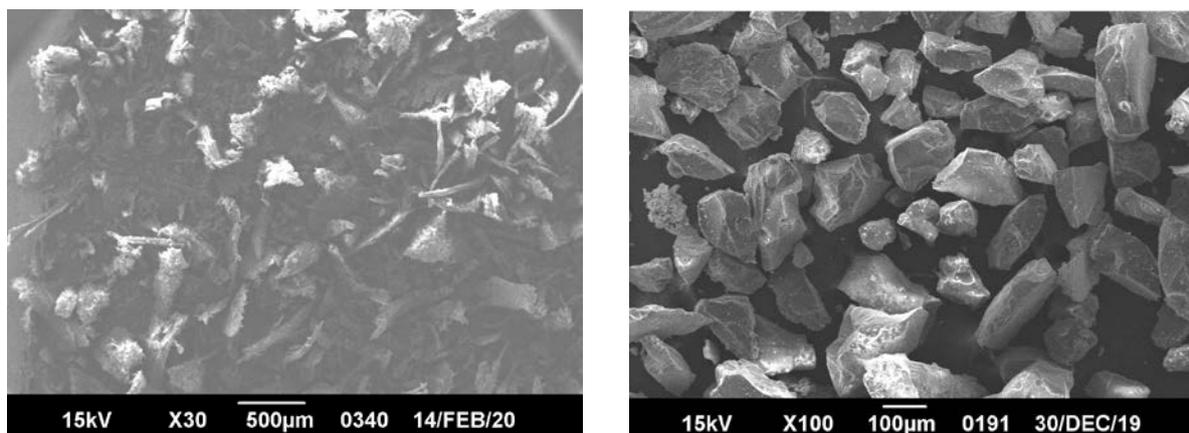


Рис. 1. Технологическая пыль, образовавшаяся при сверлении древесины (слева) и при обдирочно-шлифовальной обработке чугуна – абразивная составляющая (справа)

Целью данного исследования является разработка эффективных математических методов для корректного определения размерных параметров древесной пыли, образующейся в различных технологических процессах. Предполагается также распространение полученных методических результатов на исследования мелкодисперсных отходов различных производств.

Идея работы состоит в том, что каждой функции распределения частиц по размерам  $F(x)$  можно сопоставить некоторый функционал, в частности, некоторый ее момент. Если же ей сопоставить набор таких моментов, можно исключить неоднозначность ее идентификации. В данной работе предлагается использовать набор специальным образом нормированных моментов. Для однопараметрических распределений, к которым часто относятся результаты однократного дробления эти моменты могут быть вычислены в квадратурах. После надлежащего нормирования они составят вполне

определенный вектор, отвечающий форме  $F(x)$ , а масштабный коэффициент определится естественным образом.

Практически удобно пользоваться не самими моментами  $F(x)$ , а их комбинациями, известными как заутеровские размеры [2-3]:

$$x_{nm} = \left[ \frac{\int_0^{\infty} x^n dF(x)}{\int_0^{\infty} x^m dF(x)} \right]^{\frac{1}{n-m}}, \quad (1)$$

которая с учётом известного соотношения  $dF(x) = F'_x(x) dx = p(x) dx$  записывается как

$$x_{nm} = \left[ \frac{\int_0^{\infty} x^n p(x) dx}{\int_0^{\infty} x^m p(x) dx} \right]^{\frac{1}{n-m}}. \quad (2)$$

В последней формуле  $p(x)$  – т.н. дифференциальная функция распределения или плотность вероятности.

Если же  $F(x)$  дискретна, заутеровские радиусы вычисляются по формуле:

$$x_{nm} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^I x_i^n}{\sum_{i=1}^I x_i^m} \right]^{\frac{1}{n-m}}, \quad (3)$$

в которой  $i$  – номер частицы,  $I$  – их общее число.

Удобно ввести безразмерный коэффициент  $k_{nm} = x_{nm}/x_{10}$ , позволяющий каждой  $F(x)$  сопоставить безразмерный вектор. Результаты вычислений для нескольких однопараметрических распределений  $F(x, a)$  собраны в табл. 1. В этой таблице все значения выражаются в конечной алгебраической и/или тригонометрической форме. Однако вследствие громоздкости пятая и девятая строки даются в числовом выражении.

Тестирование распознающего алгоритма выполнялось следующим образом. Задавались 17 различных распределений из числа приведенных в табл. 1, причем с неизвестным параметром  $a$ . В выборках фигурировало по 30-300 чисел. Для каждой выборки по формуле

$$k_{nm} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^I x_i^n}{\sum_{i=1}^I x_i^m} \right]^{\frac{1}{n-m}} / \frac{\sum_{i=1}^I x_i^1}{\sum_{i=1}^I x_i^0} \quad (4)$$

рассчитывались отвечающие ей коэффициенты. Затем полученные коэффициентный вектор сравнивался с соответствующими векторами табл. 1. Наиболее полно отвечающим эксперименту считался табличный вектор, минимально отличающийся от тестируемого, т.е. удовлетворяющий соотношению [4]:

$$\sum_{n=1}^4 \sum_{m=0}^{n-1} (k_{nm} - k_{nm}^{\text{эксп}})^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Результаты тестового эксперимента приведены в табл. 2. Результаты тестового эксперимента приведены в табл. 2. Как показал компьютерный эксперимент с предлагаемой техникой идентификацией распределений, практическая эффективность разработки оказалась крайне высокой, что позволяет наращивать базу образцовых функций и стимулирует распространение методики на двух и более параметрические распределения.

Таблица 1 - Значения первых десяти коэффициентов  $k_{nm}$

Функция распределения	Коэффициент								
	$k_{20}$	$k_{21}$	$k_{30}$	$k_{31}$	$k_{32}$	$k_{40}$	$k_{41}$	$k_{42}$	$k_{43}$
$\frac{1}{a}$	$\frac{2}{3}\sqrt{3}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{\sqrt[3]{16}}{2}$	$\sqrt{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{2\sqrt[3]{125}}{5}$	$\frac{2\sqrt[3]{50}}{5}$	$\frac{2\sqrt{15}}{5}$	$\frac{8}{5}$
$(-x^2 + a^2) \cdot \frac{3}{2}a$	$\frac{8\sqrt{5}}{15}$	$\frac{64}{45}$	$\frac{\sqrt[3]{64}}{3}$	$\frac{8\sqrt{3}}{9}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{8\sqrt[4]{3 \cdot 35^3}}{105}$	$\frac{8\sqrt[3]{3 \cdot 35^2}}{105}$	$\frac{8\sqrt{21}}{21}$	$\frac{64}{35}$
$\begin{cases} \left(1 - \frac{x}{a}\right) \cdot \frac{1}{a} - \frac{1}{2a}, x < \frac{a}{2} \\ \left(\frac{x}{a^2} - \frac{1}{2a}\right) \cdot 4, x > \frac{a}{2} \end{cases}$	$\frac{\sqrt{24}}{8}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{\sqrt[3]{5 \cdot 16^2}}{8}$	$\frac{\sqrt{40}}{4}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{\sqrt[4]{13 \cdot 48^3}}{24}$	$\frac{\sqrt[3]{13 \cdot 24^2}}{12}$	$\frac{\sqrt{13 \cdot 18}}{9}$	$\frac{26}{15}$
$\begin{cases} \frac{4x}{a^2}, x < \frac{x}{2} \\ \left(\frac{1}{a} - \frac{x}{a^2}\right) \cdot 4, x > \frac{a}{2} \end{cases}$	$\frac{\sqrt{168}}{12}$	$\frac{7}{6}$	$\frac{\sqrt[3]{768}}{8}$	$\frac{\sqrt{24}}{8}$	$\frac{9}{7}$	$\frac{\sqrt[4]{31 \cdot 240^3}}{120}$	$\frac{\sqrt[3]{31 \cdot 120^2}}{120}$	$\frac{\sqrt{31 \cdot 70}}{35}$	$\frac{62}{45}$
$e^{-\frac{x}{a}} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{e}{e-1}$	1,206	1,454	1,351	1,571	1,697	1,461	1,657	1,769	1,844
$(-x^2 + ax) \cdot \frac{6}{a^3}$	$\frac{\sqrt{30}}{5}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{2\sqrt[3]{25}}{5}$	$\frac{2\sqrt{10}}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{2\sqrt[3]{343}}{7}$	$\frac{2\sqrt[3]{98}}{7}$	$\frac{2\sqrt{210}}{21}$	$\frac{10}{7}$
$ax \frac{2}{a^3}$	$\frac{3\sqrt{2}}{4}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{3\sqrt[3]{50}}{10}$	$\frac{3\sqrt{15}}{10}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{3\sqrt[4]{27}}{2}$	$\frac{3\sqrt[3]{4}}{4}$	$\frac{\sqrt{6}}{2}$	$\frac{5}{4}$
$2 \cdot \frac{(-x + a)}{a^2}$	$\frac{\sqrt{6}}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3\sqrt[3]{100}}{10}$	$\frac{3\sqrt{30}}{10}$	$\frac{9}{5}$	$\frac{\sqrt[4]{15^3}}{5}$	$\frac{3\sqrt[3]{25}}{5}$	$\frac{3\sqrt{10}}{5}$	2
$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	1,091	1,189	1,162	1,252	1,319	1,22	1,304	1,165	1,413
$\frac{12}{a^3}x^3 - \frac{12}{a^2}x + \frac{3}{a}$	$\frac{2\sqrt{10}}{5}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{\sqrt[3]{7 \cdot 20^2}}{10}$	$\frac{\sqrt{70}}{5}$	$\frac{7}{4}$	$\frac{2\sqrt[4]{11 \cdot 35^3}}{35}$	$\frac{2\sqrt[3]{22 \cdot 35^2}}{35}$	$\frac{\sqrt{11 \cdot 14}}{7}$	$\frac{88}{49}$

Практически важным результатом, полученным с помощью описанного подхода является определение функции распределения сосновой пыли, образующейся в процессе сверления сосны диаметрами от 1 до 35 мм. Установлено, что образующаяся пыле-стружка состоит из двух фракций – мелкой, не зависящей от диаметра сверла и крупной – зависящей. При этом оказалось, что размеры частиц мелкой фракции подчиняются экспоненциальному распределению:

$$F(x) \approx 1 - \exp[-x/120 \text{ мкм}], \quad (6)$$

а ее доля зависит от диаметра сверла.

Результаты выполненных авторами исследований сводятся к следующему:

- предложена методика идентификации однопараметрических функций распределения на основе интегральных показателей;
- методика прошла всестороннее тестирование и продемонстрировала высокую эффективность;
- с помощью предложенного метода идентифицированы параметры сосновой пыли, образующейся при сверлении.

Таблица 2 - Результаты восстановления неизвестной функции распределения

N	Задано			Определено		Результат
	Вид распределения	a	M	Вид распределения	a	
1	$(-x^2 + a^2) \cdot \frac{3}{2} a$	7,62	106	$(-x^2 + a^2) \cdot \frac{3}{2} a$	6,49	+
2	$ax \frac{2}{a^3}$	314	301	$ax \frac{2}{a^3}$	298	+
3	$\begin{cases} (1 - \frac{x}{a}) \cdot \frac{1}{a} - \frac{1}{2a}, x < \frac{a}{2} \\ (\frac{x}{a^2} - \frac{1}{2a}) \cdot 4, x > \frac{a}{2} \end{cases}$	0,038	276	$\begin{cases} (1 - \frac{x}{a}) \cdot \frac{1}{a} - \frac{1}{2a}, x < \frac{a}{2} \\ (\frac{x}{a^2} - \frac{1}{2a}) \cdot 4, x > \frac{a}{2} \end{cases}$	0,043	+
4	$\frac{1}{a}$	200000	227	$\frac{1}{a}$	179241	+
5	$ax \frac{2}{a^3}$	9.12	201	$ax \frac{2}{a^3}$	9,43	+
6	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	457	90	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	448	+
7	$e^{\frac{-x}{a}} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{e}{e-1}$	0,00073	24	$e^{\frac{-x}{a}} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{e}{e-1}$	0,00086	+
8	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	7,62	216	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	7,94	+
9	$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	6.28	73	$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	5,11	+
10	$\frac{1}{a}$	1242	236	$\frac{1}{a}$	1319	+
11	$\frac{12}{a^3} x^3 - \frac{12}{a^2} x + \frac{3}{a}$	369	242	$\frac{12}{a^3} x^3 - \frac{12}{a^2} x + \frac{3}{a}$	349	+
12	$(-x^2 + ax) \cdot \frac{6}{a^3}$	1,00012	58	$(-x^2 + ax) \cdot \frac{6}{a^3}$	1,131	+
13	$ax \frac{2}{a^3}$	0,343	205	$ax \frac{2}{a^3}$	0,357	+
14	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	17,071	309	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	16,54	+
15	$ax \frac{2}{a^3}$	25	221	$ax \frac{2}{a^3}$	25,86	+
16	$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	936	89	$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	1112	+
17	$\frac{12}{a^3} x^3 - \frac{12}{a^2} x + \frac{3}{a}$	310	49	$\frac{12}{a^3} x^3 - \frac{12}{a^2} x + \frac{3}{a}$	267	+

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

## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СИСТЕМОДИНАМИКИ ТЕХНОСФЕРЫ: ТЕОРИЯ, МОДЕЛИ, ПРАКТИКА

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

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

**Key words:** *System dynamics, technosphere, exponential growth, future development.*

**Введение.** Интенсивные и беспрецедентные процессы компьютеризации на рубеже тысячелетий привели к формированию глобальной информационно-компьютерной инфраструктуры, завершившей интеграцию всех составляющих техносферы в фактически в единую сверхсложную систему, что означает начало качественно нового этапа в её развитии, требующего научного осмысления и нового уровня понимания происходящих в ней процессов с целью обеспечения её максимально эффективной, управляемой и устойчивой дальнейшей эволюции. С начала 1990-х годов глобализация и нарастание интенсивности процессов интеллектуализации техносферы привели к столь стремительному развитию в области компьютеризации, что последующие 2-3 десятилетия могут быть уверенно идентифицированы как информационно-компьютерная революция, характерными признаками которой стали невиданные ранее темпы технологической эволюции и ярко выраженный экспоненциальный прогресс по целому ряду направлений. К середине 2010-х годов, когда глобальная сетевая инфраструктура в основном сформировалась как целостная система и начало отмечаться определенное замедление процессов развития, появилась возможность обобщить и систематизировать основные итоги информационно-компьютерной революции рубежа тысячелетий, выделив основные закономерности, определившие её динамику и позволяющие с достаточной степенью достоверности прогнозировать будущее. Рассматривая информационно-компьютерную революцию как квинтэссенцию и высшую стадию эволюции техносферы, которая таким образом как бы приобретает техногенную нервную систему, выявленные закономерности целесообразно рассматривать как наиболее ярко проявленные, но присущие динамике технического и технологического развития на протяжении всей их истории. Это создаёт предпосылки для формирования именно на текущем этапе такого нового научного направления как системодинамика техносферы, актуальность которого определяется, с одной стороны, невиданным ранее усложнением всей техногенной среды и происходящих в ней процессов, а с другой – явно назревшими необходимостью и возможностями повышения управляемости, эффективности, предсказуемости и надёжности процессов её развития.

В связи с этим разработка теоретических и практических основ системодинамики техносферы в контексте ключевых для неё на текущем этапе закономерностей и перспектив развития информационно-компьютерных технологий является актуальной научно-технической задачей.

**Теоретической и практической базой** для проведения исследований стали работы ведущих отечественных и зарубежных учёных в области системодинамики, системного анализа и системного подхода: Аверин Г. В., Антонов А. В., Блауберг И. В., Богданов А. А., Вентцель Е. С., Волкова В. Н., Громов Ю. Ю., Оптнер С., Перегудов Ф.И., Прангишвили И.В., Тарасенко Ф.П., Темников Ф.Е., Садовский В. Н., О'Коннор,

Дж., Форрестер Дж. и др.; в области сферного подхода, ноосферы и техносферы: Вернадский В. И., Моисеев Н. Н., Субетто А. И., Ферсман А. Е. и др.; в области закономерностей развития, в том числе технологического, в том числе в информационно-компьютерных технологиях: Акаев А. А., Апокин И. А., Брусенцов Н. П., Глазьев С. Ю., Гринин Л.Е., Кондратьев Н. Д., Коротаев А.В., Курцвейл Р., Мартино Дж., Мур Дж., Ройтер А., Пантин В.И., Садовничий В.А., Стахов А. П., Янч Э. и др.; в области кодо-логической эволюции: Белнап Н. Д., Заде Л. А., Зверев Г. Н., Лукасевич Я., Бочвар Д. А., Карпенко А. С. , Клини С. К., и др.; в области компьютерного моделирования: Вашлер Р., Гиллес Е., Петров Ю. П., Цайтц М. и др.

Несмотря на значительный объем и глубину существующих исследований в каждой из указанных научных областей, актуальность темы диссертации определяется тем, что впервые системно, комплексно, конкретно и во взаимосвязи рассматриваются как закономерности развития информационно-компьютерных технологий, так и техносферы в целом. Причём, в отличие от большинства ранее выполненных работ, основное внимание уделяется возможности инженерного использования результатов. В выполненных ранее исследованиях, в том числе авторами, указанными выше, соответствующие вопросы рассматриваются либо сугубо теоретически, либо преимущественно в философских и математических аспектах, довольно оторванных от инженерной практики, либо в основном фрагментарно. В настоящее же время назрела настоятельная необходимость комплексного рассмотрения системной динамики техносферы в целом и в различных её взаимосвязанных проявлениях, в первую очередь, в контексте закономерностей и перспектив развития информационно-компьютерных технологий, интенсивное развитие которых на рубеже и в начале нового тысячелетия, с одной стороны, ещё не получило должного осмысления, а с другой – именно в настоящее время настоятельно требует научного осмысления и обобщения, так как в обозримом будущем будет всё в большей степени влиять на текущее и долговременное технологическое развитие, а через него – и на цивилизационную эволюцию в целом.

**Теоретическую базу системодинамики техносферы** составляют в основном следующие научные положения:

1. **Совокупность взаимосвязанных и взаимозависимых экспоненциальных и периодических закономерностей развития**, позволяющих структурировать и объяснять динамику технического и технологического развития в прошлом и настоящем, а также – достаточно уверенно прогнозировать её на ближайшее и дальнее будущее.

2. **Обоснование ведущей роли информационно-компьютерных технологий в формировании техносферы как целостной сложной системы** и её развитии в будущем, что позволяет закономерности, выявленные применительно к динамике информационно-компьютерных технологий распространять как на техносферу в целом, так и прочие её составляющие.

3. Рассмотрение в качестве основных закономерностей роста в технике, технологиях и техносфере в целом **каскады экспоненциальных кривых** с различными скоростями роста, обозначаемые в зависимости от характера изменений в скоростях роста как **J, JJ-, jJ и Jj-кривые**, которые дополняя традиционные S-кривые позволяют более полно и точно описывать системодинамику процессов развития в техносфере.

4. **«Обобщенный закон Мура»** как система и единая шкала экспоненциальных закономерностей с различными скоростями роста, позволяющий систематизировать, единообразно идентифицировать и обозначать, эффективно проводить сравнительный анализ и осуществлять прогнозирование в пределах десятилетий и более длительных периодов.

5. **«Периодические системы (как аналоги периодической системы элементов) экспоненциальных закономерностей роста»** для таких ключевых характеристик различных классов информационно-компьютерных систем как производительность, объемы различных видов памяти и связность как производительность различных видов цифровой связи.

6. **«Модифицированные циклы Кондратьева»** как основная модель периодических закономерностей, определяющая, в частности, интенсивность и количество процессов экспоненциального развития в техносфере в различные периоды, стабильность и длительность которых с высокой степенью вероятности определяется экзогенными факторами.

7. **«Кодо-логическая эволюция»** как процесс последовательного развития и усложнения логических и вычислительных основ информационно-компьютерных технологий, определяя развитие от прабинарного монокомпьютинга к современному бинарному (двоичному) и будущему постбинарному компьютерингу, первой стадией которого является тетракомпьютинг на базе тетралогии и тетракодов.

8. **«Археомоделирование»** как ранняя (прабинарная) стадия развития компьютерного (вычислительного) моделирования в контексте кодо-логической эволюции.

9. **«Когнитивное компьютерное моделирование»** как дальнейшее развитие идей когнитивной компьютерной графики и концепций графических интерфейсов, предполагающее такую организацию интерфейсных модулей систем компьютерного моделирования, которая позволяет с максимальной эффективностью использовать когнитивные возможности человеческого мозга.

10. **«Универсальные моделирующие среды»** как концепция модульной гибкой организации систем моделирования, позволяющая максимально повысить эффективность их адаптации к конкретным требованиям и условиям применения, освоения пользователями, модификации и модернизации.

11. **«Суперсенсорный компьютеринг»** как среда высоконасыщенных различными сенсорами компьютерных системам различного назначения, которые ввиду многообразия физических и точностных характеристик множества датчиков могут рассматриваться приоритетная область реализации постбинарного кодирования и компьютеринга в целом.

12. **«Постбинарные клеточные автоматы»** как особая разновидность клеточных автоматов, основанная на постбинарном компьютеринге, что позволяет существенно расширить их возможности по моделированию процессов реального мира.

13. **«Постбинарная система поддержки принятия решений»**, позволяющая анализировать, систематизировать и наглядно представлять большое количество противоречивой информации и аргументации, что особенно актуально для ситуаций так называемого когнитивного конфликта.

14. **Концепция и конкретные модели экспоненциальной интеллектуализации техносферы** как органического продолжения экспоненциальной интеллектуализации в процессе универсальной эволюции.

15. **Модели экстраполяции периодических и экспоненциальных закономерностей эволюции на дальнейшее будущее.**

**Формирование и развитие представлений о системной динамике, техносфере и закономерностях развития информационно-компьютерных технологий** может рассматриваться в контексте генезиса и эволюции системных исследований (рисунок 1), концепции техносферы и представлений о закономерностях развития информационно-компьютерных технологий, которые в связи с их

интенсивным развитием на рубеже и в первые десятилетия нового тысячелетия требуют комплексного переосмысления.

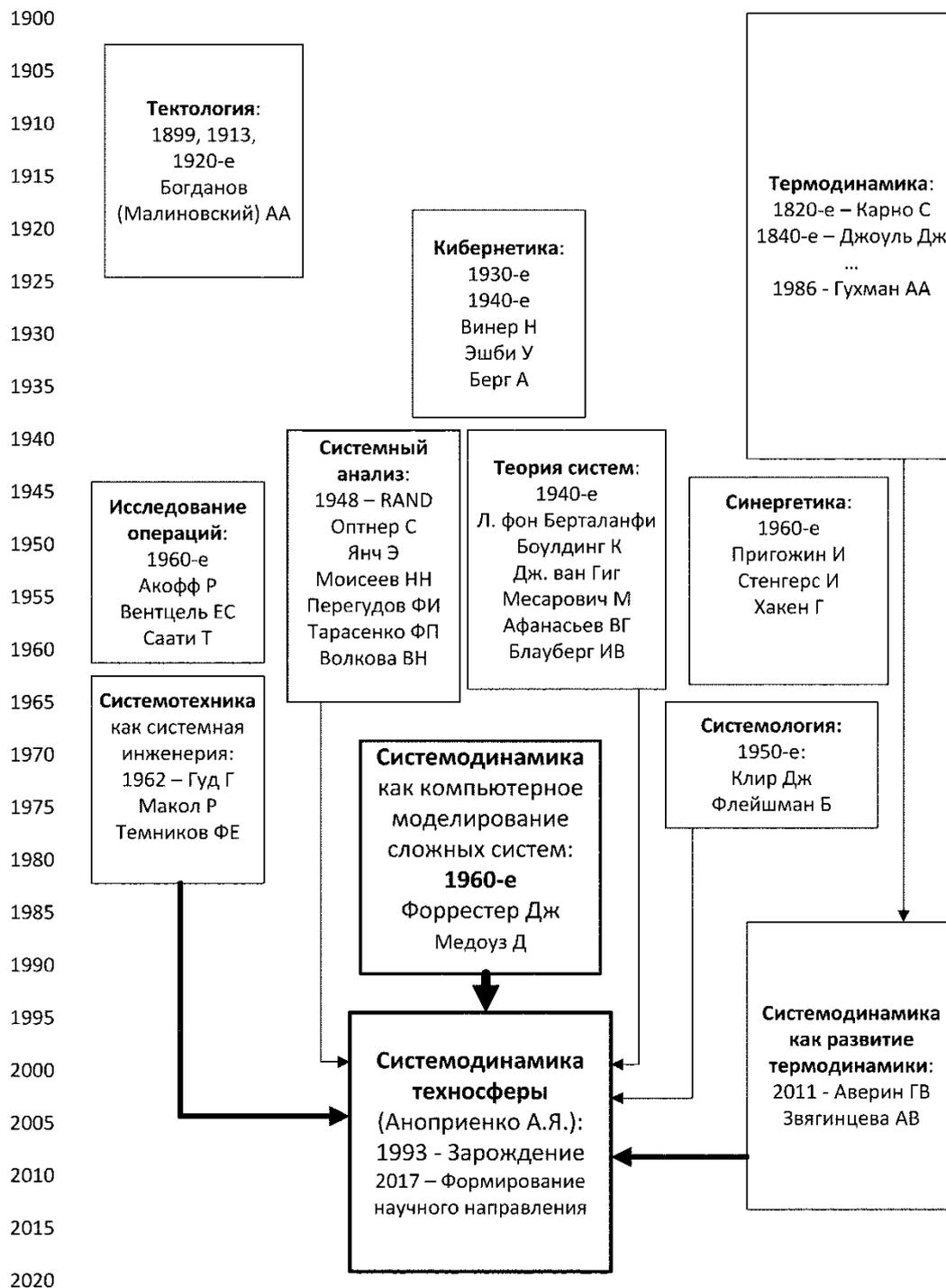


Рис. 1. Формирование и развитие системных исследований предшествующих системодинамике техносферы и оказавших на неё наибольшее влияние

Основной вывод заключается в том, что именно на текущем этапе созрела необходимость и все предпосылки для формирования такого нового научного направления как системодинамика информационно-компьютерных технологий, а на её основе – формирования системодинамики техносферы, которая в современных

условиях как раз благодаря формированию глобальной компьютерной инфраструктуры приобретает такие системные свойства как целостность и эмерджентность. Именно это определяет на современном этапе особую актуальность формирования нового научного

Основные источники	Составные части	Важнейшие цели
Сферные концепции и S-закономерности	Экспоненциальные закономерности	Прогнозирование будущего
Циклы Кондратьева и Чижевского	Периодические закономерности	Понимание настоящего
Теория систем и системный анализ, системная динамика Форрестера	Кодо-логическая эволюция и общесистемные закономерности,	Объяснение прошлого

направления и соответственно – темы данного исследования.

**Основные источники, составные части и важнейшие цели системодинамик и техносферы** как научного направления представлены на рисунке 2. Одной из важнейших составляющих системодинамики техносферы

Рис. 2. Основные источники, составные части и важнейшие цели системодинамики техносферы как научного направления

являются экспоненциальные кривые, которые кроме S-образного их представления, характерного для сред с ограниченными ресурсами (рисунок 3, слева), должны быть дополнены JJ-кривыми (точнее, их каскадами – рисунок 3, справа), происхождение которых напрямую связано с кривыми самообучения.

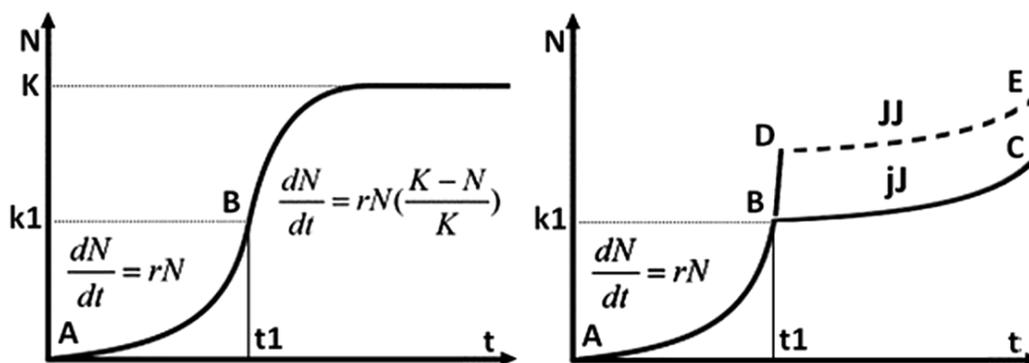


Рис. 3. Типичные кривые, описывающие закономерности роста в технических и прочих системах: слева представлена S-образная (логистическая) кривая, которая при малых значениях N (меньше k1) может рассматриваться как экспоненциальная J-образная кривая; справа – типичная для технических систем альтернатива S-образной кривой, представляющих собой последовательность J-образных кривых

Другой важной составляющей системодинамики техносферы являются периодическая составляющая, концептуальная модель (рисунок 4) которой сформирована на базе модифицированных волн Кондратьева. На рисунке 5 представлена соответствующая математическая модель в аналитическом и графическом виде.

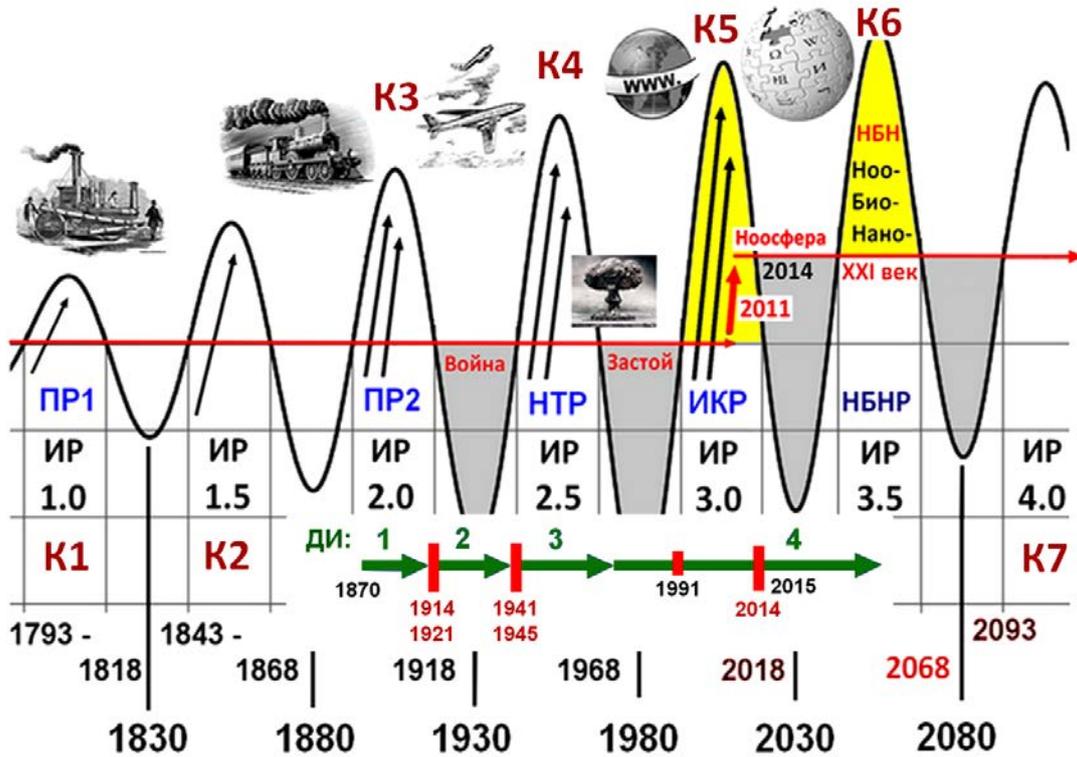


Рис. 4. Концептуальная модель периодической составляющей системодинамики информационных технологий в эпоху промышленных революций

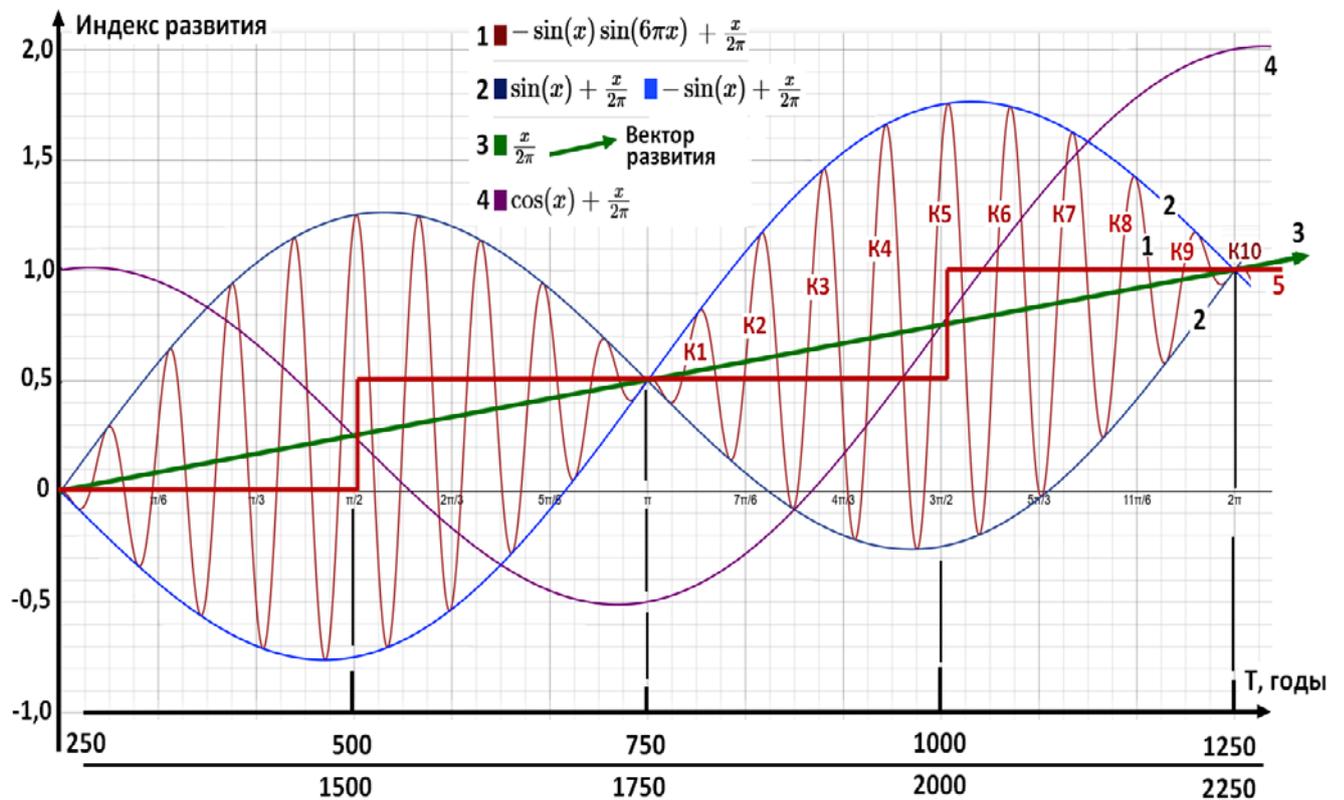


Рис. 5. Математическая модель периодической составляющей системодинамики информационных технологий и техносферы в целом

В процессе выявления и анализа закономерностей, характерных для информационно-компьютерных технологий, в рассмотрение целесообразно ввести термины «ноотехносфера» и «техноносфера», интерпретируемые соответственно как «разумная составляющая» техносферы (в первом случае) и техническое воплощение идеи ноосферы В. И. Вернадского как современной глобальной сетевой инфраструктуры (во втором случае). Детальный анализ всех наблюдаемых и выявляемых закономерностей, начиная с различных вариантов «закона Мура» позволяет сформировать концепцию «обобщенного закона Мура» (таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Коэффициенты роста для шести основных вариантов закона Мура

L	Закономерность	ЕКР							
		Коэффициент роста за указанный период (Y лет)							
		1	2	3	4	5	6	10	20
1	Рост в 10 раз каждые 20 лет	1,122	1,260	1,414	1,587	1,782	2	3,175	10
2	Рост в 10 раз каждые 10 лет	1,260	1,587	2,000	2,520	3,175	4	10	102
3	Закон Мура 1975: удвоение каждые 2 года	1,414	2,000	2,828	4,000	5,657	8	32	1 024
4	Закон Мура 1985: удвоение каждые 1,5 года (ряд Фибоначчи)	1,587	2,520	4,000	6,350	10,079	16	102	10 321
5	Рост в 10 раз каждые 4 года	1,782	3,175	5,657	10,079	17,959	32	323	104 032
6	Закон Мура 1965: ежегодное удвоение	2	4	8	16	32	64	1024	1 048 576

Таблица 2 – Обобщенные обозначения и закономерности роста для различных вариантов экспоненциального роста

X	Базовый период, лет		→					
	Коэффициент роста за базовый период (K)	Базовый период удвоения (D)	Коэффициенты ежегодного роста					
			Лет	Месяцев	JX	JX-200	JX-2000	
1	J1 = L1 10	6,00	72	1,12	1,012	1,0012	...	
2	J2 = L2 = M1 100	3,00	36	1,26	1,023	1,0023	...	
3	J3 = L3 1 000	2,00	24	1,41	1,035	1,0035	...	
4	J4 = L4 = M2 10 000	1,50	18	1,58	1,047	1,0046	...	
5	J5 = L5 100 000	1,17	14	1,78	1,059	1,0058	...	
6	J6 = L6 = M3 1 000 000	1,00	12	2,00	1,072	1,0069	...	
7	J7 10 000 000	0,86	10	2,24	1,084	1,0081	...	
8	J8 100 000 000	0,75	9	2,51	1,096	1,0093	...	
9	J9 1 000 000 000	0,66	8	2,82	1,109	1,0104	...	
10	J10 10 000 000 000	0,60	7	3,16	1,122	1,0116	...	

Развитие компьютерного моделирования как инструментальной составляющей системодинамики техносферы является хорошей иллюстрацией проявления долговременных закономерностей развития. Комплекс проведенных исследований по эволюции технологий моделирования, начиная с прабинарной эпохи, для которой предложено обобщающее название археомоделирование, показан на рисунке 6.

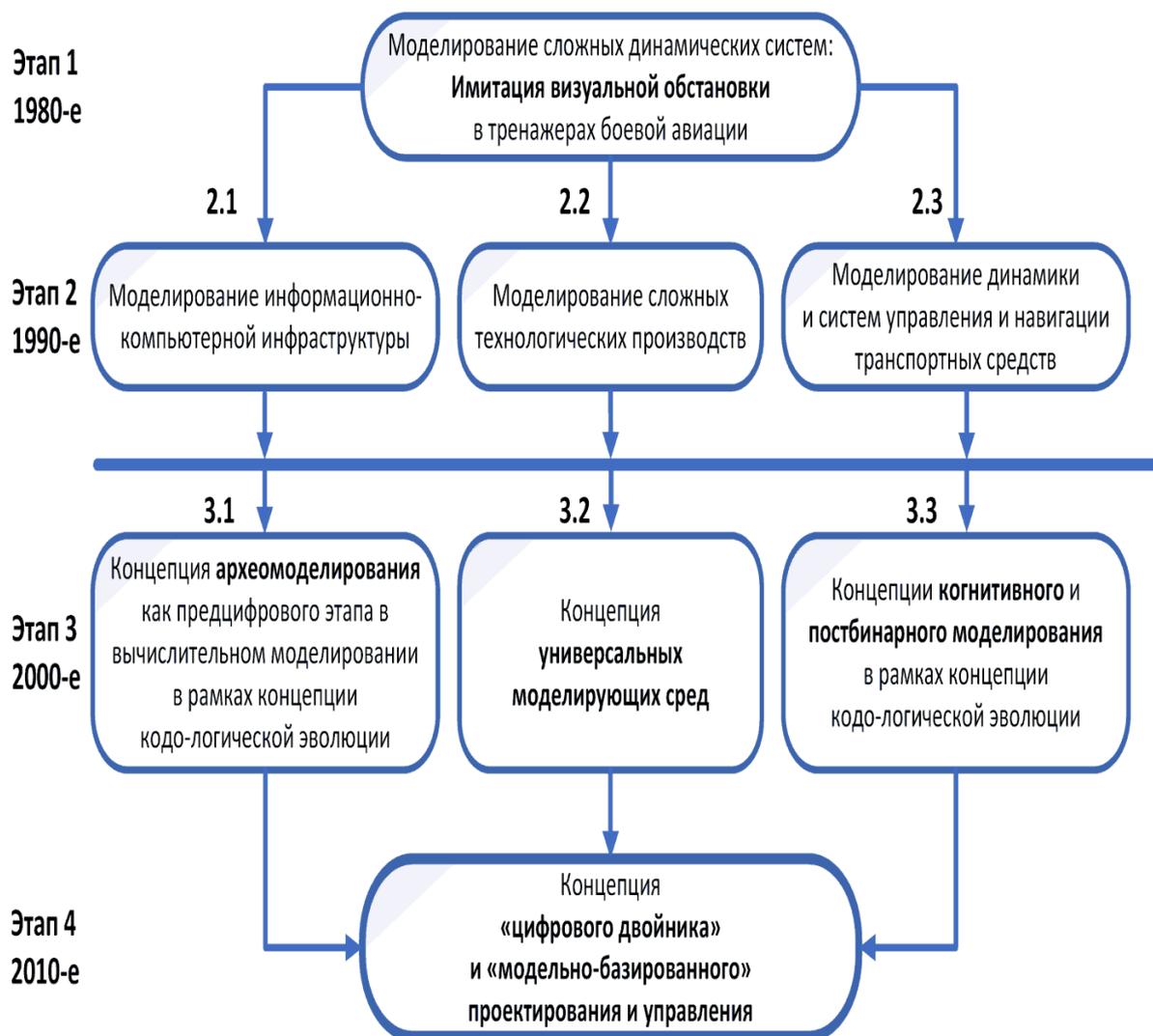


Рис. 6. Динамика, структура и взаимосвязь описанных в данном разделе авторских исследований в области компьютерного моделирования

Развитие и моделирование современных сложных технологических систем может быть хорошо проиллюстрировано на примере производства уксусной кислоты (рисунок 7).

В целом все выявленные закономерности в области вычислительного моделирования и информационно-компьютерной составляющей системодинамики техносферы образуют своего рода иерархию, привязанную к экспоненциальной шкале времени (рисунок 8).

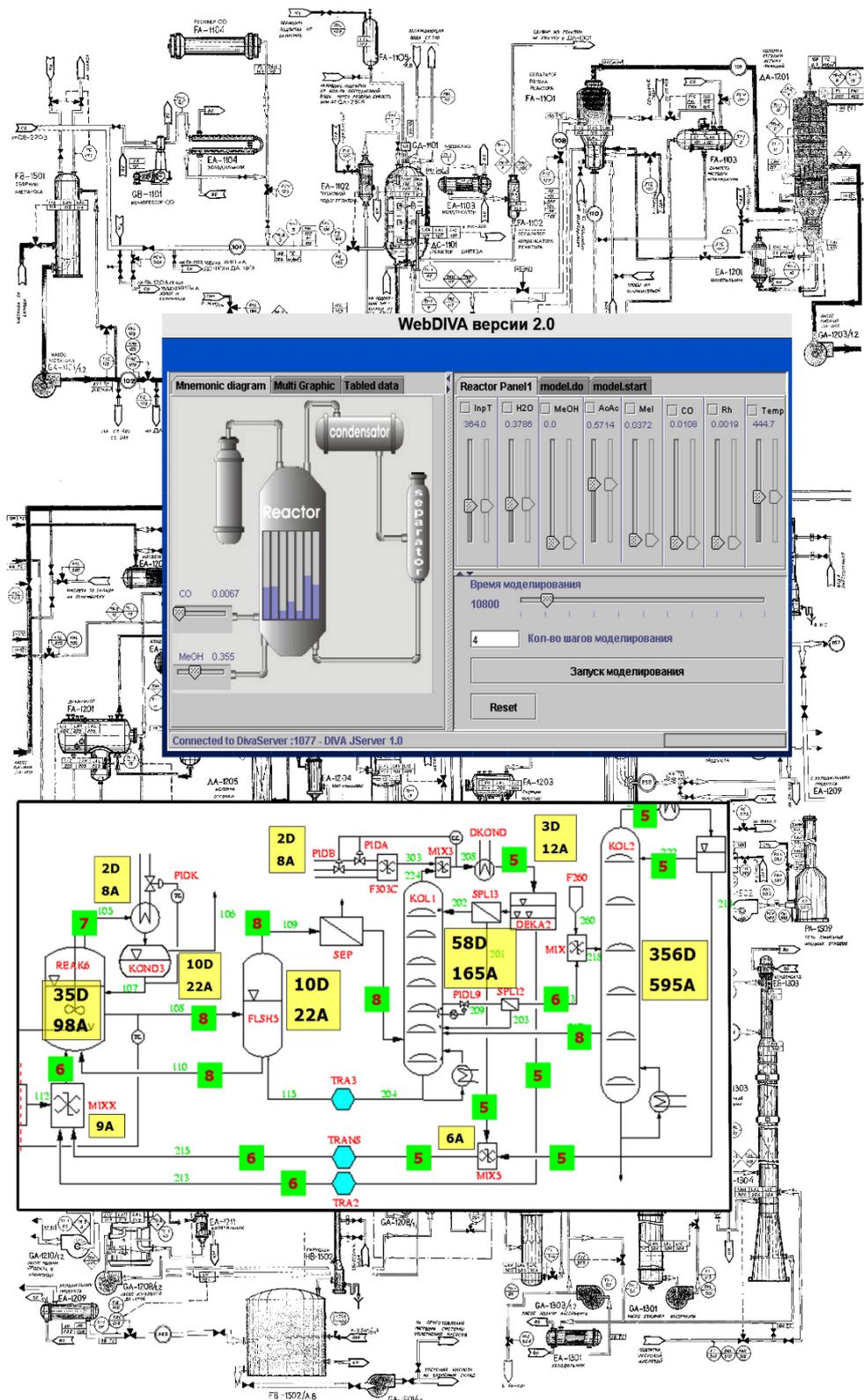


Рис. 7. Структура модели сложного технологического процесса (производства уксусной кислоты) с указанием количества соответствующих алгебраических (A) и дифференциальных (D) уравнений и один из реализованных вариантов интерфейса системы моделирования с возможностью задавать значения параметров процесса в виде интервалов (а в перспективе – с помощью тетракодов) на фоне технологической схемы процесса производства



Рис. 8. Иерархия закономерностей, определяющих долговременное развитие информационно-компьютерных технологий

С практической точки зрения важно отметить, что, например, в динамику периодической составляющей вполне гармонично и естественно вписывается также и динамика развития такого типичного индустриального региона как Донбасс (рисунок 9). Прочие возможности практического применения системодинамики, в том числе для краткосрочного и долгосрочного прогнозирования развития техники и технологий, более детально рассмотрены в работах [1-5].



Рис. 9. Динамика развития такого типичного индустриального региона как Донбасс в контексте периодической составляющей системодинамики техносферы

технологий с целью их систематизации и выявления всех возможностей формирования на их основе целостной системодинамики техносферы как научного направления.

2. Разработаны теоретические основы, позволяющие достаточно эффективно выявить, проанализировать и систематизировать основные

**Заключение.** Таким образом, разработка теоретических основ системодинамики техносферы и комплекса моделей для практического использования позволяют достаточно обоснованно утверждать о формировании нового актуального научного направления.

Основные научные результаты и выводы, полученные в рамках данного направления к настоящему времени, состоят в следующем:

1. Выполнен комплексный анализ формирования и развития исследований и разработок в области системной динамики, техносферы и известных закономерностей развития информационно-компьютерных

закономерности, определяющие системодинамику как информационно-компьютерных технологий, так и техносферы в целом.

3. Выявлены, проанализированы и систематизированы закономерности, определяющие динамику и перспективу развития информационно-компьютерных технологий, как наиболее динамичную и интеллектуалоёмкую составляющую техносферы.

4. На основе результатов, полученных применительно к информационно-компьютерным технологиям, выявлены, проанализированы и систематизированы основные периодические и экспоненциальные составляющие в развитии и прогнозировании как техносферы в целом, так и отдельных её наиболее активно развивающихся традиционных отраслей: автомобилестроения, авиации, космонавтики.

5. Выявлены, проанализированы и систематизированы долгосрочные закономерности, определяющие эволюцию информационно-компьютерных и прочих технологий в исторической перспективе и ретроспективе, охватывающей столетние и более длительные интервалы времени.

6. Проанализированы и систематизированы закономерности и тенденции развития компьютерного моделирования как инструментальной составляющей системодинамики техносферы в процессе его исторического развития с выявлением текущих тенденций и наиболее характерных примеров.

7. Определены закономерности и тенденции развития и моделирование современных сложных технологических систем.

8. Исследованы и систематизированы процессы интеллектуализации техносферы в контексте универсальной эволюции как её органической части, подчиняющейся общим закономерностям.

9. Разработаны примеры использования выявленных закономерностей системодинамики техносферы в технологическом анализе и прогнозировании в ближней и дальней перспективе и ретроспективе.

**Список литературы:** 1. Аноприенко А.Я. Системодинамика техносферы: закономерности и перспективы научно-технологического развития в контексте информационно-компьютерной революции // Доклад на XXV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» в г. Севастополе 11 сентября 2018 г. 40 слайдов. 2. Аноприенко А.Я. Интеллектуализация техносферы в контексте универсальной эволюции // «Машиностроение и техносфера XXI века». Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. С. 482-486. 3. Аноприенко А.Я. Системодинамика техносферы как новое научное направление в понимании прошлого и прогнозировании будущего // «Машиностроение и техносфера XXI века». Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. С. 18-28. 4. Аноприенко А.Я. Будущее техносферы: ближние и дальние рубежи и прогнозы // «Машиностроение и техносфера XXI века». Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-19 сентября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. С. 46-55. 5. Аноприенко А.Я. Системодинамика информационных технологий в контексте периодических, экспоненциальных и прочих закономерностей // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях» (СИТОНИ-2021), Донецк, 23 ноября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. С. 8-21.

# К ВОПРОСУ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ПРИ РУЖЕЙНОМ СВЕРЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Баранов А. В., Карачев А. В., Бахриев Ф. А., Воронцов А. А.

(РГАТУ имени П. А. Соловьёва, г. Рыбинск, Россия)

Тел. +79108141404; E-mail: alexbar57@mail.ru

**Abstract:** The article describes the main features of processing with a single-edged axial tool, highlights the configuration features of the cutting insert, shows the distribution of cutting forces, and also presents formulas for calculating the cutting components and cutting temperature.

**Key words:** hole making, single-edged axial tool, gun drills, cutting process, CAD of cutting conditions, cutting temperature

Ружейные свёрла будут находить в ближайшее время в машиностроении всё большее применение [1], прежде всего для обработки деталей с большим числом отверстий, что особенно актуально для транспортных и космических систем, военной техники, энергетических установок, ядерной энергетики: сверление глубоких ( $l/d > 10$ ) и точных отверстий (точность размеров  $IT$  6-8, отклонение от круглости  $E_{FK} < 2$  мкм, шероховатость  $Ra$  0,08...1,25 мкм, увод оси 0,01...0,03 мм/100 мм) малых ( $d = 1,0...12,0$  мм) диаметров. Схематично ружейное сверло можно представить в виде (рис. 1).

Ружейные свёрла для отверстий малого диаметра обладают малой жесткостью на изгиб и кручение. В связи с этим приходится работать с малыми подачами. Так, при сверлении глубоких отверстий диаметром 7 – 30 мм в заготовках из легированных и конструкционных сталей рабочие подачи не превышают 0,05—0,06 мм/об. При работе с такими малыми подачами срезание стружки происходит в неблагоприятных условиях, так как толщина среза равна или меньше радиуса округления режущего лезвия, поэтому при расчете сил, действующих на лезвие инструмента, важно учитывать явление подмятия металла [2].

На рис. 2 представлена схема, поясняющая процесс упругопластического подмятия металла при резании. Участок режущей кромки  $AA_1$  будет сминать слой обрабатываемого материала высотой  $h$ . В результате этого смятия металл упругопластически деформируется, а режущая кромка испытывает дополнительную силу  $P^S$ , действующую со стороны обрабатываемого материала.

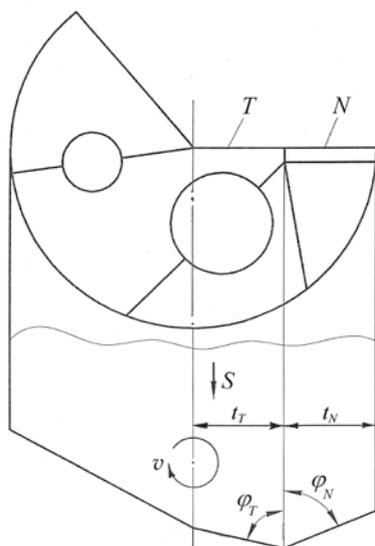


Рис. 1. Схематичное изображение ружейного сверла

Известно, что касательные напряжения на участке подмятия  $AA_1$  распределены равномерно и равны  $\tau_p$  [3]. С учетом этого величина тангенциальной составляющей силы подмятия определится выражением

$$P_Z^S = \tau_p b_N (AA_1) = \tau_p b_N \cdot \rho_1 \Psi_1, \quad (1)$$

где  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па [4],  $b_N$  – длина рабочих участков боковой режущей кромки режущего лезвия, м.

Получим выражение для расчета угла  $\Psi_1$  (рис. 1)

$$\cos \Psi_1 = \frac{\rho_1 - h}{\rho_1} = 1 - \frac{h}{\rho_1}. \quad (2)$$

Для расчета толщины упругопластически подминаемого слоя  $h$  получена [4] следующая зависимость

$$h = \rho_1 \cdot \frac{2B^2}{1+B^2} = 2 \cdot \rho_1 \cdot \sin^2 \beta_1. \quad (3)$$

Безразмерный комплекс  $B = \operatorname{tg} \beta_1$  определяется аналитически;  $\beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига, рад. (рис. 2).

$$B = \frac{0,856 \operatorname{Re}^{0,22} D^{0,185}}{F^{0,22} E^{0,09} (1 - \sin \gamma)^{0,67}}, \quad (4)$$

где  $\operatorname{Re} = \frac{va_{1N}}{a}$ ;  $D = \frac{a_{1N}}{b_{1N}}$ ;  $F = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \varepsilon$ ;  $E = \frac{\rho_1}{a_{1N}}$  – безразмерные комплексы;  $v$  – скорость

резания, м/с;  $a_{1N}$  и  $b_{1N}$  – соответственно, толщина и ширина среза для боковой кромки режущего лезвия, м;  $a = \lambda / (ср)$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К);  $ср$  – удельная объёмная теплоёмкость обрабатываемого материала, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\alpha_T$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности инструментального материала, Вт/(м·К);  $\beta$  и  $\varepsilon$  – соответственно, углы заострения и при вершине зуба в плане, рад.,  $\rho_1$  – радиус округления режущей кромки, м;  $\gamma$  – передний угол лезвия  $N$  режущего элемента (РЭ), рад. (рис. 1).

Тогда

$$\cos \psi_1 = 1 - 2 \cdot \sin^2 \beta_1 \approx 1 - B^{1,35}. \quad (5)$$

Выражение (1) с учетом (5) примет вид

$$P_Z^S = \tau_p b \rho_1 \left[ \arccos(1 - B^{1,35}) \right].$$

После упрощения получаем окончательно

$$P_Z^S = 1,53 \tau_p b \rho_1 B^{0,73}. \quad (6)$$

Выражение для составляющей  $P_Y^S$  имеет вид

$$P_Y^S = \frac{P_Z^S}{\mu_3}, \quad (7)$$

где  $\mu_3$  – средний коэффициент трения на задней поверхности [2].

На рис. 2:  $\Psi_c$  – угол наклона касательной к границе наружной поверхности. В общем случае, как было установлено Н.Н. Зоревым, зона стружкообразования является объёмной и заключена в границах  $AB_0B_1A$ . С увеличением скорости резания ширина пластической зоны  $B_0B_1$  существенно уменьшается, становясь пренебрежимо малой, а угол  $\Psi_c$  стремится

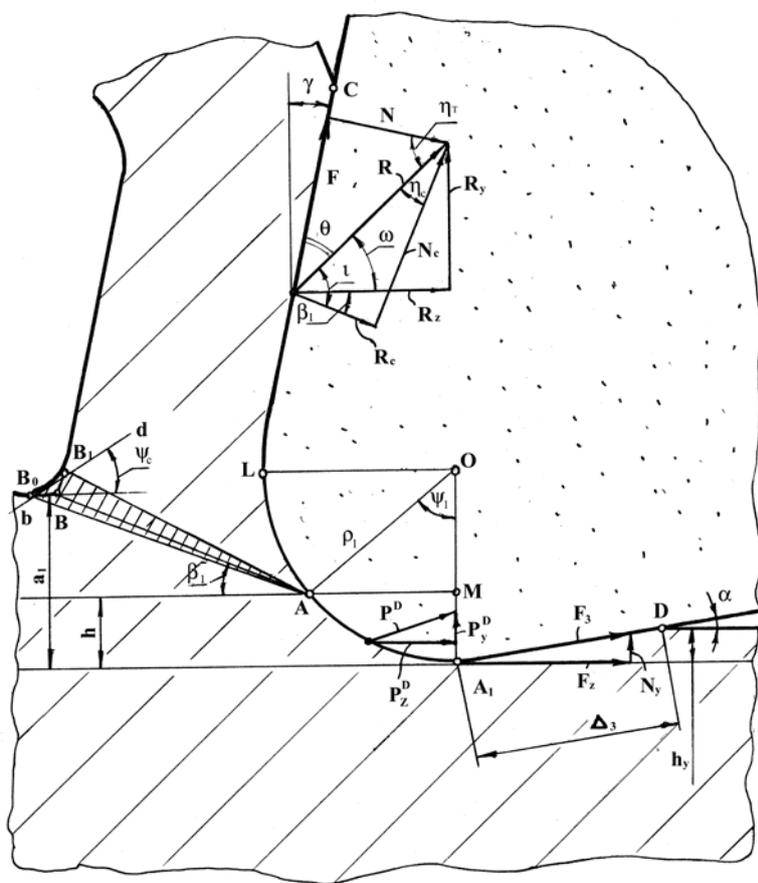


Рис. 2. Схема к расчёту составляющих силы резания

к нулю. В результате при работе с оптимальной по размерной стойкости инструмента скоростью резания  $v_0$  можно рассматривать лишь условную плоскость сдвига АВ.

С учётом составляющих силы подмятия (6) и (8), а также с учётом сил, действующих на передней и задней поверхностях режущего лезвия  $N$ , с помощью известных расчётных схем [2], были получены окончательные выражения для расчёта  $P_{zN}$  и  $P_{yN}$  (все входящие параметры определялись для кромки  $N$ ):

В результате можно записать следующее выражение для  $P_Y^S$

$$P_Y^S = \frac{1,53}{\mu_3} \tau_p b \rho_1 B^{0,73}. \quad (8)$$

$$P_{zN} = \tau_p a_1 b_1 \left\{ \frac{2}{B} + 1,53 \frac{b \rho_1}{b_1 a_1} B^{0,73} + 0,5 \frac{b \rho_1}{b_1 a_1} \cos \alpha \times \left[ \frac{B^{2,35}}{(\cos \gamma + B \sin \gamma) \sin \alpha} + \frac{\delta_u}{\rho_1} \right] \right\}; \quad (9)$$

$$P_{yN} = \tau_p a_1 b_1 \left\{ \frac{1}{B^2} - 1 + \frac{1,53 b \rho_1}{\mu_3 b_1 a_1} B^{0,73} + \frac{0,5b}{b_1} \times \right. \\ \left. \times \frac{\rho_1 \cos \alpha}{a_1 \mu_3} \left[ \frac{B^{2,35}}{(\cos \gamma + B \sin \gamma) \sin \alpha} + \frac{\delta_u}{\rho_1} \right] \right\} \sin \eta, \quad (10)$$

где  $\eta$  – угол схода стружки, рад;  $\delta_u$  – фаска износа по задней поверхности боковой режущей кромки, м.

Выражение для угла схода стружки, как было установлено Н.Н. Зоревым, имеет вид

$$\eta = \eta_0 - 0,5 \arctg(\operatorname{tg} \lambda \cos \eta_0 + \operatorname{tg} \gamma \sin \eta_0),$$

$\lambda$  – угол наклона режущей кромки, рад.,  $\eta_0$  – угол схода стружки при  $\gamma = \lambda = 0$  рад.

$$\eta_0 = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{t}{b_1}\right).$$

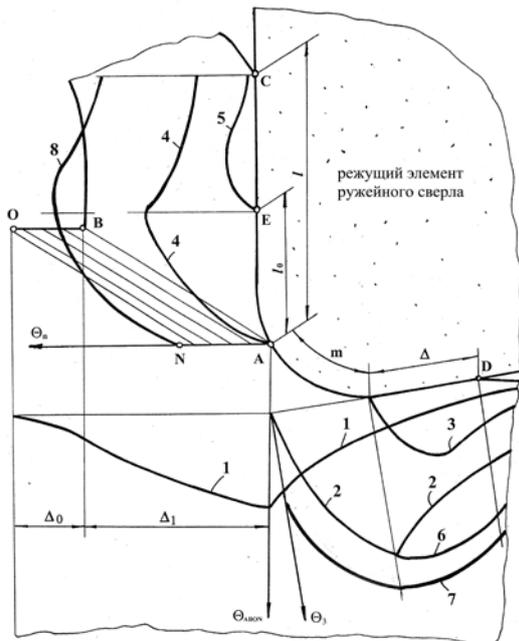


Рис. 3. Схема распределения ТП в зоне резания РЭ ружейного сверла

Выражения (9) и (10) позволяют проводить расчёт составляющих силы резания при работе ружейных свёрл.

Изучение температурных полей в зоне резания проводилось методом источников тепла. При этом рассматривалось несколько источников тепла: в зоне первичных пластических деформаций – результат предварительного деформирования обрабатываемого материала; на передней и задней контактных площадках зуба – как следствие работы сил трения и пластических деформаций.

Объединяя полученные результаты, можно изобразить полную картину распределения температурных полей в зоне резания (рис. 3). На нём: 1 – ТП от действующего в зоне первичных пластических деформаций объёмного источника тепла АВОН; 2 – ТП от радиусного участка

$m$  задней поверхности РЭ; 3 – ТП от контактной площадки  $\Delta$  задней поверхности; 4 – ТП от участка пластического контакта  $l_0$  передней поверхности; 5 – ТП от участка упругого контакта  $(l - l_0)$  передней поверхности; 6 – суммарное ТП от участков  $m$  и  $\Delta$ ; 7 – суммарное ТП на задней контактной площадке с учетом температуры от источника АВОН; 8 – суммарное ТП на передней контактной площадке  $l$  с учетом температуры  $\theta_A$  – максимальной температуры в зоне первичных пластических деформаций объемного источника тепла АВОН (в точке  $A$ , т.е. на режущей кромке).

Изучение ТП позволяет получить теоретическое уравнение для определения среднеинтегральной контактной температуры резания для РЭ ружейного сверла. На основе изучения механических и тепловых явлений, происходящих в зоне резания при данном методе обработки отверстий, появляется возможность выйти на составление уравнения баланса механической и тепловой энергии, необходимого для оптимизации процесса ружейного сверления.

Учитывая полученные выражения, а также для соотношений рабочих участков зоны резания, после некоторых преобразований получаем следующую зависимость для температуры резания.

$$\theta = \frac{2,5\tau_p Pe^{0,45} E^{0,10} \Pi^{0,04} T^{0,25} \left(1 + \frac{\delta_{II}}{\rho_1}\right)^{0,06} \operatorname{erf} \sqrt{0,64 Pe^{0,92} B}}{c_p \cdot B^{0,62} F^{0,11} D^{0,05} (1 - \sin \gamma)^{0,23} \sin^{0,03} \alpha} \times \exp \left[ -\frac{Bi}{Pe} \right] \cdot \operatorname{erf} \left[ 0,25 + \sqrt{Pe} Bi \left( 1 - \cos \varphi_N + \frac{a_{1N}}{t_N} \right) \right] \quad (11)$$

где  $\Pi = \frac{a_{1N}}{2\pi d}$ ;  $T = \frac{t_N}{t_T}$ ;  $Bi = \frac{\alpha_T a_{1N}}{\lambda}$  – безразмерные комплексы;  $d$  – диаметр инструмента, м;  $\alpha_T$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $t_N$  и  $t_T$  – соответственно, глубина резания лезвиями  $N$  и  $T$  (рис. 1) РЭ.

Приведенные в статье выражения учитывают влияние механических и теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, величину подачи и диаметр отверстия, геометрические параметры инструмента и сечения среза, допустимый износ РЭ за период стойкости. Появляется возможность научно обоснованно решать вопросы создания САПР режимов резания [5] уже на этапе проектирования операции ружейного сверления.

**Список литературы:** 1. Баранов А.В., Карачев А.В. Определение технологической наследственности при обработке отверстий в деталях газотурбинных двигателей // Вестник машиностроения. – 2021. № 11. С. 37-42. 2. Баранов А.В. Оптимизация процессов лезвийной обработки отверстий. Рыбинск: РГАТА, 2005. – 124 с. 3. Баранов А. В. Оптимизация лезвийной обработки отверстий на основе энергетических критериев // Вестник машиностроения. 2011. №3. С. 47-50. 4. Силин С.С., Рыкунов А.Н., Баранов А.В. Определение толщины упругопластически подминаемого слоя при резании металлов // Высокие технологии в машиностроении и приборостроении: Сб. науч. трудов. Вып. 2 / РГАТА. – Рыбинск, 1995. С. 71-73. 5. Баранов А. В. Обеспечение высокоэффективной обработки отверстий // Вестник машиностроения. 2008. №7. С. 42-45.

## ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАРЬЕРНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА

Безкорвайный П. Г., Шестаков В. С., Бахарева В.И.

(УГГУ, г. Екатеринбург, Россия, КГТУ, г. Караганда, Казахстан)

Тел. +7 922 1383323 E-mail: shestakov.v.s@mail.ru

**Abstract:** *In hydraulic excavators with a traditional scheme of working equipment, the boom is acted upon by the forces from the hydraulic cylinders for turning the boom and turning the handle [1, 2]. The presence of efforts from the hydraulic cylinders for turning the boom leads to an increased cross section of the boom and, accordingly, to an increase in its mass. We have carried out research to find a possible reduction in the mass of the boom, which will lead to the possibility of using a larger bucket without increasing the mass of the counterweight, the power of the slewing drive and without reducing the cycle time.*

**Keywords:** *hydraulic excavator, digging, working equipment, boom, handle, bucket, pressure rod, pressure mechanism, hydraulic cylinder, force.*

Основные параметры экскаватора [1] – производительность, энергопотребление, металлоемкость существенным образом зависят от исполнения рабочего оборудования. Производительность экскаватора определяется вместимостью ковша и временем цикла. Большую долю во времени цикла занимает продолжительность поворотного движения, которое, в свою очередь, зависит от мощности привода поворотного механизма и момента инерции поворотной части экскаватора.

Снизить продолжительность поворота можно двумя способами: увеличением мощности привода, но это потребует увеличения энергопотребления, снижением момента инерции поворотной части, который существенным образом зависит от массы рабочего оборудования. При снижении массы, например стрелы, уменьшается опрокидывающий момент, можно уменьшить массу противовеса, что приведет к уменьшению момента инерции.

Для снижения массы стрелы нами разработана схема рабочего оборудования [2], в которой стрела перемещается напорной штангой при исключении гидроцилиндров поворота стрелы. Такая схема исключит изгибающий момент от гидроцилиндров поворота стрелы, что позволит уменьшить сечение стрелы и, соответственно, массу стрелы, и момент инерции. Напорный механизм выполняется зубчато-реечным или гидроцилиндром, располагается на надстройке вблизи оси вращения, момент инерции от него ввиду малого радиуса будет небольшим. Таким образом, применение рабочего оборудования по предлагаемой схеме позволит уменьшить суммарный момент инерции поворотной части.

Результат этого положительного явления можно использовать:

- для снижения времени поворотного движения при неизменной вместимости ковша и мощности привода поворота;
- для увеличения вместимости ковша при неизменной мощности привода поворота и времени поворотного движения.

Второе направление более предпочтительно ввиду явной очевидности повышения производительности за счет вместимости ковша.

Разработанная нами схема рабочего оборудования, обеспечивающая возможность увеличения вместимости ковша показана на рис. 1 [2].

В отличие от известной схемы, предлагаемое рабочее оборудование выполнено с напорной штангой, с седловым подшипником и напорным механизмом, установленными на двуногой стойке. Напорная штанга шарнирно соединена с верхней частью стрелы и имеет возможность совершать выдвижение и поворот относительно оси седлового

подшипника.

Рабочее оборудование экскаватора включает стрелу 1, рукоять 2, напорную штангу 3, установленную посредством седлового подшипника 4 на двуногой стойке и шарнирно соединенную с верхней частью стрелы 1, ковш 5, гидроцилиндры поворота рукояти 6 и поворота ковша 7.

Рабочее оборудование экскаватора работает следующим образом. Копание производится ковшом 5 при повороте его гидроцилиндром поворота ковша 7 относительно оси крепления к рукояти. Рукоять при копании поворотом ковша удерживается в неподвижном положении гидроцилиндром поворота рукояти 6, а стрела 1 удерживается напорной штангой 3. Нагруженность стрелы 1 определяется составляющей равнодействующей сил, действующих в шарнире «стрела-рукоять», направленной на сжатие по оси стрелы, а также усилиями от гидроцилиндров поворота рукояти. Так как в предлагаемой схеме исключены гидроцилиндры поворота стрелы, то происходит соответствующее уменьшение нагрузок на стрелу. В результате за счет снижения нагруженности стрелы достигается уменьшение массы.

Подбор сечений стрелы и рукояти осуществляется по условиям прочности по действующим усилиям, которые определяются координатами элементов рабочего оборудования в пределах рабочей зоны и параметрами гидропривода. Для построения рабочей зоны исходными данными служат линейные размеры элементов рабочего оборудования, размеры крепления и ход гидроцилиндров поворота рукояти ковша, положение седлового подшипника и ход выдвижения напорной штанги. Для расчета усилий используются силы тяжести элементов рабочего оборудования и усилия сопротивления копанью.

Вычисление координат рабочей зоны и элементов рабочего оборудования, определение усилий в элементах рабочего оборудования для традиционной схемы рассмотрено в [3]. Все приведенные в [3] выражения применимы и для предлагаемой схемы, но вместо усилий на штоках гидроцилиндров стрелы должны определяться усилия в штанге по условию равновесия относительно шарнира A:

$$F_{ш} = \frac{G_c(x_{цтс} - x_A) + G_p(x_{цтр} - x_A) + G_k(x_{цтк} - x_A) + G_{ш} \left( \frac{x_T + x_B}{2} - x_A \right) + G_{цп} \left( \frac{x_F + x_P}{2} - x_A \right) + G_{цк} \left( \frac{x_R + x_D}{2} - x_A \right) + P_y(x_k - x_A) + P_x(y_k - y_A)}{L_{AB} \sin \angle_{ТВА}}$$

где  $P_x = -P_{01} \cos \psi - P_{02} \sin \psi$  - проекция на ось  $x$  усилия сопротивления копанью;

$P_y = -P_{01} \sin \psi + P_{02} \cos \psi$  - проекция на ось  $y$  усилия сопротивления копанью.

Для определения ориентировочных значений сечений, а по ним массы стрелы и рукояти на этапе эскизного проектирования можно использовать известное условие прочности

$$\sigma_p = \frac{M_{изг}}{W} + \frac{F_{сж}}{S_c} \leq [\sigma],$$

где  $M_{изг}$  – изгибающий момент в сечении;  $F_{сж}$  – усилие сжатия в сечении;  $W$  – момент сопротивления в точке действия изгибающего момента;  $S_c$  – площадь сечения стрелы;  $[\sigma]$  – допустимое напряжение.

Сечения у стрелы и рукояти прямоугольные, свариваются из листов, определение  $W$  и  $S_c$  не вызывает затруднений. Для стрелы и рукояти изгибающий момент и сжимающее усилие меняется по длине, поэтому профиль в вертикальной плоскости у них пе-

ременный, определяемый по условию достижения минимальной массы.

Определение массы стрелы, момента инерции поворотной части, значения возможного увеличения объема ковша может быть выполнено следующим образом. По рассмотренному алгоритму [3] выполняются расчеты усилий в пределах рабочей зоны, и по наиболее нагруженному варианту подбирается сечение стрелы, определяется масса, опрокидывающий момент и момент инерции относительно оси вращения стрелы. Полученные значения сравниваются с соответствующими параметрами базовой модели экскаватора, и определяется, на какую величину может быть увеличена вместимость ковша?

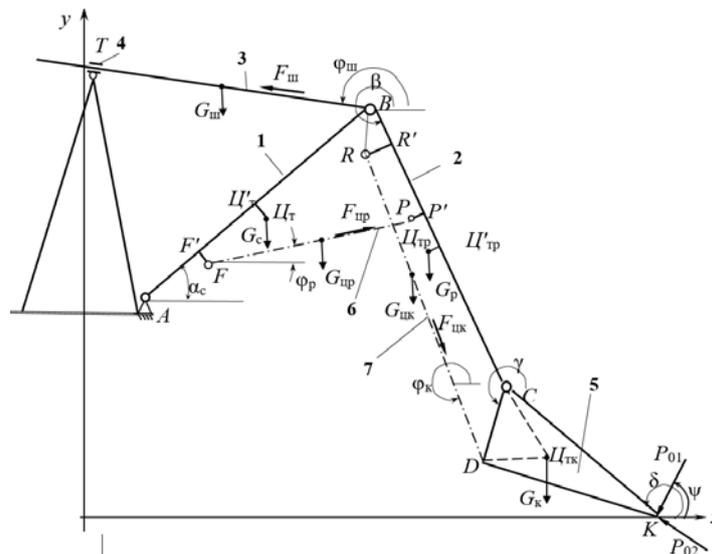


Рис. 1. Схема рабочего оборудования с напорной штангой

На этапе рабочего проектирования проводятся исследования напряженно-деформированного состояния с использованием соответствующих компьютерных систем. В процессе таких исследований проверяется возможность уменьшения массы не только стрелы, но и рукояти и ковша по условиям исключения излишних запасов прочности.

Выполненными расчетами определено, что масса стрелы может быть уменьшена для экскаватора с ковшом  $12 \text{ м}^3$  на 15 %, возможно также уменьшение массы рукояти и ковша в результате более точных расчетов. За счет уменьшения масс возможно увеличение объема ковша примерно на 10 % и, соответственно, производительности.

**Список литературы:** 1. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Проектирование карьерных экскаваторов. М.: Инновационное машиностроение. – 2017. – 228 с. 2. Безкоровайный П.Г. Комиссаров А.П., Шестаков В.С. Рабочее оборудование экскаватора // Патент на изобретение № RU 2 772 037 C1 E02F 3/30 (2006.01)// Патентообладатель: ФГБОУ «Уральский государственный горный университет». Заявка № 2021122144, дата регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 16.05.2021, опубл. 16.05.2022 Бюл. № 14. 4. Безкоровайный, П. Г. Оптимизация рабочего оборудования гидравлического экскаватора / П. Г. Безкоровайный, В. С. Шестаков, В. И. Нестеров // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 6(158). – С. 3-8. – DOI 10.26730/1816-4528-2021-6-3-8. – EDN EIVNEV.

## ВОПРОСЫ АНАЛИЗА, СИНТЕЗА, МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Борзов Д.Б., Кулагина Е.С. (ЮЗГУ, г. Курск, Россия)  
Тел./Факс: +7(4712)22-26-65; E-mail: vt.swsu@yandex.ru

**Annotation:** *The article presents the definition of a complex technical system, its properties, indicators, and also discusses the issues of analysis, synthesis, modeling and calculations of complex technical systems. The efficiency of mathematical modeling in the design of complex technical systems is considered.*

**Keywords:** *complex technical system, property, system, quality criterion, mathematical modeling, synthesis, model, characteristic.*

Сложная техническая система (СТС) – техническая система (объект), представляющая собой совокупность взаимодействующих, функционально самостоятельных подсистем, предназначенных для достижения общей или конкретной цели, в том числе технических устройств с измерительными функциями. Система обладает определенными свойствами:

- целенаправленность;
- использование информационной модели для управления системы;
- многокомпонентность;
- интегративность.

На основе этого проектирование системы сводится к построению ее сложной модели [1]. Предполагается, что компоненты системы могут рассматриваться как отдельные подсистемы, в свою очередь и сама система может, является компонентом системы более высокого порядка. Проект системы состоит из частных, взаимосвязанных, взаимообусловленных моделей, отображает значительное количество параметров и связей между ними. Проект представляет собой большую сложную модель, отражающую все свойства будущей реальной системы, а также ряд зависимостей между целями проектирования, возможностями их достижения, окружающей средой и ресурсами. Любая сложная техническая система соответствует ряду критериев (показателей).

База знаний совокупностей показателей должна состоять как из общих, так и специальных (предметно-ориентированных). В настоящее время используют следующие классификации показателей:

- показатели функционирования;
- показатели надежности;
- показатели технологичности;
- показатели стандартизации и унификации;
- патентно-правовые показатели;
- эргономические показатели;
- эстетические показатели;
- экономические показатели[2].

Чтобы произвести выбор оптимального варианта, надо иметь несколько версий реализации системы. Критерии качества системы должны давать количественную оценку. Интересующая характеристика системы может определяться любыми способами, но предпочтение отдается методу, требующему простых измерений и легкой интерпретации результатов. Структурная и параметрическая идентификация с корректировкой характеристик системы при обязательном учете экспериментальных данных, должны осуществляться с требуемой точностью моделирования характеристик. Методика идентификации должна быть увязана с перечнем рассматриваемых свойств систе-

мы, должен быть разработан перечень допустимых отклонений характеристик модели от характеристик разрабатываемого объекта и методика корректировки характеристик частных моделей (модулей) для устранения указанных отклонений.

Как сформулировать единую цель, если критериев много? Это одна из основных проблем при проектировании сложных технических систем. Так как одновременное соответствие всем критериям невозможно в принципе, возможен лишь некоторый компромисс в сочетании требуемых качеств.

Для достижения этого компромисса обычно используют математическое моделирование с имитацией процессов функционирования системы. Разработка математических моделей начинается с анализа функциональных характеристик. При построении математических моделей сложных технических систем эффективным оказывается их последовательное разделение на подсистемы с сохранением связей между выявленными блоками. Процедура декомпозиции осуществляется до получения таких подсистем, которые в условиях рассматриваемой задачи будут признаны достаточно простыми и удобными для непосредственного математического описания.

Математическое моделирование позволяет посредством математических символов и зависимостей составить описание функционирования каждого элемента системы в окружающей внешней среде, определить выходные параметры и характеристики, получить оценку показателей эффективности и качества, осуществить поиск оптимальной структуры и параметров блоков. Применение математического моделирования при проектировании в большинстве случаев позволяет значительно сократить объемы испытаний, обеспечить создание технических объектов с высокими показателями эффективности и качества [1, 3]. Эффективность математического моделирования при синтезе сложных систем определяется степенью изученности взаимодействий между элементами и подсистемами. Так как каждая из подсистем выполняет в системе определенную функцию, но помимо этого ещё и участвует в общем функционировании. В сложной технической системе изменение любой подсистемы оказывает влияние на другие блоки системы и ведет к её изменению. При синтезе необходимо решать задачи формирования новых систем, объектов, имеющих или не имеющих своих прототипов и выбирать из них лучшие варианты. В отличие от проектирования при синтезе систем могут отсутствовать характеристики объектов (нет прототипов), их необходимо разрабатывать по заданным требованиям. При проектировании решаются задачи построения систем на основе уже существующих решений, либо имеющих некоторые элементы новизны.

Подводя итог вышесказанному, хочется обратить внимание, что в настоящее время проектирование сложной технической системы сводится к моделированию отдельных узлов этой системы с последующей интеграцией в общую совокупность. При этом уделяется особое внимание внутрисистемному взаимодействию между элементами, так как это позволяет вносить корректировки в уже существующие системы, для расширения области применения и улучшения показателей эффективности и качественных характеристик.

**Список литературы:** 1. Будылина, Е. А. Некоторые подходы к анализу и синтезу сложных систем / Е. А. Будылина, И. А. Гарькина, А. М. Данилов, Я. И. Сухов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2013. — № 10 (57). — С. 105-107. — URL: <https://moluch.ru/archive/57/7884/> (дата обращения: 15.06.2022). 2. Показатели (критерии) качества систем: [Электронный ресурс]. — URL: [https://studopedia.ru/2\\_58931\\_pokazateli-kriterii-kachestva-sistem.html?](https://studopedia.ru/2_58931_pokazateli-kriterii-kachestva-sistem.html?) (дата обращения: 16.06.2022). 3. Математическое моделирование технических систем: [Электронный ресурс]. — URL: [https://studref.com/649784/tehnika/matematiceskoe\\_modelirovanie\\_tehnicheskih\\_sistem](https://studref.com/649784/tehnika/matematiceskoe_modelirovanie_tehnicheskih_sistem) (дата обращения: 17.06.2022).

## ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ЕВРАЗИЙСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Борзов Д.Б., Кулагина Е.С.** (ЮЗГУ, г. Курск, Россия)  
Тел./Факс: +7(4712)22-26-65; E-mail: vt.swsu@yandex.ru

***Annotation:** This article is devoted to the peculiarities of higher professional education systems in Europe, Asia and the Russian Federation. It examines the education systems of the EU, Japan, China and the Russian Federation. The distinctive features of each system are given and a comparative analysis is carried out. The article is intended for applicants, as well as students who want to continue their studies in Russia or abroad.*

***Keywords:** higher educational institution (university), higher education, bachelor's degree, master's degree, doctoral degree, student.*

Для всех государств, заинтересованных в динамичном развитии культуры, экономики, технологий, важнейшей задачей является подготовка квалифицированных кадров. Система европейского образования долгое время являлась наиболее адекватно отвечающей требованиям своего времени. Однако в последнее десятилетие азиатские страны захватывают ведущие позиции на глобальном рынке образовательных услуг. Подтверждением растущего уровня высшего образования в странах Азии являются рейтинги высших учебных заведений, в которых все более высокие позиции занимают университеты Китая и Японии, пытаясь нарушить гегемонию европейских университетов. Отмечается заметное повышение качественного уровня высшего образования, предлагаемого в Сингапуре, Южной Корее, Тайване, Гонконге, разрабатываются «сценарии будущего» высшего образования в Малайзии [1, 2, 3].

В стремлении максимально комфортно влиться в новые реалии страны ЕС укрепляют интеллектуально-культурную, социальную и техническую базу, внедряют инновации в образование [3]. Новый термин «Европа знаний», который отразил эти ключевые тенденции развитых стран, говорит сам за себя. В образовании каркасом и движущей силой актуальных реформ стал Болонский процесс (1999), согласно которому Европа становится единым пространством, открытым для каждого, с идентичными принципами обучения и оценкой знаний в каждой стране.

В европейском образовании сложилась трёхступенчатая структура высшего образования - бакалавриат, магистратура, докторантура. На 1 уровне (бакалавриат) изучаются общие дисциплины без сильного углубления в специализацию, а профессиональную специализацию дают на 2 уровне (магистратура). В Европе нет понятия аспирантура, в научные уровни включены: BA (бакалавр), Mag. (магистр), Ph.D. (кандидат наук), Dr. (доктор) [3, 4].

Бюджетное обучение в Европе предусмотрено ECTS-системой зачётных единиц. Это система представляет собой накопление кредитов, конкретное количество которых должен набрать каждый студент на каждом уровне обучения. В системе европейского образования liberal arts студент выбирает модули по собственному желанию, традиционного для нас статичного расписания лекций просто не существует, как и графика экзаменов — он индивидуальный. Всё это мотивирует, но требует повышенного самоконтроля. По статистике 40% отчисляется за неуспеваемость, справляются не все. Единственным препятствием полной интеграции является языковой барьер. Так как в большинстве стран сложно поступить на

бакалавриат и в магистратуру без знания государственного языка. Хотя Европа и стала единым образовательным пространством, иностранный студент может рассчитывать только на 1/3 программ магистратуры и гораздо меньше количество программ бакалавриата [4].

В системе образования международные обмены и практики для студентов и преподавателей широко распространены. Это даёт возможность провести 1 семестр обучения в любой другой стране. Совместные программы ВУЗов и академические обмены поддерживаются финансово, а тем, кто в них участвует, могут присвоить степени сразу 2-х ВУЗов.

Структура системы высшего образования в Европе находящаяся под влиянием внутриеропейской интеграции стала вооружать не только знаниями «как действовать», а и знаниями «как сосуществовать».

Каждый университет занимается исследовательской деятельностью. Исследования – один из основных критериев европейского образования. Западный студент должен уметь применять навыки исследования не только в профессии, но и в жизни. Креативное мышление и самостоятельность являются основополагающими качествами успешной профессиональной деятельности.

В систему европейского образования была интегрирована цепочка «средняя школа - колледж - университет», она повышает результативность образования и конкурентоспособность студента на рынке труда [3, 4].

Ещё одной особенностью обучения в Европе является его продолжительность. Учебные планы не ограничивают сроки. Студенты учатся от 3 до 6 лет, но и в эти границы укладываются не все, многие выпускаются только через 10-12 лет.

В Азии в отличие от Европы нет как такового единого образовательного пространства. Образование в разных странах имеет схожую структуру, но и присутствуют небольшие различия.

Во всех странах Азии сложилась трёхступенчатая структура высшего образования - бакалавриат, магистратура, докторантура. Например, в Японии на 1 ступени (бакалавриат) первые 2 года обучения изучаются общие дисциплины, и выбирается направление дальнейшего обучения, а последующие 2 года – специальные дисциплины по выбранному направлению. Количество дисциплин регламентируется, в среднем их должно быть 25. Считается, что при большем количестве студент не в состоянии концентрироваться и качественно обучаться, а меньший список предметов не позволит набрать нужное количество кредитов для успешной учёбы. Для тех, кто пошёл после старшей школы есть возможность перейти сразу на третий курс, пропустив первые 2 года обучения. Вместо привычной для многих ВКР выпускники пишут «научный тезис» и защищают его, после чего им присуждается квалификация бакалавра и вручается соответствующий диплом, служащий допуском к работе или магистратуре. На 2 ступени (магистратура) – более углублённое изучение специальных дисциплин 2 года. Для получения диплома магистра необходимо подготовить и защитить диссертацию, а также пройти финальные экзамены [5, 6, 7].

В отличие от Японии в Китае первая ступень обучения предполагает изучение базовых дисциплин с постепенным погружением в профиль на протяжении 4 лет. Также студенты в обязательном порядке проходят элективную часть (изучение профильных и дополнительных предметов), стажировку на базе предприятий-партнёров и проведение исследований. Для получения диплома бакалавра студенты

обязаны подготовить и защитить ВКР и сдать выпускные экзамены. Продолжительность обучения в магистратуре составляет 2-3 года. Поступить смогут только дипломированные бакалавры, притом направление обучения будет прежним (то есть соответствовать специальности бакалавриата). Окончить магистратуру можно двумя способами: без подготовки диссертации, только прохождение финальных экзаменов – в этом случае выпускник получает сертификат без присвоения квалификации магистра, второй вариант – написание и защита диссертации, соответственно полноценный диплом магистра.

Бюджетное высшее образование в Азии отсутствует. Однако система зачётных единиц, представляющая собой накопление кредитов, сохраняется. Количество набранных баллов напрямую влияет на получение диплома об образовании.

Высшее образование в Японии можно получить в частных и государственных ВУЗах. Но все стремятся поступить в государственные. Это связано с тем, что диплом даёт преимущество при устройстве на работу, цена за обучение значительно ниже, а также считается, что там более качественное образование. При этом поступить в государственный ВУЗ очень сложно. Если для учёбы в частном университете достаточно показать результаты Центрального экзамена, сдать вступительные и стабильно платить раз в год прописанную сумму, то для государственного ВУЗа помимо всего вышеперечисленного придётся написать мотивационное письмо и стать лучшим среди остальных абитуриентов, пройдя сумасшедший конкурс. Китайские ВУЗы также делятся на частные и государственные, однако, в независимости от формы собственности все они подчиняются первичному комитету КПК и обучение в них отличается только стоимостью [5].

В Китае образовательные программы доступны, как на государственном, так и иных языках: японский, английский и пр. При этом обучение на иностранном языке обходится примерно на 20-30% дороже, чем на китайском. В Японии же обучение в университетах проходит на государственном языке [7].

Из-за географического положения и исторического наследия в Российской Федерации сложилась своеобразная система высшего образования. В настоящее время она построена по Болонскому принципу, но имеет отличительные особенности.

В России действуют 2 системы высшего образования. Первая, как и в других странах, имеет трёхступенчатую структуру — бакалавриат, магистратура, аспирантура (аналог докторантуры). Вторая же, классическая система, имеющая две ступени — специалитет и аспирантура.

Сроки обучения в России строго ограничены и составляют: для бакалавриата – 4 года, для специалитета – 5 лет, для магистратуры – 2 года, для аспирантуры – 3 года.

Первая ступень обучения (бакалавр) предполагает изучение базовых дисциплин с постепенным погружением в профиль. Для получения диплома бакалавра студенты обязаны подготовить и защитить ВКР и сдать выпускные экзамены [8].

Для поступления на вторую ступень (магистратура) необходимо сдать специальный квалификационный экзамен, который определяется ВУЗом, и пройти по конкурсу. В магистратуру могут поступать как бакалавры, так и специалисты. Причем совершенно не обязательно, чтобы это была одна и та же образовательная организация и одно и то же направление [8].

Специалитет включает как базовое образование, так и специальную подготовку в рамках выбранного направления. Поступление производится на основе результатов ЕГЭ. Специалитет даёт право поступления в магистратуру или аспирантуру.

Квалификация «специалист» считается второй ступенью высшего образования, как и магистратура. Поэтому после специалитета невозможно поступление в магистратуру на бюджетной основе, так как это, согласно закону, будет считаться получением второго высшего образования. Зато специалист, в отличие от бакалавра, может поступить в аспирантуру. Диплом специалиста традиционно считается престижным в России, однако он создаст проблемы при трудоустройстве за границей [8].

Аспирантура — это уровень высшего образования в России, цель которого — подготовка к соисканию ученой степени кандидата наук. Ученая степень присуждается аспиранту после сдачи кандидатского минимума (экзаменов) и защиты диссертации. Поступление в аспирантуру на бюджетной основе возможно только после специалитета [8].

Многие ВУЗы сочетают 2 системы образования. Хотя с каждым годом специалитета становится всё меньше и меньше. Обучение в высших учебных заведениях ведётся по образовательным программам прошедшим государственную аккредитацию. Студент может выбрать лишь направление подготовки, а не перечень изучаемых дисциплин.

Сравнивая образовательные системы различных стран, можно сделать вывод, что в Европе и Азии они имеют существенные отличия. Это обусловлено разницей в менталитете населения, религиозными и народными традициями.

**Список литературы:** 1. Прохоров А. В. Интернационализация высшего образования в странах Азии // Социально-экономические явления и процессы. Тамбов, 2012. № 7-8 (41-42). С. 221-224. 2. Прохоров А. В. Восточные ценности академической культуры (на примере Китая) // Вестник Тамбовского университета. Общественные науки. 2015. № 1. С. 73-80. 3. Особенности европейского образования: [Электронный ресурс]. – URL: <https://studyinfocus.ru/osobennosti-evropejskogo-obrazovaniya/?ysclid=144nflf8e7> 4. Система европейского образования: [Электронный ресурс]. – URL: <https://edu-vienna.com/news/obrazovanie-v-evrope/sistema-evropejskogo-obrazovaniya> (дата обращения 04.06.2022). 5. Система высшего образования в Японии и Китае: [Электронный ресурс]. – URL: <https://disshelp.ru/blog/sistema-vysshego-obrazovaniya-v-yaponii-i-kitae> (дата обращения 05.06.2022). 6. Система образования в Японии: особенности среднего и высшего образования: [Электронный ресурс]. – URL: <https://zachnik.ru/blog/sistema-obrazovaniya-v-japonii-osobennosti-srednego-i-vysshego-obrazovaniya> (дата обращения 02.06.2022). 7. Система высшего образования в Японии: общая характеристика, особенности, схема: [Электронный ресурс]. – URL: <https://zachnik.ru/blog/sistema-vysshego-obrazovaniya-v-yaponii-obshhaya-kharakteristika-osobennosti-skhema> (дата обращения 02.06.2022). 8. Современная система высшего образования в России: вчера, сегодня, завтра : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kp.ru/guide/sovremennoe-vysshee-obrazovanie.html?ysclid=146zrivr45443513509>.

## РЕВЕРСИОННЫЙ ПРИНЦИП ОПТИМАЛЬНОСТИ

Бохонский А.И.<sup>1</sup>, Варминская Н.И.<sup>2</sup> (<sup>1</sup>СевГУ, г. Севастополь, Россия;  
<sup>2</sup>ЧВВМУ имени П.С. Нахимова, г. Севастополь, Россия)  
E-mail: [bohon.alex@mail.ru](mailto:bohon.alex@mail.ru); [nvarminska@gmail.com](mailto:nvarminska@gmail.com)

**Abstract:** A reverse optimality principle is formulated and an algorithm for its use for constructing optimal translational object movements is presented. Using an example, sufficient conditions for the extremality of the restored criterion functional are verified when constructing an optimal control of the «acceleration-deceleration» type. The following theorems were formulated and proved: on the numerical equality of integrals with different integral functions, on the minimum energy to achieve the goal of optimally controlled motion in the form of «acceleration-deceleration». Basing on the generalization of the results for optimal controls designing of the «acceleration-deceleration» type of motion, whence the known special cases follow, universal analytical control function (translational acceleration) was found. Analytically and numerically was confirmed the existence of the limiting minimum control energy at which the movement of an object from the initial state of quiescence to a new state of quiescence is possible at a fixed distance and time of motion.

**Keywords:** reverse design of controls, functional extremum, minimum energy theorem.

Обоснован реверсионный принцип оптимальности (РПО), подтверждающий существование минимального энергетического принуждения при оптимальном управлении движением объекта. Описан алгоритм для конструирования оптимальных переносных ускорений объектов. С использованием достаточных условий экстремальности восстановленного функционала-критерия при конструировании оптимального управления типа «разгон-торможение» доказана оптимальность управлений. Сформулированы теоремы: о численном равенстве интегралов с различными подинтегральными функциями, найдена универсальная аналитическая функция управления (переносного ускорения), из которой следуют известные частные случаи. Аналитически и численно подтверждено существование предельной минимальной энергии управления, при которой осуществимо перемещение объекта из исходного состояния покоя в новое состояние покоя.

Становлению, развитию и совершенствованию вариационного исчисления и его приложениям посвящены работы выдающихся ученых, математиков и механиков [1-10]. Решение полных обратных задач вариационного исчисления предполагает преобразования – от аналитической исходной функции через уравнение Эйлера к восстановленному функционалу-критерию. Восстановление функционала по заданной функции в работах [11-15] названо реверсионным исчислением, которое использовалось для решения задач оптимального переносного движения упругих систем.

Реверсионный принцип оптимальности означает, что аналитическая кососимметричная функция управления (переносного ускорения)  $U_e(t)$  является

решением конструируемого уравнения Эйлера  $F_{U_e} - \frac{d}{dt} F_{\dot{U}_e} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{U}_e} + \dots = 0$  для

восстанавливаемого функционала – критерия  $\int_0^T F(U_e, \dot{U}_e, \ddot{U}_e, \dots) dt$ , принимающего за

время движения минимальное значение.

Алгоритм конструирования управления. 1. Формулирование цели движения. 2. Задание переносного ускорения или перемещения в виде полинома, степень которого уточняется в процессе анализа цели движения объекта и ограничений. 3.

Формулирование краевых условий и условий косой симметрии управления. 4. Решение системы алгебраических уравнений (определение констант полинома), факторизация, определение перемещения, скорости и ускорения (управления) переносного движения. 5. Восстановление уравнения Эйлера и функционала-критерия. 6. Сравнение результата конструирования с примерами решения, найденными классическим вариационным методом теории оптимального управления. Оценка результатов при использовании критериев: энергоемкости, принципа действия (в форме Лагранжа), нормы мощности. Проверка необходимых и достаточных условий экстремума (минимума) восстановленного функционала-критерия.

*На примере проверены достаточные условия экстремума (минимума) реверсионно восстановленных функционалов. Обращено внимание на возможное существование двух функционалов. Построены зависимости функционалов от параметра варьирования функций, близких к «скелетной», являющейся решением уравнения Эйлера.*

### **Графическая оценка экстремумов функционалов.**

Используются функции, близкие к «скелетной кривой», которая является решением уравнения Эйлера. Близость функций обусловлена привлечением малого параметра, изменяющегося в заданном коридоре поля экстремалей с близостью нулевого порядка. Использована функция

$$y(t) = \frac{t}{2} - \frac{t^2}{4} + \left( \frac{t}{2} - \frac{t^2}{4} \right) \lambda, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – малый параметр, значение которого находится в пределах  $0,1 \geq \lambda \geq -0,1$ .

Графики функций  $y(t)$ , отображающих поле экстремалей при различных значениях параметра  $\lambda$ , изображены на рисунке 1. Средняя кривая для  $\lambda = 0$ , т.е. является скелетной кривой. В соответствии со значениями  $\lambda$  вычислены функционалы; табличные значения аппроксимированы по способу наименьших квадратов аналитическими функциями вида:

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

где  $a, b = const$ . Для функционалов получены следующие функции:

$$\begin{aligned} J_1^*(\lambda) &= 0,05\lambda + 8,33 \cdot 10^7 \cdot \lambda^2 - 8,33 \cdot 10^7, \\ J_2^*(\lambda) &= -0,5\lambda + 1,67 \cdot 10^8 \cdot \lambda^2 - 1,67 \cdot 10^8. \end{aligned} \quad (3)$$

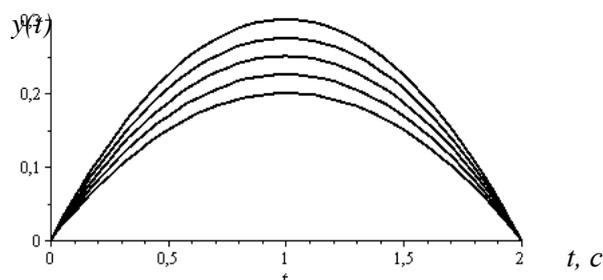


Рис. 1. Поле экстремалей в окрестности «скелетной функции» (средней кривой)

Графики функций (3), подтверждающие существование минимумов функционалов, изображены на рисунке 2. Общее время движения, при котором функционалы равны ( $J_1(T) = J_2(T)$ ), найдено с использованием теоремы о равенстве определённых интегралов с различными подынтегральными функциями. Из выражения

$$\int_0^T (\dot{y}^2 - y) dt - \int_0^T (\dot{y}^2 - t\dot{y}) dt = 0, \quad (4)$$

после преобразований получено уравнение  $T(4T^2 - 6T - 3) = 0$ , один из корней которого  $T = 1,8956$  с.

Для найденного времени движения функционалы численно равны ( $J_1 = J_2 = -0,09375$ ). С увеличением общего времени движения  $T$  объекта значения интегралов отличаются  $J_1(T) \neq J_2(T)$ , что свидетельствует о естественном соответствии функционала  $J_1$  принципу наименьшего действия.

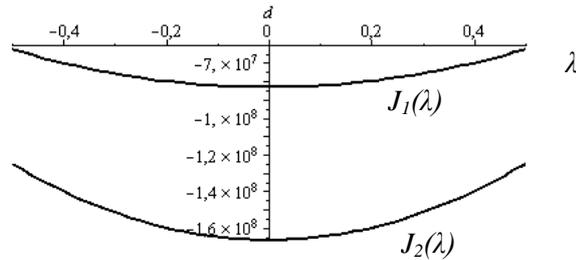


Рис. 2. Графики зависимости функционалов  $J_1$  и  $J_2$  от параметра  $\lambda$  варьирования функций

*Теорема о численном равенстве определенных интегралов* (функционалов-критериев) с различными под интегральными функциями.

Если существуют корни  $t_1$  и  $t_2$  общего уравнения первообразных, то для них, как пределов интегрирования, определенные интегралы численно равны

$$\int_{t_1}^{t_2} f_1(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} f_2(t) dt. \quad (5)$$

*Доказательство.* Для интегралов (5)

$$I_1(t) = \int f_1(t) dt = F_1(t) + C_1, \quad I_2(t) = \int f_2(t) dt = F_2(t) + C_2 \quad (6)$$

с учетом (6) следует

$$I_1(t) - I_2(t) = 0. \quad (7)$$

Из уравнения (7), имеющего, например, два корня  $t_1$  и  $t_2$ , следует:

$$F_1(t_2) - F_1(t_1) = F_2(t_2) - F_2(t_1), \quad \text{т. е.} \quad \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} f_2(t) dt. \quad (8)$$

Итак, корни уравнения (7), как пределы интегрирования, подтверждают численное равенство интегралов (5). Пример:  $f_1(t) = t^2 + 3t^3$ ,  $f_2(t) = t + 5t^4 - 8$ . Корнями уравнения  $I_1(t) - I_2(t) = 0$  являются: -1.6536; 0.00; 1.8326.

### Минимальная энергия управления.

Возможно обобщение – для ускорения переносного движения приемлема зависимость

$$U_e(t) = \frac{a(2n+4)(T-2t)^n}{T^n}, \quad (9)$$

где  $a = \frac{L}{T^2}$ , из которой следуют известные случаи;  $n$  – целое нечетное число. С учетом  $t = 0, V_e(0) = 0$  и  $S_e(0) = 0$  после интегрирования и определения констант получено:

$$V_e = \frac{L}{T(n+1)} \left( 1 - (T-2t)^{n+1} \cdot T^{-n-1} \right). \quad (10)$$

Интересно асимптотическое поведение энергии с ростом степени полинома.

*Теорема о минимальном энергетическом принуждении в управляемом движении.*

Для заданного расстояния и времени движения объекта из исходного состояния покоя в конечное состояние покоя (разгон с торможением) цель движения достижима с минимальной энергоемкостью.

*Доказательство.* Для исходных данных  $m = 1$  кг,  $L = 1$  м,  $T = 1$  с предельно возможная энергия управления вычисляется как

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} 2 \cdot \int_0^{T/2} U_e(t) \cdot V_e(t) dt = \frac{4(n+2)}{n+1} \int_0^{T/2} \left[ (1-2t)^n - (1-2t)^{2n+1} \right] dt = 1. \quad (11)$$

Энергетическая гипербола в данном случае имеет асимптоту  $A = 1$  Дж. Управление можно получить как вариационным методом, так и конструированием.

Пример. Согласно алгоритму РПО перемещение принято в виде полинома:

$$S_e(t) = \sum_{i=1}^4 C_i t^{i+1} = C_1 t^2 + C_2 t^3 + C_3 t^4 + C_4 t^5, \quad (12)$$

где  $C_1..C_4$  находятся с учетом краевых условий и косо́й симметрии управления. Полиному (12) удовлетворяют условия  $S_e(0) = 0, V_e(0) = 0$ . Для определения констант использованы дополнительные условия:

$$S_e(T) = L, V_e(T) = 0; \quad U_e\left(\frac{T}{2}\right) = 0; \quad \frac{dU_e}{dt}\left(\frac{T}{2}\right) = 0. \quad (13)$$

Из (13), как системы алгебраических уравнений, найдены корни:

$$C_1 = \frac{5L}{T^2}; \quad C_2 = -\frac{10L}{T^3}; \quad C_3 = \frac{10L}{T^4}; \quad C_4 = -\frac{4L}{T^5}. \quad (14)$$

С учетом факторизации полинома (12) получены окончательные выражения для  $S_e(t), V_e(t), U_e(t)$ . Полином (12) является решением дифференциального уравнения

$$\frac{d^4 U_e}{dt^4} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^6 S_e}{dt^6} = 0. \quad (15)$$

Уравнению Эйлера (15) соответствует функционал-критерий

$$J = \int_0^T \left[ \ddot{U}_e \right]^2 dt. \quad (16)$$

Если использовать вариационный метод, то необходимо заранее знать функционал-критерий (16), и из записанного для него уравнения Эйлера найти решение (с учетом принятых краевых условий). Графики  $U_e(t), V_e(t), S_e(t)$  для случая  $n = 3$  изображены на рисунке 3.

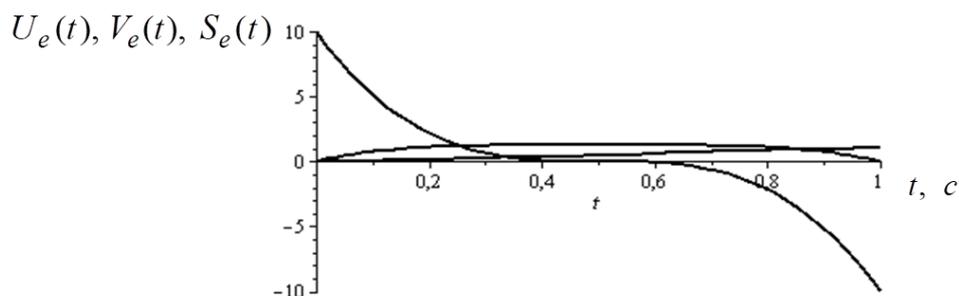


Рис. 3. Ускорение, скорость и перемещение (при  $n=3$ )

Следует подчеркнуть, что действие и энергия с ростом степени полинома  $n$  уменьшились, но норма мощности возросла.

При реверсионном конструировании выполняются условия экстремума функционала-критерия (по Якоби, Вейерштрассу и Лежандру), а также подтверждается его минимум в результате построения графического образа.

Конструирование кососимметричных управлений (ускорений) расширяет возможности задачи Лагранжа с закреплёнными концами траектории. Найден широкий класс новых управлений, позволяющих достичь цели движения. Доказано существование минимального энергетического принуждения для достижения цели движения.

**Список литературы:** 1. Бидерман В.П. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высш. шк., 1972. – 416 с. 2. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с. 3. Светлицкий В.А. Сборник задач по теории колебаний / В.А. Светлицкий, И.В. Стаценко. – М.: Высш. шк., 1973. – 456 с. 4. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с. 5. Троицкий А.И. Оптимальные процессы колебаний механических систем. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248 с. 6. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с. 7. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с. 8. Красовский Н.Н. Теория оптимального управления. – М.: Наука, 1968. – 476 с. 9. Теория автоматического регулирования. Ч II. Теория нелинейных систем автоматического регулирования / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Госиздат, 1955. – 248 с. 10. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк., 1982. – 416 с. 11. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с. 12. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационные исчисления. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p. 13. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с. 14. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p. 15. Bokhonsky A. Modelling and investigation of discrete-continuous vibrating mechatronic systems with damping / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОМОЛОТОВ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Буялич Г. Д., Тащиенко В. П. (КузГТУ, г. Кемерово, Россия)

**Abstract:** The paper considers the non-traditional use of hydraulic hammers in underground mining as devices for crushing solid inclusions in coal seams, as devices for crushing oversize in longwall faces and when driving failures between twin drifts to drain water without stopping the work of stopes. The given technical solutions are protected by patents of the Russian Federation for inventions and utility models.

Отдельные разработки, выполненные в Кузбасском государственном техническом университета имени Т. Ф. Горбачева, можно разделить по следующим направлениям.

**Разрушение твёрдых включений.** В Кузбассе, как и в других угольных месторождениях, в некоторых пластах у почвы встречаются сернистые колчеданы в виде отдельных включений с сопротивляемостью резания до 1500 кН/м, что в несколько раз превышает возможности очистного комбайна по их разрушению, особенно вблизи сопряжения лавы со штреком. В этих условиях разработано устройство в виде манипулятора [1], монтируемого на секции переходной крепи (рис.1).

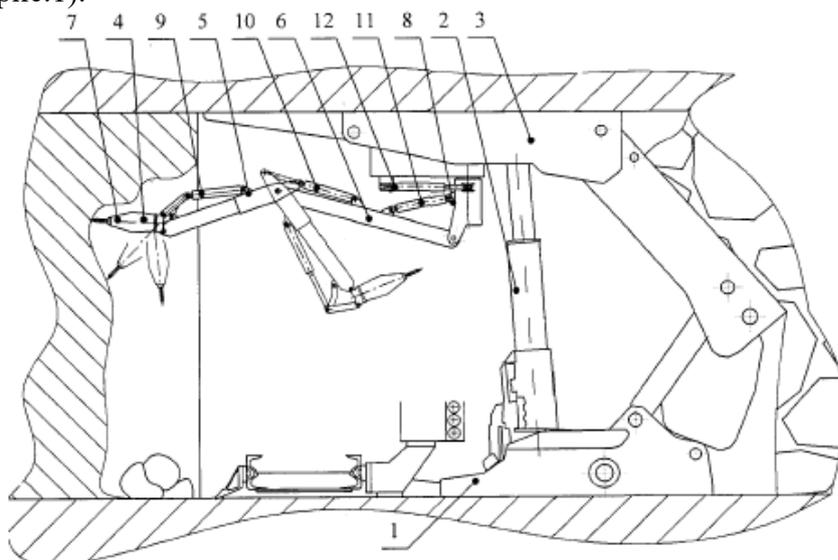


Рис. 1. Расположение гидромолота на секции механизированной крепи

Манипулятор представляет из себя поворотную платформу и шарнирно соединённые звенья, управляемые с помощью гидродомкратов.

**Маслостанция.** Все гидромолоты с большой энергией разрушения в качестве рабочей жидкости используют масло, в то время как в очистном забое в качестве рабочей жидкости используется водо-масляная эмульсия с небольшой вязкостью. Это вызывает необходимость установки вблизи гидромолота специальной маслостанции, гидронасос которой приводится в работу от электродвигателя. Электрический привод имеет неоспоримые преимущества в использовании из-за небольших габаритов, хорошей защитой от перегрузок и перегрева масла в маслостанции. Однако требует отдельного кабеля для подвода электроэнергии, что не всегда удобно в виду удалённости пускателя, стеснённости рабочего пространства и не выполнимо при необходимости установки гидромолота в другом месте лавы.

В гидроприводе механизированной крепи используется водо-масляная эмульсия, подаваемая от насосной станции под давлением порядка 30 МПа с расходом от 200 до 600 л/мин в зависимости от типа. Для этих условий были разработаны несколько маслостанций для гидромолота, в которых в качестве источника энергии для

маслонасоса использована энергия водо-масляной эмульсии в напорном трубопроводе [2–6].

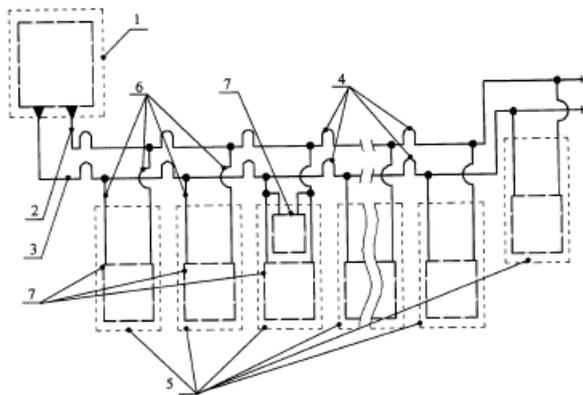


Рис. 2. Подключение гидромолота с маслостанцией к гидросистеме крепи

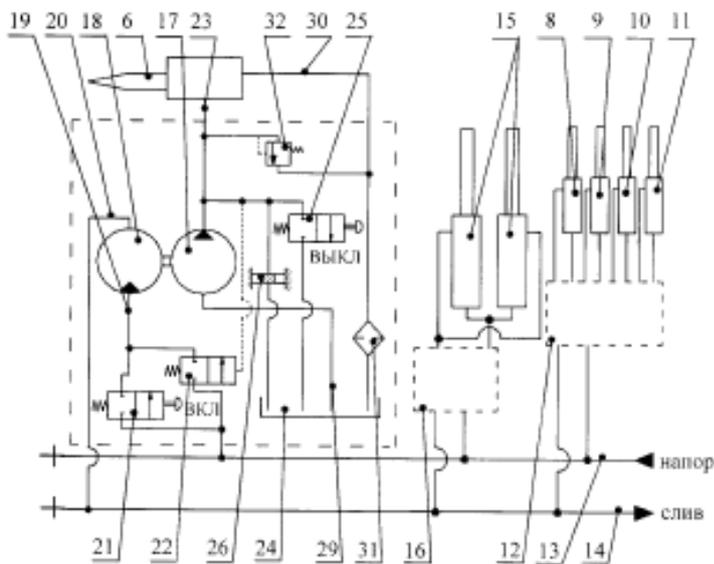


Рис. 3. Схема тепловой защиты и включения-выключения гидродвигателя маслостанции

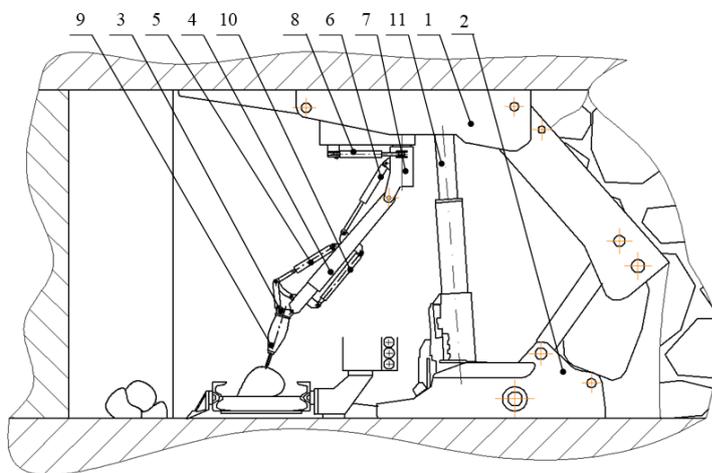


Рис. 4. Положение гидромолота и манипулятора при разрушении негабарита «в движении» позволяет разрушать породные блоки большой прочности в любом месте очистного

Преимуществом такого подключения является возможность установки гидромолота и подключения маслостанции к напорному трубопроводу насосной станции механизированной крепи в любом необходимом месте лавы (рис. 2).

В качестве предохранительного устройства от перегрева масла в маслостанции использована тепловая вставка 26 от турбомуфты забойного скребкового конвейера, при срабатывании которой происходит автоматическое отключение гидродвигателя 18 с помощью распределителей 21 и 22 (рис.3).

### Автоматизация разрушения негабарита на работающем конвейере.

Для более эффективного дробления негабаритов на работающем забойном скребковом конвейере разработаны технические решения, при которых обеспечивается движение гидромолоты вдоль конвейера, синхронно с движением негабарита [7, 8] (рис. 4).

### Расположение гидромолота на корпусе очистного комбайна.

Вариант расположения гидромолота на корпусе очистного комбайна приведён на рис. 5 [9]. Такое расположение

забоя, предотвращая затор транспортного потока в лаве и исключая трудоёмких ручных операций.

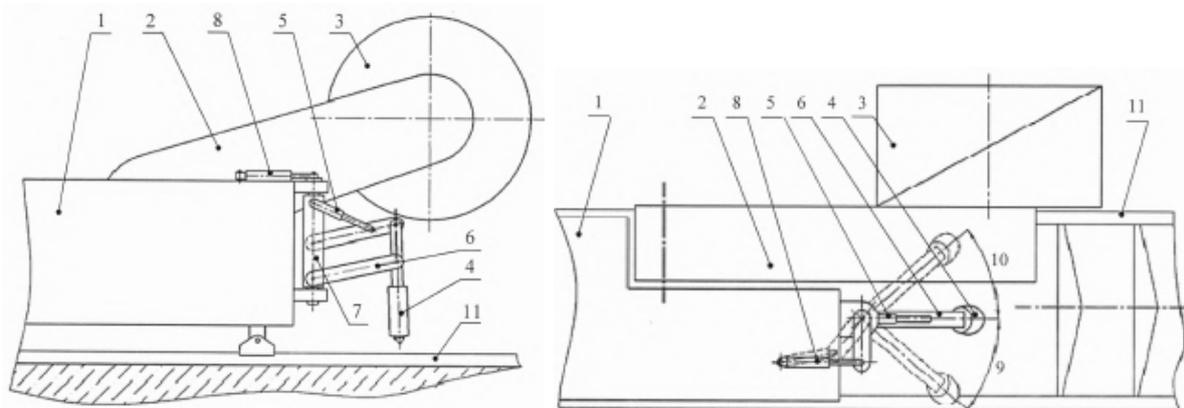


Рис. 5. Размещение гидромолота на очистном комбайне

### Проходка сбоек.

Гидромолот, размещённый на монорельсе над штреком (над ленточным конвейером) позволяет в необходимых случаях проходить сбойки, не останавливая добычные работы в очистном забое [10, 11] (рис. 6).

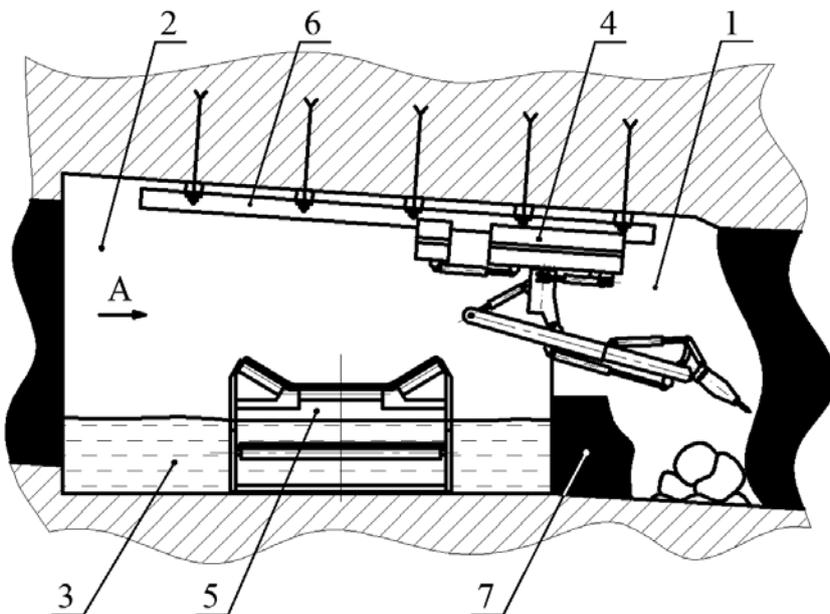


Рис. 5. Размещение гидромолота на монорельсовой дороге при проходке сбоек

Таким образом, рассмотренные варианты использования гидромолота расширяют технологические возможности по добыче твёрдых полезных ископаемых подземным способом.

### Список

литературы: 1.

Патент РФ 184573 U1.

2. Патент РФ 196644

U1. 3. Патент РФ

196646 U1. 4. Патент

РФ 196188 U1. 5. Патент РФ 195624 U1. 6. Патент РФ 2735276 С1. 7. Патент РФ 195623

U1. 8. Патент РФ 2735274 С1. 9. Патент РФ 184570 U1. 10. Заявка на патент РФ №

2022112832 от 13.05.2022. 11. Заявка на патент РФ № 2022112834 от 13.05.2022.

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ И ИНДУКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Вегера<sup>1</sup> И.И., Голубев<sup>1</sup> В.С., Ходюш<sup>1</sup> В.Е., Дробышевский<sup>2</sup> П.С.

(<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь; <sup>2</sup>ОАО

«Гомсельмаш», г.Гомель, Беларусь)

Тел.: +375 (029) 6381950, E-mail: [gvs\\_fti@mail.ru](mailto:gvs_fti@mail.ru)

**Abstract:** *The study of the microstructure, physical and mechanical characteristics (microhardness, hardness, geometric dimensions and defects of layers, etc.) of the wear-resistant coating - transition layer - base metal composition formed on the working surface of samples from structural steels of the 50KhGFA and 51CrV4 types by laser powder surfacing was carried out. A comparison is made of the possibilities of using an ytterbium fiber laser and a CO<sub>2</sub> - laser for these purposes. It is concluded that the use of a complex technology based on laser cladding and induction heat treatment expands the possibilities of creating regulated quality, structural-phase and stress states in hardened products.*

**Key words:** *laser cladding, induction treatment, surface layer, microstructure, microhardness*

**Введение.** Лазерные технологии [1-3], как и технологии индукционного нагрева ТВЧ [4-6] в настоящее время прочно заняли свои позиции в промышленности ведущих стран мира. Применение технологических лазеров обусловлено возможностями сфокусированного лазерного излучения: бесконтактность и локальность воздействия, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, отсутствие коробления, повышение дисперсности структуры и т.д. С развитием методов лазерного модифицирования, легирования и наплавки появляются новые перспективные возможности для повышения надежности и долговечности быстроизнашивающихся деталей и инструмента. С помощью данных технологий удается создавать поверхностные слои с заранее заданными и легко прогнозируемыми свойствами. В целом, методами лазерного воздействия возможно обрабатывать материалы с различными теплофизическими свойствами, вводя различные легирующие элементы для упрочнения и восстановления деталей и получения покрытий, которые невозможно или экономически нецелесообразно получать другими способами. Данные методы позволяют расширить область применения недорогих углеродистых сталей для изготовления деталей и конструкций, работающих в тяжелых условиях износа, в агрессивной среде, или сопровождающихся нагревом. Наиболее приемлемыми сегодня являются методы лазерной наплавки при непосредственной подаче порошка через сопло и при использовании шликерных обмазок. Данными методами можно наносить многокомпонентные наплавочные и разнообразные легирующие композиции, которые другими методами зачастую нанести невозможно. 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 выбором 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.

В свою очередь, воздействию ТВЧ присущи высокая скорость нагрева, возможность получения мелкозернистых и равнозернистых структур, обеспечивающих высокие физико-механические свойства, отсутствие окалины и обезуглероживания поверхности. Это дает возможность широко применять скоростной ТВЧ нагрев для упрочнения сложнопрофильных деталей машин путём бездеформационной контурной закалки, непрерывно-последовательной локальной закалки, операций скоростного местного отпуска и отжига, быстрого равномерного по сечению нагрева металлов перед операциями обработки давлением (прокатка, штамповка, выдавливание и т.д.), плавки черных и цветных металлов в индукционных, в том числе и вакуумных печах, пайки и наплавки различного инструмента и оснастки.

Увеличение твердости и износостойкости конструкционных деталей может быть достигнуто применением комбинированных методов обработки, включающих высокочастотную, и, например, лазерную, плазменную и другие виды обработки. Применение индукционного и лазерного-плазменного нагревов или их комбинирование с традиционными технологиями термической обработки является наиболее эффективным для повышения эксплуатационных свойств деталей, работающих на износ и испытывающих ударные и циклические нагрузки. Данные методы более экономичны, менее трудоемки, при их применении сокращается длительность процесса термообработки и снижаются энергозатраты, а по качеству упрочнения они не уступают, а в ряде случаев и превосходят процессы печной обработки.

**Материалы и методы исследований.** Проведены исследования микроструктуры, физико-механических характеристик (микротвёрдость, твёрдость, геометрические размеры и дефекты слоёв и т.д.) композиции износостойкое покрытие – переходной слой – основной металл, сформированной на рабочей поверхности образцов (деталей) из конструкционных сталей типа 51CrV4 и 50ХГФА методом лазерной порошковой наплавки, как из обмазок, так и при непосредственной подаче порошка через сопло.

Лазерная наплавка с длиной волны излучения 10,6 мкм проводилась с использованием CO<sub>2</sub> – установки непрерывного действия «Комета-2» с выходной мощностью ~ 0,6 кВт. При этом порошок предварительно наносился на поверхность толщиной ~ 300 мкм в виде обмазки на связующем.

Для осуществления процессов обработки металлических поверхностей излучением с длиной волны 1,06 мкм использовался иттербиевый волоконный лазер ЛС-2 с номинальной выходной мощностью 2 кВт. Применяемый лазерный технологический комплекс оснащен устройствами подачи порошка и проволоки.

Поверхностный нагрев и закалку листовых образцов из стали осуществляли непрерывно-последовательным индукционным методом с использованием установок индукционного нагрева ФТИ 3.148.1, ФТИ 3.148.2 в комплекте с высокочастотными преобразователями в различных диапазонах частот и специальных индукторов, спроектированных и изготовленных в ФТИ НАН Беларуси.

В качестве материала для лазерной наплавки использовался порошок Т-Термо 650, представляющий собой механическую смесь порошкового самофлюсующегося сплава на никелевой основе ПГ – 10Н – 01 и 50% частиц карбида вольфрама. Испытания физико-механических свойств, а также исследования фазовых и структурных превращений проводили с помощью металлографического, рентгеноструктурного и электронно-микроскопического анализов по стандартным методикам.

**Результаты исследований и обсуждение.** В проведенных экспериментах по поверхностному упрочнению и наплавке с использованием иттербиевого волоконного лазера показано, что при термообработке глубина упрочненного слоя в твердой фазе

может достигать 1 мм, толщина наплавленного слоя – до 2 мм. При этом в качестве наплавочных материалов могут использоваться как порошки с фракцией до 150 мкм, так и проволока с диаметром до 1,6 мм. Проведен подбор режимов по наплавке износостойких слоев на деталях клиновидной формы типа ножей сельхозмашин. Установлено, что наиболее качественные слои при непосредственной подаче порошка в зону наплавки таких деталей формируются при мощности 0,5 кВт. При этом оказалось, что производительность такой наплавки сравнима с производительностью наплавки из обмазок, осуществляемой с использованием CO<sub>2</sub> – лазера сравнимой мощности. Показано также, что химическим составом слоя, его микротвердостью и однородностью можно управлять путем регулирования следующих основных факторов: типа и толщины присадочной обмазки, фракционного состава используемого порошка, рода окружающей газовой среды, геометрии фокусировки лазерного излучения, мощности и скорости сканирования луча.

Установлено влияние рода защитного газа на топологию и твердость 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 твердость имеет место при воздушной атмосфере в зоне наплавки. Такая тенденция может быть связана как с формированием твердых нитридных и оксидных фаз в процессах взаимодействия ванны расплава с азотом и кислородом при обработке в воздушной атмосфере, так и с образованием силицидов вольфрама при обработке в аргоне порошка Т – Термо 650. Такие утверждения основаны на результатах проведенного микрорентгеноспектрального анализа. При этом микротвердость матрицы наплавленного слоя возрастает по мере растворения упрочняющих фаз и насыщения твердого раствора основы и может достигать 18000 МПа и выше.

В настоящих экспериментах рабочие части образцов измельчающих ножей кормоуборочного комбайна типа КВК-800 из сталей 51CrV4 и 50ХГФА подвергались нагреву ТВЧ и охлаждались в масле. При этом лазерная наплавка указанным выше порошком проводилась как до, так и после закалки деталей. Толщина наплавленного слоя составляла ~ 200 мкм. Впоследствии образцы деталей проходили отпуск в интервале температур 250 °С – 350 °С в течение 1,5 – 2 часа. В случае, например, стали 51CrV4 микротвердость наплавленного слоя после лазерной наплавки + индукционная закалка ТВЧ + отпуск 300°С в течение 1,5 часа - [вариант 1] составляла ~7000 МПа (~59 HRC). Твердость в рабочей зоне с обратной стороны при этом варианте обработки составляла 47 – 51 HRC, на хвостовой части – 38 – 40 HRC. При отпуске 270°С в течение 2 часов аналогичных образцов [вариант 2] микротвердость в наплавленном слое варьировалась на уровне 7400 – 10950 МПа (60 – 70 HRC). Твердость в рабочей части с обратной стороны после отпуска составляла 50 – 54 HRC.

В дальнейших экспериментах на образцах проводилась индукционная закалка, после чего лазерная наплавка и в завершении аналогичным образом проводился отпуск [варианты 3,4]. Микротвердость в наплавленном слое для обоих вариантов варьировалась в диапазоне 7500 – 9500 МПа (60 – 65 HRC). Следует отметить, что в этом случае микротвердость под слоем в зоне термического влияния была на уровне 4500 - 5000 МПа, тогда как для вариантов 1 и 2 она могла снижаться до уровня 3000 МПа. Т.е. если лазерная наплавка следует за ТВЧ закалкой, то подзакаленный слой обладает способностью лучше противостоять финишному отпуску. Одна из причин такого поведения может быть связана с наведением более высокого уровня остаточных напряжений.

Был проведен также рентгеновский фазовый анализ наплавленного слоя при лазерной обработке в атмосфере трех газов: воздух, аргон, азот. Результаты данных исследований подтверждают сложность происходящих процессов и определенное влияние газовой атмосферы на качественный и количественный фазовый состав поверхностного слоя при лазерной наплавке. Так при использовании азота наблюдается повышение интенсивности ряда линий отражения, соответствующих фазам WC и Cr. При обработке в воздушной атмосфере, аналогичная картина наблюдается для ряда линий отражения, соответствующих Ni. Обработка в инертной атмосфере аргона сказывается на уровне интенсивности менее энергетичных частей спектра отражения.

Следует отметить, что данного рода ножи работают в самых сложных условиях в сельскохозяйственном производстве [7]. Во-первых, они клиновидные и достаточно тонкие, должны резать и измельчать растительную массу, вращаются на барабане с частотой ~ 2000 об/мин. Во-вторых, испытывают значительный абразивный и коррозионный износ. В - третьих, периодически подвергаются мощным ударам при попадании в барабан камней и других инородных, в первую очередь металлических, предметов. Если небольшие камни при столкновении с ножом улетают по касательной, то с крупными камнями все сложнее. Но особую опасность представляют металлические предметы типа граблин, - металлические стержни диаметром 10 мм и выше, арматура и всевозможные детали сельскохозяйственной техники, нередко присутствующие на полях. Попадание такого рода предметов зачастую приводит к катастрофическому разрушению не только измельчающего барабана, но в целом может приводить к серьезному выходу из строя дорогостоящего комбайна и представлять угрозу здоровью и жизни обслуживающим их механизаторам.

Анализ микрошлифов позволил выявить следующие особенности такой комплексной обработки указанных деталей. Было обнаружено, что в зависимости от условий и схемы обработки в наплавленном слое могли образовываться микротрещины. Во-первых, могли образовываться трещины вдоль дорожек, т.е. продольные трещины. Их особенность в том, что они не переходили в подложку, а были только в наплавленном слое. Такие трещины могли появляться при 1 и 2 варианте комплексной обработки. В 3 и 4 вариантах их не было вовсе. Отметим, что трещины в целом не влияют на износостойкость поверхностного слоя. А такого рода трещины не будут оказывать влияние до определенных нагрузок на разрушение детали.

Второго типа трещины поперек наплавленного слоя при определенных условиях могли образовываться в вариантах 3 и 4. Такие трещины могли выходить уже в сам материал детали. Этих трещин можно было вообще избегать, и можно было ими управлять. Причем в этом случае полностью отсутствовали продольные трещины. При металлографическом анализе было обращено внимание на тот факт, что отпечатки индентора могли быть вытянутыми в ту или другую сторону. Направление и степень их вытянутости были связаны с режимами комплексной обработки и температуры последующего отпуска. Сам факт их искаженности можно однозначно связать с возникающими напряжениями и их направленностью. В конечном итоге, варьируя температурой отпуска, можно было полностью устранить их искаженность и таким образом констатировать снятие остаточных напряжений в поверхностном наплавленном слое. И таким образом определить оптимальную температуру отпуска для конкретной схемы комплексной обработки на основе лазерной наплавки и обработки ТВЧ.

В практическом плане на основе лазерной наплавки и технологии термообработки (закалка ТВЧ + отпуск) было изготовлено несколько опытных партий ножей из сталей 51CrV4, 50XГФА и 30MnB5 для кормоуборочных комбайнов КВК-800, John Deere и

«Полесье -3000». Детали были переданы на предварительные полевые испытания в различные сельскохозяйственные предприятия. Везде был отмечен высокий уровень износостойкости этих деталей. Причем в одном из вариантов при работе как раз сложились неблагоприятные условия, когда в измельчающий барабан попал металлический предмет. В результате произошло разрушение экспериментальных ножей, которые являются по существу сменными деталями, на большое количество фрагментов, и таким образом не был нанесен существенный урон сельхозтехнике.

**Заключение.** На основании проведенной работы был сделан вывод, что использование комплексной технологии на основе лазерной наплавки и термообработки ТВЧ расширяет возможности создания в упрочняемых изделиях регламентированного качества, структурно-фазового и напряженного состояния. При этом рекомендовано для снятия остаточных напряжений, возникающих в клиновидных деталях типа режущих или измельчающих ножей сельхозмашин, проводить отпуск при температурах на 70 – 100 °С более высоких по сравнению со стандартными технологиями. Анализ предварительных испытаний показал, что по износостойкости рабочих поверхностей изготовленные ножи не уступают лучшим зарубежным образцам. Применительно к такого рода сменным деталям кормоуборочного комбайна как измельчающие ножи это открывает перспективы по обеспечению их высокой износостойкости и надежности при нормальных условиях функционирования и быстрого разрушения вследствие попадания в рабочую зону значительных инородных предметов. Это позволит избегать катастрофических поломок, в первую очередь, как измельчающего барабана, так и других дорогостоящих узлов кормоуборочных комбайнов.

**Список литературы:** 1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с. 2. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. – Минск : Белорусская наука, 2008. – 252 с. 3. Астапчик, С. А. Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 2. – С. 33–37. 4. Гордиенко, А.И. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / П.С. Гурченко, А.И. Михлюк, И.И. Вегера. – Минск : Белорусская наука, 2009. – 287 с. 5. А.И. Михлюк, И.И. Вегера, В.Ч. Вишневский Индукционная закалка внутренних поверхностей в машиностроении: обзор, анализ, решения // Индукционный нагрев – 2015, №28.– С. 44–49. 6. Вегера, И.И. Исследование и разработка скоростных методов термообработки высокопрочных сталей и создание на их основе функционально-градиентных материалов // Перспективные материалы и технологии / Под общей редакцией В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2008. – С. 253–287. 7. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И.Н. Шило, Г.Ф. Бетенья, Л.А. Маринич, В.С. Голубев и др. – Минск: БГАТУ, 2010. – 320 с.

## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГИПЕРБОЛОИДНЫХ ПЕРЕДАЧ

Величко Н. И., Макухин А.Г. (ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)

Тел. +38 (072) 1402528; E- mail: [makukhinstigr@mail.ru](mailto:makukhinstigr@mail.ru)

**Abstract:** *The analysis of design features of hyperboloidal gears on the example of helical globoid gear is performed. The efficiency of the contact localization methods of the mating surfaces has been investigated. The efficiency of helical gears performance has been evaluated according to the criterions of extreme pressure resistance and the conditions of the lubricating layer formation.*

**Key words:** *initial contour, gearing, globoid gear, gear wheel, localization, operability.*

Одним из путей совершенствования гиперболоидных зубчатых передач, распространенной разновидностью которых являются винтовые передачи, является разработка передач с улучшенными геометро-кинематическими показателями взаимодействия зубьев в зоне их контакта. Повышение нагрузочной способности и других эксплуатационных свойств достигается модификацией геометрии сопряженных поверхностей зубьев колес с целью перехода к линейному контакту (или близкому к нему по передаваемой нагрузке точечному) взамен ярко выраженного точечного контакта. В работе [1] излагаются результаты исследований эксплуатационного зацепления винтовых передач с цилиндрическими колесами с целью выбора оптимальной геометрии исходного контура. Показано, что применение кругового исходного контура существенно повысило нагрузочную способность передач.

Важное направление совершенствования зацеплений связано также с развитием методов и оптимизацией параметров процессов взаимоогибания в паре инструмент-заготовка. Получил развитие метод зуботочения с применением зуборезных долбяков, позволяющий (при непрерывном делении) повысить производительность обработки и качество поверхностей; в качестве главного движения резания выступает скорость относительного скольжения при скрещивающихся осях заготовки и инструмента. Выполнены комплексные исследования процессов изготовления зубчатых колес, которые позволили даже при применении стандартных долбяков назначать рациональные значения параметров процесса, например, рекомендованы значения коэффициентов смещения, углов зацепления [2]. Для винтовых передач важным результатом внедрения метода явилась возможность придавать глобоидную форму меньшему из колес, а большему – геометрию, совпадающую с винтовой производящей поверхностью и получить тем самым линейный контакт в зацеплении.

Рабочие поверхности зубьев шестерни глобоидной винтовой передачи с линейным контактом являются взаимоогибоемыми с поверхностями зубьев цилиндрического колеса. Для локализации контакта необходимо обеспечить профильный или продольный отвод поверхностей зубьев колеса, что достигается путем применения производящего колеса, отличающегося от цилиндрического. Сопряженность зацепления при переходе от линейного контакта к теоретически точечному не нарушается, если линия модификации (линия на зубе шестерни, относительно которой осуществляется отвод её рабочих поверхностей) не будет совпадать ни с одной из контактных линий. Линия модификации становится активной действующей линией поверхности зуба шестерни, а её положение во многом определяет форму, расположение пятна контакта и нагрузочную способность передачи в целом. Поэтому при синтезе глобоидных винтовых передач с локализованным контактом важнейшая задача состоит в выборе рационального способа локализации, обеспечивающего благоприятное расположение линии модификации.

Геометрия винтовых глобоидных передач, образованных с использованием эвольвентного производящего колеса, исследована достаточно полно. Применение других форм исходного контура и более общих схем синтеза передач требует дальнейшего развития аналитического аппарата для решения задач анализа и синтеза винтовых глобоидных передач.

Звеньями исследуемых передач являются косозубое колесо Ц и глобоидная шестерня Г (рис. 1). При малом числе зубьев колесо вырождается в цилиндрический червяк, а винтовая глобоидная передача – в цилиндрическую червячную. Уменьшение числа зубьев шестерни позволяет перейти к передаче с глобоидным червяком и цилиндрическим колесом. Поэтому предложенная схема образования передач и полученные зависимости могут применяться при синтезе и анализе перечисленных разновидностей гиперболюидных передач.

Особенность принятой схемы образования винтовых глобоидных передач состоит в применении двух соосных винтовых производящих колес, поверхности зубьев

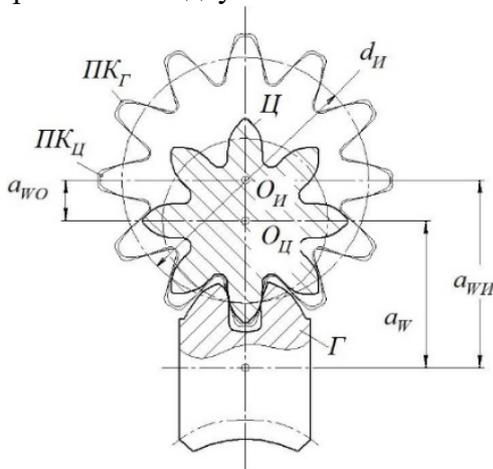


Рис. 1. Схема образования винтовой глобоидной передачи

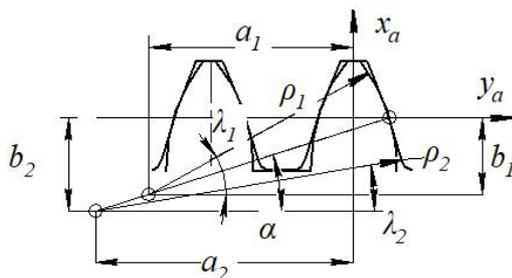


Рис. 2. Сопоставление параметров исходных контуров для гиперболюидного (1) и цилиндрического (2) колес

которых образуют неконгруэнтные пары. На рисунке оказаны профили зубьев производящих колес ПКЦ и ПКГ в сечении средней торцовой плоскостью цилиндрического колеса Ц. Рабочие поверхности зубьев колеса Ц выполнены в виде огибающих колеса ПКЦ (при внутреннем зацеплении) зубья шестерни Г имеют форму огибающих колеса ПКГ. Производящие поверхности колес ПК имеют в общем случае форму геликоидов и касаются по винтовой линии, расположенной на цилиндре с диаметром  $d_u$ . Относительная свобода выбора формы исходных контуров для производящих поверхностей позволяет оптимизировать геометрию передач, управлять степенью локализации пятна контакта и чувствительностью зацепления к погрешностям монтажа.

В качестве исходных вспомогательных поверхностей для моделирования использованы поверхности производящих реек, поскольку число параметров, определяющих поверхности рейки, меньше, чем у других вспомогательных поверхностей (рис. 2).

Следуя [1], сопряженные участки исходного контура в параметрической форме описаны системами уравнений

$$\begin{aligned} f_{1i}(\lambda_1) &= x_{ai} = \rho_i(\sin\lambda_i - \sin\alpha), \\ f_{2i}(\lambda_1) &= y_{ai} = \rho_i(\cos\lambda_i - \cos\alpha), \end{aligned}$$

где  $i$  – индекс, указывающий на принадлежность контура к шестерне или производящему колесу ( $i = u, u$ );

$\lambda$  – независимый параметр, однозначно определяющий положение текущей точки на профиле. При выборе круговой формы исходного контура руководствовались

требованиями технологичности и положительными результатами применения такой формы для червячных и других видов гиперболоидных передач.

В системе координат, жестко связанных с цилиндрическим и производящим колесами, проекции радиус-векторов сопряженных поверхностей описаны уравнениями

$$\begin{aligned}x_{1i} &= (f_{1i} - r_i - x_{0i}m) \cos \psi_i + \Omega_i \cos \beta \sin \psi_i, \\y_{1i} &= (f_{1i} - r_i - x_{0i}m) \sin \psi_i - \Omega_i \cos \beta \cos \psi_i, \\z_{1i} &= -f_{2i} / \sin \beta - \Omega_i \operatorname{ctg} \beta \cos \beta - r_i \psi_i \operatorname{ctg} \beta,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\psi_i$  – угловой параметр,

$r_i, x_{0i}$  – делительный радиус колес и коэффициент смещения исходного контура;

$m$  – модуль зацепления;

$\Omega_i$  – вспомогательная функция

$$\Omega_i = (f_{1i} - x_{0i} \cdot m) f'_{1i} / f'_{2i}.$$

Выражения для определения производных первого и второго порядка при круговом исходном контуре

$$f'_{1i} = \rho_i \cos \lambda_i, f'_{2i} = -\rho_i \sin \lambda_i, f''_{1i} = -\rho_i \sin \lambda_i, f''_{2i} = -\rho_i \cos \lambda_i,$$

Взаимное положение производящего колеса и шестерни характеризуется станочным межосевым расстоянием

$$a_{wu} = r_u (1 + \operatorname{ctg} \beta / u_{ru}) + x_o m,$$

где  $u_{ru}$  – передаточное отношение в паре инструмент-заготовка, равное отношению чисел зубьев производящего колеса и шестерни;

$x_o$  – коэффициент смещения шестерни. Коэффициент характеризует отклонение межосевого расстояния от делительного.

Для определения координат точек, принадлежащих поверхности зуба глобоидной шестерни, следует воспользоваться уравнением связи параметров  $\lambda_u, \psi_u, \varphi_u$ , полученным кинематическим методом

$$\begin{aligned}F(\lambda_u, \psi_u, \varphi_u) &= \{ [z_u \sin \Sigma f'_{2u} / f'_{1u} - a_{wu} \cos \beta \cos \Sigma - (f_{1u} - r_u - x_{0u}m) \sin \beta \sin \Sigma] \cos(\varphi_u + \\&\psi_u) + (z_u \cos \beta \sin \Sigma + \frac{a_{wu} f'_{2u} \cos \Sigma}{f'_{1u}} - \Omega_u \cos \beta \sin \beta \sin \Sigma) \sin(\varphi_u + \psi_u) + r_u \cos \beta \left( \cos \Sigma + \right. \\&\left. \frac{1}{u_{ru}} \right) - a_w \sin \beta \sin \Sigma \} = 0,\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\Sigma$  – межосевой угол в эксплуатационном зацеплении;

$\varphi_u$  – угловое положение производящего колеса.

При фиксированных значениях угла  $\varphi_u$  определяются параметры  $\lambda_u, \psi_u$ , удовлетворяющие уравнению связи, эти же параметры подставляются в уравнения

$$\begin{aligned}x_\Gamma &= x_u \cos(u_{ru} \varphi_u) - y_u \cos \Sigma \sin(u_{ru} \varphi_u) + z_u \sin \Sigma \sin(u_{ru} \varphi_u) + a_{wu} \cos(u_{ru} \varphi_u), \\y_\Gamma &= x_u \sin(u_{ru} \varphi_u) + y_u \cos \Sigma \cos(u_{ru} \varphi_u) - z_u \sin \Sigma \cos(u_{ru} \varphi_u) + a_{wu} \sin(u_{ru} \varphi_u), \\z_\Gamma &= y_u \sin \Sigma + z_u \cos \Sigma,\end{aligned}\quad (3)$$

описывающие радиус-вектор поверхностей зубьев шестерни как взаимоггибаемых поверхностям производящего колеса.

В эксплуатационном зацеплении находятся поверхности зубьев цилиндрического колеса и глобоидной шестерни, оси вращения которых скрещиваются под углом  $\Sigma$ . Записав уравнения поверхностей зубьев (1), (3), полученных ранее в подвижных системах, и ортов нормалей к ним в неподвижной системе, а также присовокупив уравнение связи (2) получим зависимости для исследования эксплуатационного зацепления методом «обратной» задачи

$$\begin{aligned}\vec{r}_u(\lambda_u, \psi_u, \varphi_u) &= \vec{r}_\Gamma(\lambda_u, \psi_u, \varphi_\Gamma), \\ \vec{e}_u &= (\lambda_u, \psi_u, \varphi_u) = \vec{e}_\Gamma(\lambda_u, \psi_u, \varphi_\Gamma), \\ F(\lambda_u, \psi_u, \varphi_u) &= 0.\end{aligned}$$

Численное исследование системы позволяет установить закон движения зубчатого механизма в виде

$$\varphi_u = \varphi_u(\varphi_r).$$

Передаточное отношение кинематической пары шестерня – колесо в общем случае является переменной величиной. Постоянное значение передаточного отношения наблюдается в передачах с линейным контактом (совпадают поверхности  $ПК_{Ц}$ ,  $ПК_r$ ,  $Ц$ ), в передачах с локализованным контактом (совпадают поверхности  $ПК_{Ц}$  и  $Ц$ ). В последнем случае зона касания располагается в средней по высоте части зубьев. Как и у червячных передач, поле зацепления имеет несимметричную форму, а условия касания по полю неоднородны. В отдельных положениях условия образования смазочного слоя ухудшаются, поскольку скорость скольжения совпадает с большой полуосью пятна контакта. Такая локализация относится к профильной, а степень локализации оценивается коэффициентом

$$K_p = (\rho_u - \rho_r)/\rho_r,$$

зависящим от радиусов кривизны исходных контуров.

К приближенным передачам относятся передачи с локализованным контактом, у которых совпадают исходные контуры, но у производящего колеса число зубьев больше, чем у цилиндрического. Коэффициент для оценки степени продольной локализации

$$K_z = (z_u^* - z_r^*)/z_r^*$$

зависит от чисел зубьев производящего  $z_r^*$  и цилиндрического  $z_u^*$  колес; при увеличении степени локализации глобоидная передача приближается к винтовой цилиндрической, а с увеличением радиуса кривизны – к эвольвентной. Условия контакта в такой передаче предпочтительнее, чувствительность к технологическим погрешностям снижена.

Нагрузочную способность глобоидных передач можно оценивать по критерию заедания винтовых эвольвентных передач

$$[P] = C/(V_s^{0,25} \cdot n_3),$$

где  $[P]$  – допускаемое максимальное давление в зоне контакта;

$V_s$  – скорость скольжения зубьев;

$C$  – постоянная, значения которой зависят от сочетания материалов и смазки;

$n_3$  – коэффициент запаса прочности, зависящий от свойств материалов колес.

После подстановки выражения для определения максимального давления [3] уравнение преобразовано к виду

$$[F_N] = \frac{2}{3} \pi^3 \eta^2 (C/n_3)^3 K_r,$$

где  $K_r$  – геометрический параметр, применяемый для сравнительной оценки нагрузочной способности при постоянстве прочих составляющих,

$$K_r = (n_a^3 n_b^3) / \left[ \left( \sum k \right)^2 \cdot V_s^{0,25} \right],$$

где  $\sum k$  – сумма главных кривизн соприкасающихся поверхностей зубьев;

$n_a, n_b$  – коэффициенты, определяющие форму площадки контакта.

Для пространственных передач при изотермическом состоянии и точечном контакте зависимость для толщина масляной пленки предложена в виде [4]

$$H_{min} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073} (1 - e^{-0,68 K \varepsilon})$$

где  $U$  – безразмерный параметр скорости

$$U = \eta_0 V_s k_{max} \omega_u / \eta$$

$W$  – безразмерный параметр нагрузки

$$W = 2 F_N k_{max}^2 / \eta,$$

где  $G$  – безразмерный параметр материала  $G = 2 \eta \alpha^*$ ;

$k_{\Sigma}$  – коэффициент эллиптичности;  $\eta$  – приведенный модуль упругости,  
 $V_{\Sigma}$  – составляющая суммарной скорости качения зубьев в направлении малой оси;  
 $K_{max}$  – приведенная кривизна в направлении той же оси;  
 $\omega_{ц}$  – угловая скорость колеса (при сравнительном анализе передач  $\omega_{ц} = 1\text{с}^{-1}$ ),  
 $\eta_0$  – динамическая вязкость масла в атмосферных условиях;  
 $\alpha^*$  – пьезометрический коэффициент вязкости.

С учетом выражения

$$H_{min} = K_{max} \cdot h_{min},$$

где  $h_{min}$  – минимальная толщина пленки в зоне контакта, можно выделить параметр  $K_C$ , характеризующей влияние управляемых геометрических факторов на толщину слоя смазки

$$K_C = V_{\Sigma}^{0,68} \cdot K_{max}^{-0,446} (1 - e^{-0,68K_{\Sigma}}).$$

На рис. 3, 4 в качестве примера представлена сравнительная оценка критериев работоспособности в передачах с параметрами:  $z_u^* = 20$ ;  $\rho_u = 8\text{м}$ ;  $K_{\rho} = 0,9$ .

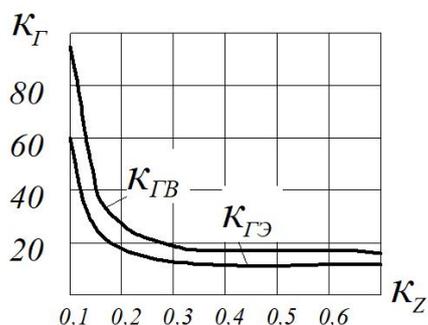


Рис. 3. Влияние степени локализации на значения параметра нагрузочной способности

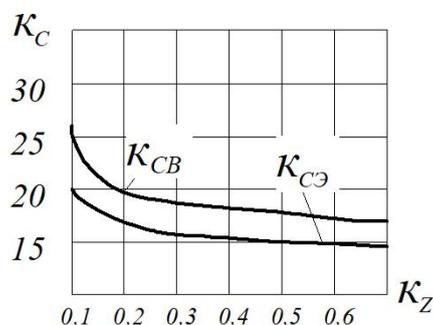


Рис. 4. Влияние степени локализации пятна контакта на толщину масляной пленки

На основании численного анализа математических моделей взаимодействия активных поверхностей зубьев в винтовой глобоидной передаче выявлено существенное повышение эксплуатационных свойств:

1. Сравнительный анализ уровня несущей способности подтвердил снижение склонности к заеданию в разработанном зацеплении, параметр несущей способности синтезированных передач на 50...60% выше, чем у передач с эвольвентным колесом.

2. Оценка условий образования смазочного слоя между поверхностями зубьев по геометро–кинематическим факторам позволяет прогнозировать повышение к.п.д. и износостойкости в передачах с круговым исходным контуром зубьев.

**Список литературы:** 1. Моделирование формообразования и оценка работоспособности винтовых передач / Н.И. Величко, П.Л. Носко, Д.Н. Марченко, П.В. Филь. Х.: НТУ «ХП», 2015. - №31 (1124). – с. 139 – 143. 2. Крупина Н.П., Гаврилов Ю.В. Оптимальные параметры обкаточных резцов при зуботочении // Известия Челябинского научного центра, вып. 2 (36). 2007. - с. 49-54. 3. Прочность, устойчивость, колебания. – М.: Машиностроение, 1988, т.2,- с. 382-395. 4. Дусев И.И., Васильев В.М. Аналитическая теория пространственных зацеплений и ее применение к исследованию гипоидных передач. – Новочеркасск, 1988. -174 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНЕРЦИОННОГО СГУСТИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО ДОЗАКЛАДКЕ

Васильева М.А., Волчихина А.А.

(Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия)

Тел: +7 (952) 218-56-11 ; E-mail: alexandravolchihina@yandex.ru

**Abstract.** *Backfilling of the mined-out space, which should be carried out at fields with underground mining, usually occurs with the formation of voids between the roof and the backfill massif. The resulting underburden can cause an accident in the field. Therefore, this article will help consider the problem of voids during stowing operations, as well as pay special attention to the use of a thickener based on a mobile stowing complex for additional stowing operations.*

**Keywords:** *filling equipment, mobile units, additional filling of voids.*

Отработка месторождений с подземной добычей полезных ископаемых ведется с закладкой пустот. Закладочные работы на месторождении проводятся с вышележащих горизонтов по закладочным выработкам, скважинам или трубам, а смесь поступает самотеком по выработкам в выработанное пространство, за это время смесь расслаивается на жидкую и твердую фазы так, что в выработке смесь растекается и не формируется массив [1-2].

Закладочные работы в выработках производятся в три этапа: закладочные работы более густой смесью для формирования основания массива, закладочные работы смесью меньшей концентрации для формирования тела массива и закладочные работы густой смесью для формирования массива под кровлю выработки без образования пустот. Данная технология предусматривает полное заполнение выработки, но при подаче подготовленной смеси с поверхности, она расслаивается и смесь любой концентрации к выработке подходит уже расслоившейся за счет потери гидросмесью своей кинетической энергии, что приводит к расслоению и потере гидросмесью своих рабочих параметров [3]. Расслоившейся смесью производят «заливку» выработки, что приводит к усадке массива и разделению жидкой фазы от твердой фракции. Результатом проведения закладочных работ представленной смесью является образование пустот между сводом выработки и массивом.

Образовавшиеся пустоты могут приводить к неоднократным опусканиям подрабатываемого массива горных пород, увеличению степени разрушения подрабатываемых массивов, возникновению зон повышенного горного давления, способные привести к горному удару, поэтому их необходимо ликвидировать, проводя работы по дозакладке образовавшихся полостей [4].

Работы по дозакладке подразделяются на две большие группы в зависимости от параметров недозаклада и имеющихся сетей горных выработок [5-8]. К таким способам относят дозакладку с вышележащих горизонтов по выработкам или скважинам, что часто приводит к их забутовке, невозможности контроля полноты заполнения и обладает высокой стоимостью работ. Вторым способом является применение различного мобильного оборудования. Но у них есть свои ограничения, к примеру ограничение по допустимой концентрации, высокий износ насоса, большая масса, а также оборудование имеет короткий трубопровод, недостаточной дальности подачи, и применимость только для сухой закладки отдельного мобильного оборудования [9]. Главным недостатком применению любого из выше описанных методов является то, что работы по дозакладке производятся, чаще всего той же расслоившейся смесью, циркулирующей в системе, которой производились закладочные работы.

Для решения проблемы недозаклада предлагается применение существующей гидравлической смеси со сгущением непосредственно у закладываемой выработки для получения густой смеси с необходимыми характеристиками и передачи ее на насосное оборудование. Высококонцентрированные смеси невозможно использовать для проведения закладочных работ в связи с ограничениями используемого оборудования [10].

Для решения поставленных проблем предлагается использовать для проведения работ по дозакладке на месте инерционный сгуститель, который позволяет использовать гидравлическую смесь при обычной концентрации из системы гидротранспорта на входе в установку. Смесь, поставляемая сверху по традиционным технологическим каналам и магистральным трубопроводам, сгущается с дальнейшей передачей в насосное оборудование, которое перекачивает высококонцентрированную смесь для подачи в выработанное пространство.

При исследовании выделены три основных сгустителя в зависимости от принципа действия: гравитационные, инерционные и комбинированные [11]. Применение различных сгустителей обладают рядом недостатков, а именно: значительными габаритами, временем работы, необходимостью подведения дополнительных подпитывающих сетей, а также применения химических реагентов для более быстрого процесса сгущения или получения более высокой концентрации сгущенного потока.

Разработана конструкция инерционного сгустителя, входящего в состав мобильного закладочного комплекса, который может быть гибко интегрирован в существующую трубопроводную схему без капитальных ее изменений. Инерционный сгуститель позволяет получить высококонцентрированную гидросмесь и в дальнейшем транспортировать насосами по гибкому трубопроводу для ликвидации полостей, образовавшихся при расслоении или осадке смеси после проведения закладочных работ.

Место расположения разработанного оборудования определяется объемом и пространственным расположением пустот, интенсивностью и направлением развития горных работ. Конструкция сгустителя представлена рабочей осадительной камерой трапецеидальной формы, где и происходит осаждение твердых частиц, двумя гидродинамическими профилями, которые способствуют снижению скорости движения частиц, впускными/выпускными патрубками и ультразвуковым поточным плотномером (Рис.1). Работа предлагаемого инерционного сгустителя заключается в аккумуляции смеси, осаждении твердого компонента на дно резервуара с дальнейшей закладкой и отделении жидкой фазы с дальнейшим поступлением в обратное водоснабжение.

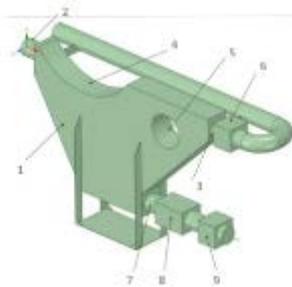


Рис. 1. Конструкция сгустителя: 1 – рабочая зона; 2 – впускной патрубок первичной гидросмеси; 3 – выпускной патрубок для осветленной воды; 4 – отклоняющий гидродинамический профиль; 5 – цилиндрический гидродинамический профиль; 6 – ультразвуковой поточный плотномер; 7 – патрубок для сгущенной смеси; 8 – ультразвуковой поточный плотномер; 9 – насос

Разработан цифровой двойник сгустителя на основании математической модели для определения параметров установки, который позволяет определить направления и значения векторов скорости воды; массовую долю частиц в расчетной области; значение скоростей твердых частиц; содержание (массовую долю) частиц в потоке осветленной воды; содержание (массовую долю) частиц в потоке сгущенной смеси (рис.2.).

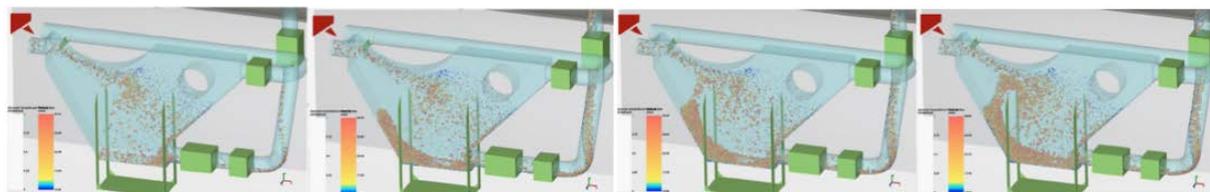


Рис. 2. Моделирование движения гидросмеси в резервуаре сгустителя

Картина распределения скоростей частиц в расчетной области дополняет представление о принципе функционирования сгустителя. После взаимодействия с первым гидродинамическим профилем скорость частиц снижается более чем в два раза, по сравнению со скоростью во входном патрубке. При этом формируется обширная область с минимальными скоростями частиц, где и происходит основное осаждение частиц за счет действия сил инерции и сил тяжести. После взаимодействия с 1-м гидродинамическим профилем поток с частицами отклоняется и движется вдоль дна резервуара к выпускному патрубку, пока к ним добавляются частицы, отклонившиеся после взаимодействия со 2-м гидродинамическим профилем.

Данная конструкция разработана, запатентована и сконструирована в учебных мастерских для оценки работоспособности технологии и распределения твердых частиц в корпусе при ее работе, которая будет использоваться при проведении диссертационного исследования (рис.3.).



Рис. 3. Резервуар для аккумуляции и подачи гидросмеси в насосный агрегат. 1 – рабочая зона; 2 – воронка для загрузки гидросмеси; 3 – канал для подключения к секции насосного агрегата; 4 – канал для отвода осветленной воды; 5 – расположение шнекового смесителя; 6 – привод смесителя

Сгуститель имеет следующий механизм работы: после поступления в резервуар смесь взаимодействует с первым гидродинамическим профилем, часть твердых частиц смеси теряют скорость и оседают на направляющую поверхность, смесь движется дальше с небольшим количеством взвешенных частиц, которые осаждаются на стенки и дно водоотделителя после взаимодействия со вторым гидродинамическим профилем. В нижней части резервуара образуется слой сгущенной смеси, которую шнек, расположенный в нижней части резервуара, взрыхляет для отсутствия застоя в нижней области рабочей камеры. Далее высококонцентрированная смесь из нижней части резервуара движется в сливной патрубок, откуда поступает в насосный агрегат, а жидкая фаза направляется на слив и в обратную систему. В случае, когда в

осветленной воде начинает регистрироваться поточным плотномером повышенное содержание твердой фракции, насосный агрегат увеличивает подачу закладочной гидросмеси для предотвращения скапливания сгущенного материала и его последующего вымывания в сливную трубу для осветленной воды.

#### Вывод

Применение инерционного сгустителя в составе мобильной закладочной установки позволяет сгущать закладочный материал и получать высококонцентрированную смесь, и подавать ее в заполняемые полости с низким напряжением сдвига. Подобное оборудование применимо в широких пределах горно-геологических и технологических условий, позволяя существенно сократить объемы незаложенных пустот и повысить безопасность ведения горных работ.

**Список литературы:** 1. Закладочные работы в шахтах : справочник / под ред. Д. М. Бронникова, М. Н. Цыгалова. – М. : Недра, 1989. – 400 с. 2. Дзюба С.В. Анализ технологий подземной разработки месторождений полезных ископаемых при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях / С.В Дзюба, Н.А. Шмелев, Н.В. Коваль // Геотехническая механика: сб. науч. тр. – Украина: Изд-во ИГТМ НАН, 2012.- Выпуск 101 - С. 284–291. 3. Васильева М.А. Мультифизическая модель течения гетерогенного потока при движении по каналу переменного сечения / М. А. Васильева, С. Фёйт // Записки Горного Института. – 2017 - Том 227. С. 558-562. 4. Медведев В.В. Совершенствование технологии закладочных работ при камерных системах разработки с закладкой / В.В. Медведев, В.В. Пакулов // Вестник ЗабГУ. – 2013. - №10(101) – С.25-31. 5. Шубин А.А. Моделирование процесса ликвидации подземных пустот в условиях техногенной активизации / А. А. Шубин // Записки Горного Института – 2013. – Том №204 – С. 101-104. 6. Qiang Zhang Overview of Solid Backfilling Technology Based on Coal-Waste Underground Separation in China / Qiang Zhang, Jixiong Zhang, Zhongya Wu, Yang Chen // Sustainability – 2019 – 11, 2118. 7. Krzysztof Skrzypkowski Compressibility of materials and backfilling mixtures with addition of solid wastes from flue-gas treatment and fly ashes / Krzysztof Skrzypkowski // XVIII Conference of PhD Students and Young Scientists “Interdisciplinary Topics in Mining and Geology” – Kraków, Poland, 2018. – Vol. 71. – P. 1–6. 8. Xuan D Backfill mining practice in China coal mines / D. Xuan, J. Xu, W. Zhu // Journal of Mines, Metals and Fuels – India, 2013. – 61(7–8). – P. 225–234. 9. Васильева М.А. оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства / М.А. Васильева, А.А. Волчихина, М.Д. Морозов // Горный информационно – Аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 133–144. DOI 0.25018/0236\_1493\_2021\_4\_7\_39/. 10. Сараскин А.В. Технология закладки выработанного пространства смесями на основе отходов обогащения руд / А.В. Сараскин, А.А. Гоготин // Горный журнал – 2017. – Том №9 – С. 41-45. 11. Туркин И. С. Закладка выработанных пространств рудников с применением вертикальных сгустителей / И. С. Туркин, В. В. Олизаренко, Р. Х. Шарипов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. С.- 206–210.

## РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЗОТНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В КОМПРЕССОРЕ

**Ворошилов И.В., Шамаров М.В.** (ООО «Краснодарский Компрессорный Завод», Краснодарский край, ст-ца Динская, Кубанский государственный технологический университет, Россия)

Тел/факс: +7(861) 298-09-09, E-mail: [schmax@mail.ru](mailto:schmax@mail.ru)

**Abstract:** *The article presents the features of the use of mobile nitrogen compressor stations. The ways of their application in production processes are shown, the issues of mathematical modeling aimed at optimizing the weight and size indicators of the station and optimizing its operation in conditions of variable modes are considered.*

**Key words:** *piston compressor, mathematical model, nitrogen station, membrane separation, compressor station.*

**Введение.** Несмотря на тенденцию к замене поршневых компрессоров (ПК) в области низкого давления винтовыми, основными преимуществами поршневых компрессоров остаются экономичность и возможность использования в области среднего и высокого давления.

Компрессорные станции с ПК общего назначения с конечным давлением до 1 МПа и с ПК, обеспечивающими давление до 25 МПа, могут работать в составе станций общего назначения и в составе специализированных компрессорных систем. Повышение эффективности их работы возможно на основе применения средств математического моделирования.

### **Основное содержание и результаты работы.**

Используя инновационную технику и технологии необходимо уделять особое внимание повышению эффективности эксплуатации малодебитных нефтяных скважин и поиску экономически оправданных путей запуска в эксплуатацию бездействующих скважин.

При освоении скважин, содержащих сероводород, в условиях малопроницаемых коллекторов и низких пластовых давлений, в зоне влияния подземного горения и в других случаях, когда существующие методы освоения малоэффективны и не обеспечивают взрывобезопасности работ, а также при освоении скважин в суровых климатических условиях при температуре окружающего воздуха  $-30^{\circ}\text{C}$  и  $+50^{\circ}\text{C}$ , предусматривается применения азотных компрессорных станций.

Область применения различных азотсодержащих циркуляционных флюидов - газообразного азота, газированной им жидкости (пены) для вызова притока нефти и газа из пласта зависит от геологотехнических и других условий освоения скважин.

Вызов притока нефти и газа из пласта с использованием передвижных азотных компрессорных станций типа ТГА заключается в том, что газообразный азот или газированная им жидкость (пена) нагнетаются в скважину и замещают находящуюся в ней жидкость (буровой раствор, воду или нефть). Регулируя среднюю плотность закачиваемой в скважину системы и используя упругие свойства газа и пены, по мере их выпуска из скважины можно снизить противодавление на пласт в необходимых пределах. [2, 4].

Азотно-кислотную обработку призабойной зоны пласта применяют для интенсификации притока нефти и газа. Применение азота при подобной обработке улучшает условия освоения скважин, а также упрощает очистку призабойной зоны пласта после обработки и повышает безопасность работ.

Процесс происходит с использованием передвижных азотных компрессорных станций типа ТГА и заключается в том, что в призабойную зону продуктивного пласта через перфорационные отверстия нагнетаются последовательно порции сжатого газо-

образного азота и газированного азотом кислотного раствора, которые продавливаются в пласт водой, нефтью или газированной азотом жидкостью (пенной).

В связи с высокой активностью азотно-кислотной смеси и практически полной ее нейтрализацией еще в процессе выдерживания кислоты на реагирование. Поэтому сразу после окончания продавливания приступают к освоению скважины, плавно снижая устьевое давление с целью удаления продуктов реакции кислоты из пласта и создания необходимой депрессии для вызова притока из скважины.

Использование инертного газа (азота) значительно повышает взрывобезопасность проведения работ по освоению скважин и улучшают технико-экономические показатели кислотного воздействия на призабойную зону пласта, особенно в условиях слабопроницаемых пород и сравнительно низких пластовых давлений.



Рис.1. Применение азотной станции в технологической операции с использованием колтюбинга

На скважинах гибкая труба, сматываясь с вращающегося барабана, спускается по гузнеку и далее через инжектор, который обеспечивает давление, необходимое для продвижения гибкой трубы по стволу скважины и преодоления внутрискважинного давления или силы трения в стволе. Затем труба проходит через блок противовыбросовых превенторов, устьевое оборудование и входит в колонну НКТ или обсадных труб. Компоновка на конце гибкой трубы обычно состоит из стандартной гидромониторной насадки и обратного клапана, через которые закачивается жидкость и/или азот. Выносы из скважины отводятся через штуцерную линию и манифольд в желобную емкость.

Использование колтюбинга для вымыва проппанта при пониженном гидростатическом давлении обеспечивает наилучшие условия для возвращения скважины в эксплуатацию после проведения гидроразрыва пласта. Применение данной технологии повышает производительность скважины, увеличивает межремонтный период и сокращает сроки возврата скважин в эксплуатацию по сравнению с традиционными методами освоения.

Типичная операция очистки скважины после проведения гидроразрыва пласта выглядит следующим образом: гибкие трубы спускаются в скважину при периодической подаче рассола до контакта с проппантом, оставшимся в стволе скважины.

Затем на поверхности в рассол закачивается азот, с помощью передвижной станции ТГА (рис. 1), и аэрированный азотом рассол подается в скважину через гибкие трубы, очищая ствол скважины до заданной глубины. Общая скорость подачи жидкости и азота рассчитывается таким образом, чтобы создать в продуктивном пласте депрессию в 50 атм. или более. [2]

Через определенные интервалы времени производится отбор проб. Возвратный раствор проверяется на наличие проппанта и/или пластового песка. Для удаления всех твердых частиц и полной промывки скважины в аэрированный азотом раствор добавляются пакки геля.

Использование смеси азота с рассолом позволяет производить очистку в условиях пониженного гидростатического давления (на депрессии), что способствует более эффективному удалению твердых частиц и уменьшению повреждения пласта. После этого в течение нескольких часов можно освоить скважину закачкой одного лишь азота, с помощью передвижной станции ТГА. Это обеспечивает еще более тщательную очистку ствола и позволяет получить данные по динамике добычи, необходимые для подбора типоразмера УЭЦН и оценки работы скважины. Наконец, промывка скважины с применением колтюбинга, как правило, занимает всего два-три дня – на несколько дней меньше, чем при использовании традиционных методов.

Использование газообразного азота подразумевает использование надежного, отвечающего всем установленным техническим требованиям, мобильного самоходного газового комплекса для закачки инертной газовой смеси в нефтяные, газовые и газоконденсатные скважины.

Сам по себе поршневой компрессор – это высокотехнологичное устройство. Многоступенчатые агрегаты имеют сложную систему механизма привода движения дифференциальных поршней, которая ввиду высоких нагрузок, вызванных необходимостью обеспечения выходного давления в размере 20 МПа, подвержена интенсивному износу. Примером такого агрегата может служить компрессор 4ГМ2,5-10/250, широко применяемый для систем подачи газа и газовых смесей в нефтегазовой промышленности, при постановке экспериментальных задач и исследований. Одним из недостатков такого компрессора является значительная шумность и большие массогабаритные характеристики при максимальных значениях вырабатываемого максимального давления и производительности. [1]

Кроме того, в случае выхода из строя механизма движения любой поршневой компрессор становится полностью непригодным для дальнейшего применения, а его ремонт связан с высокими временными и финансовыми затратами. Это в конечном итоге приводит к увеличению издержек производства сжатого газа и других производственных задач.

Большую помощь для выработки рекомендаций, особенно при оценке работы компрессоров на нерасчетных режимах, оказывают математические модели рабочих процессов. Авторами данной статьи разработаны алгоритмы, позволяющие проводить анализ рабочих процессов, силовой анализ механизма движения, оценивать прочность деталей, анализировать работу клапанов.

Дифференцированная оценка влияния каждого из факторов на одновременно протекающие в цилиндре компрессора и зависящие друг от друга рабочие процессы экспериментальным путем связана со значительными материальными и временными затратами. Поэтому в настоящее время на стадии поверочного расчета и рабочего проектирования параллельно проводится численный анализ различных вариантов конструктивного исполнения машин и протекающих рабочих процессов, позволяющий при минимальных материальных и временных затратах научно обосновать вариант, близкий к «оптимальному», подробно рассмотренный в работах [1, 3]

Основой является математическое моделирование рабочих процессов в компрессорных и расширительных машинах объемного действия.

Математическая модель ступени компрессора представляет собой систему, построенную на базе фундаментальных теоретических положений термодинамики тела переменной массы и дополненную рядом логических условий, эмпирических зависимостей и специфических коэффициентов. Она адекватно заменяет объект исследования, обеспечивая при этом изучение, поиск и научное обоснование перспективных технических решений на базе комплексной выходной информации в цифровой и графической форме, раскрывающей взаимосвязь конструкции объекта исследования с протекающими рабочими процессами. В основе математической модели лежат уравнения сохране-

ния энергии тела переменной массы в цилиндре  $i$ -й ступени и в  $j$ -х примыкающих к нему через органы газораспределения полостях конечного объема

$$d(U_i m_i) = dQ_i - dL_i + \sum_{j=1}^n dE_{j,i}, \quad (1)$$

где  $d(U_i m_i)$  – бесконечно малое изменение энергии газа и его массы при сжатии;  $Q_i$  – количество тепловой энергии, выделяемое при сжатии газа;  $L_i$  – работа, затрачиваемая на сжатие газа;  $E_{j,i}$  – энергия, затрачиваемая на перемещение газа в цилиндре и в полостях газораспределения.

Базируясь на законах термодинамики тела переменной массы, запишем уравнение для удельной внутренней энергии реального газа в цилиндре ступени компрессора (детандера) с параметрами  $p$  и  $T$ :

$$du = T \cdot ds - p \cdot dv, \quad (2)$$

которое после несложных преобразований позволяет связать изменение удельной энтропии  $s$  с протекающими процессами теплообмена и массопереноса:

$$ds = \frac{dQ}{m \cdot T} + \frac{\sum [(h_j - h) \cdot dm_{j-II}]}{m \cdot T}. \quad (3)$$

Изменение массы газа в рабочей полости за время, соответствующее повороту вала на угол  $\Delta\varphi$ , определяется соотношением

$$\Delta m = \frac{\Delta\varphi}{\omega} \sum_1^Z M^*, \quad (4)$$

где  $M^*$  – функция, определяющая расход газа через органы газораспределения и уплотнительные узлы;  $Z$  – число каналов (щелей).

Для расчета величины  $M^*$  используются формулы адиабатного течения:

- при критическом режиме истечения формула имеет вид

$$M^* = (\mu F)_\varphi \sqrt{k \cdot p_{ex} \cdot \rho_{ex} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}; \quad (5)$$

- в случае докритического истечения формулу можно записать в виде

$$M^* = (\mu F)_\varphi \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot p_{ex} \cdot \rho_{ex} \cdot \left[ \left(\frac{p_{вых}}{p_{ex}}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{вых}}{p_{ex}}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (6)$$

Здесь индексы «вх» и «вых» – параметры газа на входе и выходе рассматриваемой щели  $F_{щ}$ , а текущий коэффициент расхода  $\mu$  вычисляется с помощью эмпирической зависимости:

$$\mu = \mu_{щ} = 1 - 0,55 \cdot \left(\frac{f_{щ\varphi}}{f_c}\right)^{0,58} \quad (7)$$

#### Моделирование процессов теплообмена

Для определения количества теплоты  $\Delta Q_{\Delta\varphi}$ , отводимой от газа при повороте вала на угол  $\Delta\varphi$ , воспользуемся уравнением, описывающим конвективный теплообмен газа со стенками рабочей камеры, температура которой практически постоянна во времени:

$$dQ = \alpha_{F\varphi} \cdot F_\varphi \cdot (T_{CT} - T) \cdot d\tau, \quad (8)$$

где  $\alpha_{F\varphi}$  – текущий коэффициент теплоотдачи, осредненный по поверхности цилиндра  $F$ ;  $F_\varphi$  – переменная во времени поверхность теплообмена рабочей камеры;  $T_{CT}$  – осредненная по поверхности теплообмена рабочей камеры температура стенок;  $\tau$  – время;  $T$  – текущая температура газа в рабочей камере.

Осредненная температура стенок рассчитывается следующим образом:

$$t_{CT} = k_{CT} \cdot (t_n - t_k), \quad (9)$$

где  $k_{CT}$  - эмпирический коэффициент, характеризующий способ охлаждения ступени,  $k_{CT} = 0,3 \div 0,5$ , цифры указывают на «водяное» или «воздушное» охлаждение соответственно.

В конечно-разностной форме исходное уравнение для определения количества теплоты будет иметь вид

$$\Delta Q_{\Delta\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{\omega} \cdot [\alpha_{F\varphi} \cdot F_{\varphi} \cdot (T_{CT} - T)]. \quad (10)$$

В уравнении (10) текущая поверхность теплообмена описывается с помощью уравнения

$$F_{\varphi} = 2F_{\Pi} + \pi \cdot [(S_{м.л.} + S_{\varphi}) \cdot D], \quad (11)$$

где  $S_{м.л.}$  - площадь линейного мертвого пространства ступени;  $S_{\varphi}$  - площадь поверхности цилиндра, ометаемая поршнем;  $D$  - диаметр цилиндра ступени;  $F_{\Pi}$  - площадь рабочей поверхности поршня.

Текущий коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{F\varphi}$  определяется как

$$\alpha_{F\varphi} = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{ЭКВ}}, \quad (12)$$

где  $Nu$  - критерий Нуссельта;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности сжимаемого газа;  $D_{ЭКВ}$  - эквивалентный линейный размер (диаметр цилиндра ступени).

Определить  $Nu$  можно из критериального уравнения, предложенного профессором, И.К. Прилуцким для компрессорных ступеней

$$Nu = A_{ПК} \cdot Re^x = \sqrt{\frac{\rho_{BC.I} \cdot Re^{0,6}}{\rho_{BC.i}}}, \quad (13)$$

где  $Re$  - критерий Рейнольдса;  $\rho_{BC.I}$  - плотность газа на входе в I ступень;  $\rho_{BC.i}$  - плотность газа на входе в  $i$ -ю ступень;  $x$  - эмпирический показатель степени,  $x = 0,6$ .

Критерий Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = \frac{w \cdot D_{ЭКВ} \cdot \rho}{\mu}, \quad (12)$$

где  $w$  - характеристическая скорость газа в полости сжатия;  $\rho$  - плотность газа в полости сжатия;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости газа.

Решая уравнения относительно  $\alpha_{F\varphi}$ , после ряда упрощений находим текущее во времени и осредненное по текущей поверхности теплообмена значение коэффициента теплоотдачи в цилиндре машин с возвратно движением поршня:

$$\alpha_{\varphi} = \left[ \frac{\lambda}{D_{ЭКВ}} A_{ПК} \cdot \left( \frac{w \cdot D_{ЭКВ} \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,6} \right]. \quad (13)$$

Здесь плотность  $\rho$ , теплопроводность динамическая вязкость  $\mu$  газа определяются в процессе итерационного расчета цикла компрессорной ступени.

Таким образом, текущее  $\Delta Q_{\Delta\varphi}$ , отводимое от газа к стенкам рабочей камеры в течение рабочего цикла, определяется с помощью уравнения

$$\Delta Q_{\Delta\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{\omega} \cdot \left[ \frac{\lambda}{D_{ЭКВ}} A_{ПК} \cdot \left( \frac{w \cdot D_{ЭКВ} \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,6} \right] F_{\varphi} \cdot (T_{CT} - T). \quad (14)$$

Основной задачей в ходе численного эксперимента являлось изучение расчетным путем особенности рабочих процессов поршневых компрессоров с повышенным отношением давлений в ступенях и оценка уровня механического КПД компрессоров с традиционным кривошипно-шатунным механизмом движения.

Анализ рабочих циклов ступеней компрессора на основе расчетных T-s диаграмм при аналитических расчетах с применением пакета Match Cad, позволил устано-

вить преобладающее влияние на трансформацию температурных диаграмм теплообмена газа со стенками цилиндра на участке нагнетания, следствием которого в конце процесса расширения в цилиндре 1 ступени является значительное понижение температуры газа до уровня ниже 0°C.

Закономерности изменения температуры газа во второй ступени те же самые, но в силу большей плотности газа на входе в ступень интенсивность процессов теплообмена резко снижается. При повышенном отношении давлений в 1 ступени уменьшается не только время процесса нагнетания, но и средняя скорость поршня в цилиндре. Это создает предпосылки для снижения числа клапанов или высоты подъема клапанных пластин, что способствует повышению надежности работы компрессора.

**Заключение.** Резюмируя изложенное выше, можно сделать вывод, что при переходных режимах работы поршневых компрессоров можно ожидать повышение эффективности их работы за счет увеличения механического КПД на 7-8% и общего изотермного КПД компрессора на 3-4%. Вместе с тем результаты численного анализа позволили:

- выявить, изучить и научно обосновать новые качественные и количественные закономерности процессов теплообмена и массопереноса в поршневых компрессорах;
- дифференцировать газодинамические потери в каналах клапанов, в патрубках полостей всасывания и нагнетания и в элементах газовых трактов;
- проанализировать возможные конструктивные недостатки уплотнительных узлов поршней и сальников в ступенях и сальников в ступенях высокого давления ( $P_{\text{нг}} = 40$  МПа) при перепадах давлений на кольцах в диапазоне 3–10 МПа и наметить задачи, решение которых будет способствовать созданию герметичных и износостойких уплотнительных узлов;
- обосновать перспективные направления совершенствования схемных решений компрессоров, конструкций, методов расчета и прогнозирования показателей надежности их работы в затраты на преодоление механического трения в узлах с вращательным и возвратно-поступательным движением элементов малорасходных компрессоров;
- рекомендовать научно обоснованные, близкие к «оптимуму» технические решения на стадии эскизного проекта и минимизировать материальные и временные затраты на проведение испытаний макетных и опытных образцов новой техники.
- показано, что при всех плюсах работы на режиме регулирования частотой вращения вала (изменение производительности происходит практически пропорционально изменению частоты вращения; удельная мощность значительно ниже, чем при других способах регулирования; суммарные потери уменьшаются с уменьшением цикличности и т.д.) к применению частотно-регулируемого привода следует относиться с осторожностью.

**Список литературы:** 1. Прилуцкий И.К. Экспериментальная ступень поршневого компрессора с линейным приводом/ Молостов А.В., Казимиров А.В., Молодова Ю.И., Ворошилов И.В. // В сборнике: Перспективы применения энергосберегающего, компрессорного и газоразделительного оборудования в России. Сборник трудов 2-й научно-технической конференции. - Краснодар, 2019. - С. 17-25. 2. Ворошилов И.В. Передвижные азотные компрессорные станции/ Владыкин Д.В., Копачёв Д.Н. // Бурение и нефть. 2013. № 10. - С. 59-62. 3. Котлов А.А. Анализ и оценка эффективности компрессорного оборудования при проведении энергоаудита систем воздухообеспечения предприятий. Часть 2 (поршневые компрессоры)/ Устюшенкова О.Ю., Хрусталева Б.С., Тулеев Д.В., Ворошилов И.В. // Компрессорная техника и пневматика. 2011. № 4.- С. 37. 4. Ворошилов И.В. Компрессорное, газоразделительное и энергосберегающее оборудование нового поколения/ Шулекин П.Б.// Нефть. Газ. Новации. 2021. № 9 (250). - С. 80-81.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ МИКРОРОБОТОВ ГИБРИДНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Галоян Г.А., Закарян Н.Б., Арутюнян М.Г., Саргсян Ю.Л.

(НПУА, Ереван, Армения) Tel.: +374 10 520-348;

E-mail: [mharut@seua.am](mailto:mharut@seua.am)

**Abstract:** The paper presents hybrid microrobots, consisting of two serial connected stages: a macro-stage, for the implementation of a wide range of motion and a micro-stage, which significantly improves robot position accuracy. Two variants of the microrobot design are described based on Gauf-Stewart and Delta platforms. Piezoelectric drive elements and elastic joints are applied in the precision stage.

**Keywords:** hybrid micromanipulator, elastic joints, piezoelectric drive elements, Gauf-Stewart and Delta platforms, high-precision micromanipulator

**Аннотация:** В работе представлены микророботы гибридной конструкции, состоящие из последовательно соединенных друг с другом двух ступеней: макроступени, реализующей перемещения в широком диапазоне и присоединенной к ней микроступени, с высокой точностью корректирующей позиционирование рабочего органа. Описаны два варианта конструкции микроробота, разработанные на основе структур платформ “Гауфа-Стюарта” и “Дельта”. В прецизионной ступени использованы пьезоэлектрические приводные элементы и упругие шарниры.

**Введение.** Прецизионные микророботы предназначены для выполнения сверхточных перемещений, необходимых в различных областях науки и техники, в таких процессах как, например, микрохирургические операции, микробиологические исследования, управление компонентами прецизионных оптомеханических приборов, МЭМС технологии и ряда других.

### 1. Проектирование микроробота типа платформы “Гауфа-Стюарта”

Микроробот содержит две платформы, связанные друг с другом шестью ножками, которые управляясь приводами и меняя свою длину позиционируют платформы друг относительно друга, т.е., при условии неподвижности одной из них, позиционируют подвижную платформу в трехмерном пространстве, по заранее заданной, либо варьируемой программе [1].

Ножки в спроектированном микророботе связаны с платформами посредством, разработанных авторами, двухподвижных упругих шарниров, а в качестве приводов использованы пьезостолбики типа «PISMA P-080» (рис. 1).

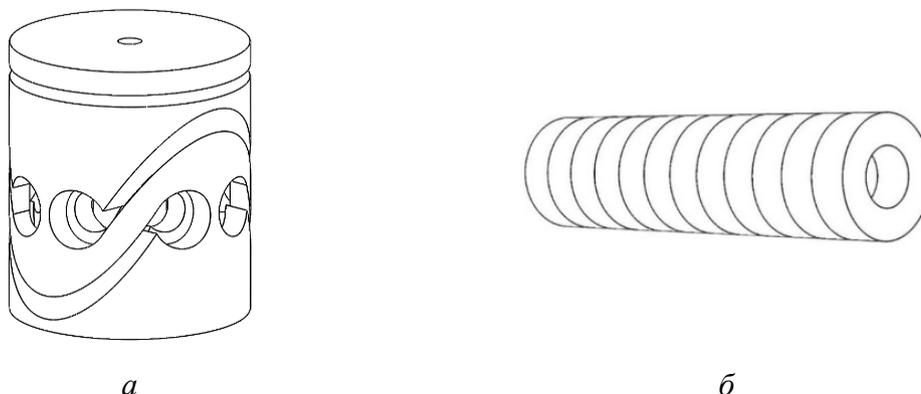


Рис. 1. Компоненты микроробота типа платформы “Гауфа-Стюарта”: а – конструкция двухподвижного упругого шарнира, б – пьезоэлектрический привод «PISMA P-080»

С использованием названных компонентов: путем жесткого прикрепления по концам пьезопривода «PISMA P-080» двухподвижных упругих шарниров, разработана конструкция ножки микроробота (рис. 2).

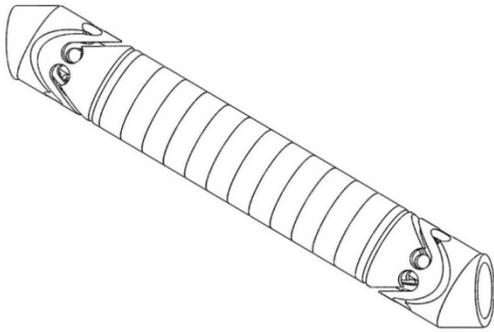


Рис. 2. Конструкция ножки микроробота

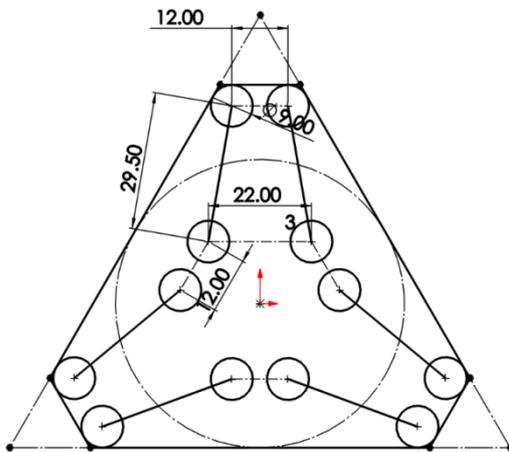


Рис. 3. Схема микроробота с указанием координат присоединения ножек к платформам (размеры в мм)

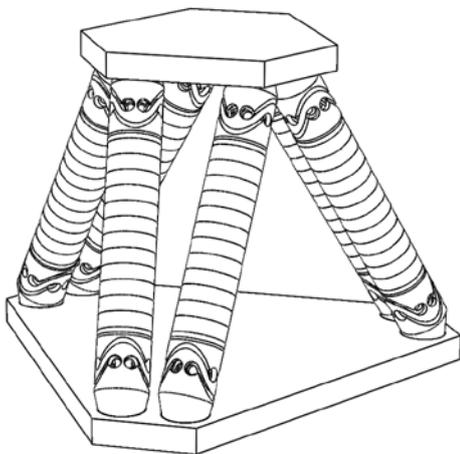


Рис. 4. Конструкция микроробота типа платформы «Гауфа-Стюарта»

Платформы спроектированы в соответствии с заданными в техническом задании размерами ножек и расчетными координатами их присоединения (рис. 3).

Конструктивная схема спроектированного микроробота приведена на рис. 4.

В рассматриваемом варианте его габаритные размеры составляют: 100x100x68 мм, материал упругих шарниров Ti6Al4V, платформы изготовлены из карбона.

## 2. Проектирование микроробота типа «Дельта»

Микроробот типа Дельта также содержит две платформы и соединяющие их три ножки, одним из концов присоединенных к платформе через линейные приводы [2], причем, каждая ножка изготовлена в виде двух спаренных стержней, по обоим концам которых прикреплены по два одноподвижных упругих шарнира, с взаимноперпендикулярными осями вращения, итого по четыре шарнира на каждой ножке (рис. 5 и рис. 6). В качестве приводов использованы линейные приводы марки «PISMA N-422».

Конструкция спроектированной ножки микроробота приведена на рис.6.

В результате использования описанных выше компонентов и спроектированных на основе технического задания платформ выполнена окончательная сборка микроробота типа «Дельта» (рис. 7).

В этом проекте микроробот имеет габариты: 125x125x105 мм, в качестве материала для упругих шарниров взят сплав Ti6Al4V, а платформы изготовлены из карбона.

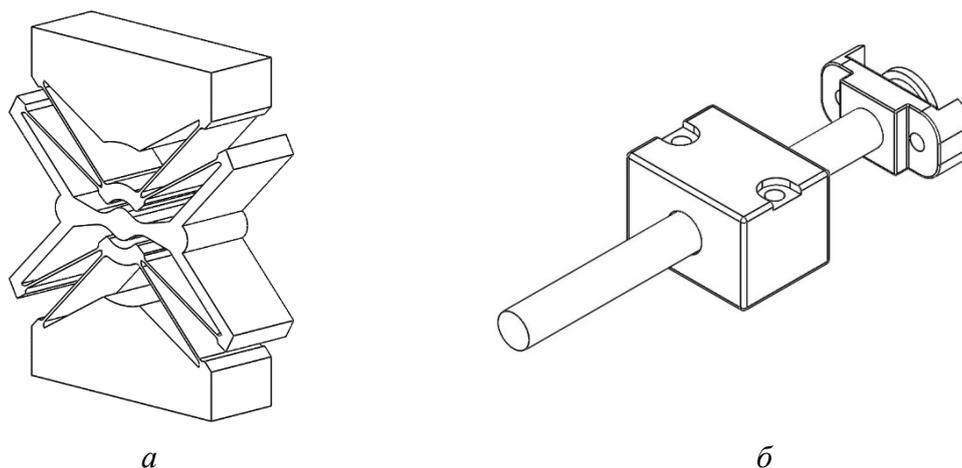


Рис. 5. Компоненты микроробота: а – конструкция одноподвижного упругого шарнира, б – линейный привод «PISMA N-422»

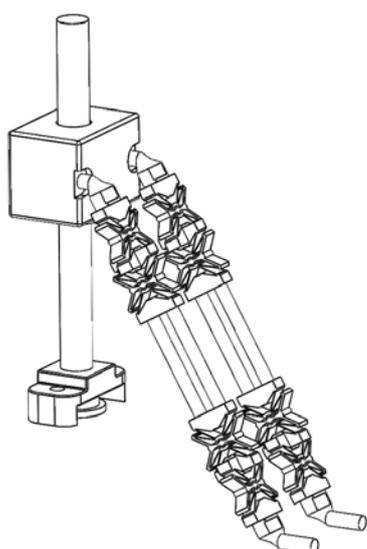


Рис. 6. Конструктивная схема ножки микроробота

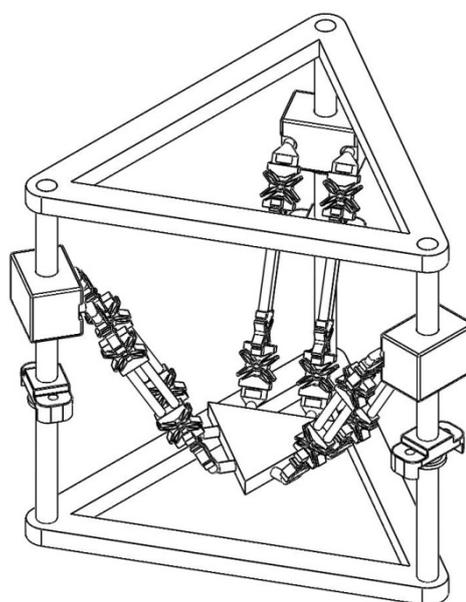


Рис. 7. Конструкция микроробота типа “Дельта”

### 3. Проектирование микроробота гибридной конструкции

Разработанные прецизионные микророботы типа платформы “Гауфа-Стюарта” и “Дельта” имея высокую точность ограничены в диапазонах позиционирования, возникает необходимость создания гибридных роботов, составленных из микроробота и макроробота, в качестве последнего предложен вариант манипулятора типа “Дельта”. При этом, микроробот закрепляется на выходном звене: подвижной платформе макроманипулятора “Дельта” (рис. 8 и рис. 9). В процессе работы ошибки позиционирования макророступени в полной степени поглощаются и устраняются микророступенью.

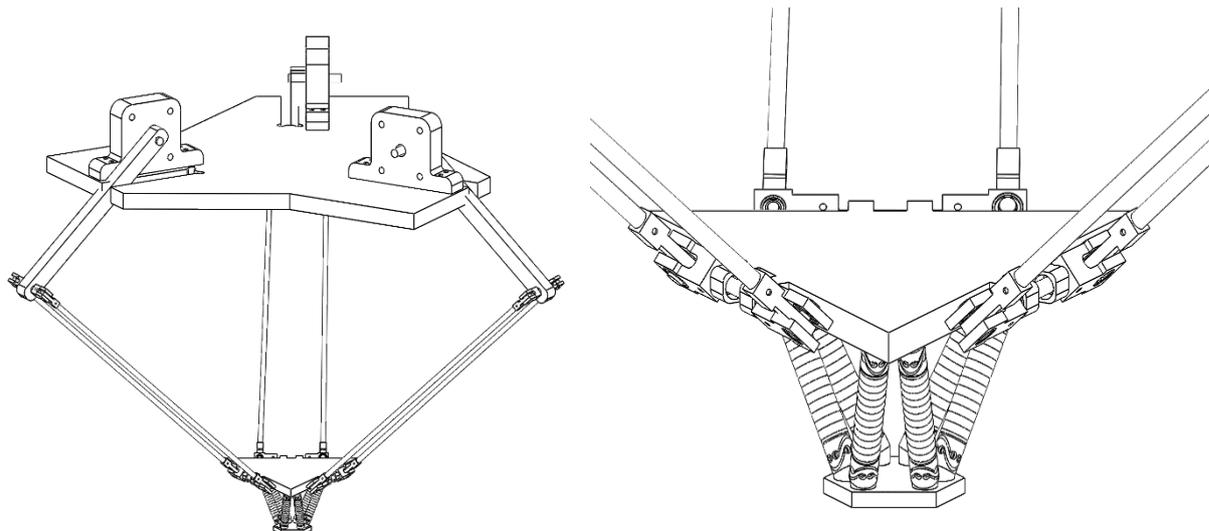


Рис. 8. Гибридный робот с макроступеню “Дельта” и микроступеню “Гауф-Стюарт”

Макроступень робота спроектирована с использованием традиционных жестких шарниров и шаговых двигателей.

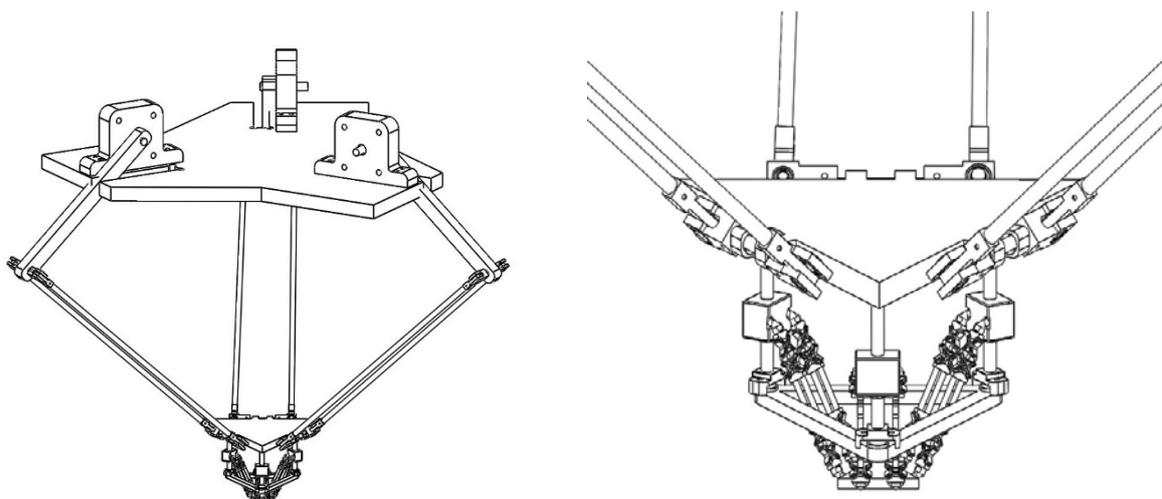


Рис. 9. Гибридный робот с макроступеню “Дельта” и микроступеню “Дельта”

**Заключение.** Исследования в области прецизионных микроботов и опыт их проектирования выводят на оптимальное решение задачи: с использованием микроботов гибридной конструкции, позволяющих обеспечить как любой требуемый технологическим процессом диапазон перемещений, так и сверхвысокую точность позиционирования рабочего органа.

**Список литературы:** 1. G. Sibsankar; et. al. // Kinematic Modeling of Stewart Platform. - 2020. - 10.1007/978-3-030-42363-6\_81. 2. A. Alvares; et. al. // Development of the Linear Delta Robot for Additive Manufacturing. - 2018. - 187-192. 10.1109/CoDIT.2018.8394869.

## АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ВАЛОПРОВОДА ГРЕБНОГО ВИНТА

Гараев Р.А., Царенко С.Н. (КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)  
Тел: +7 (914) 0215016; E-mail: Yesproinpast@gmail.com

**Abstract:** The paper presents an analysis of the transient processes of the propeller shaft line that occur under various acceleration modes. Calculated dependences for determining deformations, angular velocities and torques in shaft sections are obtained. The results obtained in the work can be used to calculate and select the structural elements of the shaft connections that perform both protective and preventive functions.

**Keywords:** shaft line, impulse action, dynamic forces, torsional vibrations, Fourier method.

### Введение

Назначение валопровода в передаче крутящего момента от двигателя гребному винту [1]. Помимо кручения валопровод испытывает продольные и поперечные нагрузки с динамической и статической составляющей. Учет статических нагрузок производится на основе классических методов сопротивления материалов, и не вызывает больших трудностей. Основную сложность для расчета представляют динамические нагрузки. Учет динамических воздействий более сложная задача, для решения которой используют, как точные, так и приближенные методы сопротивления материалов и математической физики [2].

Номинальные нагрузки, действующие на валопровод в штатном режиме работы, можно считать статическими. Более интенсивное воздействие на вал возникает при переходных режимах работы (разгон, торможение), резонансных явлениях и в аварийных ситуациях. В работах [3-5] рассмотрены разные случаи разгона валопровода по экспоненциальному, линейному и импульсному закону. Экспоненциальный наилучшим образом отражает физическую природу процесса, линейный соответствует упрощенным моделям исследования динамики разгонных режимов и импульсный – аварийному случаю.

**Целью работы** является анализ влияния характера разгонного режима на напряженно-деформированное состояние (НДС) валопровода гребного винта.

### Методы и материалы

Исследование, для рассматриваемого режима разгона, выполним по математической модели, представленной в работе [3]. В модели приняты следующие допущения и обозначения: систему валов валопровода заменим однородным упругим стержнем длиной  $l$ , крутильной жесткостью  $GJ_p$  и равномерно распределенным по длине моментом инерции масс  $\gamma J_p$  (рис. 1). На конце вала располагается гребной винт с моментом инерции  $I_M$  и учитывается момент гидродинамического сопротивления, пропорциональный квадрату угловой скорости.

Для рассматриваемого случая левый торец вала начинает движение с номинальной скорости –  $\dot{\theta}_{\text{ном}}$ . Движение произвольного сечения вала рассматривается, как сложное, состоящее из переносного движения левого торца вала и относительного движения деформации вала. Углы поворота для произвольного сечения находятся из зависимости:

$$\psi = \theta + \varphi,$$

где  $\varphi$  — угол закручивания.

Уравнение углов закручивания для рассматриваемой схемы имеет вид [6]:

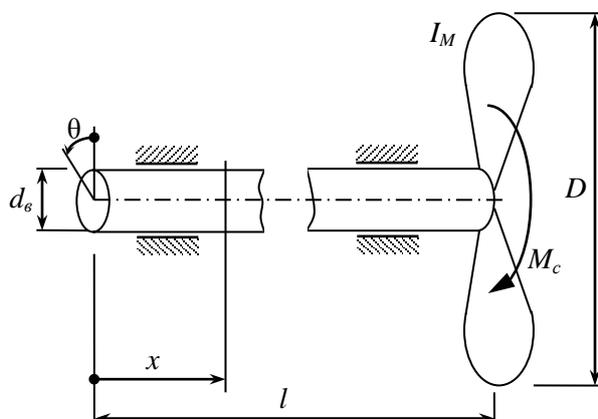


Рис. 1. Расчетная схема валопровода

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \tau^2} = 2\mu \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \delta(\xi - 1) + \tilde{R}_c \left( \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right)^2 \delta(\xi - 1) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2}, \quad (1)$$

здесь используются следующие обозначения:  $\xi=x/l$  – безразмерная координата;  $\tau=tc/l$  – безразмерное время,  $c = \sqrt{GJ_p/\gamma J_p}$  – скорость распространения крутильных волн в стержне;  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака;  $\mu = \frac{R_c \dot{\theta}_{\text{ном}} c}{2GJ_p}$ ;  $\dot{\theta}_{\text{ном}}$  – номинальная угловая скорость;  $R_c$  – коэффициент гидродинамического сопротивления;  $\tilde{R}_c = \frac{R_c c^2}{GJ_p l}$ .

Граничные условия задачи (1) удовлетворяют заземлению левого торца вала и учитывают инерционный момент на правом торце вала:

$$\varphi(0, \tau) = 0; \quad \frac{GJ_p}{l} \varphi'(1, \tau) = \frac{I_M c^2}{l^2} \ddot{\varphi}(1, \tau) \quad (2)$$

Начальные условия учитывают отсутствие в начальный момент времени углов закручивания, а также то, что скорость всех сечений, кроме левого торца в начальный момент равна нулю. Подставляя функцию  $\theta$  принятую для соответствующего режима разгона, находится решение неоднородного уравнения (1):

– для случая экспоненциального режима разгона [3]

$$\theta(\tau) = \dot{\theta}_{\text{ном}} \frac{l}{c} \left( \tau - \frac{1-e^{-\alpha\tau}}{\alpha} \right). \quad (3)$$

– для случая импульсного разгона [4]

$$\theta(\tau) = \dot{\theta}_{\text{ном}} \frac{l}{c} \tau. \quad (4)$$

– для линейного режима разгона [5]

$$\theta(\tau) = \frac{\dot{\theta}_{\text{ном}} l^2}{2Tc^2} \tau^2, \quad (5)$$

здесь  $T$  – период времени за который угловая скорость валопровода выходит на номинальное значение.

### Результаты моделирования.

В качестве примера используются параметры траулера Механик Ковтун: номинальная частота вращения  $\dot{\theta}_{\text{ном}} = 16.3$  рад/с; длина валопровода  $l=11.35$  м; приведенная жесткость валопровода  $GJ_p=1.33 \cdot 10^8$  Н·м<sup>2</sup>; скорость распространения волн крутильных колебаний в стальном стержне  $c=3200$  м/с; относительная инерционная нагрузка  $\zeta=22$ ; коэффициент гидродинамического сопротивления  $R_c=587$  кг·м<sup>2</sup>.

На графиках рис. 2 и рис. 3, соответственно показаны угловые скорости торцевых сечений валопровода и относительных моменты на левом торце вала в соответствии с экспоненциальным режимом разгона (3) при выходе на 95% номинальной скорости вращения за время периода главной формы колебаний  $T = 0.105$  с ( $\alpha=0.1$ ). Штриховые линии соответствуют левому торцу ( $\xi=0$ ), сплошные – правому ( $\xi=1$ ).

На графиках рис. 4 и рис. 5 представлены угловые скорости торцевых сечений валопровода и относительных моменты на левом торце вала для линейного режима разгона (5). На графиках рис. 6 и рис. 7 представлены угловые скорости торцевых сечений валопровода и относительных моменты на левом торце вала для импульсного разгона (4).

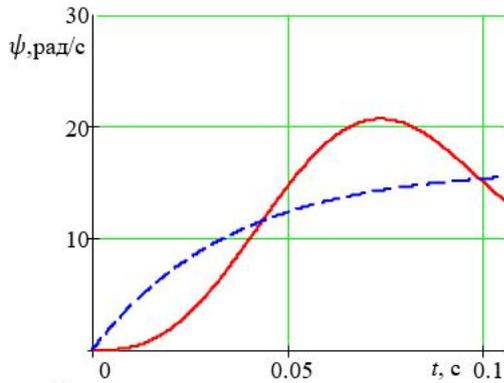


Рис. 2. Угловые скорости торцевых сечений вала

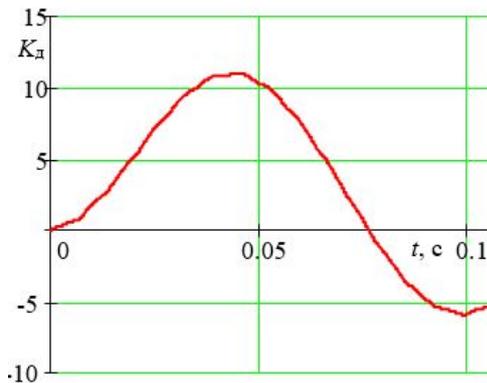


Рис. 3. Относительные моменты на левом торце валопровода

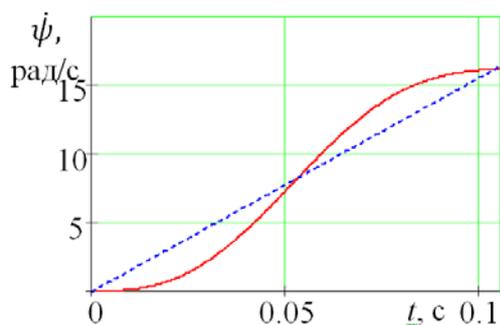


Рис. 4. Угловые скорости торцевых сечений валопровода

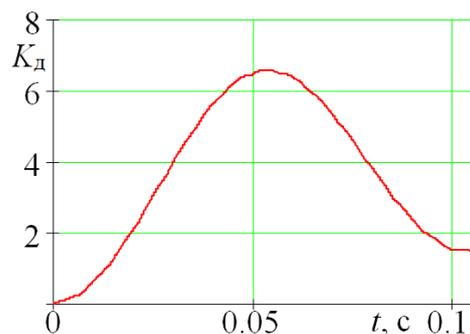


Рис. 5. Динамический коэффициент на левом торце вала

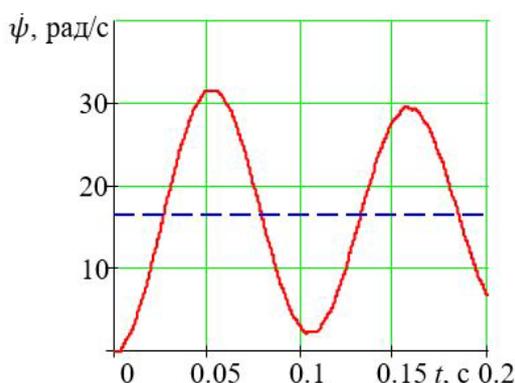


Рис. 6. Угловые скорости торцевых сечений валопровода

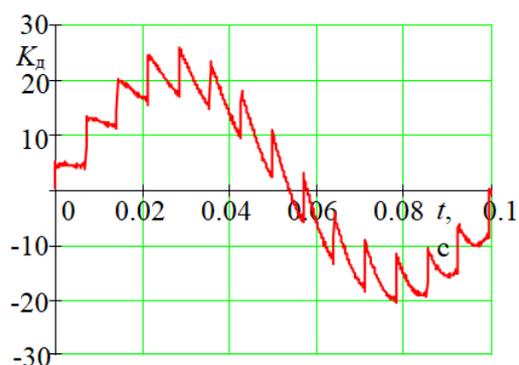


Рис. 7. Относительные моменты на левом торце валопровода

**Заключение.** Анализ разных условий разгона показал, что наиболее благоприятным с позиции динамических усилий является линейный режим разгона. Однако он не в полной мере отражает физическую природу процесса, так как при выходе на номинальную скорость ускорение должно падать до нуля, как в случае экспоненциального разгона, а при линейном – ускорение в любой момент сохраняет постоянную величину. Наиболее опасным является импульсный разгон, но этот случай не является штатным, а относится к аварийным условиям пуска или торможения. Во всех проанализированных случаях нагрузка на вал не доходила до своего пика мгновенно, а это означает, что можно предусмотреть какой-либо механизм либо систему автоматической диагностики, которые в случае возникновения чрезмерной нагрузки оказывали защитное воздействие.

**Список литературы:** 1. Судовой механик: справ. / Под общ. ред. А.А. Фока. – Одесса: Фенікс, 2008. – Т. 1. – 1036 с. 2. Ларин А.А. Роль исследований крутильных колебаний валопроводов в развитии динамики машин // Питання історії науки і техніки. – 2009. – № 4. – С. 2-9. 3. Царенко С. Н. Динамика валопровода гребного винта при разгонных режимах / С. Н. Царенко, А. Н. Рак, Б. Н. Безлобенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С.548–558. DOI:10.21821/2309-5180-2021-13-4-548-558. 4. Гараев Р.А. Анализ динамики разгонных режимов валопровода гребного винта/ Р.А. Гараев, С.Н. Царенко// Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование». Петропавловск-Камчатский, 28–29 апреля 2021 г. 5. Царенко С.Н. Динамика валопровода гребного винта при линейном режиме разгона/ С.Н. Царенко, А.А. Молчан, А.А. Мхоян// Материалы конференции.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ИЗЛОЖНИЦ ДЛЯ РАЗЛИВКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ

Гарченко А.А., Рябцев А.Д., Коровин В.А., Маслов К.А.

(ПАО «Русполимет», НГТУ, г. Кулебаки, г. Нижний Новгород, Россия)

Тел +79524423056, E-mail: a.garchenko@ruspolymet.ru

**Abstract:** The molds are necessary to obtain ingots. High requirements are applied to the ladlers as to the cast metal mold. It must withstand high temperature, pressure, pressure transformations on the part of the ingot and a large number of fillings. This paper presents a method for producing ladles made of steel and cast iron with additional processing in a bucket.

**Keywords:** melting point, steel, cast iron, mold and ingot.

В настоящее время для получения слитков используют литые массивные чугунные или стальные изложницы. Изложницы отливают обычно из чугуна, в некоторых случаях (например, для отливки крупных кузнечных слитков) изложницы отливают из углеродистой качественной стали, предварительно подвергнутой вакуумированию. Сталь для отливки изложниц применяют с содержанием углерода 0,20-0,45%. Конструкция изложницы должна быть удобна в эксплуатации и иметь возможно более высокую стойкость. Стойкость изложницы (срок службы) характеризуется числом слитков, отлитых в нее. На практике в зависимости от веса слитка это число колеблется от 30 до 100 штук.

Стойкость изложниц зависит от состава и качества стали, из которой изложница изготовлена, состава, и температуры разливаемой стали, от условий эксплуатации изложниц в данном цехе, от конструкции изложницы (при данной массе слитка) и времени выдержки слитков в изложницах. Увеличение времени выдержки слитков в изложницах приводит к значительному нагреву их стенок, росту зерен и повышению тепловых напряжений в стенках изложниц. Стойкость изложниц при этом снижается.

Микролегирование исследовали вводом в расплав при наполнении ковша кусками размерами 10-40 мм лигатурой Ni-Mo и VAl. Элементы никель, молибден и ванадий активно стабилизируют и упрочняют металлическую основу.

В условиях ООО «ВЛЗ» были получены отливки – изложниц 1,5 т по трём вариантам внепечной ковшевой обработки расплава стали:

*Первый вариант.* Сталь выплавлялась в дуговой сталеплавильной печи с основной футеровкой, емкость печи 6,0 т. Выпуск стали в ковш осуществляли при температуре 1570°C, температура ковша - 630°C. Обработка расплава в этом варианте осуществлялась карбонатными материалами. Вводили модификатор Lcast5.2 в ковш перед установкой его под прогрев футеровки в количестве 0,2% и далее при наполнении ковша вводили модификатор BARC25 в количестве 0,2%.

*Второй вариант.* Обработка расплава в этом варианте осуществлялась как по варианту 1 и дополнительно при наполнении ковша вводили лигатуру Ni-Mo в количестве 0,2% и VAl в количестве 0,1%.

*Третий вариант.* Обработка расплава в этом варианте осуществлялась вводом модификатора Lcast5.2 в количестве 0,2% в печь и затем при наполнении в ковш модификатор INSTEEL-7 в количестве 0,2% (INSTEEL-7 это комплексный модификатор системы Fe-Si-Mg-Ca-P3M-Al).

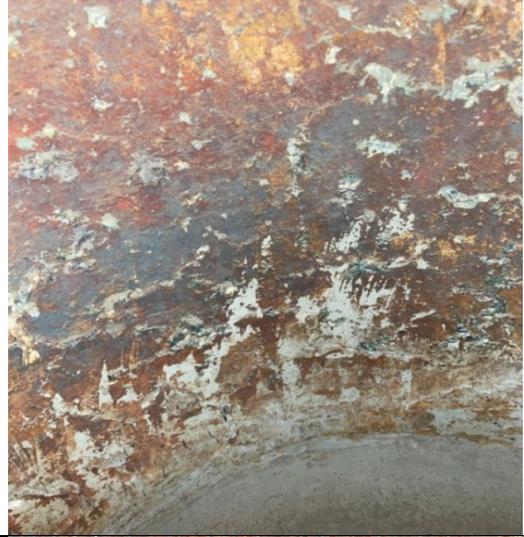
### Эксплуатация стальных изложниц.

Испытания стальных изложниц для разливки высоколегированных сплавов, полученных в условиях ООО «ВЛЗ», производились на предприятии ПАО «Русполимет».

В марте 2022 года стальные изложницы №10060 (вариант 1 с дополнительным модифицированием), №14573 (вариант 2 с дополнительным модифицированием и микролегированием), №14682 (вариант 3 с комплексным модифицированием) прошли 39

наливов (на изложницах полученных без дополнительной обработки стойкость составила 15-20 наливов), а их состояние представлено на следующих фото в таблице 1.

Таблица 1. Состояние внутренней поверхности изложницы

№	Состояние внутренней поверхности изложницы	
10060		
14573		
14682		

В процессе разливки высоколегированных сплавов в изложницу с получением слитка (налива) фиксировалась его температура, которая находилась в интервале 1460-1560°C и температура по оси литейной изложницы, которая находилась в интервале 350-530°C.

**Производство и эксплуатация чугунных изложниц.**

В работе описано совершенствование ваграночного серого чугуна за счет обработки чугуна в ковше карбонатными материалами L-cast 5.3 и БАРС25, а также микролегирования молибденом и ванадием. Целью, которой является повышение стойкости изложниц. Работу проводили при отливке конических изложниц предназначенных для получения слитков из жаропрочного сплава ЭП648 массой 1,3тонны на вакуумной индукционной печи ВИП4,6 в условиях ПАО «Русполимет».

В рамках работы отлито 6 изложниц по трем вариантам: *Первый вариант.* Чугун обрабатывался карбонатными материалами L-cast 5.3 и БАРС25; *Второй вариант.* Обработка по первому варианту, а также легирование металла молибденом и ванадием; *Третий вариант.* По серийной технологии завода изготовителя, без дополнительной обработки.

Разливку сплавов в изложницы производили через промежуточный ковш, свеху. После каждого налива изложниц проводили оценку состояния внутренней поверхности, а также замеры температур в трех точках изложниц. Нормативная стойкость (до образования сетки разгара) чугунных изложниц серийно применяемых на предприятии составляет 20 плавов. В таблице 2 изображено состояние внутренней поверхности изложниц после 10, 20 и 32 наливов.

Таблица 2. Состояние внутренней поверхности изложниц

Наливы	1 вариант	2 вариант	Серийно применяемая
10			
20			

32			---
----	---	--	-----

В процессе эксплуатации отмечено, что на серийно применяемом варианте, изложнице из чугуна СЧ10 сетка разгара появилась уже после 13го налива (так же как и на остальных изложницах из СЧ10), а на экспериментальных изложницах незначительная сетка разгара появилась после 15 наливов (1 вариант) и 17 наливов (2 вариант).

К 20 наливу состояние внутренней поверхности изложницы из СЧ10 не позволяло продолжать ее эксплуатацию, когда экспериментальные изложницы находились в хорошем состоянии (с незначительной сеткой разгара).

После 32 наливов экспериментальные изложницы выведены из работы.

#### **Выводы.**

При эксплуатации стальных и чугунных изложниц по предложенным вариантам были зафиксированы следующие результаты:

- модифицирование и микролегирование расплава стали за счет воздействия на микроструктуру повышает ее механические и эксплуатационные свойства;
- стойкость стальных изложниц в процессе разливки высоколегированных сплавов составила 39 наливов;
- модифицирование и микролегирование расплава чугуна за счет воздействия на микроструктуру повышает механические свойства чугуна;
- стойкость чугунных изложниц отлитых по экспериментальной технологии превышает стойкость серийно применяемых более чем на 50% и составляет 32 налива;
- полученные результаты эксплуатационных испытаний подтвердили результативность рекомендуемых технологий получения стальных и чугунных изложниц.

**Список литературы:** 1. Кульбовский, И.К. Роль микропримесей в формировании структуры графита в чугуне / И.К. Кульбовский, Р.А. Богданов // Литейщик России. – 2006. - № 12. – С. 31 – 34. 2. Курчанов, В. А. В сб.: Повышение стойкости изложниц / В.А. Курчанов. М.: Металлургия. 1989. -142с. 3. Мизин, В.Г. Экспериментальное исследование рафинирования и модифицирования стали сплавами Si - Ca, Si - Sr и Si - Ba / В.Г. Мизин, Б.Ф. Белов, Г.Г. Михайлов, А.В. Сенин, ЮУрГУ, г. Челябинск, Россия ООО НП «Технология», г. Челябинск, Россия ДонНАСА, г. Донецк ЖУРНАЛ: СТАЛЬ Номер:8 Год: 2019. Страницы: 14-18. 4. Коровин, В.А. Комплексная обработка расплава стали и чугуна: монография / В.А. Коровин, Р.Н. Палавин; Нижегород. гос. техн. ун-т.им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2009. – 101 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Герасимов А.В., Мухамадиев Р.Р. (КНИТУ, г. Казань, Россия),  
Тел./Факс+7(843)231-41-88, E-mail: [aleks\\_gerasimov@mail.ru](mailto:aleks_gerasimov@mail.ru)

**Abstract:** *The paper presents the development of a neural network implemented using the Python programming language version 3.6.9, together with installed libraries: tensorflow for working with neural network models and conducting training, numpy for working with multidimensional data arrays, pandas for working with tabular files and their processing, matplotlib for visualizing information and working with graphs and sklearn for working with scalar data and their transformation. The model was built and trained in the google.colab environment to ensure stable operation of the development environment and the operating system.*

**Key words:** *neural network, forecasting, time series, modeling, programming language.*

Испокон веков человек мечтал знать будущее и уметь предсказывать события хотя бы следующего дня. Это желание вполне понятно, поскольку знание даже приблизительного будущего позволяет получить существенные преимущества в настоящем. Этим обусловлен интерес современных ученых к созданию математических моделей для предсказания тенденций и трендов самых разнообразных процессов, от технологических до финансовых или политических. Как показывают научные достижения, спрогнозировать будущие события вполне реально, если обладать достаточной информацией о нынешнем состоянии и состояниях в прошлом.

Огромное количество проектов, с которыми современные компании приходится иметь дело требуют четкого планирования на месяцы или даже годы. Однако всё еще одной из наиболее важных и при этом сложных задач считается прогнозирование сроков выполнения работ. Оценить задачу в рамках допустимых погрешностей – задача для опытных и высококвалифицированных сотрудников. При этом нарушение сроков ведет к репутационным и материальным убыткам компании.

Прогнозирование временных рядов является достаточно старой задачей, которую пытались решить разнообразными способами, включая статистический анализ. Подобные прогнозирующие модели не смогли предложить достаточную точность, удовлетворяющую поставленным целям и задачам. Однако по мере распространения методов машинного обучения стало очевидно, что нейронные сети могут прогнозировать с точностью, превышающей стандартные методы статистического анализа [1].

Для задач прогнозирования хорошо зарекомендовали себя рекуррентные нейронные сети. Суть работы подобных сетей заключается в том, чтобы проанализировать входные вектора  $X_1 \dots X_n$ , являющиеся критериями прогнозирования, и дать количественную оценку  $Y_k$ , зависимую от этих параметров. Задачи прогнозирования временных рядов, в свою очередь, сводятся к решению задачи регрессии. При решении подобных задач методами машинного обучения считается, что можно предпочесть ту же рекуррентную модель нейронной сети. На практике же такая модель показала себя не хуже статистических методов прогнозирования, однако не является однозначно более совершенной моделью для решения подобных задач. Для улучшения работы нейронной сети в сравнении со статистическими методами были созданы улучшенные модели рекуррентных нейронных сетей, такие как LSTM (Сети

долго-краткосрочной памяти) [1] и GRU (вентильная рекуррентная единица) [2], продемонстрировавшие более высокие показатели прогнозирования.

Разработка нейронной сети была реализована с помощью языка программирования Python версии 3.6.9, совместно с установленными библиотеками: tensorflow для работы с моделями нейронных сетей и проведением обучения, numpy для работы с многомерными массивами данных, pandas для работы с табличными файлами и их обработки, matplotlib для визуализации информации и работы с графиками и sklearn для работы с скалярными данными и их преобразования. Построение и обучение модели выполнялась в среде google.colab для обеспечения стабильной работы среды разработки и операционной системы.

Данные для обучения и тестирования построенной модели представляют собой выборку из корпоративной системы управления проектами по 17 проектам, включающие 534875 задач организации на протяжении 9 лет работы. Каждый проект разделен по древовидной структуре на под-проекты, каждый родительский проект которого можно принять за классификатор проекта, а конечные листья считать классификатором каждой из задачи. Такая структура позволяет поддерживать более точную классификацию при работе модели, несмотря на наличие классифицирующих слоев до рассматриваемой, а также устраняет проблемы накопления ошибок при обучении модели.

Обработка полученных данных производилась под каждую конкретную модель. В общем виде данные стандартизировались и структурировались по набору необходимых из имеющихся данных для обучения нейронной сети. Для сохранения информации о древовидной структуре каждый элемент выборки имеет идентификатор проекта вместе с идентификатором родительского проекта. Это позволяет не выводить область классификации выше 3х уровней для поддержания возможности работы с уникальными задачами на основании иных критериев.

Для работы с классической рекуррентной сетью данные форматировались с целью определения тенденции сроков выполнения по каждому из классов задачи. Разбивка данных проводилась по последовательности задач одной категории с диапазоном в 12 значений. В случае отсутствия достаточно количества задач в под-проектах их задачи вырезались из итоговой таблицы.

	t-12	t-11	t-10	t-9	t-8	t-7	t-6	t-5	t-4	t-3	t-2	t-1	
12	5207.783333	1171.183333	2202.183333	1031.366667	850.566667	1004.166667	991.766667	10797.616670	836.283333	501.783333	298.266667	51.216667	303.016667
13	1171.183333	2202.183333	1031.366667	850.566667	1004.166667	991.766667	10797.616670	836.283333	501.783333	298.266667	51.216667	303.016667	154.616667
14	2202.183333	1031.366667	850.566667	1004.166667	991.766667	10797.616670	836.283333	501.783333	298.266667	51.216667	303.016667	154.616667	151.366667
15	1031.366667	850.566667	1004.166667	991.766667	10797.616670	836.283333	501.783333	298.266667	51.216667	303.016667	154.616667	151.366667	93.700000
16	850.566667	1004.166667	991.766667	10797.616670	836.283333	501.783333	298.266667	51.216667	303.016667	154.616667	151.366667	93.700000	1076.950000

Рис. 1. Входные данные рекуррентной нейронной сети

Архитектура рекуррентной нейронной сети представляет собой сеть с 12 входными нейронами, 128 нейронов скрытого слоя функции RELU и линейным выходным слоем. Обучение проводится методом обратного распространения ошибки.

Средне относительная ошибка MAE составила 2235 минут, что выходит за рамки диапазона допустимой погрешности прогнозирования конкретной задачи.

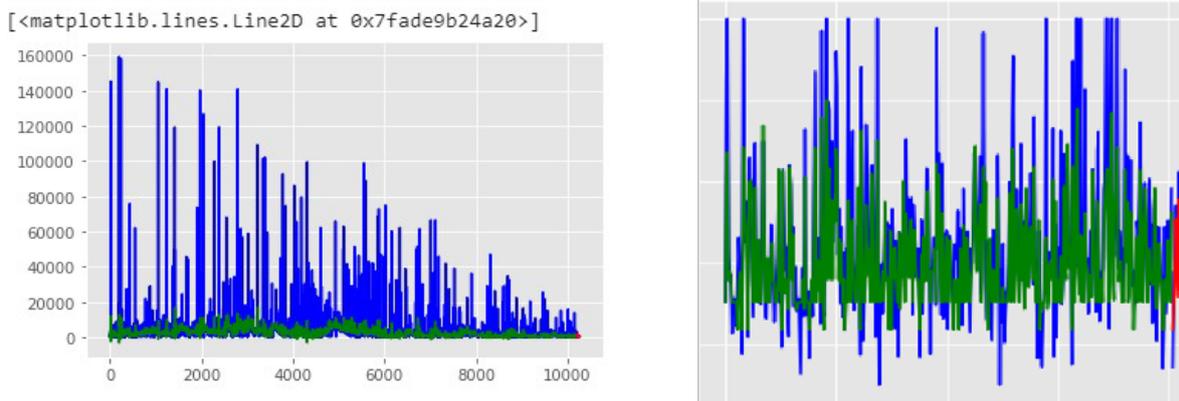


Рис. 2. Результаты рекуррентной нейронной сети

Ввиду возможности создания задачи из внешнего сервиса и иного процесса выполнения таких задач, введен буллевый классификатор источника создания задачи характеризующий по какому процессу выполняется та или иная задача. Также задачи могут быть созданы в не рабочее время, что увеличивает время на обработку, а соответственно, и на завершение задачи. Для идентификации подобных случаев был введен буллевый классификатор создания задачи. Время потраченное на задачу рассчитывается по разнице дат создания и закрытия задачи, исчисляемое в минутах.

В общем виде на вход поступают следующие данные:

- Идентификатор родительского проекта
- Идентификатор проекта для определения классификатора задачи, который фактически представляет собой конечный лист дерева проектов к которой принадлежит задача.
- Идентификатор исполнителя.
- Буллевый классификатор источника задачи.
- Буллевый классификатор создания задачи.
- Время потраченное на задачу.

Улучшенные данные подавались в построенную LSTM модель, состоящую из 2 рекуррентных слоёв с коротко срочной памятью и 2мя слоями забвения для избежание переобучения модели. Обучение проводится циклами по 100, 300, 600, 800 эпох с фиксацией наилучшего результата.

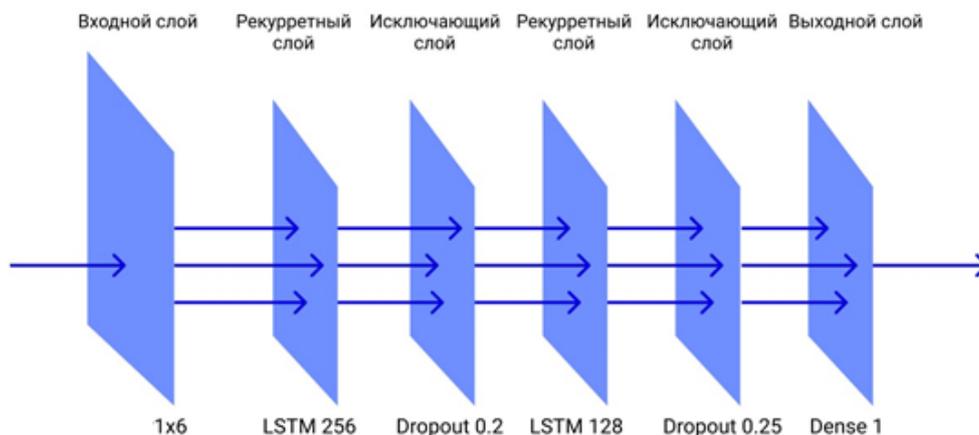


Рис. 3. Архитектура LSTM модели

Наилучшим результатом обучения была выбрана модель после 300 эпох обучения со средней абсолютной ошибкой (MAE) 1188 и средней квадратичной ошибкой (MSE) в 1411344. Что в часах соответствует средней абсолютной ошибке 19.8. На рисунке 4 приведен график обучения нейронной сети, где синим – фактические значения, зеленым – результат на тренировочной выборке, красным – результат на тестовой выборке.

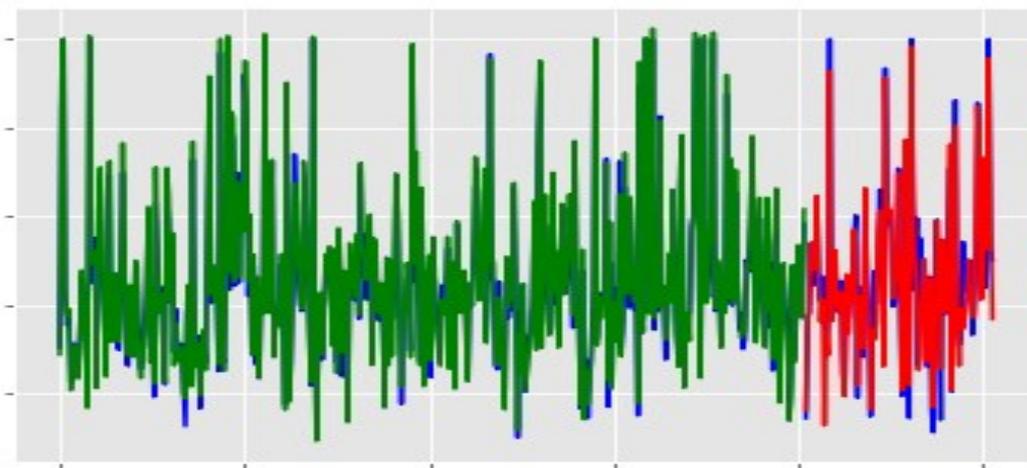


Рис. 4. График обучения

При сравнении результатов видно, что рассмотренная ранее модель рекуррентной нейронной сети и метод плавающего окна уступает LSTM модели с классификационным характером построения данным. Видно, что характер прогнозов на пиках лучше опознаётся LSTM моделью, на ней прогнозы практически полностью перекрывают фактические данные тогда как стандартная рекуррентная модель не справляется с определением пиковых показателей выравнивая график прогноза по среднему значению.

В рамках поставленной задачи полученная LSTM модель с средним диапазоном погрешности меньше чем в день полностью удовлетворяет требованиям. Усложнение архитектуры модели приведет лишь к снижению результата и увеличению требований к ресурсам при обучении. На основании этого в случае необходимости улучшения результата имеет смысл переработать входные данные или рассмотреть иные виды нейронных сетей.

**Список литературы:** 1. Gers F.A., Schmidhuber J.. 2000. Recurrent nets that time and count, Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. 2. Livieris I. E., Pintelas E., Pintelas P. 2020. A CNN-LSTM model for gold price time-series forecasting. Neural Computing and Applications. 1-10.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ КОНСТРУКЦИЙ 3D-ПРИНТЕРА

Горобец И.А., Лахин А.М., Киселица Д.О., Жарких Д.С.

(ГОУВПО «ДОННТУ», г. Донецк, ДНР)

E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

**Abstract:** *New technologies for the production of mechanical engineering products are the task of modern industry. Additive technologies are one of the implementations of the newest approaches to solving such problems. Peculiarities of kinematic structures of 3D-printers are investigated. The schemes of parallel kinematics structures of the mechanical part of technological equipment for the implementation of additive technologies are considered. The analysis of parallel kinematic structures of the equipment is given. The best solutions of designs of 3D-printers are offered.*

**Key words:** *3D printer, analysis, structure, kinematics, characteristics, scheme.*

Современные требования к материалоемкости, прочности, точности изделий машиностроения привели к формированию новых задач, в числе которых - использование аддитивных технологий. Под аддитивными технологиями понимают процесс получения трёхмерных объектов заданной геометрической формы и качества поверхности на основе цифровой 3D-модели, путём поэтапного формирования поверхностей изделия за счёт добавления слоя материала на созданную основу или заготовку. Таким образом, идея аддитивного изготовления (или 3D-печати) объекта основана на концепции построения изделия последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры объекта, с использованием цифровой модели создаваемого изделия. При этом, каждый из наносимых слоёв материала увеличивает объем и вес изготавливаемой заготовки. Такая концепция производства изделий машиностроения в виде поэтапного наращивания их объёма является антагонистичной классической модели изготовления (путём механического удаления поверхностных слоёв у заготовки до получения размеров детали), но вовсе не противоречит целям и задачам отрасли.

Ежегодно прирост в мировом рынке аддитивных технологий составляет 27—28%, с лидерством США (доля АФ-оборудования достигает 38%). В пятёрке передовиков находятся Япония, Германия, Китай и Великобритания. В России также функционируют компании, занимающиеся прототипированием. Большинство из них — небольшие, без дорогостоящего оборудования, но есть и известные: ФГУП «НАМИ», НПО «Салют», АБ «Универсал», НИИ «Машиностроительные Технологии» [1, 2].

Особенностями конструкций известных типов технологического оборудования (3D-принтера) для реализации аддитивных технологий, является их приверженность к картезианскому типу, основанная на возможности линейного перемещения экструдера в трёх измерениях [3]. Однако, существуют конструкции, использующие принцип параллельных структур [4,5], среди которых существует множество реализаций структурной схемы кинематики механической части 3D-принтера. Рассмотрим вероятные структурные схемы 3D-принтеров на основе параллельных структур с целью отыскания наилучшего решения для повышения производительности и точности работы устройств.

Структурные схемы механизма 3D-принтера состоят из простых кинематических пар, какими являются: R – вращательная пара, P – поступательная пара, S – шаровой шарнир, C – цилиндрическая пара, H – винтовая пара, U – карданное соединение. Каждая простая кинематическая пара имеет определённое количество степеней свободы [6]. Основными типами пространственных параллельных устройств с кинематическими структурами, обеспечивающими три степени свободы, являются

устройства, которые имеют или один активный поступательный шарнир в кинематической цепи, или один активный вращательный шарнир.

Принцип действия параллельных устройств с активным поступательным шарниром основан на изменении положения подвижной платформы при изменении длин звеньев с помощью поступательных кинематических пар.

Структуры, содержащие активную поступательную пару, в свою очередь, подразделяются на две группы, со звеньями постоянной длины и со звеньями переменной длины. К таким механизмам относятся устройства с UPU-, SPS-, UPS-, SPU-, PUU-структурами (рис. 1).

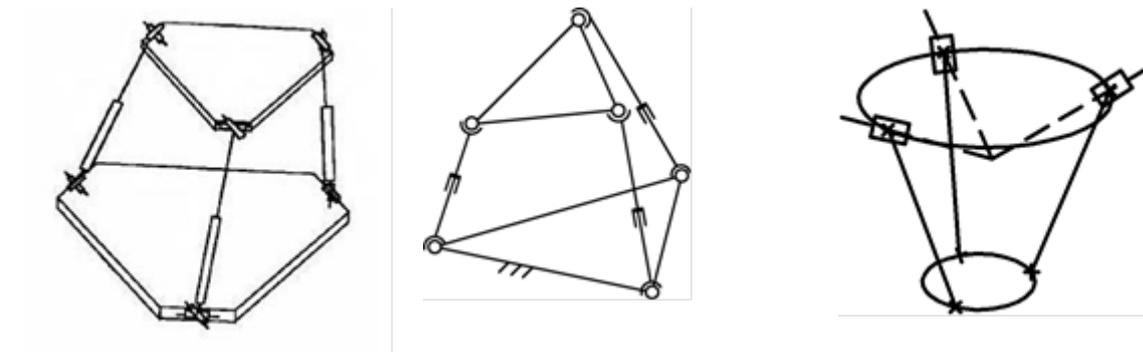


Рис. 1. Структурные схемы UPU-, SPS-, PUU- устройств, соответственно

Устройства со структурой UPU-, SPS-, UPS- и SPU имеют кинематические звенья пар переменной длины. Длина цепи варьируется с помощью призматической кинематической пары. Принцип действия таких устройств основан на зависимости положения подвижной платформы относительно неподвижной, от длины каждого из звеньев кинематической пары. Устройство со структурой PUU имеет кинематические звенья постоянной длины. Положение подвижной платформы относительно неподвижной изменятся с помощью линейных приводов, которые также являются кинематическими поступательными парами.

Устройства с вращательным активным шарниром называют Delta –структурами. Устройство состоит из трёх рычагов, прикреплённых посредством карданных шарниров к неподвижной платформе. Особенностью схемы конструкции является использование параллелограммов, что позволяет сохранять пространственную ориентацию исполнительного механизма, рис. 2 а.

Параллельной кинематической структурой обладает и конструкция Tricept, Схема конструкции такого устройства состоит из четырёх кинематических звеньев, включая три идентичные активные пары и одно пассивное звено, соединяющее неподвижную основу с движущейся платформой. Каждая активная кинематическая пара содержит карданный шарнир, установленный на неподвижной платформе, изменяемое по длине звено с приводимым в движение призматическим шарниром и сферическим шарниром, прикреплённым к движущейся платформе. При этом, пассивное кинематическое звено в виде телескопической трубы, находится в середине конструкции устройства для ограничения движения платформы только тремя степенями свободы, рис.2 б.

Структура параллельного механизма Orthoglide, состоит из трёх параллельных идентичных кинематических пар. Активными шарнирами устройства являются три ортогональных призматических шарнира. Подвижная платформа связана с призматическими шарнирами с помощью трёх параллелограммов. Таким образом, конструкция может совершать только поступательные перемещения. Особенностью

этой структуры является отсутствие возможности столкновений звеньев устройства, рис.2 в.

Выбор конкретной структурной схемы и в дальнейшем конструкции 3D-принтера на основе структуры параллельных механизмов, является сложной задачей, решение которой должно быть обусловлено многими факторами и критериями оценки.

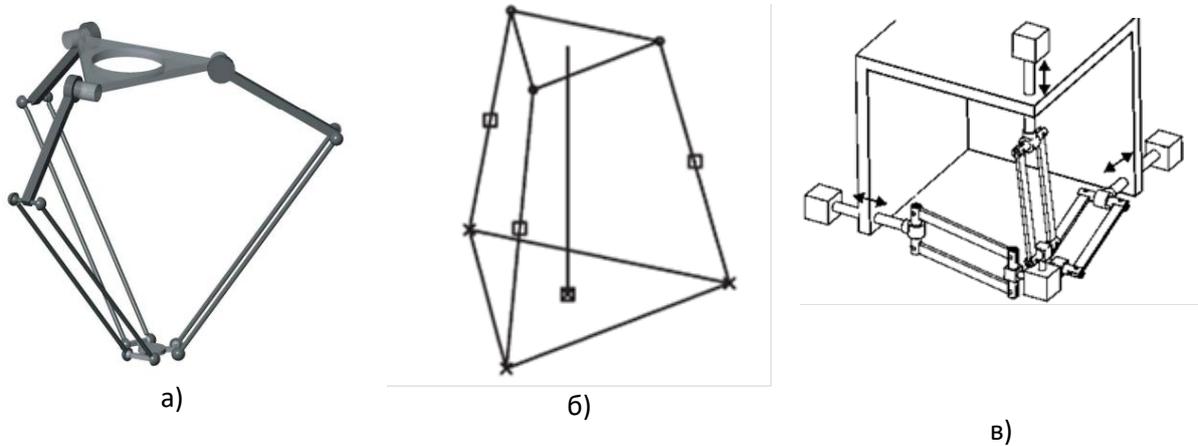


Рис. 2. Структуры: а) Delta, б) Tricept и в) Orthoglide, соответственно

Наиболее весомыми критериями оценки пригодности параллельной структуры механизма для использования в конструкции 3D-принтера, табл.1, являются:

Таблица 1 – Критерии и оценки возможных структур робота

Критерий оценки / Вариант структуры	3- UPU	3- SPS	3- PUU	Delta	Tricept	Orthoglide
количество кинематических пар	9	9	9	9	10	9
сложность кинематических пар	15	21	15	9	17	9
количество приводов	3	3	3	3	3	3
количество степеней свободы	3	3	3	3	3	3
обратная задача кинематики	9	8	8	9	9	8
прямая задача кинематики	7	10	6	8	8	6
динамика	10	8	8	8	8	8
управление	9	10	8	9	8	8
скорость	8	8	7	6	10	8
рабочая зона	6	6	6	7	8	10
сложность структуры	7	7	7	9	10	8
рабочая зона / конструкция	7	7	6	7	8	10
Итого	93	100	86	87	102	90

- количество и сложность кинематических пар,
- количество приводов,
- реализуемое количество степеней свободы,
- сложность решения обратной и прямой задачи кинематики,
- динамические характеристики,
- система управления,
- скорость работы 3D-принтера,
- реализуемая рабочая зона,
- сложность структуры,
- отношение рабочей зоны 3D-принтера к объёму, занимаемому его конструкцией и пр.

Из таблицы 1 можно сделать вывод о минимальных значениях суммарных численных параметров в структурах 3-PUU и Delta, которые можно рекомендовать для реализации кинематики механической части 3D-принтера с тремя степенями свободы. Структуры Tricert и 3-SPS содержат более сложные кинематические пары, а структура Orthoglide - имеет относительно небольшую рабочую зону.

**Выводы.** Использование новых технологий получения изделий машиностроения является актуальной задачей современной промышленности. Одной из реализаций новейших подходов решения таких задач являются аддитивные технологии. Исследования схем конструкций технологического оборудования аддитивных технологий выявили особенности кинематических структур механической части 3D-принтеров. Рассмотрены актуальные схемы высокоточных и производительных параллельных структур, кинематики механической части технологического оборудования для реализации аддитивных технологий. Дан анализ параллельных кинематических структур 3D-принтеров и предложены их наилучшие решения в виде структур 3-PUU и Delta.

**Список литературы:** 1. Носков, О. Еще раз догнать Америку [Электронный ресурс] – М.: Академгородок – 2017. — Режим доступа: <https://academcity.org/content/eshche-raz-dognat-ameriku> 2 Сферы применений аддитивных технологий [Электронный ресурс] - М.: Изд. Эра 3D,- 2017. — Режим доступа:<https://era-3d.ru/baza-znaniy/poleznaya-informatsiya/sfery-primeneniya-additivnykh-tehnologiy> 3. Горобец, И.А. Методы и применимость аддитивных технологий в машиностроении / И.А. Горобец, Н.В. Голубов, А.М. Лахин, Д.О.Киселица, Д.С.Жарких/ ИНЖЕНЕР: студенческий научно-технический журнал. – Донецк, ДонНТУ, 2021. - № 2(31). С. 43-49. 4. Merlet J.-P. “Parallel Robots. Second Edition.” – Springer, 2006 5. Raza Ur-Rehman. Multiobjective Optimization of Parallel Robots and Optimal Path Placement. Robotics - Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2009. 6. Тимофеев, Г.А. Теория механизмов и машин: учебник и практикум для прикладного бакалавриата/ Г.А.Тимофеев – М.: Изд. «Юрайт», 2019 – 368с.

## ПРИМЕНЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Гусев Е.Л.<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>Институт проблем нефти и газа Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского Отделения Российской Академии наук»,  
<sup>2</sup>Северо-Восточный федеральный университет, Институт математики и информатики, г. Якутск, Россия)  
E-mail: [elgusev@mail.ru](mailto:elgusev@mail.ru)

**Abstract:** *In recent decades, composite materials and structures made of them have been widely used in various modern fields of physics and technology, which determine scientific and technological progress. Composite materials, structures made of them, composite coatings, are constantly under the influence of static and dynamic loads, which are additionally influenced by extreme environmental factors. In accordance with this, the problem of developing effective mathematical methods for solving inverse problems of forecasting the defining characteristics of composites under the influence of extreme loads and extreme environmental factors is of considerable relevance.*

*A study of the problem of developing effective methods for predicting the defining characteristics (residual resource, strength, reliability, durability) of composite materials and structures under the influence of extreme environmental factors and operational loads characteristic of the sharply continental climate of the Arctic and Subarctic zones. The formulated problems are investigated within the framework of refined variational formulations of inverse forecasting problems based on modern provisions of the kinetic theory of strength.*

*The application of modern kinetic strength theory to solve the problems of predicting the residual life of polymer composites under extreme conditions allowed us to build effective generalized models of the durability of composites, as well as to conduct a constructive analysis of the nature and degree of influence of various destructive factors on the durability of composites.*

**Key words:** *composite materials, extreme environmental factors, kinetic theory of strength.*

**Введение.** В настоящее время широкое распространение в различных современных областях физики и техники, определяющих научно-технический прогресс, таких как авиа-, и космическая техника, нефтяная и газовая промышленность, судостроение, находят композиционные материалы и конструкции из них. Композиционные материалы, конструкции из них, композиционные покрытия, постоянно находятся под влиянием статических и динамических нагрузок, на которые дополнительно накладывается влияние экстремальных факторов внешней среды. В соответствии с этим значительную актуальность имеет проблема разработки математических методов решения обратных задач прогнозирования определяющих характеристик композитов при воздействии экстремальных нагрузок и экстремальных факторов внешней среды [1-14].

Задачи прогнозирования остаточного ресурса, прочности, надежности, долговечности композиционных материалов и конструкций из них являются в значительной степени многоаспектными, для их успешного решения необходимы глубокие знания на стыке многих областей, таких как физика, химия, материаловедение, современные математические методы и подходы, физика и механика композитов и др.

Одностороннее решение задач прогнозирования определяющих характеристик композитов на основе методов и подходов, присущих для одной научной области, как

правило, приводит к упрощенным решениям, имеющим значительную погрешность. Недостатком известных методов и подходов, применяемых для решения задач прогнозирования определяющих характеристик композитов является то, что как правило, данные методы являются упрощенными, и не основываются на современном математическом аппарате. Следствием этого является то, что прогнозируемые решения, получаемые с помощью известных методов и подходов, могут существенно отличаться от реальных зависимостей.

Проведено исследование проблемы разработки эффективных методов прогнозирования определяющих характеристик (остаточного ресурса прочности, надежности, долговечности) композиционных материалов и конструкций при воздействии экстремальных факторов внешней среды и эксплуатационных нагрузок, характерных для резкоконтинентального климата Арктической и Субарктической зоны. Сформулированные проблемы исследованы в рамках уточненных вариационных постановок обратных задач прогнозирования на основе современных положений кинетической теории прочности.

**Материалы и методы исследования.** При выборе материала для конкретного использования в промышленности, в строительстве, на транспорте из большого количества возможных вариантов подбирается такой состав, который обеспечит сочетание необходимых показателей. Важнейшим преимуществом материала становится его способность как можно дольше сохранять свою работоспособность, то есть, противостоять старению – совокупности физико-химических обратимых и необратимых превращений под воздействием экстремальных факторов внешней среды (температуры, влажности, солнечной радиации, механических напряжений и др.).

Совокупность требуемых показателей полимерных композиционных материалов при его приемлемой стоимости и способности противостоять старению являются основой для принятия решения об использовании материала. Доминируют полимерные композиционные материалы, способные без замены функционировать 20-30, а в необходимых случаях и более 50 лет.

Применение полимерных композиционных материалов в авиа- и космической технике делает еще более актуальными исследования стойкости полимеров к излучению. Эффективным активатором старения является проникающая радиация, которая в отличие от световой способна инициировать превращения во всем объеме полимера.

При этом химические превращения могут происходить как на межмолекулярном, так и на внутримолекулярном уровнях. Большинство химических превращений инициируется внешними факторами - температурой, световой и проникающей радиацией; механические и электрические воздействия в большинстве случаев способствуют ускорению химических превращений. Проведенные исследования показали, что в химических процессах, протекающих при старении полимерных композитов, энергия активации связана с интенсивностью молекулярных движений в полимере.

На основе проведенных исследований была установлена связь между энергией активации протекающего при старении химического процесса и интенсивностью молекулярных движений в полимере. При этом энергия активации будет зависеть от температуры и физического состояния полимера. Значительное влияние на изменение свойств полимерных композитов оказывает солнечная радиация. Эффективность воздействия солнечной радиации на материал зависит от спектрального состава излучения и типа функциональных групп, входящих в состав макромолекулы полимера, а также от содержащихся в материале добавок. В результате проведенных исследований было введено понятие «спектр активации».

Под спектром активации понимается та длина волны или сравнительно узкая область длин волн, которая, попадая на материал, инициирует наиболее заметные изменения в химическом составе или структуре полимера.

В настоящее время механизм старения полимерных композитов является изученным еще недостаточно, является еще не установленной количественная связь между влиянием различных видов внешних воздействий на скорость преобладающего процесса старения. Для эффективного решения задач прогноза необходимо иметь надежные соотношения между кинетическими параметрами физико-химических процессов и макросвойствами полимерных композитов, определяющими их эксплуатационную пригодность.

Данные вопросы связаны с решением важной научной проблемы, стоящей на пути создания обоснованных подходов к прогнозированию изменения свойств полимерных композитов. Без данных о характере и скорости изменения механических, электрических, теплофизических свойств полимеров в условиях эксплуатации изделий невозможно обеспечить рациональный выбор материалов и повысить за счет этого надежность изделий. Этим объясняется важность и актуальность разработки эффективных методов прогнозирования изменения свойств полимерных композитов.

Из распределения Больцмана для кинетической энергии молекул известно, что число молекул, обладающих энергией  $E > E_a$  пропорционально  $\exp(-E_a/RT)$ . В результате скорость химической реакции представляется уравнением Аррениуса, которое получено из термодинамических соображений. В функциональной и дифференциальной формах уравнения Аррениуса могут быть представлены в виде

$$k = k_0 \exp(-E_a / RT), \quad d(\ln k) / dT = E_a / RT^2 \quad (1)$$

Анализ уравнения Аррениуса в дифференциальной форме показывает, что чем больше энергия активации, тем быстрее увеличивается константа скорости реакции с возрастанием температуры. В этих обозначениях фактор частоты  $k_0$  характеризует частоту столкновений реагирующих молекул (число активных столкновений частиц в единице объема в реакционной смеси). Фактор  $k_0$  выражает ту долю частиц, у которых энергия равна или больше энергии активации  $E_a$ . Энергия активации  $E_a$  представляет собой избыток энергии по отношению к средней энергии частиц при данной температуре, который необходим для того, чтобы реагирующие частицы могли вступить в химическую реакцию, и определяется свойствами реагирующих частиц, их энергетическим состоянием.

В соответствии с основными положениями кинетической теории прочности в основу исследования была положена физическая модель, в которой характер изменения во времени определяющего свойства композита  $W$  при одновременном воздействии нескольких экстремальных факторов, определяется химическими реакциями на молекулярном уровне, описываемыми суперпозицией уравнений Аррениуса, описывающих различные виды молекулярных взаимодействий, инициированных воздействием различных экстремальных факторов  $F_1, F_2, \dots, F_p$  на композит:

$$W = W_0 + Y \left( k_0^1 \exp(E_a^1 / RT), k_0^2 \exp(E_a^2 / RT), k_0^3 \exp(E_a^3 / RT) \dots \right) \quad (2)$$

Или, в предположении аддитивного характера влияния результатов молекулярных взаимодействий на долговечность полимерных композитных материалов

$$W = W_0 + \sum_s G_s(k_0^s) \exp\left(H_s(E_a^s) / RT\right) \quad (3)$$

$G_s(k_0^s)$ ,  $H_s(E_a^s)$  – функциональные коэффициенты, зависящие от фактора частоты  $k_0^s$  и энергии активации  $E_a^s$ , определяющие определенный вид молекулярных взаимодействий.

В предположении, что различные физические факторы оказывают на полимерный композит воздействие, независимое от воздействия других факторов, и изменения, вызванные в композите, суммируются, было принято, что обобщенная модель долговечности, описывающая одновременное воздействие нескольких факторов на материал может быть представлена в виде:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^p F_j(u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}; t). \quad (4)$$

В этих обозначениях:  $u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}$  – параметры, описывающие характер воздействия  $j$ -го фактора на композит. В соответствии с современными положениями кинетической теории прочности было принято, что воздействие каждого из факторов  $F_j$  на композит активирует на микроуровне совокупность деструктивных элементарных процессов, протекающие химические реакции в которых допускают описание в виде суперпозиции уравнений Аррениуса. Каждое из составляющих суперпозицию уравнений Аррениуса описывает определенный вид химических реакций, с присущими ему параметрами – фактором частоты, характеризующим частоту столкновений реагирующих молекул (число активных столкновений частиц в единице объема полимерного композита), и энергией активации, присущими для данной реакции.

На основе современных положений кинетической теории прочности был исследован вопрос о согласовании определяющих параметров математических моделей, вычисленных в результате решения задач прогнозирования в рамках сформулированной вариационной постановки, учитывающей результаты экспериментальных измерений на макроуровне, с соответствующими определяющими параметрами физических моделей, описывающих молекулярные взаимодействия на микроуровне.

Для достижения оптимального согласования между определяющими параметрами был введен ряд основополагающих принципов и понятий, позволяющих провести оптимальное согласование определяющих параметров, вычисленных на основе построенных математических моделей на макроуровне с определяющими параметрами физических моделей, описывающими молекулярные взаимодействия на микроуровне.

Разработана методология согласования параметров математических и физических моделей на микро- и макроуровнях, позволившая решить задачу восстановления параметров физико-химических процессов, происходящих на молекулярном уровне, и приводящих к деструктивным изменениям в композитах и ухудшению их характеристик с течением времени.

### **Выводы.**

Применение современной кинетической теории прочности для решения задач прогнозирования определяющих характеристик полимерных композитов (остаточного ресурса, прочности, надежности, долговечности) в экстремальных условиях позволило построить эффективные обобщенные модели долговечности композитов, а также провести конструктивный анализ характера и степени влияния различных

деструктивных факторов на долговечность композитов.

**Список литературы:** 1. Уржумцев Ю.С. Прогнозирование длительного сопротивления полимерных материалов - М. : Наука, 1982. - 222 с. 2. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и 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. 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. 5. Филатов И.С., Бочкарев Р.Н. Некоторые проблемы оценки и прогнозирования климатической устойчивости полимерных материалов//Методы оценки климатической устойчивости полимерных материалов, Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1986, с. 11-20. 6. Потапова, Л.Д., Ярцев В.П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии : как прогнозируют предельные напряжения? М. : Машиностроение, 2005. – 242. 7. Реутов А.И. Прогнозирование надежности строительных изделий из полимерных материалов. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2007. - 184 с. 8. 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. 9. Реутов А.И. Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов, применяемых в строительстве // Вестник ТГАСУ, 2009, №2, с. 127-141. 10. Степанов М.Н., Зинин А.В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2007. 392 с. 11. Башкарев А. Я., Веттегрень В.И., Суслов М.А. Долговечность полимерных композитов, СППТУ, С-Птб, 2016. - 147 с. 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., Всероссийский институт авиационных материалов, 2015, с.132-141. 13. Гусев Е.Л. Задачи, связанные с уточнением моделей прогнозирования остаточного ресурса полимерных композитов и методы их решения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, 2017, т.57, в.2, с. 9-16. 14. Гусев Е.Л., Бакулин В.Н. Методы решения обратных задач прогнозирования остаточного ресурса конструкций из композиционных материалов при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды в уточненных постановках // Сб. трудов 7-ой Всероссийской конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных гетерогенных сред», М., изд. ИПРИМ РАН, 2017, с. 68-70.

## СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СТРЕЛОЧНЫЙ ПЕРЕВОД ШАХТНОЙ ПОДВЕСНОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ДОРОГИ

Гутаревич В.О., Прибой М.Н. (ДОННТУ, г. Донецк, ДНР)

Тел.: +38 (062) 3010787; E-mail: gzt1@fimm.donntu.ru

**Abstract:** *mathematical model of vertical oscillations of a turnout switch for a monorail track has been developed. This allows establishing the relationship between parameters of rolling stock and the dynamic loads acting in the suspension. As a result, the equations for the oscillation amplitudes of turnout elements were obtained and depreciation coefficient of suspension was determined. The results obtained make it possible to reasonably set parameters of fastening turnout, which will reduce dynamic loads that occur during the operation of mine suspended monorail roads.*

**Keywords:** *monorail track, turnout, vibrations, mathematical model, amplitude, frequency.*

**Актуальность исследования.** Стрелочные переводы подвесных монорельсового пути являются одним из важных элементов, обеспечивающих бесперебойную и безопасную эксплуатацию шахтных подвесных монорельсовых дорог (ПМД). Динамические нагрузки, формирующиеся во время движения по переходным участкам стрелочного перевода, увеличивают износ составных элементов и снижают его срок службы. Динамика стрелочных переводов для обычного рельсового пути исследована довольно подробно [1, 2]. Однако конструкция и условия эксплуатации монорельсового транспорта имеют существенные отличия [3, 4], поэтому полученные ранее результаты исследований стрелочных переводов требуют уточнения, а тема работы является актуальной.

**Цели и задачи исследования.** Цель работы заключается в установлении взаимосвязи между параметрами колебаний стрелочного перевода во время движения подвижного состава ПМД для снижения дополнительных динамических нагрузок на монорельсовый путь, его подвеску и горную выработку.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи: разработана математическая модель колебаний стрелочного перевода во время движения подвижного состава шахтной ПМД; исследованы процессы колебаний стрелочного перевода во время движения по нему подвижного состава; определены условия, при которых динамические воздействия на стрелочный перевод сводятся к минимуму.

**Основная часть.** В общем случае стрелочный перевод монорельсового пути состоит из перестановочной платформы с переходными отрезками монорельса, перемещаемой по направляющим рамы с помощью винтового привода. Кроме этого, рама имеет дополнительные отрезки монорельса, необходимые для соединения стрелочного перевода с монорельсом основного и примыкающего направлений пути.

Переходные отрезки располагаются на одном уровне с монорельсом и весь стрелочный перевод подвешивается к кровле горной выработки. Поэтому формируемые во время движения подвижного состава по стрелочному переводу динамические нагрузки воспринимаются кровлей горной выработки, что снижает ее устойчивость.

При вертикальных колебаниях монорельсового пути под действием гармонической возмущающей силы, возникающей во время движения подвижного состава, система подвески монорельсового пути может быть представлена в виде двухмассовой системы, приведенной на рис. 1.

Обозначим на этой расчетной схеме:  $m_1$  – масса стрелочного перевода;  $m_2$  – масса подвижного состава, воздействующей на подвеску;  $C_1$  – коэффициент жесткости подвески стрелочного перевода;  $C_2$  – коэффициент жесткости подвески подвижного

состава;  $Q_v \sin \omega t$  – вертикальная возмущающая сила, возникающая во время движения ходовых тележек подвижного состава по стрелочному переводу.

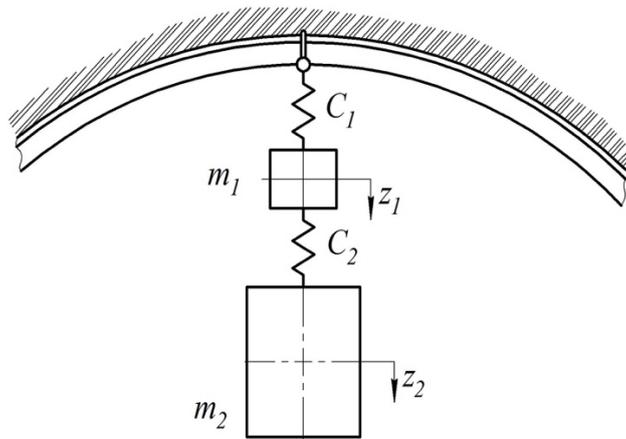


Рис. 1. Расчетная схема амортизации ударного воздействия на подвеску стрелочного перевода

Дифференциальные уравнения вынужденных вертикальных колебаний рассматриваемых масс будут:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + C_1 z_1 - C_2 (z_2 - z_1) = 0; \\ m_2 \ddot{z}_2 + C_2 (z_2 - z_1) = Q_v \sin \omega t. \end{cases} \quad (1)$$

где  $z_1, z_2$  – вертикальные смещения центров тяжести масс  $m_1$  и  $m_2$ , соответственно.

Решение системы уравнений найдем в виде

$$\begin{cases} z_1 = A_1 \sin \omega t; \\ z_2 = A_2 \sin \omega t. \end{cases}$$

где  $A_1, A_2$  – амплитуды вынужденных колебаний центров тяжести соответствующих масс  $m_1$  и  $m_2$ .

С учетом этого систему (1) можем привести к виду:

$$\begin{cases} A_1 (m_1 \omega^2 + C_1 + C_2) - A_2 C_2 = 0; \\ -A_1 C_2 + A_2 (C_2 - m_2 \omega^2) = P_v. \end{cases}$$

На основании [5] решение системы уравнений будет

$$A_1 = \frac{P_v C_2}{m_2 (m_1 + m_2) \left[ \left( \frac{C_1}{m_1 + m_2} - \omega^2 \right) \left( \frac{C_2}{m_2} - \omega^2 \right) - \frac{\omega^4 m_2}{m_1 + m_2} \right]};$$

$$A_2 = \frac{P_v (C_1 + C_2 - m_1 \omega^2)}{m_2 (m_1 + m_2) \left[ \left( \frac{C_1}{m_1 + m_2} - \omega^2 \right) \left( \frac{C_2}{m_2} - \omega^2 \right) - \frac{\omega^4 m_2}{m_1 + m_2} \right]}.$$

Учитывая, что амплитуды возмущающих сил пропорциональны квадрату частоты, считаем  $P_v = m_e r_e \omega^2$ , где  $m_e r_e$  – эквивалентный по действию статический

момент приведенной неуравновешенной массы  $m_e$  с радиусом приведения  $r_e$ .

Тогда после преобразований имеем

$$A_1 = \frac{m_e r_e C_e \xi_e^2}{\mu_e (m_1 + m_2) \left[ (1 - \mu_e) - \xi_e^2 \left( \frac{C_e}{\mu_e} + 1 \right) + \frac{C_e}{\mu_e} \xi_e^4 \right]}, \quad (2)$$

где

$$C_e = \frac{C_2}{C_1}; \quad \mu_e = \frac{m_2}{m_1 + m_2}; \quad \xi_e = \frac{k_e}{\omega}; \quad k_e^2 = \frac{C_1}{m_1 + m_2}.$$

Степень снижения вертикальных амплитуд колебаний, действующих на крепь горной выработки, характеризуется коэффициентом амортизации, который равен отношению  $W_{kv} = A_0 / A_1$ , где  $A_0$  – амплитуда колебаний подвеса, не имеющего упругих элементов, когда  $C_e = \infty$ .

Амплитуду  $A_0$  можно найти согласно [5]

$$A_0 = \lim_{C_e \rightarrow \infty} A_1 = \frac{m_e r_e}{(m_1 + m_2)(\xi_e^2 - 1)}. \quad (3)$$

Следовательно

$$W_{kv} = 1 - \frac{\mu_e (\xi_e^2 - 1 + \mu_e)}{C_e \xi_e^2 (\xi_e^2 - 1)}. \quad (4)$$

Для снижения амплитуд колебаний подвеса в выражении (4) необходимо выбирать соотношение входящих параметров, при которых  $|W_{kv}| > 1$ . При увеличении модуля коэффициента амортизации  $W_{kv}$  снижается амплитуда колебаний точки крепления подвеса к крепи горной выработки и, следовательно, уменьшаются динамические нагрузки на крепь.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента амортизации  $W_{kv}$  от соотношения коэффициентов жесткостей  $C_e = C_2/C_1$ .

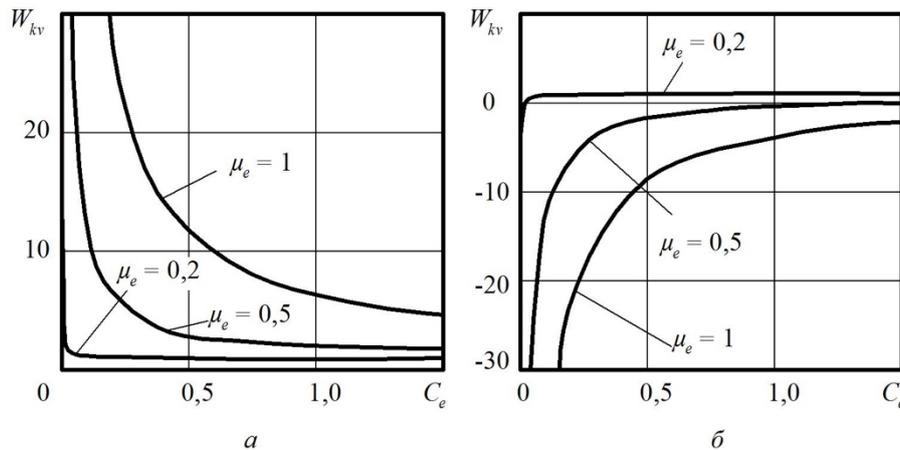


Рис. 2. Графики функций  $W_{kv} = f(C_e)$  при:  $a - \xi_e = 0,9$ ;  $b - \xi_e = 1,1$

Как видно из этого рисунка, при  $\xi_e < 1$  с повышением  $C_e$  коэффициент амортизации многократно уменьшается и стремится принять значение, равное 1, а при

$\xi_e > 1$  – увеличивается, принимая практически во всем диапазоне значения меньше 1. В первом случае (рис. 2,а), когда  $\xi_e < 1$  и  $C_e = 1$ , с повышением соотношения  $\mu_e = m_2 / (m_1 + m_2)$  от 0,2 до 1 значение  $W_{kv}$  увеличивается в 6 раз, а во втором (рис. 2,б), когда  $\xi_e > 1$  – уменьшается в 5 раз. При этом коэффициент амортизации  $|W_{kv}| > 4$ , что позволяет уменьшить амплитуды колебаний точки крепления подвеса к верхняку крепи горной выработки пропорционально во столько же раз.

При одном и том же значении  $C_e$  коэффициент амортизации в первом случае всегда больше, чем во втором. Причем во втором случае (рис. 2,б) снижение амплитуд имеет место не во всем диапазоне изменения  $C_e$ , а только для значений:

$$C_e < \frac{\mu_e (\xi_e^2 - 1 + \mu_e)}{2\xi_e^2 (\xi_e^2 - 1)}.$$

Как следует из этого рисунка, при  $\mu_e \leq 0,2$  наблюдается низкая эффективность амортизации. Такое значение  $\mu_e$  имеет место, когда масса подвески монорельсового пути превышает массу подвижного состава, что на практике встречается редко. Для существующих подвесных монорельсовых дорог характерен диапазон изменения  $\mu_e$  от 0,5 до 0,99. Более высокие значения этого коэффициента относятся к груженому составу, а наименьшие – порожнему.

Рассмотрим влияние  $\mu_e$  и  $\xi_e$  на коэффициент амортизации  $W_{kv}$ . На рис. 3 показаны зависимости  $W_{kv} = f(\mu_e)$  и  $W_{kv} = f(\xi_e)$ , полученные при  $C_e = 0,5$ .

Графики функций, показанные на рис. 3,а,в, относятся для случаев, когда собственная частота  $k_e$  меньше частоты возмущающей силы  $\omega$  и, следовательно –  $\xi_e < 1$ , а на рис. 3,б,г –  $k_e > \omega$  и  $\xi_e > 1$ .

Если собственная частота  $k_e$  меньше частоты возмущающей силы  $\omega$ , то при увеличении  $\mu_e$  от 0 до 1 (рис. 3,а) коэффициент амортизации первоначально снижается и, в дальнейшем, после достижения своего наименьшего значения увеличивается. Причем наименьшие значения коэффициент амортизации достигает при  $\mu_e < 0,5$ . Поэтому в этом случае эффективность амортизации практически обеспечивается, когда  $\mu_e \geq 0,5$ .

Если  $k_e > \omega$ , то при увеличении  $\mu_e$  от 0 до 1 (рис. 3,б) коэффициент амортизации снижается во всем диапазоне. В этом случае для разных значений  $\xi_e$  эффективность амортизации различна. При  $\xi_e \leq 1,2$  модуль коэффициента амортизации достигает значения 3,5 и более, а при  $\xi_e \geq 2,5$  – не превышает 1 и коэффициент  $\mu_e$  практически не влияет на эффективность амортизации. С увеличением  $\xi_e$  от 0 до 1 (рис. 3,в) коэффициент амортизации повышается с разной интенсивностью.

В диапазоне изменения  $\xi_e$  от 0,3 до 0,8 его влияние на эффективность амортизации незначительно. При дальнейшем повышении, когда  $\xi_e > 1$  (рис. 3,г), модуль коэффициента амортизации уменьшается в широких пределах и при  $\xi_e \geq 1,2$  – стремится принять значение меньше 1.

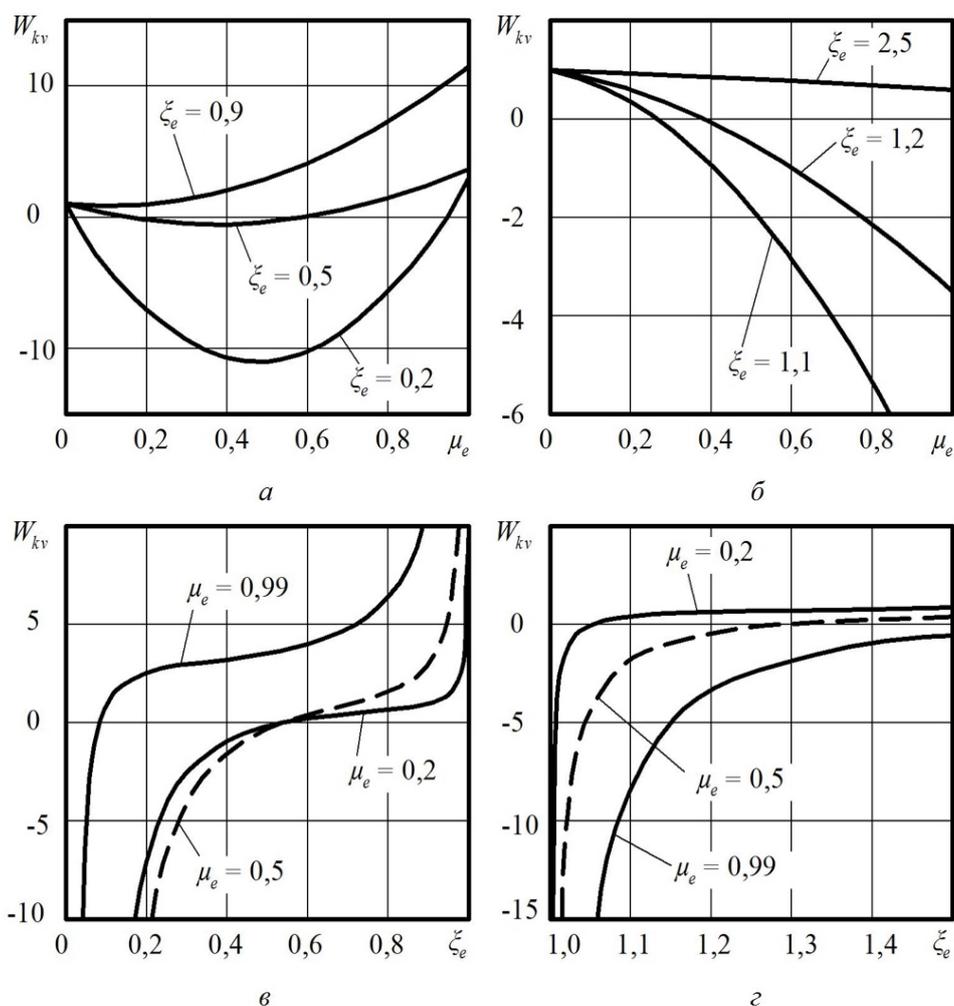


Рис. 3. Графики функций: а, б –  $W_{kv} = f(\mu_e)$  и в, г –  $W_{kv} = f(\xi_e)$

**Выводы.** Разработанная математическая модель вертикальных колебаний стрелочного перевода позволяет установить взаимосвязь между параметрами подвижного состава и динамическими нагрузками, действующими в подвеске. В результате получены уравнения амплитуд колебаний элементов стрелочного перевода и определен коэффициент амортизации подвески. Полученные результаты позволят обоснованно устанавливать параметры крепления монорельсового пути шахтных подвесных монорельсовых дорог.

**Список литературы:** 1. Говоруха, В.В. Механика взаимодействия рельсового пути, подвижных транспортных средств и смежных устройств / В.В. Говоруха. – Днепропетровск: Лира, 2006. – 448 с. 2. Ладик, С.Л. Исследование динамики приводов стрелочных переводов горного транспорта / С.Л. Ладик, А.В. Говоруха // Геотехническая механика. – 2013. – №109. – С. 99-108. 3. Гутаревич, В.О. Динамика шахтных подвесных монорельсовых дорог / В.О. Гутаревич; ГВУЗ "ДонНТУ". – Донецк: ЛАНДОН-XXI, 2014. – 205. 4. Gutarevich, V.O. Mathematical modeling of end carriage motion on the overhead monorail / V.O. Gutarevich // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – Vol. 6. – No 5. – P. 51-55. 5. Штейнвольф, Л.И. Динамические расчеты машин и механизмов / Л.И. Штейнвольф. – Москва; Киев : Машгиз, [Юж. отделение], 1961. – 340 с.

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ, В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И., Артюкевич А.В.

(БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)

Тел./Факс: +375 (17) 3310045; E-mail: scvmed@bntu.by

**Abstract:** The article investigates the tribological properties of laser-deposited 2D and 3D multimodal coatings from dissimilar materials under dry friction conditions. The dependences of the wear rate of multimodal and homogeneous coatings on the laser cladding rate and the tracks deposition step are given. It has also been shown that multimodal coatings under dry friction conditions have a sufficiently high wear resistance, and the wear resistance of a cheap 3D multimodal coating is equal to the wear resistance of an expensive nickel-based self-fluxing alloy coating.

**Key words:** Laser cladding, multimodal coatings, tribological properties, wear rate, coefficients of friction.

Современные машины и механизмы характеризуются в большинстве случаев наличием высоких скоростей и нагрузок. Поэтому растет потребность в композиционных материалах, которые позволяют значительно увеличить износостойкость, в том числе растет потребность в нанесении композиционных упрочняющих покрытий. В последнее время появился новый вид композиционных покрытий, так называемые мультимодальные покрытия, которые показывают особенно высокие физико-механические свойства [1, 2]. Модой является значение любого признака (размера частиц упрочняющей фазы, величины пористости, элементного состава материала), которое встречается наиболее часто. Если встречаются несколько значений какого-либо признака, имеющие одинаковую частоту повторения, то покрытие считается мультимодальным.

Процесс лазерной наплавки характеризуется валиками небольших размеров, минимальным тепловым вкладом в прилегающие области покрытия и подложку, низкой диффузией материала покрытия в подложку, но, в то же время, высокой прочностью сцепления наплавленных валиков с подложкой и между собой [3].

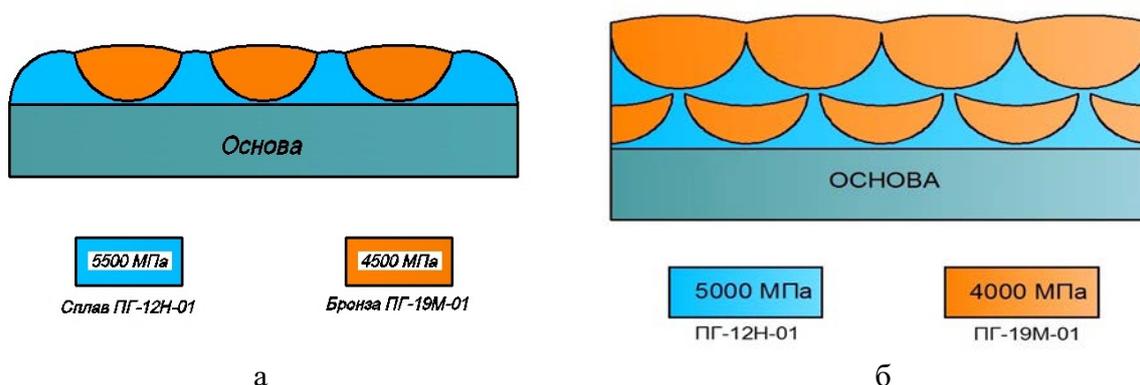


Рис. 1. Схемы поперечного сечения 2D (а) и 3D (б) мультимодальных покрытий

Приведенные свойства лазерной наплавки позволяют использовать ее для построения мультимодальных покрытий. Могут быть получены мультимодальные покрытия, состоящие из полосчатых слоев, нанесенных чередованием материалов, обладающих разнородными физико-механическими свойствами. Авторами статьи разработана технология нанесения мультимодальных покрытий путем послойного

чередования валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. При этом чередование валиков может быть как послойно (рисунок 1а) в однослойном 2D покрытии, так и между слоями (рисунок 1б) – в двухслойном 3D покрытии. Такая технология построения мультимодальных покрытий может быть использована как для упрочнения поверхностей новых деталей, так и для восстановления изношенных поверхностей с хорошими прочностными свойствами [4].

В данной статье авторы сделали попытку исследовать трибологические свойства мультимодальных покрытий, показанных на рисунке 1.

Как уже было отмечено, материалами для построения мультимодальных покрытий являлись самофлюсующийся сплав на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронза ПГ-19М-01. Для сравнения также наплавлялись образцы с однородными покрытиями из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. В качестве материала для образцов использовалась сталь 45. Нанесение покрытий производилось на лазерном технологическом комплексе на базе CO<sub>2</sub>-лазера непрерывного действия «Комета 2» и координатной системы с числовым программным управлением «РУХ-4.0». Мощность излучения составляла 1000 Вт. Подачу порошка – 12 г/мин обеспечивал дисковый питатель.

Для испытаний в условиях сухого трения применялись призматические образцы размером 20×30×8 мм. Поверхность покрытий после наплавки на образцы шлифовалась до Ra 1,6 мкм. Испытания на износ выполнялись на установке МИПТ при возвратно-поступательном движении контртела относительно поверхности образца. Контртелом при испытаниях на износостойкость являлся алмазный наконечник типа Роквелл. При исследовании износостойкости в условиях сухого трения использовались следующие режимы: нормальная нагрузка – 2 Н; скорость движения каретки – 5 мм/с; длина единичного прохода – 15 мм; путь трения – 10 м.

Удельный объемный износ  $V_{y\partial} \left( \frac{\text{мм}^3}{\text{м}} \cdot \text{Н} \right)$  рассчитывался по формуле 1.

$$V_{y\partial} = \frac{V}{S} \cdot P = \frac{b \cdot h \cdot L}{2S} \cdot P, \quad (1)$$

где  $V$  – объем изношенного материала;

$S$  – путь трения ( $S=10$  м);

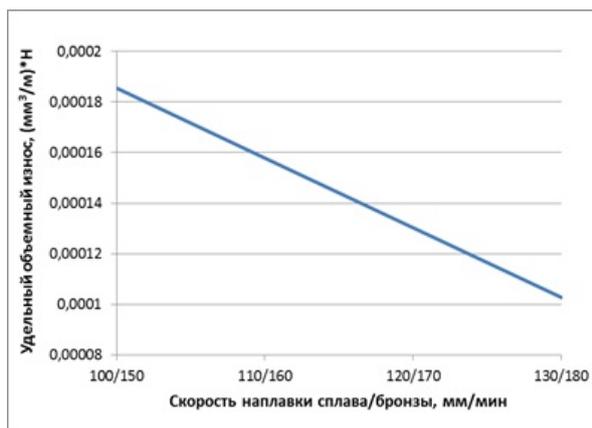
$P$  – нагрузка на контртело ( $P=2$  Н);

$b$  – ширина дорожки износа;

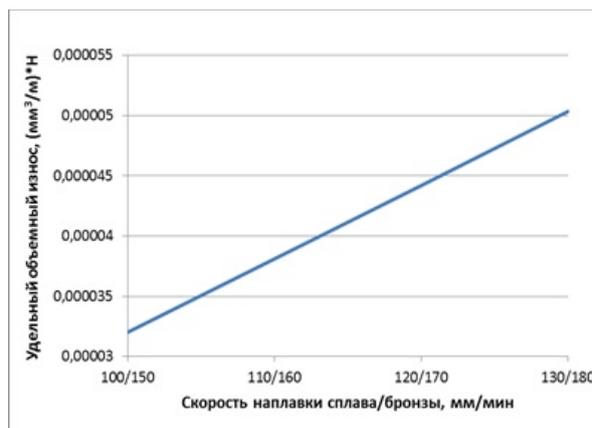
$h$  – глубина дорожки износа;

$L$  – длина единичного прохода ( $L=15$  мм).

Глубина –  $h$  и ширина –  $b$  дорожки износа измерялись при помощи профилографа-профилометра Mar Surf PS1 – Explorer. Результаты определения удельного износа в условиях сухого трения были обработаны способом линейного приближения по методу наименьших квадратов с помощью редактора электронных таблиц Microsoft Excel 2010. Были получены зависимости удельного объемного износа 2D и 3D мультимодальных покрытий от скорости наплавки (рисунки 2а и 2б) и такие же зависимости для однородных покрытий из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 (рисунки 3а и 3б).

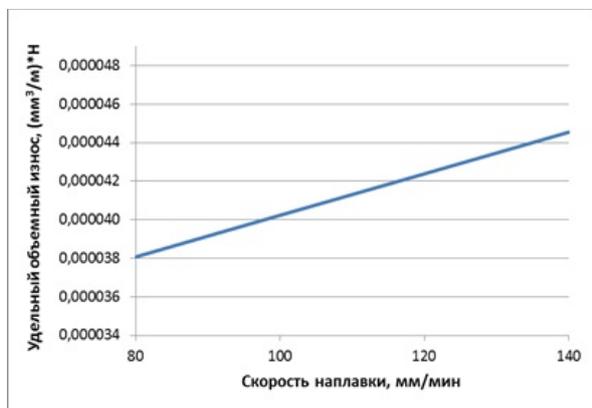


а

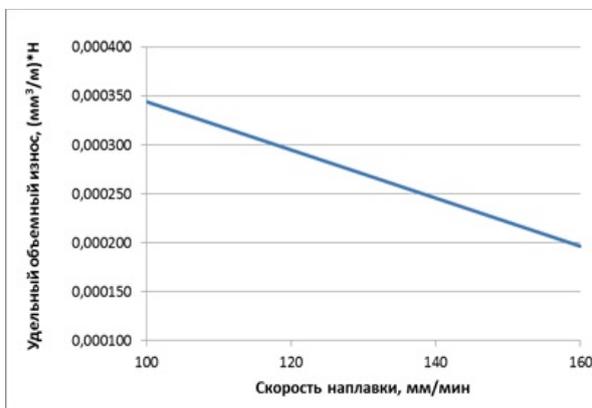


б

Рис. 2. Зависимости удельного объемного износа от скорости наплавки для 2D мультимодального покрытия (а) и для 3D мультимодального покрытия (б) в условиях сухого трения



а



б

Рис. 3. Зависимости удельного объемного износа от скорости наплавки для однородных покрытий из сплава ПГ-12Н-01 (а) и бронзы ПГ-19М-01 (б) в условиях сухого трения

Анализируя полученные зависимости можно заметить, что для 3D мультимодального покрытия (рисунок 2б) и для покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля (рисунок 3а) при сухом трении с увеличением скорости наплавки наблюдается рост удельного объемного износа. Диапазоны изменения величины износа при этом в большом интервале совпадают. Отличие состоит только в том, что для 3D мультимодального покрытия рост составляет 57,4 %, а для покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля – 17 %. Можно предположить, что одинаковый вид зависимостей в данном случае определяется, прежде всего, самофлюсующимся сплавом ПГ-12Н-01, входящим, в том числе, в состав 3D мультимодального покрытия. Увеличение величины износа при росте скорости наплавки связано с возрастанием неполного сплавления материалов валиков по границам зерен из-за уменьшения удельной энергии, получаемой покрытием.

Также заметно подобие зависимостей удельного объемного износа от скорости наплавки для 2D мультимодального покрытия (рисунок 2а) и покрытия из бронзы ПГ-19Н-01 (рисунок 3б) при сухом трении. В обоих случаях при росте скорости наплавки величина износа уменьшается, для 2D мультимодального покрытия на 44,5 %, а для покрытия из бронзы – на 42,8 %. Для обоих покрытий такой характер зависимостей объясняется наличием в их составе бронзы и изменением ее фазового состава и физико-

механических свойств. Меньшая величина износа для 2D мультимодального покрытия связана с наличием в его составе моды высоко износостойкого самофлюсующегося сплава на основе никеля, что в сочетании с наличием фазы бронзы, играющей роль твердой смазки, увеличивает износостойкость.

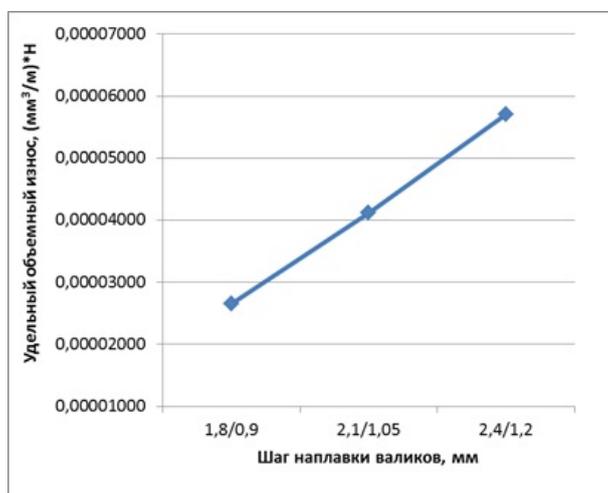


Рис. 4. Зависимость удельного объемного износа от шага наплавки валиков для 3D мультимодального покрытия при сухом трении

Было также проведено исследование влияния шага наплавки валиков на величину удельного объемного износа в условиях сухого трения (рисунок 4). При росте шага наплавки валиков в 3D мультимодальном покрытии с 1,8/0,9 мм до 2,4/1,2 мм удельный объемный износ этого покрытия увеличивается в 2,15 раза. В данном случае такая картина износа связана с тем, что с увеличением шага наплавки валиков уменьшается площадь фазы самофлюсующегося сплава на основе никеля, приходящаяся на единицу площади пятна контакта.

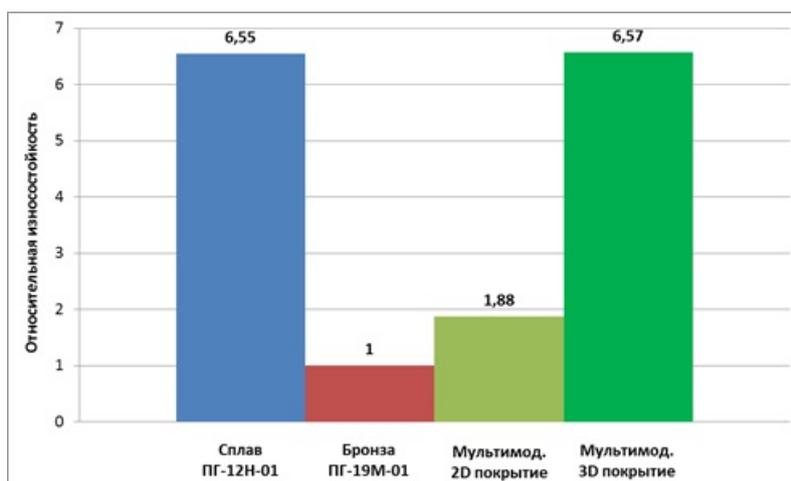


Рис. 5. Относительная износостойкость покрытий при сухом трении

Для сравнения износостойкости покрытий при сухом трении на рисунке 5 приведена диаграмма, показывающая относительную износостойкость всех подвергнутых испытаниям покрытий. Наибольшей износостойкостью при сухом трении обладает 3D мультимодальное покрытие (6,57) и однородное покрытие из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 (6,55). Наиболее низкой износостойкостью обладает однородное покрытие из бронзы ПГ-19М-01 (1).

Износостойкость 2D мультимодального покрытия (1,88), хотя и выше износостойкости покрытия из бронзы, тем не менее, она в 3,5 раза ниже износостойкости 3D мультимодального покрытия.

Таким образом, видно, что при небольшой себестоимости нанесения 3D мультимодального покрытия, его износостойкость при сухом трении равна износостойкости однородного покрытия из высоко-износостойкого, но очень дорогого сплава на основе никеля [5]. Такие высокие эксплуатационные свойства мультимодального покрытия при сухом трении связаны с наличием в его составе двух компонентов, из которых сплав ПГ-12Н-01 выполняет роль силового корсета, а бронза ПГ-19М-01 участвует в процессах избирательного переноса, имеющих место при изнашивании мультимодального покрытия, как многокомпонентного, включающего мягкую составляющую [6].

#### **Выводы:**

- Проведенные исследования износа показали несомненные преимущества нанесенных лазерной наплавкой мультимодальных покрытий перед однородными покрытиями из тех же материалов, нанесенными тем же методом.

- Наиболее высокой износостойкостью в условиях сухого трения обладает 3D мультимодальное покрытие. Это покрытие, обладающее низкой себестоимостью нанесения, имеет износостойкость на уровне износостойкости покрытия из дорогостоящего самофлюсующегося сплава на основе никеля. Поэтому 3D мультимодальные покрытия могут с успехом заменять покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля и обеспечивать значительное удешевление деталей с износостойкими покрытиями при увеличении их эксплуатационных показателей.

- Показатели износостойкости 2D мультимодального покрытия гораздо скромнее. Это покрытие, хотя и превосходит по износостойкости покрытие из бронзы, но его износостойкость значительно ниже не только износостойкости 3D мультимодального покрытия, но и износостойкости однородного покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля.

- Полученные данные дают возможность обеспечивать заданную износостойкость мультимодальных покрытий и разрабатывать технологические процессы их нанесения на конкретные детали без необходимости отработки режимов в каждом отдельном случае.

**Список литературы:** 1. Ratajski, J. Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings/ J. Ratajski , A. Gilewicz, P. Bartosik, L. Szparaga// Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. - I. 2. – P. 35-45. 2. Gilewicz, A. The properties of multi-module and gradient coatings base on CrN/CrCN deposited on nitride 4140 steel/ A.Gilewicz, R. Olik, L. Szpraga, J. Ratajski// Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems. – 2014. – I. 3. – P. 27-43. 3. Vilar, R. Laser cladding/ R. Vilar// Journal of laser applications. – 1999. – V. 11. – I. 2. - P. 64-79. 4. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, - С. 424 5. Борисов, Ю.С. Получение и структура газотермических покрытий на основе Ni-Cr-B-Si – сплавов/ Ю.С. Борисов, И.Н. Горбатов, В.Р. Калиновский и др.// Порошковая металлургия – 1985 - № 9 - С. 22-26. 6. Берсенев, В.М. Влияние многокомпонентных и многослойных покрытий на процессы трения и износа// Физическая инженерия поверхностей. – 2004 - Т. 2. - № 4 - С. 214-219.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ СВОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ТОЛСТОЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Егоров Н.Т., Крымов В.Н. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)  
Тел.: (062)301-08-72, E-mail: [fm@fizmet.donntu.org](mailto:fm@fizmet.donntu.org)

**Abstract:** *The properties and production technology of thick sheets for pipes of main gas pipelines are considered. The possibility of using thermoplastic processing with the use of deformation by cyclic bending instead of low-temperature controlled rolling is shown. To increase the level of strength, toughness and resistance to stress corrosion, it is advisable to combine high-temperature controlled rolling with direct quenching and tempering.*

**Keywords:** *sheet, pipes, controlled rolling, thermoplastic processing, hardening, strength, stress corrosion*

Современная практика строительства трубопроводов большого диаметра для транспортировки природного газа на большие расстояния и работающих в сложных климатических условиях, в том числе и районах Крайнего Севера, привела к разработке и промышленному освоению малоперлитных низколегированных трубных сталей, обладающих повышенной прочностью, ударной вязкостью, хладостойкостью и свариваемостью в заводских и полевых условиях [ 1 ].

В настоящее время для изготовления труб большого диаметра в отечественной практике наиболее широко используются малоуглеродистые микролегированные стали марок 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБЮ, 08Г2ФБТ и другие с гарантированными механическими характеристиками и температурой эксплуатации минус 15-20°С, поставляемые по специальным техническим условиям и подвергаемые контролируемой прокатки.

Выплавку сталей целесообразно осуществлять в конвертерах без использования металлолома, подвергать внепечной обработке и непрерывной разливки.

Наиболее распространенными зарубежными сталями для изготовления хладостойких газопроводных труб большого диаметра являются стали классов прочности Х60 и Х70, производство которых осуществляется по техническим нормам Американского нефтяного института API 5L, принятым во всем мире за общепризнанный стандарт.

Учитывая, что классы прочности трубных сталей в России устанавливаются по временному сопротивлению разрыву, выраженному в кгс/мм<sup>2</sup>, а в стандарте API 5L – по пределу текучести в тысячах фунтов на кв. дюйм, установить однозначное их соответствие затруднительно. Наиболее близки по своим прочностным характеристикам отечественные и зарубежные марки стали классов прочности К56-К65 и Х60-Х80.

Трубные стали отечественного и зарубежного производства по своему химическому составу и уровню свойств практически не различаются и содержат в своем составе %: С 0,07-0,12; Мн 1,5-2,0; Si 0,35-0,50; Nb 0,04-0,06; V 0,06-0,12; Ti 0,02-0,05. Содержание алюминия в сталях не превышает 0,05%, азота 0,010%. Особые стали устойчивые к агрессивным средам (например Х65Н1С), содержат не более 0,05% С, 1,4% Мн и 0,002% S [ 2 ].

В высокопрочных сталях классов прочности Х80 и Х100 в качестве микролегирующих элементов дополнительно применяются Мо, Ni, Cr, В. Для обеспечения высоких характеристик хладостойкости, устойчивости против сероводородного охрупчивания и стресс-коррозии содержание примесных элементов

снижается до уровня  $S \leq 0,002\%$ ,  $P \leq 0,025\%$ ,  $H_2 \leq 2\text{ppm}$ ,  $O_2 \leq 0,30\text{ppm}$ ,  $\Sigma$  (As, Sb, Sn, Pb, Zn, Bi)  $\leq 0,020\%$ .

В таблице 1 приведен химический состав отечественных и зарубежных сталей для хладостойких газопроводных труб большого диаметра, а в таблице 2 - их механические свойства.

Таблица 1. Химический состав отечественных и зарубежных сталей для хладостойких газопроводных труб большого диаметра

Марка стали	Массовая доля элементов (не более), %							
	C	Mn	Si	Nb	V	Ti	S	P
09Г2ФБ	0,13	1,70	0,35	0,05	0,09	0,035	0,007	0,020
10Г2ФБ	0,12	1,75	0,35	0,04	0,12	0,035	0,006	0,020
10Г2ФБЮ	0,12	1,75	0,50	0,05	0,12	0,035	0,006	0,020
08Г2ФБТ	0,10	2,00	0,50	0,06	0,08	0,050	0,005	0,020
X60	0,10	1,40	0,35	0,04	0,06	0,020	0,007	0,025
X70	0,09	1,70	0,35	0,04	0,08	0,020	0,003	0,020
X80	0,10	2,0	0,50	0,055	0,08	0,020	0,003	0,020
X100	0,07	2,0	0,30	0,055	-	0,025	0,002	0,015

Технологические схемы производства толстолистового проката для изготовления труб большого диаметра на зарубежных и отечественных станах близки между собой и предусматривают обязательное применение контролируемой прокатки, которая является сегодня неотъемлемой частью технологического процесса производства трубных сталей.

При производстве сталей классов прочности X60(K56) и X70(K60) в основном применяется низкотемпературная контролируемая прокатка, предусматривающая окончание деформации в двухфазной  $\gamma + \alpha$  – области при температурах 710-730°C и последующие охлаждение на воздухе, что обеспечивает формирование мелкозернистой феррито-перлитной структуры с величиной ферритного зерна не более 5-7 мкм. Получение высокого комплекса свойств после контролируемой прокатки обусловлено не только измельчением зерна феррита, но также в результате выделения дисперсных частиц карбидов и карбонитридов.

Таблица 2. Механические свойства сталей для газопроводных труб большого диаметра

Марка стали (класс, группа прочности)	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	KCV, <sup>-20°C</sup> Дж/см <sup>2</sup>	KCU, <sup>-60°C</sup> Дж/см <sup>2</sup>	DWTT, <sup>-20°C</sup> %
09Г2ФБ (K56)	550-670	450-570	22	88	59	85
10Г2ФБ (K60)	590-690	480-580	22	98	69	90
10Г2ФБЮ (K60)	590-690	480-580	22	49	69	70
08Г2ФБТ (K65)	640-740	510-610	20	88	59	85
X60	517-617	434-534	22	88	59	80
X70	565-665	502-602	22	88	59	80
X80	621-721	572-672	20	117	69	85
X100	700-850	688-700	18	180	69	85

Технологию низкотемпературной контролируемой прокатки успешно освоили металлургические комбинаты «Азовсталь» (стан 3600), им. Ильича (стан 3000), ОАО «Уральская сталь» и ОАО «Северсталь» (станы 2800 и 5000).

В частности, на листах толщиной 18,6 мм из стали 10Г2ФБ (группа прочности К60) после контролируемой прокатки на стане 3000 ОАО Metallургический комбинат им. Ильича были получены механические свойства соответствующие классу прочности Х70 ( $\sigma_B = 620-638$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_T = 528-545$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\delta_5 = 22-23\%$ ,  $KCV^{-20^\circ C} = 100-120$  Дж/см<sup>2</sup>,  $KCU^{-60^\circ C} = 125-150$  Дж/см<sup>2</sup>,  $DWTT^{-20^\circ C} = 80-90\%$ ).

На ряде заводов отдельных зарубежных фирм при производстве сталей класса прочности Х70 иногда применяется высокотемпературная контролируемая прокатка с окончанием деформации в аустенитной области (выше точки Ar<sub>3</sub>, но ниже температуры рекристаллизации аустенита) с последующим ускоренным охлаждением.

Современная практика проектирования и эксплуатации протяженных магистральных газопроводов требует увеличение рабочего давления с 7,5 до 10-12 Н/мм<sup>2</sup> и толщины листового проката для изготовления труб диаметром 1420 мм до 32-33 мм [ 3 ].

Перспективные требования к толстолистовому прокату для изготовления высокопрочных труб диаметром 1420 мм приведены в таблице 3.

Таблица 3. Требования к свойствам толстолистовой стали для высокопрочных труб магистральных газопроводов

Класс прочности	Рабочее давление, Н/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, $\delta_5$ , %	Ударная вязкость, $KCV^{-20^\circ C}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Доля вязкой составляющей, ИПГ $^{-20^\circ C}$ , %
				не менее		
К60	7,5	490-600	590-690	22	90	90
К60	10,0	490-600	590-690	22	127	90
К65	12,0	610-760	555-665	18	180	85
Х80	12,0	620-720	570-670	20	117	85
Х100	12,0	700-850	690-700	18	180	85

Из приведенных данных видно, что для обеспечения необходимой надежности и сопротивления разрушению высокопрочных трубопроводов, работающих при повышенных давлениях, требуется не только их высокая прочность, но и повышение характеристик ударной вязкости и хладостойкости сталей до значений  $KCV^{-20^\circ C} \geq 170-200$  Дж/см<sup>2</sup>, а в перспективе и до 260 Дж/см<sup>2</sup> при температуре испытания минус 40°С. Требования к свариваемости металла также предусматривает ограничение углеродного эквивалента (Сэкв) сталей до величины не более 0,43 и параметров сопротивляемости растрескиванию при сварке (Рст) не более 0,23.

Совокупность требуемых свойств для современных газопроводов большого диаметра, работающих при давлениях 10-12 Н/мм<sup>2</sup>, не может быть обеспечена применением традиционных сталей с феррито-перлитной структурой и, как показывают исследования [ 4 ], могут достигаться только при формировании многофазной феррито-бейнитной структуры с различным соотношением структурных составляющих, таких как полигональный и игольчатый феррит, бейнит, мартенсито-аустенитные комплексы и дисперсные частицы специальных карбидов, небольшое количество которых имеют наноразмеры.

В настоящее время признанной технологией, обеспечивающей получение необходимой микроструктуры трубных сталей классов прочности Х70 и Х80, является высокотемпературная термомеханическая (контролируемая) прокатка с ускоренным охлаждением.

Вместе с тем следует отметить, что толстолистовые стали после контролируемой прокатки, особенно низкотемпературной, характеризуются неравномерной напряженной микроструктурой с ярко выраженной структурной неоднородностью в виде чередующихся полос феррита и перлита. При этом ориентированные зерна феррита имеют развитую деформационную текстуру. Такая структурная неоднородность является основной причиной возникновения анизотропии механических свойств в листах и готовых трубах, особенно заметно это проявляется на показателях ударной вязкости, а также приводит к преждевременному разрушению металлов в процессе длительной эксплуатации труб магистральных газопроводов (деградационные отказы) из-за коррозионного растрескивания под напряжением (стресс-коррозии) [ 5 ] .

Другим прогрессивным направлением развития упрочняющей обработки толстолистовой стали, в отличие от контролируемой прокатки, является ее осуществление с использованием знакопеременной деформации циклическим изгибом. Особенность и привлекательность такой технологии заключается в том, что она может осуществляться вне линии прокатных станов не осложняя их работу, а деформационное воздействие на листовую прокат производится без изменения его формы путем многократноповторяющегося циклического изгиба. Эффект упрочнения при пластической деформации многократным изгибом определяется разовой степенью деформации при изгибе, числом циклов изгиба, характеризующим суммарную степень деформации и температурой обработки. В зависимости от комбинации перечисленных параметров обработки степень упрочнения малоуглеродистых низколегированных сталей может быть весьма значительной и достигать 60-230 Н/мм<sup>2</sup>.

Исследованиями [ 6 ] установлено, что наилучшие результаты с точки зрения повышения прочности, и, что особенно важно, плоскостности листов, достигаются при управляемом деформационном воздействии в интервале температур 900-500°С с максимальной разовой степенью деформации за изгиб 3-4% и числом циклов изгиба не менее 7. Количество циклов изгиба и условия охлаждения в процессе деформирования и после его завершения выбирается и регулируется в зависимости от марки стали, ее исходной структуры, необходимой степени упрочнения и толщины обрабатываемых листов.

В таблице 4 приведены механические свойства толстых листов трубной стали 08Г2МФБ после контролируемой прокатки (КП) и термопластической обработки с использованием деформации циклическим изгибом (ТПОЦИ).

Таблица 4. Механические свойства трубной стали 08Г2МФБ после контролируемой прокатки и термопластической обработки с деформацией циклическим изгибом

Вид обработки	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$KCU,^{-40^{\circ}C}$ , Мдж/м <sup>2</sup>
			Не менее	
Обычная прокатка, тк.п. = 1000-1050°С, воздух	550-590	370-400	26-69	0,85-1,10
КП, тк.п. = 750-780°С, воздух	600-630	480-540	23-24	1,25-1,39
ТПОЦИ, $t_d = 750-780^{\circ}C$ , $t_d = 500-550^{\circ}C$ , воздух	660-710	510-620	21-22	1,41-1,68

Анализ представленных данных показывает, что достигнутый после термопластической обработки комплекс свойств характеризуется сочетанием повышенной прочности и ударной вязкости по сравнению с контролируемой прокаткой и полностью соответствует классу прочности трубной стали X70.

Реализация такой совмещенной технологии деформационно-термического упрочнения возможно в агрегатах роликового типа, состоящих их правильно-охлаждающих и охлаждающих секций и содержащих типовые элементы роликовых закалочных и правильных машин.

Перспективным направлением повышения прочностных свойств, ударной вязкости и хладостойкости толстолистовых трубных сталей классов прочности X100 и X120 может быть не только дальнейшее совершенствование их химического состава, но и применение закалки с прокатного нагрева и последующего отпуска либо самоотпуска.

Закаленный и отпущенный толстолистовой прокат свободен от отмеченных ранее недостатков металла контролируемой прокатки и характеризуется однородной и равновесной мелкозернистой структурой, обеспечивающий гомогенность механических свойств, отсутствием внутренней напряженности и развитой деформационной текстуры. Применение закалки с отпуском повышает стойкость стали против водородного охрупчивания и стресс-коррозии в 1,5-2 раза, значительно увеличивая при этом длительность эксплуатации газопроводов до их деградационных отказов. Это подтверждается многолетним опытом работы термообработанных спирально-шовных труб Волжского трубного завода.

Таким образом перспектива развития листопрокатного производства в ближайшие годы во многом будет определяться потребностью в высокопрочных трубных сталях классов прочности X100 и выше, работающих при давлениях 10-12 н/мм<sup>2</sup> и имеющих толщину 30-33 мм. По всей вероятности, завершающей операцией при производстве таких высокопрочных трубных сталей в ближайшие годы должна стать закалка с высоким отпуском, а не контролируемая прокатка. Это потребует оснащение толстолистовых станов современными охлаждающими устройствами и новейшими системами автоматического контроля и регулирования технологического процесса на всех его этапах. Современные знания процессов структурообразования при горячей пластической деформации и термообработке позволяют сегодня разрабатывать и успешно реализовывать при производстве высокопрочных толстолистовых сталей для труб большого диаметра эффективные и научно-обоснованные упрочняющие технологии, обеспечивающие высокий комплекс свойств и значительный материалосберегающий эффект.

**Список литературы:** 1. Хулка К. Тенденция разработка сталей для труб большого диаметра / К. Хулка, П. Петрс, Ф. Хайстеркамп // *Сталь*, №10, 1997. – С.62-67. 2. Голованенко С.А. Новые стали и технологические схемы производства толстого листа для газопроводных труб большого диаметра // *Металлы*, 2002, №5. – С. 36-46. 3. Матросов Ю.И. Разработка и технологический процесс производства трубных сталей в XXI века / Ю.И. Матросов, Ю.Д. Морозов, А.С. Болотов и др. // «*Сталь*», №4. 2001. – С. 58-61. 4. Морозов Ю.Д. Применение термомеханической обработки для повышения прочности и хладостойкости высокопрочных сталей / Ю.Д. Морозов, С.Ю. Настич, М.И. Матросов и др. // *Бюллетень «Черметинформация»*, 2013, №4. – С. 65-75. 5. Седых А.Д. Стресс-коррозия на российских газопроводах / А.Д. Седых, М.М. Контор, А.Б. Аребей, В.Г. Антонов // *Потенциал*, 2002, №3. – С.46-50. 6. Егоров Н.Т. Развитие и совершенствование технологий деформационно-термической обработки стали // *Научные труды ДонНТУ, серия «Металлургия»*, вып. 73, Донецк, ДонНТУ, 2004. – С. 118-126.

# ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ермишкин В.А., Минина Н.А., Кулагин С.П., Палий Н.А.

ИМЕТ РАН, Москва, Россия Тел./факс: +7(499)1359668/+7(499) 1358680

[eva@imet.ac.ru](mailto:eva@imet.ac.ru); [minina1951@rambler.ru](mailto:minina1951@rambler.ru)

**Abstract:** This work considers the use for the analysis of structural changes on the surface of tested samples near the crack-crack tip for crack resistance in the B95 alloy, the photometric analysis of structural images, developed at IMET to study the correlation of the measurement data of the mechanical characteristics of the studied sample with the corresponding data of structural parameters on its working surface.

**Key words:** crack resistance criterion, photometric analysis, structural parameters.

В настоящее время при оценки трещиностойкости конструкционных материалов доминирующее место принадлежит методам механики разрушения (МР). Структурным аспектам разрушения отводится подчиненная роль, которая ограничена иллюстративными функциями для установления общего характера вида разрушения по его фрактографическим деталям [1-3]. В рамках МР в качестве количественных критериев разрушения используются коэффициенты интенсивности напряжения (КИН), которые определяются по результатам механических испытаний специальных образцов с надрезами заданных размеров и ориентированных определенным образом по отношению к приложенной нагрузке. В соответствии с этим рассматриваются три основные моды разрушения:  $K_I$  – нормальный отрыв,  $K_{II}$  – поперечный и  $K_{III}$  – продольный сдвиги. Важным преимуществом механики разрушения является тот факт, что в ее рамках удается выразит в аналитическом виде компоненты напряженного состояния материала (НС) вблизи вершины трещины через КИН и радиус-вектор, соединяющий вершину трещины и точку, в которой оценивается НС и его азимут. Структурные особенности разрушения в МР не могут анализироваться, так как в МР материал рассматривается как сплошная бесструктурная изотропная среда. Для разных типов образцов существуют формулы для определения КИН [4, 5]. В частности для образцов на внецентренное растяжение формула для определения КИН имеет вид:

$$K_I = \frac{P}{wt^{1/2}} \cdot f(\alpha) \quad (1)$$

где:  $P$  - нагрузка,  $W$  - расстояние от оси нагружения до кромки образца,  $t$  - толщина образца,  $\alpha = a/W$ ,  $f(\alpha)$  - функция, рассчитываемая по формуле (2)

$$f(\alpha) = (2+\alpha) \cdot (0,886+4,64\alpha-13,32\alpha^2+14,72\alpha^3-5,6\alpha^4) \cdot (1-\alpha)^{-3/2} \quad (2)$$

На рис 1 представлено изображение образца для внецентренного растяжения

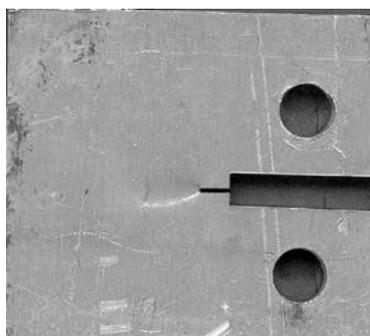


Рис. 1. Внешний вид образца для определения трещиностойкости при внецентренном растяжении

Следует отметить, что реальная траектория развития трещин, как правило, не соответствует модам разрушения, рассматриваемые в механике разрушения. По данным наблюдений за зарождением и ростом трещин в образцах из монокристаллов молибдена методом *in situ* в высоковольтном электронном микроскопе JEM-1000 [5] их развитие происходит при участии всех трех мод, при этом магистральная трещина формируется из трещин дислокационного происхождения, ориентированны под углом к оси нагружения. Попытки увеличить коэффициенты концентрации напряжений в вершине надреза с помощью усталостного нагружения не изменяют направления распространения трещин, так как их природа остается дислокационной и они развиваются в направлении максимальных касательных напряжений [6]. Для проверки влияния усталостного приращения трещины-надреза на величину КИН были проведены соответствующие испытания на образцах из сплава В95 в для внецентренного растяжения. Результаты этой проверки приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты сравнительных испытаний на трещиностойкость сплава В95

Тип образца	Расчетная нагрузка, кН	Расчетное значение КИН, МПа <sup>1/2</sup>	Критическое значение КИН, МПа
Образцы для внецентренного растяжения с надрезом	9,6	48,1	48,11
	11,1	52,6	52,6
	10,5	51,8	51,8
Надрез с усталостным приращением	9,4	48,3	48,3

Испытания были проведены по методике соответствующей [7] при температуре 20°C на машине для механических испытаний типа Biss UT-02-0025 после сертифицированной тарировки. Данные таблицы свидетельствуют о том, что значения КИН практически не зависят от зарождения у вершины надреза усталостной трещины, поскольку, как в случае образца с надрезом длиной 4мм и шириной 0,4 мм, так и в случае образца с надрезом и усталостной трещиной у вершины надреза рост трещины при нагружении происходит путем генерации дислокаций от микроконцентратора напряжений в вершине зародышевой трещины. Для анализа структурных изменений на поверхности испытанных образцов вблизи вершины трещины-надреза на трещиностойкость сплава В95 был использован фотометрический анализ структурных изображений (ФАСИ), разработанный в ИМЕТ для изучения взаимосвязи данных измерений механических характеристик исследуемого образца с соответствующими данными структурных параметров на его рабочей поверхности.

ФАСИ основан на дифференциальной схеме сравнения изображения идентичных фрагментов, сравниваемых изображений и спектров яркости отражения видимого света от их поверхности, снятых до начала испытания и в некоторый фиксированный момент времени после их начала. Спектры яркости изображения представляют в координатах:  $I$  - интенсивность отражения;  $p(I)$  - спектральная плотность отражения, которые измеряются в безразмерных относительных единицах. Под спектральной плотностью яркости отражения понимается отношение числа пикселей с интенсивностью в некотором интервале интенсивностей  $\Delta I(n)$  к общему числу пикселей, на которое разбито исследуемое изображение ( $N$ ), т.е.:

$$p(I) = \frac{n}{N} \quad (3)$$

Значения спектральной плотности откладываются по оси ординат, по оси абсцисс откладываются значения интенсивности отражения в условных единицах

линейной шкалы за нуль которой принято состояние полного поглощения падающего на фрагмент светового потока от внешнего источника, а за единицу состояние полного его отражения от него. Для оценки степени повреждения поверхности исследуемого фрагмента поверхности образца была применена функция структурной повреждаемости поверхности ( $D_s$ ), введено представление о внешнем воздействии известной физической природы с помощью соотношений:

$$D_s = \{0 \text{ при } x = 0; 1 \text{ при } x = x_{max}\} \quad 4)$$

$$D_s = \frac{S_i - S_i(0)}{S_{x_{max}} - S_{max}(0)}$$

Данные ФАСИ можно выводить в печать в вербальной форме, в виде таблиц, графиков и гистограмм. На рис. 2 приведены фрагменты образцов для оценки трещиностойкости вблизи вершины трещины

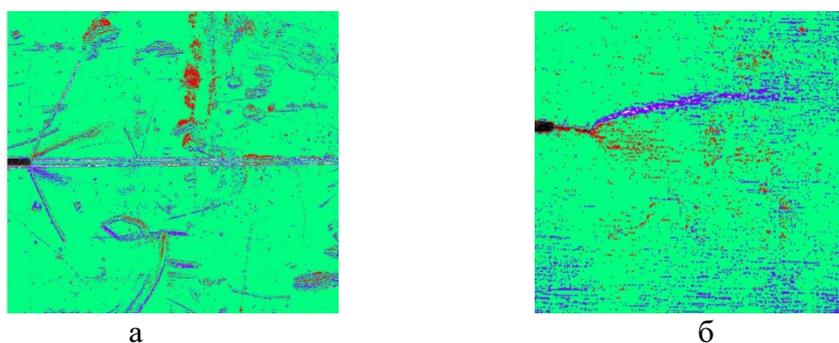


Рис. 2. Фрагменты образцов для оценки трещиностойкости вблизи вершины трещины: а - образец с трещиной надрезом; б - образец с трещиной - надрезом, удлиненным за счет усталостного нагружения

Из рисунка видно, что характер развития трещин из вершины одинаков для обоих его образцов, что можно видеть по цепочкам микроповреждений, берущих начало вниз вершины трещины. Измерения площадей, окрашенных интервалов спектров яркости отражения для обоих образцов мало отличаются для обоих образцов. Это можно видеть из таблицы 2.

Таблица 2. Сравнение площадей с одинаковой окраской интервалов спектров яркости отражения

Тип трещин	Окраска интервалов		
	Красная	Зеленая	Синия
С трещиной-надрезом	0,0255	0,8033	0,0777
С трещиной-надрезом после усталости	0,0286	0,9099	0,0552

ФАСИ удобно использовать для изучения кинетики развития магистральных трещин для установления стадийности их зарождения и роста. Известно, что по данным изучения временных зависимостей распространения трещин в настоящее время используются кинетика роста трещин, либо кинетика их раскрытия, что одинаково неудобно, так как механизм развития трещин представляет собой чередование актов раскрытия трещин с относительно медленным формированием пластических зон перед их вершинами с последующим образованием острого клюва в пределах пластической зоны с последующим быстрым ростом их длины в пределах пластической зоны [6]. В результате траектория трещин постоянно изменяется не только по длине, но и по направлению. Применение для изучения кинетики развития трещин позволяет учесть оба фактора, если

строить временную зависимость площади, которая охватывается берегами трещины. На рис. 3 показана такая зависимость для поликристаллического образца из сплава В95.

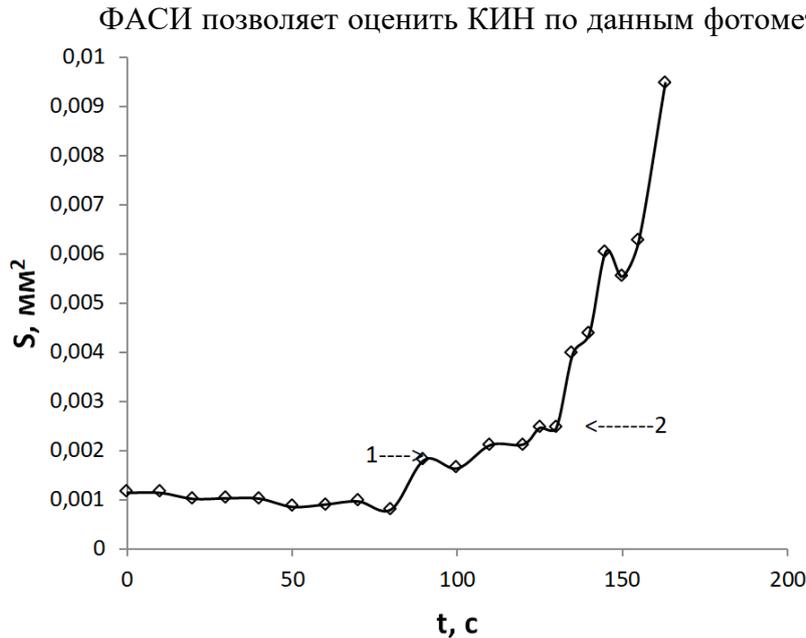


Рис. 3. Кинетическая кривая изменения площади, заключенной между берегами трещины в сплаве В95. Точка 1 на графике соответствует моменту окончания развития трещины в условиях упругого нагружения, точка 2 соответствует моменту перехода трещины к ускоренному росту

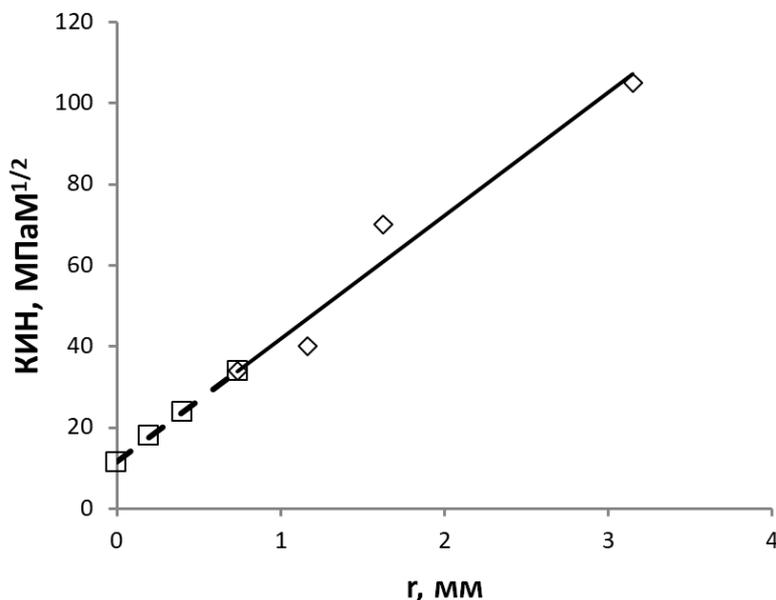


Рис. 4. Величина КИН для сплава В95 в функции удаленности точки измерения напряжений от величины радиуса-вектора  $r_{i1}$

напряжений, действующих в  $i$ -тых фрагментах, получили данные для построения зависимости КИН от величины радиусов-векторов  $r$ , соединяющих центр первого микрофрагмента  $r_{i1}$  с центрами последовательности микрофрагментов. На рис. 4

отраженного от поверхности образца светового потока в условиях экспериментов по деформированию образцов в условиях экспериментов *in situ* с одновременной регистрацией кривой растяжения образца и видеозаписью изображения его поверхности. Из равенства энергии деформирования выделенного фрагмента образца и энергии, аккумулированной в этом же фрагменте по данным измерений методом ФАСИ. Отсюда следует для удельного объема материала равенство:

$$\frac{\sigma_t^2}{2E} = A(\varphi_t - \varphi_0), \quad (5)$$

где:  $E$  - модуль Юнга,  $A$  - размерный коэффициент,  $\varphi_i$  -  $i$ -тое измерение энергии аккумулированного в образце светового потока,  $\varphi_0$  - измерение светового потока от поверхности образца до начала испытания. Выразив из формулы (5) значение действующих напряжений можно определить значение коэффициента  $A$ . Для последовательности микрофрагментов, выделенных по горизонтальной оси симметрии образца. Расчитав значения

показана эта зависимость КИН -  $f(r)$ . Ее экстраполяция при  $r \rightarrow 0$  дает критическое значение КИН<sub>с</sub>.

В таблице 3 приведены результаты оценки критических значений, рассчитанных по различным методикам. Данные таблицы №3 свидетельствуют о том, что значения критических КИН, определяющих стадийность процесса разрушения, рассчитанные по различным формулам, но по данным испытания одного и того же образца хорошо согласуются между собой. Исключение составляет значение КИН, полученное экстраполяцией значений радиуса-вектора на его нулевое значение. В идеале это соответствует началу генерации дислокаций из концентратора напряжений, что экспериментально нами наблюдалось в экспериментах *in situ* в колонне высоковольтного электронного микроскопа [8].

Таблица 3. Критические значения КИН для сплава В95 по данным различных методик

Метод оценки	Режим развития	Радиус-вектор, r, мм	КИН <sub>с</sub> , МПа <sup>1/2</sup>
ФАСИ	Упругий	1,165	51,22
	Нестабильный рост	3,495	92,65
Формула Мураками	Упругий	2,36	49,12
	Нестабильный рост	2,36	114,52
ГОСТ	Нестабильный рост	0,04	48,1
Экстраполяция к 0	Упругое раскрытие трещины	0,064	10,0

#### Выводы:

1. Результаты проведенных экспериментов по оценке трещиностойкости сплава В95 показали, что значения КИН при усталостном подрастании трещины на образцах с трещиной-надрезом практически не изменяют их величину.

2. Методом ФАСИ была изучена кинетика развития разрушения алюминиевого сплава В95 и установлены критические значения КИН, определяющие развитие трещины в режиме упругого нагружения и ее переход к нестабильному росту.

3. Проведенные эксперименты по определению критических значений, определяющие стадийность процесса разрушения, показали близкие результаты при их оценке по различным формулам, но с использованием данных одно и того же образца.

**Список литературы:** 1. Иванова В. С., Шанявский А. А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. – Челябинск : Металлургия, 1988. 400 с. 2. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. - М. : Наука, 1989. 230 с. 3. Нотт Д. Ф. Основы механики разрушения. - М.: Металлургия, 1975.- 256 с. 4. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1974. - 640 с. 5. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений п/р Мураками Ю. - М. : Мир, 1980. - Т. 1, - 448 с., - Т. 2. - 1012 с. 6. Новиков И.И., Ермишкин В.А. Микромеханизмы разрушения металлов. - М.: Наука. 1991, - 376 с. 7. ГОСТ 25506-85 Испытания на трещиностойкость. 8. Ермишкин В. А., Мурат Д. П., Подбельский В. В. Информационные технологии фотометрического анализа усталостной повреждаемости материалов. Информационные технологии, 2007. №11. - С. 65 - 70.

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ЭКЗОСКЕЛЕТОНА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ КИСТИ РУКИ ЧЕЛОВЕКА

Закарян Н.Б., Акопян Н.Г. (Кафедра Механики и Машиноведения. Национальный политехнический университет Армении (НПУА), Ереван, Армения)  
Тел.: +374 (93)066506; E-mail: [hakobyan\\_nina@list.ru](mailto:hakobyan_nina@list.ru)

**Abstract:** The article presents a model of an exoskeleton for the rehabilitation of the motor functions of the human fingers, a kinematic and dynamic study of the proposed module, its conceptual design with an illustration of the calculation of energy characteristics and the selection of a compact actuator.

**Key words:** Exoskeleton, rehabilitation, conceptual design, actuator, human fingers.

**Введение.** В настоящее время широкое применение получили роботизированные устройства, служащие для восстановления, компенсации, либо усиления двигательных функций опорно-двигательного аппарата человека – экзоскелетоны. Оптимальное проектирование и разработка экзоскелетонных и их унифицированных модулей является актуальной инженерно-технической проблемой, требующей решения множества междисциплинарных задач [1-4].

### 1. Модуль экзоскелетона для кисти руки человека

Проведены структурный синтез, кинематический и динамический анализ, а также проектирование реабилитационного и ассистирующего экзоскелетонного модуля кисти руки человека. Используется плоский трехзвенный исполнительный механизм (рис. 1). Выполнен силовой анализ, определены двигательные моменты в его кинематических парах, рассчитаны требуемые мощности привода и подобран соответствующий двигатель.

Длины звеньев приводятся в соответствие с длинами фаланг пальцев ( $OA = l_1$ ,  $AB = l_2$ ,  $BC = l_3$ ),  $q_1, q_2, q_3$  - обобщенные координаты механизма, области изменения которых:  $q_1 \in [0; \frac{\pi}{2}]$ ,  $q_2 \in [0; \frac{2\pi}{3}]$ ,  $q_3 \in [0; \frac{\pi}{4}]$  соответствуют анатомическим интервалам движения фаланг.

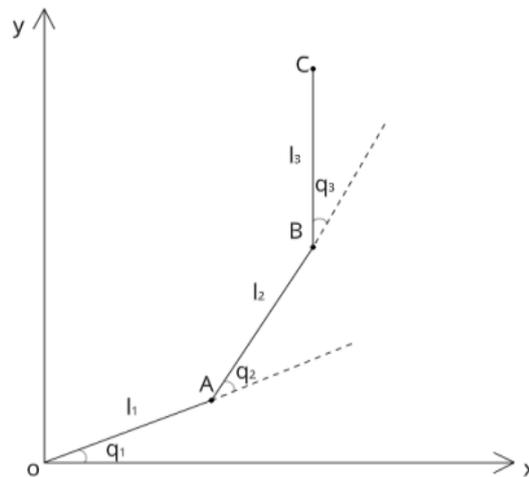


Рис. 1. Схема плоского трехзвенного исполнительного механизма модуля экзоскелетона для кисти

Для определения траектории движения точки С конечного звена используем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3), \\ y &= l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) : \end{aligned} \quad (1)$$

## 2. Численное моделирование модуля экзоскелетона

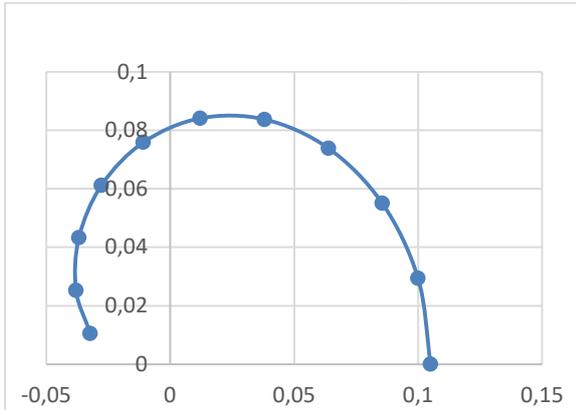


Рис. 2. Траектории движения точки С конечного звена исполнительного механизма

имеем:

$$\sum M_B = 0, \quad M_3 = F_C \cdot \sin \alpha \cdot l_3. \quad (2)$$

Принимаются следующие соотношения для двигательных моментов механизма:

$$\frac{M_3}{M_2} = \frac{l_3}{l_2 + l_3}, \quad \frac{M_2}{M_1} = \frac{l_2}{l_2 + l_1}. \quad (3)$$

Имеем:  $M_2 = \frac{M_3 \cdot (l_2 + l_3)}{l_3}$ ,  $M_1 = \frac{M_2 \cdot (l_2 + l_1)}{l_2}$ ,  $M_3$  – все три двигательных момента.

Результаты моделирования для трех представляющих практический интерес случаев приведены графически (рис. 3):

1.  $F_C \in (1 - 11) \text{ Н}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ; 2.  $F_C = 11 \text{ Н}$ ,  $\alpha \in (0 - 180^\circ)$ ; 3.  $F_C \in (0,1 - 1,1) \text{ Н}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ .

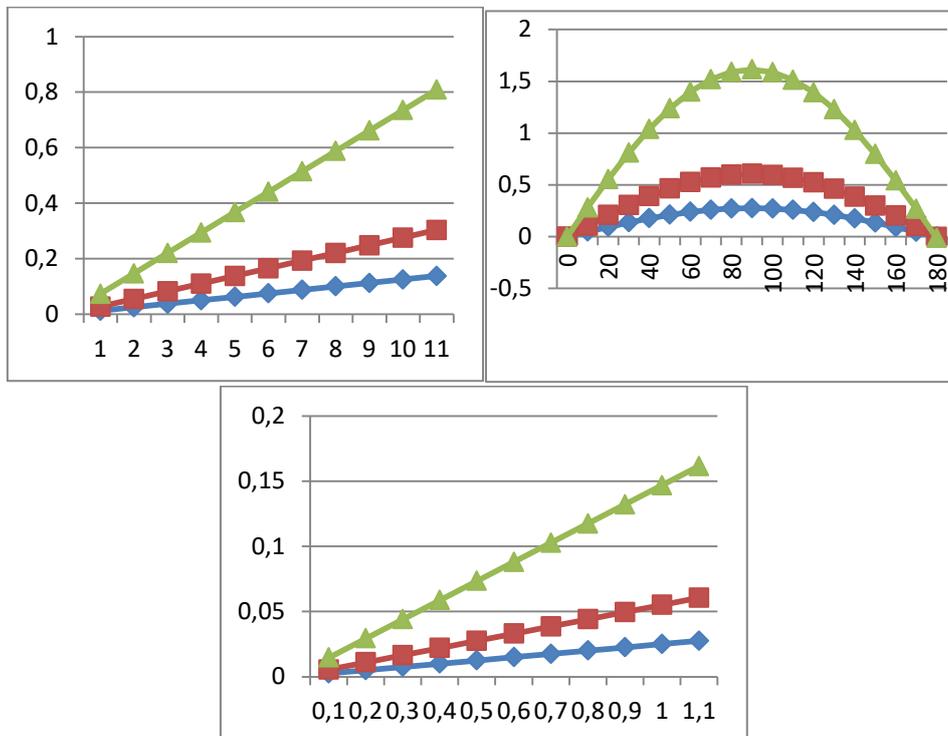
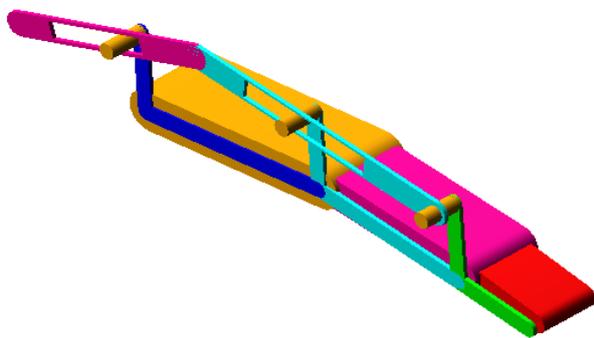


Рис. 3. Зависимость двигательных моментов от внешней нагрузки

Из результатов расчета видно, что двигательные моменты порядка 1 Нм могут быть востребованы для промышленных экзоскелетов, при нагрузках  $F_C = 1 \div 11$  Н, для реабилитационных же экзоскелетов более подходят значения  $F_C = 0,1 \div 1,1$  Н, т.е., на порядок меньшие, чем в случае усиливающих устройств.

Из известного  $P = \frac{M \cdot \omega}{\eta}$  соотношения определяется требуемая мощность двигателя, которая при  $\omega = 1.57 \text{сек}^{-1}$ ,  $\eta = 0,5$  составляет:  $P = 0,507$  Вт и подбирается двигатель фирмы **PIline**: малогабаритный пьезоэлектрический двигатель марки **U-622**, который отличается быстродействием и точностью позиционирования. Двигатель питается от аккумулятора, имеет малое энергопотребление и нагрев, снабжен датчиком угла поворота и оптическим выключателем, обеспечивает точную повторяемость движения, доступен и может быть изготовлен по индивидуальным заказам.

*Динамическое моделирование рычажного механизма модуля реабилитационного устройства.*



Предложено рычажное реабилитационное устройство, помогающее движениям пальцев (рис.4.), которое учитывает амплитуды возможных движений сегментов пальцев кисти человека и обеспечение их взаимодействия с каким-либо объектом.

Рис. 4. Рычажный механизм модуля реабилитационного устройства

Моделирование выполнено в программной среде ADAMS. Проведены кинематический и динамический анализы. Инерционные характеристики рычагов реабилитационного устройства составляют:

входное звено:  $m_{L_1} = 6.3 \cdot 10^{-4}$  кг,  $I_{xx}^{L_1} = 2.5 \cdot 10^{-7}$  кг · м<sup>2</sup>,  $I_{yy}^{L_1} = 2.5 \cdot 10^{-7}$  кг · м<sup>2</sup>,  $I_{zz}^{L_1} = 2.3 \cdot 10^{-9}$  кг · м<sup>2</sup>, выходное звено:  $m_{L_2} = 7.4 \cdot 10^{-4}$  кг,  $I_{xx}^{L_2} = 5 \cdot 10^{-7}$  кг · м<sup>2</sup>,  $I_{yy}^{L_2} = 5 \cdot 10^{-7}$  кг · м<sup>2</sup>,  $I_{zz}^{L_2} = 2.7 \cdot 10^{-9}$  кг · м<sup>2</sup>.

В результате моделирования определены характеристики модуля: перемещения (рис.5) и требуемая мощность линейного двигателя (рис.6).

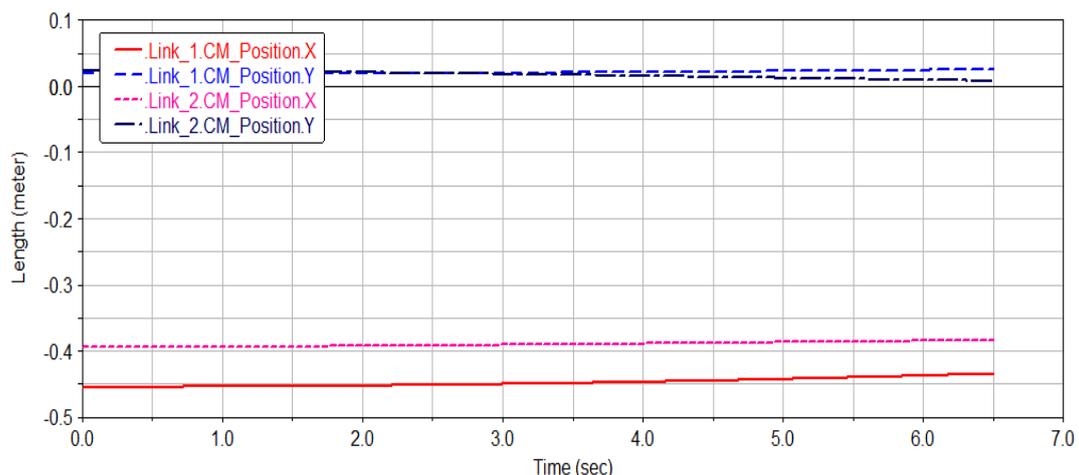


Рис. 5. Изменение положения входных и выходных рычагов по отношению к осям X и Y

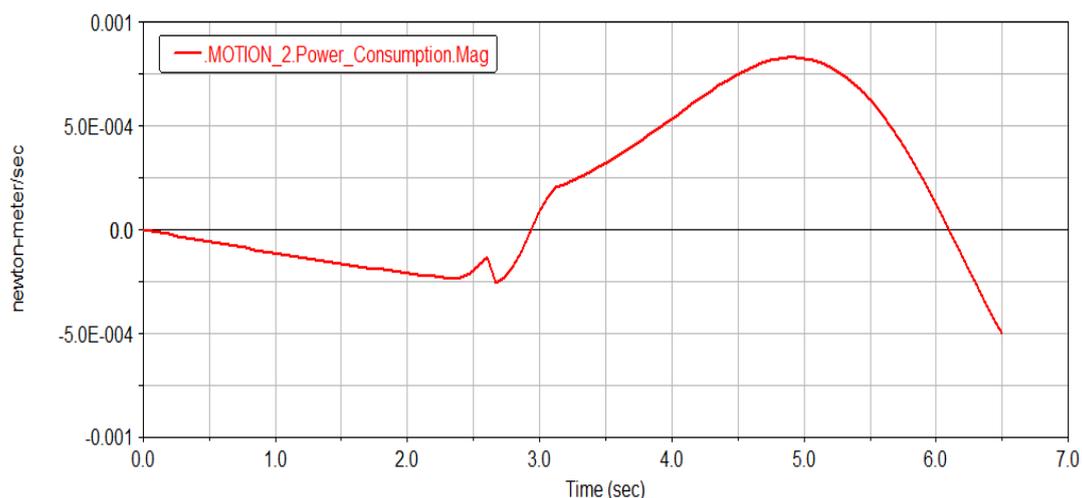


Рис. 6. Мощность линейного двигателя реабилитационного устройства пальцев

В предложенном активном модуле вибропривод шарнирно соединяется со свободным концом рычага реабилитационного устройства и приводит его в движение.

**Заключение:** Предложена новая конструкция модуля, в качестве привода которого используется пьезоэлектрический двигатель. Использован также новый рычажный механизм для ассистирования движениям пальца руки человека.

Потребная мощность, необходимая для работы модуля составляет 0,002 Вт, а используемый двигатель обеспечивает 0,3 Вт, что более чем достаточно для надежного его функционирования. Перемещения звеньев модуля находятся в диапазоне анатомических движений пальцев: (-0,45,...,0,035) мм. Предложенная разработка отличается универсальностью: может служить как прототипом при проектировании аналогичных модулей экзоскелетов и ассистирующих устройств, так и, при соответствующем его масштабировании, для прочих сегментов опорно-двигательного аппарата человека.

**Список литературы:** 1. Zakaryan N. B. Modelling of Universal Active Module of Human Motor Function Rehabilitation Device. // NPUA Proceedings, Series “Mechanics, machine science, machine building”. – 2015, Issue 18, №2, P. 72-77. 2. Zakaryan N.B., Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G., Sargsyan Yu.L., Verlinski S.V. Present state and development perspectives of rehabilitation and assistive robotics // NPUA of Proceedings: Mechanics, Machine science, machine-building.- 2019.- № 1.- P. 9-28. 3. <http://www.nrc.com.tw/CAT/PiezoMotor/WL0104A.pdf> - PiezoWave Linear 0.1N. 4. Казарян С.Д., Арутюнян М.Г., Аракелян В.А. Аспекты проектирования реабилитационных средств - ассистентов движения человека // Труды 1-й Международной конференции ИРМ-2018 / MES-2018 “Инженерные решения в машиностроении. Проектирование, моделирование, испытание и изготовление” 17-19 сентября 2018 г.- Ереван, 2018.- С. 71-80.

# К ВОПРОСУ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО СБОРКИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО КОНТЕЙНЕРА

Калинин А.В. (ОО ВПО «ДАТ», г. Донецк, ДНР)  
Тел./Факс: +38 062 345 21 90; E-mail: [mail@dat-dn.ru](mailto:mail@dat-dn.ru)

**Abstract:** A formalized record of the task of supporting the body of domestic containers according to the criterion of minimum material consumption has been developed, which indicates the expediency of using the proposed formalized record of the optimization design problem according to the criterion of changing the material consumption to improve the design of containers of domestic production.

**Key words:** container, damage, production, operation, construction

Контейнерные перевозки являются одной из важных составляющих транспортной системы любого государства. На основании возникает потребность высокоэффективного, своевременного и устойчивого обеспечения потребности в перевозке.

Более 50% общего грузооборота стран СНГ приходится на долю контейнерных перевозок. Но в настоящее время имеет место дефицит контейнеров для перевозки разнообразных видов грузов с учетом их физико-химических свойств и геометрических параметров, что определяет необходимость пополнения количества и модернизации в соответствии с правилами транспортировки и конвенции КДПГ/CMR. В последнее время пополнение контейнеров происходит за счет их изготовления на машиностроительных предприятиях. Причем общее количество базовых конструкций контейнеров состоит более чем из 25 моделей. Поэтому заказчики более тщательно анализируют технико-экономические показатели (ТЭП) существующих конструкций и заказывают новые конструкции у предприятий, которые изготавливают модели с наилучшими ТЭП. Это обосновывает актуальность дальнейшего развития научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с целью создания моделей отечественных контейнеров с улучшенными ТЭП, контейнеров нового поколения.

Решение этой задачи требует проведения оптимизационного проектирования (ОП) контейнеров по важнейшим техническим, экономическим, интегральным критериям, которые отвечают современному уровню ТЭП. Одним из важнейших ТЭП является - материалоемкость (масса тары - контейнера), изменение которой является одним из приоритетных направлений развития отечественной машиностроительной отрасли.

По своей сути решения вышеуказанной задачи на современном уровне целесообразно осуществлять с использованием подходов и методов теории оптимизации - например по критерию изменения калькуляции себестоимости производства с учетом изменения материалоемкости изделия. При этом одна из главных ролей при решении такой задачи отводится ее формализованной (математической) записи. Вместе с тем в соответствующей справочной и специальной научно-технической литературе эти вопросы не нашли достаточного освещения.

Технологическую надёжность можно охарактеризовать процессами изготовления контейнера, то есть определяющими будут физико-механические и физико-химические свойства выполненных элементов и деталей, а также дальнейшими процессами соединения элементов и деталей в отдельные узлы и контейнер в целом.

Данный вид надёжности должен описываться на этапе технологических процессов сборки элементов, деталей, узлов или контейнера в целом. Кроме того, полученные в процессе изготовления указанные элементы с соответствующими

физико-механическими и физико-химическими свойствами будут влиять на их технические характеристики в процессе эксплуатации контейнера, а в целом изменение этих свойств будет определять уровень технологической надёжности.

Авторами в работе [1-3] предложена обобщенная математическая (формализованная) запись задачи ОП отечественных контейнеров по критерию минимальной материалоемкости, как задачи многомерной оптимизации с ограничениями. Особенностью указанной записи является то, что она ориентирована на комплексное усовершенствование конструкции контейнера за счет модернизации ее отдельных составляющих. При этом, результаты предварительного анализа структурной материалоемкости элементов блочно-иерархической схемы конструкции отечественных контейнеров [3] показали, что одной из ее наиболее материалоемких составляющих является модуль кузова (около 36-40% от массы контейнера). Поэтому была разработана формализованная запись задачи ОП модуля кузова отечественных контейнеров по критерию минимальной материалоемкости. В качестве главного (первостепенного) критерия выбираем ожидаемую величину изменения материалоемкости конструкции контейнера, которая определяется по следующей формуле:

$$\Delta m_k = m_{\text{БМ}} - m_{\text{ВММ}} \quad (1)$$

где  $\Delta m_{\text{БМ}}$  - материалоемкость базовой конструкция модуля (контейнера) которая принимается за базовую для усовершенствования, кг;

$m_{\text{ВММ}}$  - материалоемкость усовершенствованной (модернизированной) конструкции модуля (контейнера), кг.

Тогда общий вид предложенной формализованной записи, с учетом всех параметрических и функциональных ограничений, будет иметь следующий вид:

$$\Delta m_k(\bar{x}) \rightarrow \max \quad (2)$$

$$\bar{x} \in D, x \in D,$$

$$D = \left\{ \bar{x} \left| \begin{array}{l} x_{\Gamma a \min} \leq x_{\Gamma a} \leq x_{\Gamma a \max}; M_{d \max} \leq M_d \leq M_{d \min}; x_{K e \min} \leq x_{K e} \leq x_{K e \max}; a \in [1; 3], \\ d \in [1; c], [1; 3], e \in [1; s], \end{array} \right. \right\} \quad (3)$$

$$D = \left\{ \bar{x} \left| \begin{array}{l} \sigma \max \leq [\sigma]; P_{oc \max} \leq [P_{oc \max}]; P_B \geq P_{B \text{прот}}; V_B \geq V_{\text{прот}}; Z_{B \max} \geq Z_{\text{прот}}; \\ x_{\Gamma a \min} \leq x_{\Gamma a} \leq x_{\Gamma a \max}; M_{d \max} \leq M_d \leq M_{d \min}; x_{K e \min} \leq x_{K e} \leq x_{K e \max}; a \in [1; 3], \\ d \in [1; c], [1; 3], \\ e \in [1; s], \end{array} \right. \right\}$$

где  $D$  - область возможных решений, которая формируется границами варьирования составляющих вектора переменных параметров ( $x_{\Gamma a}$ ,  $x_{M d}$ ,  $x_{K e}$ ) - параметрическими ограничениями;

$x_{\Gamma a}$ -суммарная составляющая вектора переменных параметров, которая характеризует габаритные размеры модуля кузова (высота -  $x_{\Gamma 1}$ , длина -  $x_{\Gamma 2}$ , ширина -  $x_{\Gamma 3}$ ). Причем максимальные значения соответствующей переменной ( $x_{\Gamma a \max}$ ) определяются выбранным габаритным очертанием контейнера (0-ВМ...3-ВМ), а минимальные значения ( $x_{\Gamma a \min}$ ) - выбираются в зависимости от функционального назначения типа контейнера (например: учета возможности перевозки различных видов грузов);

$x_{Md}$ -суммарная составляющая вектора переменных параметров, которая характеризует показатели материала, из которого изготовлены элементы контейнера (например: удельный вес, предел текучести и т.д.). Максимальные  $x_{Mdmax}$  и минимальные  $x_{Mdmin}$  значение соответствующей переменной определяются с учетом свойств материалов, которые могут быть применены для изготовления элементов контейнера (сплавов на основе алюминия, конструкционных сталей и проч.);

$x_{Ke}$ -суммарная составляющая вектора переменных параметров, которая характеризует конструкционные особенности контейнера. Максимальные  $x_{Kemax}$  и минимальные  $x_{Kemin}$  значения переменной, рассматривается, будут определяются в зависимости от предлагаемых конструкционных решений (например: толщина листа металла обшивки торцевой стены может варьироваться от 4 до 8 мм, а количество стоек одной боковой стены варьировать от 6 до 16);

$Dx$ -область допустимых решений, которая признается функциональными ограничениями-вторичными критериями оптимизации, которые также меняются при варьировании составляющих  $\bar{x}$  вектора и задаются в виде соответствующих соотношений.

При решении задач ОП модуля контейнера усовершенствованной конструкции в качестве функциональных ограничений могут рассматриваться:

$\sigma_{max}$ -эквивалентные напряжения для наиболее нагруженного элемента контейнера, которые не должны превышать допустимые напряжения  $[\sigma]$  для выбранного материала;

$P_{ocmax}$ -расчетная статическая нагрузка от груза на пол контейнера, которое не должно превышать допустимого значения  $[P_{ocmax}]$ , что устанавливается нормативно-технической документацией;

$P_B$  - грузоподъемность, которая должна быть не меньше грузоподъемности прототипа  $P_{Bпрот}$ ;

$V_B$ -полный (нагрузочный) объем контейнера, который должен быть больше общего объема контейнера для прототипа  $V_{прот}$ ;

$Z_{Bmax}$  - максимальные затраты на производство модуля кузова, которые должны быть меньшими, чем аналогичные расходы для прототипа  $Z_{прот}$ .

Вышеуказанное свидетельствует о целесообразности использования предложенной формализованной записи задачи оптимизационного проектирования по критерию изменения материалоемкости для усовершенствования конструкции контейнеров отечественного производства.

#### **Вывод:**

Вышеуказанное свидетельствует о целесообразности использования предложенной формализованной записи задачи оптимизационного проектирования по критерию изменения материалоемкости для усовершенствования конструкции контейнеров отечественного производства.

**Список литературы:** 1. Гусев А.А., Павлов В.В., Андреев А.Г. Под ред. Соломенцева Ю.М. «Технология сборки в машиностроении». Энциклопедия в 40 тт. Раздел III Технология производства машин. Т III-5. М., «Машиностроение» 2001. 2. Дашенко А.И. и др. "Технология автомобиле- и тракторостроения" Учебник для студентов вузов. М., Машиностроение, 2005 3. Жолобов А.А., Лукашенко В.А., Сазонов И.С. «Проектирование технологических процессов сборки машин». Учебник для студентов вузов. 2005. 4. Шандров Б.В., Стржемечный М.М. Автоматизированная сборка изделий на базе применения несинхронных сборочных линий. Учебное пособие. - М., МГТУ «МАМИ», 2006 г. № 1852

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ БУРЕНИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН УДАРНЫМ СПОСОБОМ

Каракозов А.А.

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР)

E-mail: [karakozov@donntu.ru](mailto:karakozov@donntu.ru)

**Abstract:** *The results of the development of technologies for drilling geological engineering wells during the development of offshore oil and gas fields, based on the use of water driven hammer drilling tools, are presented.*

**Keywords:** *shelf, development of oil and gas fields, engineering and geological surveys, drilling, sampling, dynamic processes.*

В настоящее время идёт активное освоение углеводородных ресурсов морского шельфа, осуществляется добыча твёрдых полезных ископаемых (в том числе, и строительных материалов) из морских месторождений. Для решения этих задач необходимо выполнять большие объёмы геологоразведочного бурения: для разведки полезных ископаемых и для инженерно-геологических изысканий, обеспечивающих строительство морской инфраструктуры по добыче и транспортировке углеводородного сырья. Большинство таких скважин приходится на породы песчано-глинистого комплекса I–IV категорий по буримости при глубинах моря до 60–80 м (весьма редко – до 200 м).

Скважины глубиной до 100 метров могут проходиться с плавучих самоподъёмных буровых установок (СПБУ). При бурении в инженерно-геологических целях отбор монолитов в мягкопластичных грунтах проводится вдавливаемыми пробоотборниками, а отбор монолитов и проб в плотных, полутвёрдых глинистых грунтах и песках различной плотности – гидроударными буровыми снарядами (ГБС) или гидравлическими забивными пробоотборниками (ГЗП), реализующими ударный способ погружения в горную породу. В других случаях ГБС и ГЗП могут использоваться по всей глубине скважины.

По заданию ГАО «Черноморнефтегаз» была разработана технология поинтервального бурения (рис. 1) и технические средства для её реализации, в том числе и гидроударные буровые снаряды и гидравлические забивные пробоотборники [1, 2].

С СПБУ спускается колонна обсадных труб диаметром 219 или 245 мм. Её башмак устанавливается выше дна моря на расстоянии 1,5–2 м. Затем спускается колонна обсадных труб диаметром 146 мм, предназначенная для крепления скважины в процессе проходки. Если первый рейс по отбору пробы планируется проводить ГБС, то колонну останавливают на расстоянии 0,5 м от дна во избежание заклинивания снаряда. Если же планируется использовать вдавливаемый пробоотборник, то колонну опирают на дно. После этого начинается отбор проб.

В зависимости от средства отбора керна предусматривается применение двух компоновок бурового снаряда:

1. При бурении тугопластичных глин, суглинков, песков различной консистенции – гидроударный буровой снаряд (забивной пробоотборник) с диаметром корпуса 108 мм, спускаемый в скважину на бурильных трубах диаметром 73 мм (рис. 3);

2. В мягкопластичных грунтах – вдавливаемый пробоотборник с диаметром корпуса 102 мм, спускаемый в скважину на бурильных трубах диаметром 73 мм, при этом над пробоотборником устанавливается секция УБТ диаметром 89 мм массой не менее 2–2,5 т, обеспечивающая внедрение пробоотборника в глинистые грунты.

Технология работ заключается в следующем (рис. 1). При первом рейсе производится бурение на заданную длину рейса (обычно – до 3 м). После выключения гидроударника ГБС на бурильных трубах поднимается на СПБУ, где из колонковой трубы извлекается керн. Обсадную колонну диаметром 146 мм заглубляют в грунт на глуби-

ну, не превышающую длину рейса.

Второй и последующие рейсы выполняются следующим образом. ГБС спускается в скважину на бурильной колонне момента появления разгрузки инструмента. Если она произошла в момент, когда ГБС не дошёл до забоя, то это свидетельствует об частичном обрушении стенок скважины. Тогда к верхней бурильной трубе присоединяются бурильные трубы с вертлюгом-сальником таким образом, чтобы при дальнейшей подаче снаряда обеспечивалась установка ГБС на забой и проходка на длину рейса. Запускается буровой насос, и рабочая жидкость подается в ГБС с расходом, достаточным для срабатывания его нижнего пускового узла, обеспечивающего размыв пород на забое скважины. В таком режиме ГБС опускается на глубину выше отметки забоя скважины на 0,1 м.

После этого насос кратковременно выключается, и пусковой узел возвращается в исходное положение, обеспечивающее отбор пробы грунта. При помощи питателя в нагнетательную линию сбрасывается шарик. Буровой насос снова включается. Срабатывает верхний пусковой узел и запускается гидроударник. Выполняется бурение на заданную длину рейса. Расход жидкости уменьшается до остановки гидроударника, ГБС поднимается в полость обсадных труб, а после выключения насоса – на поверхность для извлечения керна.

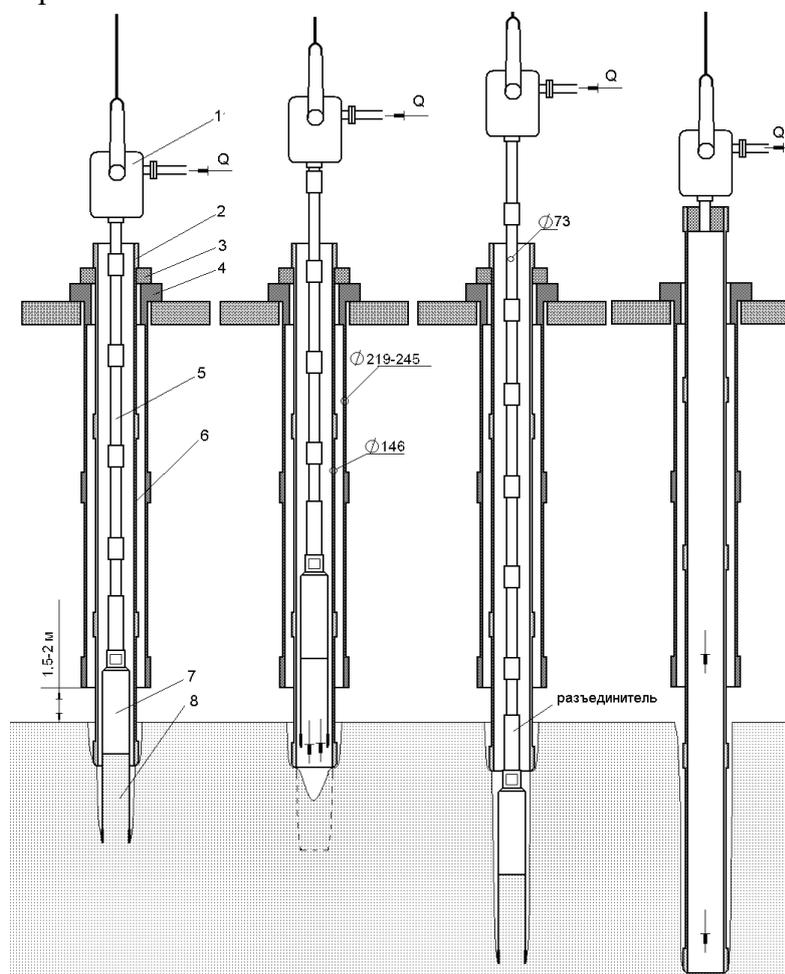


Рис. 1. Технологическая схема поинтервальной проходки скважин с СПБУ: 1 – вертлюг-сальник; 2 – муфта обсадной колонны  $\varnothing 146$  мм; 3 – хомут; 4 – головка обсадной колонны  $\varnothing 219-245$  мм; 5 – бурильные трубы  $\varnothing 73$  мм; 6 – обсадная колонна  $\varnothing 146$  мм; 7 – ГБС (ГЗП); 8 – керн; Q – подача жидкости

После углубки скважины на длину обсадной трубы (9-12 метров) обсадная колонна диаметром 146 мм наращивается ещё одной трубой с установленным в верхней части вертлюгом-сальником. Затем обсадная колонна с расхаживанием и промывкой спускается до достигнутого ранее забоя скважины.

Данная технология и технические средства прошли апробацию при выполнении инженерных геотехнических исследований площадки под строительство платформы блок-кондукторов Субботинского нефтегазового месторождения в Черном море. С СПБУ «Сиваш» была пробурена скважина глубиной 78 м, при этом было отобрано 60 проб (из них 30 – монолиты).

Результаты испытаний в производственных условиях показали возможные пути совершенствования данной технологии, в том числе, с точки зрения выбора рациональной

компоновки бурового снаряда, использования бурильных труб меньшего диаметра, статических и динамических утяжелителей, определения места установки разъединителя и т.д.

При проведении этих исследований были рассмотрены вопросы определения параметров динамических процессов в бурильных трубах при ударном способе проходки скважин, который реализуется при использовании гидроударных буровых снарядов или забивных пробоотборников.

В частности, была рассмотрена следующая модель (рис. 2). Упругий стержень длиной  $l$  с массой единицы длины  $m$  и жёсткостью  $EF$  соединён с сосредоточенной массой  $M_0$ , по которой со скоростью  $v_0$  ударяет масса  $M$ . Система опирается на упругое основание с жёсткостью  $c_0$ . Динамические процессы такой системы с распределенными параметрами описываются волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - c^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{q(x,t)}{m}, \quad (1)$$

где  $u$  – перемещение сечения стержня с координатой  $x$  в момент времени  $t$  (ось  $x$  направлена вверх от массы  $M_0$ );  $c$  – скорость распространения упругих деформаций;  $q$  – интенсивность возмущающей распределенной нагрузки (для нашей задачи её нет).

Решение однородного уравнения, полученного из (1), известно в виде [3]:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) \sin(\omega_n t + \mu_n). \quad (2)$$

Уравнение перемещений сечений стержня  $u(x)$  можно принять в начальных параметрах:

Если усилие

$$u(x) = u_0 \cos kx + \frac{N_0}{kEF} \sin kx. \quad (3)$$

в начале координат  $N_0$  выразить через перемещение  $u_0$ , то получим решение в собственных функциях  $X(x)$ :

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) \sin(\omega_n t + \mu_n), \quad (4)$$

где  $n$  – номер произвольной гармоник колебаний с частотой  $\omega_n$  и начальной фазой  $\mu_n$ , которые определяются из граничных и начальных условий через волновые числа  $k_n$ :

$$\omega_n = k_n c = k_n \sqrt{\frac{EF}{m}} \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \mu_n = \frac{u_0}{v_0} \omega_n, \quad (6)$$

Поскольку начало координат принято на нижнем конце стержня, то решение уравнения (1) можно выразить через один начальный параметр  $u_0$ , используя граничное условие на нижнем конце стержня – уравнение динамического равновесия всех сил, приложенных к массам  $M$  и  $M_0$ :

$$N_0 + c_0 u_0 + M^* \ddot{u}(0) = 0,$$

где  $M^* = M + M_0$ .

Так как ускорение движения масс  $\ddot{u}(0) = -\omega^2 u(0)$ , то с учетом частоты колебаний (5) получим:

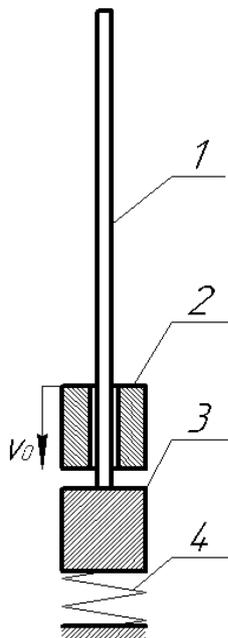


Рис. 2. Модель ударного бурения: 1 – стержень (бурильные трубы); 2 – боёк (масса  $M$ ); 3 – пробоотборник (масса  $M_0$ ); 4 – грунт с упругой характеристикой

$$N_0 = u_0 \left( \frac{M^* k^2 EF}{m} - c_0 \right) = u_0 k EF \left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right), \quad (6)$$

где:  $\xi = \frac{M^*}{ml}$  – отношение сосредоточенных масс к массе стержня,  $\lambda = kl$  – собственные числа трансцендентного частотного уравнения,  $\bar{c} = \frac{c_0 l}{EF}$  – коэффициент жесткости упругого основания.

С учетом усилия (6) уравнение перемещений сечений (2) можно представить в собственных функциях  $X(x)$ :

$$u(x) = u_0 \left[ \cos kx + \left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \sin kx \right] = u_0 X(x). \quad (7)$$

Так как на стержне с распределенной массой  $m$  имеется сосредоточенная масса  $M^*$ , то собственные функции будут ортогональными с весом.

Весовую функцию для нашего случая находим по теореме Бетти [3]:

$$\rho(x) = m(1 + \xi l \delta(x)), \quad (8)$$

где  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака.

Используя граничное условие ( $x=l, N(l)=0$ ), с учётом (7) получаем частотное уравнение

$$\left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \cdot \operatorname{tg} \lambda = 1. \quad (9)$$

Из условия возбуждения собственных колебаний начальной скоростью движения  $v_0$  при  $u_0=0$  на основании (6) находим  $\mu=0$ .

Рассмотрим начальное условие, требующее, чтобы при  $t=0$  скорость движения всех сечений была равна нулю, кроме сечения, по которому наносится удар:

$$\dot{u}(x, 0) = v_0 e(-x).$$

Так с учётом квадрата нормы собственных функций  $\Delta_n^2$  находим амплитудное перемещение

$$u_0 = v_0 \frac{2\xi l}{\omega l \Delta_n^2} = v_0 \frac{2\xi l}{\lambda c \left[ X(l) + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]}$$

и уравнение движения сечений

$$u(x, t) = v_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\xi l \cdot X_n(x) \sin \omega_n t}{\lambda_n c \left[ X^2(l) + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]}. \quad (10)$$

К этому решению нужно добавить воздействие внезапного приложения веса  $Q$  от груза массой  $M$ . Уравнение движения сечений от внезапного приложения груза  $Q$  будет иметь вид:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} 2Q \frac{X_n(x)(1 - \cos \omega_n t)}{m \cdot k_n^2 c^2 \cdot l \Delta_n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Ql}{EF\lambda^2} \cdot \frac{X_n(x)(1 - \cos \omega_n t)}{\left[ X^2(l) + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]}. \quad (11)$$

Суммируя (10) и (11), в итоге получаем:

$$u(x,t) = 2 \frac{Ql}{EF} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos k_n x + \left( \xi \lambda_n - \frac{\bar{c}}{\lambda_n} \right) \sin k_n x}{\lambda_n^2 \cdot \left[ \left( \cos \lambda_n + \left( \xi \lambda_n - \frac{\bar{c}}{\lambda_n} \right) \right)^2 + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda_n^2} \right]} \cdot \left( 1 - \cos \omega_n t + \sqrt{\frac{v^2 \eta}{gf} \lambda_n^2} \right), \quad (12)$$

где  $\eta = \frac{M}{ml}$ ,  $f = \frac{Ql}{EF}$  – квазистатическое растяжение стержня от падающего груза.

Из (12) дифференцированием находим уравнение внутренних усилий:

$$N(x,t) = 2Q \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n} \cdot \frac{-\sin kx + \left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \cos kx}{\left[ \left( \cos \lambda + \left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \right)^2 + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]} \cdot \left( 1 - \cos \omega_n t + \sqrt{\frac{v^2 \eta}{gf} \lambda_n^2} \right). \quad (13)$$

Оно позволяет определить максимальный динамический коэффициент для нашей задачи:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2 \lambda_n^2}{gf} \eta}. \quad (14)$$

Приведенная выше методика позволяет определять параметры динамических процессов при ударном бурении горных пород, в частности гидроударными буровыми снарядами и забивными пробоотборниками.

**Список литературы: 1.** Каракозов, А. А. Совершенствование технических средств и технологий отбора проб грунта при бурении геотехнических скважин с плавающих самоподъемных установок на шельфе Чёрного моря / А.А. Каракозов, О.И. Калиниченко, П.В. Зыбинский, С.Н. Парфенюк, А.В. Хохуля, П.Л. Комарь // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения / Сборник научных трудов. – Вып. 11 – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ АЛКОН НАНУ, 2008. – С. 66–74. **2.** Каракозов, А. А. Об использовании забивных пробоотборников с гидравлическим приводом при реализации технологии поинтервального бурения геотехнических скважин с буровых судов и самоподъемных буровых установок/ А. А. Каракозов // Научные труды ДонНТУ, Серия «Горно-геологическая». Вып. 2(17). – Донецк, ДонНТУ, 2012. – С. 173–178. **3.** Шевченко Ф.Л. Строительная механика. Специальный курс. Динамика упругих стержневых систем. – Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. – 293 с.

## РАЗРАБОТКА УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПРИХВАТОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ПЕРЕПАД ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЕ И СКВАЖИНЕ

Каракозов А.А., Паршков А.В.

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР)

E-mail: [karakozov@donntu.ru](mailto:karakozov@donntu.ru)

**Abstract:** *The results of the development of a hydraulic impact mechanism that uses the hydrostatic pressure of a liquid column in a drill string and is designed to free stuck pipe in exploration wells in conditions of catastrophic losses of drilling fluid.*

**Keywords:** *well drilling, sticking, hydraulic impact mechanism, working cycle.*

Бурение геологоразведочных скважин в Донбассе часто осложняется техногенными прихватоопасными зонами старых горных выработок. Они, как правило, характеризуются весьма высокой интенсивностью поглощения промывочной жидкости, обвалами и осыпями горных пород. Несмотря на значительные успехи в создании технических средств для борьбы с прихватами, на их ликвидацию ежегодно затрачивается до 60-80% аварийного времени.

Весьма тяжелыми являются прихваты под действием перепада давления, которые обусловлены разницей гидростатического и пластового давления, в результате чего часть бурильной колонны прижимается к стенке скважины. Поверхность труб, соприкасаясь с постоянно уплотняющейся фильтрационной коркой, принимает на себя действие перепада давления.

Для ликвидации этих прихватов наиболее действенным может быть снижение гидростатического давления в зоне прихвата в сочетании с действием осевой нагрузки или крутящего момента. При работе существующих ударных механизмов обычно создаются лишь мощные единичные удары или вибрация, поэтому они мало пригодны для ликвидации таких прихватов. В ДонНТУ была предложена схема гидравлического ударного механизма на основе гидроударника для ликвидации сложных прихватов, обусловленных разницей гидростатического и пластового давления.

Устройство [1] состоит из гидроударника двойного действия с насосным блоком и пакера с раздуваемой камерой, выполненного ограниченно подвижным относительно гидроударника. Схема устройства представлена на рис. 1а. Расположение механизма в скважине и схема его работы показаны на рис. 1б и 1в. Стрелками указано направление движения жидкости в устройстве при его работе.

Устройство присоединяется к прихваченному снаряду. Рабочая жидкость подаётся в гидроударник по колонне бурильных труб. Срабатывает пакер и отделяет зону прихвата от остальной скважины. В системе возрастает давление, гидроударник запускается в работу и наносит удары, передающиеся на прихваченный снаряд.

Работа гидроударника – генератора ударных импульсов, сводится к следующему. В исходном положении боёк 6 веса находится в крайнем нижнем положении. Впускной клапан 13 закрыт, выпускной 14 – открыт. Промывочная жидкость, подаваемая буровым насосом к переходнику 1, поступает под поршень 5, вызывая его подъём вместе с бойком. Жидкость, находящаяся над поршнем 5, вытесняется через осевые каналы клапанной коробки в полость кожуха гидроударника. При ходе поршня вверх клапанная группа остается в исходном положении за счет давления жидкости на впускной клапан 13. По мере подъема поршня пружина, упираясь в хвостовик выпускного клапана 14, сжимается. Поршень встречается с выпускным клапаном и наносит по нему удар. За счет энергии удара и силы сжатой пружины выпускной клапан закрывает осевые каналы в клапанной коробке 3, а впускной клапан 13 открывает центральный канал клапан-

ной коробки, обеспечивая доступ жидкости в верхнюю полость цилиндра 4.

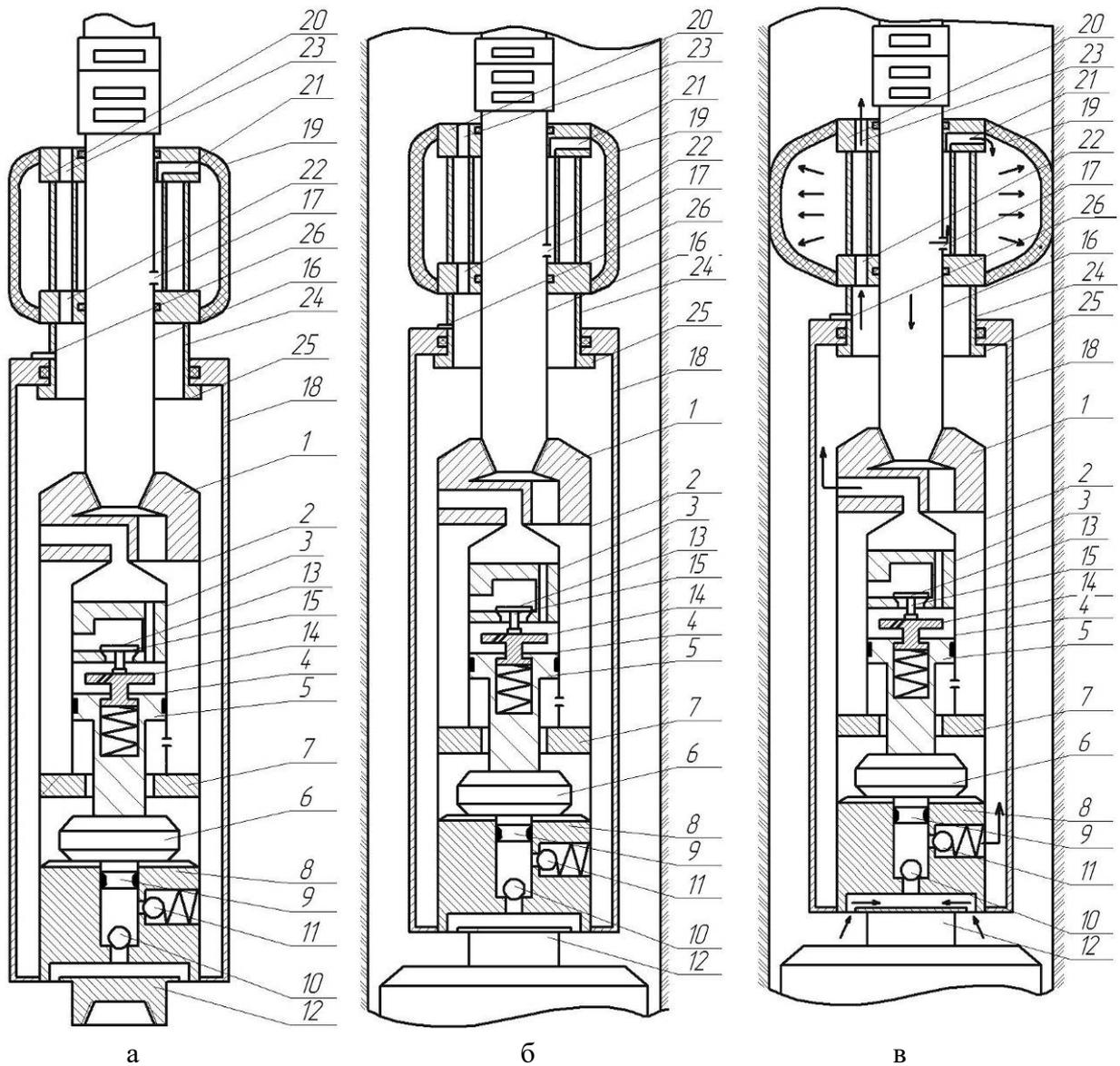


Рис. 1. Гидравлический ударный механизм для ликвидации сложных прихватов в скважинах. а – схема устройства, б – расположение механизма в скважине, в – схема работы механизма. 1 – верхний переходник, 2 – корпус, 3 – клапанная коробка, 4 – цилиндр, 5 – поршень, 6 – боёк, 7, 8 – верхняя и нижняя наковальни, 9 – шток, 10, 11 – всасывающий и нагнетательный насосные клапана, 12 – переходник, 13, 14 – впускной и выпускной клапан, 15 – толкатель, 16 – полый шток, 17 – отверстие, 18 – кожух, 19 – раздуваемая камера, 20 – корпус, 21, 22, 23 – канал, 24 – патрубок, 25 – ограничитель, 26 – срезной штифт

Так как площадь поршня 5 со стороны верхней полости цилиндра больше, чем со стороны нижней полости, то боёк 6 устремится вниз. При этом клапанная группа сохраняет свое верхнее положение за счет давления жидкости на выпускной клапан 14. В момент, когда поршень захватит хвостовик клапана 14, произойдет перестановка клапанов в исходное положение. Далее цикл работы гидроударника повторится.

В периоды перестановки клапанов боёк, за счет накопленной энергии, продолжает движение вверх или вниз и ударяет по наковальням 7 или 8. При ходе бойка 6 вверх

происходит всасывание жидкости из скважины через всасывающий клапан насосного блока 10 в пространство под штоком, а при ходе штока вниз жидкость будет выбрасываться через нагнетательный клапан 11 в зону над пакером.

Данная конструкция позволяет перемещаться гидроударнику на бурильных трубах относительно пакера, что обеспечивает возможность перемещения прихваченного снаряда в случае ликвидации прихвата.

3D-модель гидроударника, входящего в состав разработанного гидравлического ударного механизма, показана на рис. 2.

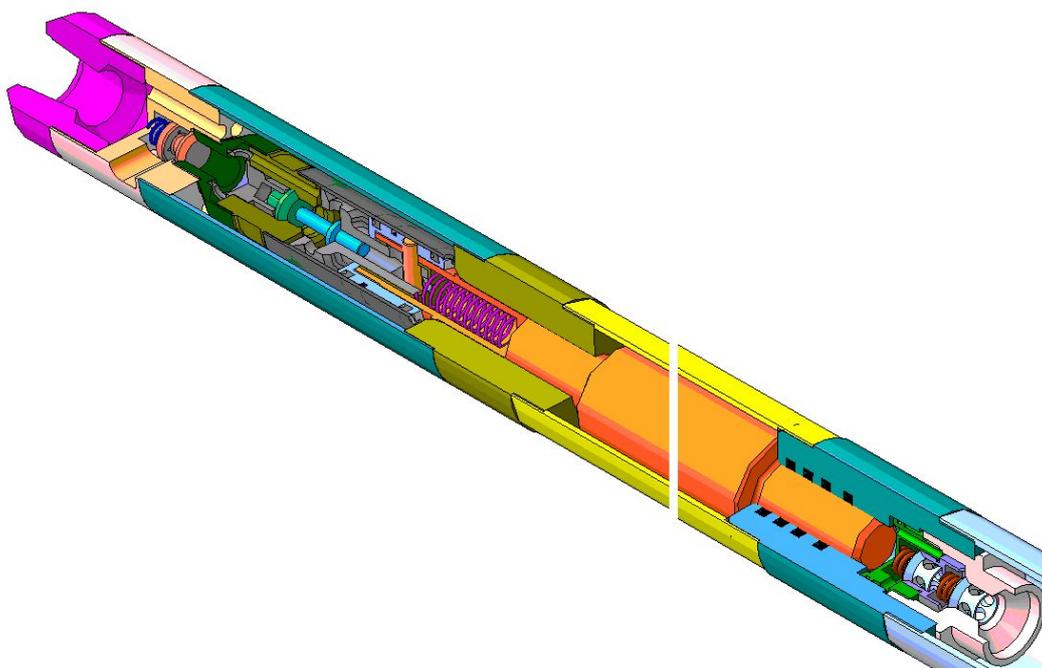


Рис. 2. Конструкция гидроударника для ликвидации прихватов

Для работы в ситуациях, когда прихваты обусловлены резким падением уровня жидкости в скважине вследствие поглощения промывочной жидкости, что очень часто наблюдается при бурении скважин на полях угольных шахт Донбасса, была предложена и апробирована конструктивная схема ударного механизма (УМЛП), реализующего для разгона бойка давление столба жидкости в бурильных трубах (рис. 3) [2, 3, 4].

Принцип действия механизма заключается в следующем. УМЛП может включаться в состав бурового снаряда или спускаться в скважину после аварии, соединяясь с прихваченным снарядом. При этом скважина остается пустой или частично заполненной жидкостью вследствие катастрофического поглощения, а бурильная колонна заполняется промывочной жидкостью.

При использовании после возникновения прихвата в скважине, УМЛП спускается к прихваченному объекту на бурильных трубах, соединенных со штоком 9. При этом обратный клапан 14 может отсутствовать. В случае необходимости, промывка забоя скважины осуществляется через осевые каналы устройства. Устройство соединяется с прихваченным буровым снарядом нижним переходником 4 с резьбой 16, к которой может дополнительно крепиться ловильный инструмент. Затем по бурильным трубам в седло 13 сбрасывается обратный клапан 14, который перекрывает осевой канал в нижнем переходнике 4. Бурильные трубы буровым насосом заполняют промывочной жидкостью так, чтобы уровень жидкости в них был значительно выше, чем в скважине. При этом обратный клапан не дает жидкости вытекать из полости бурильных труб. Поршень-боек 12 остается на уступе 5 под действием собственного веса.

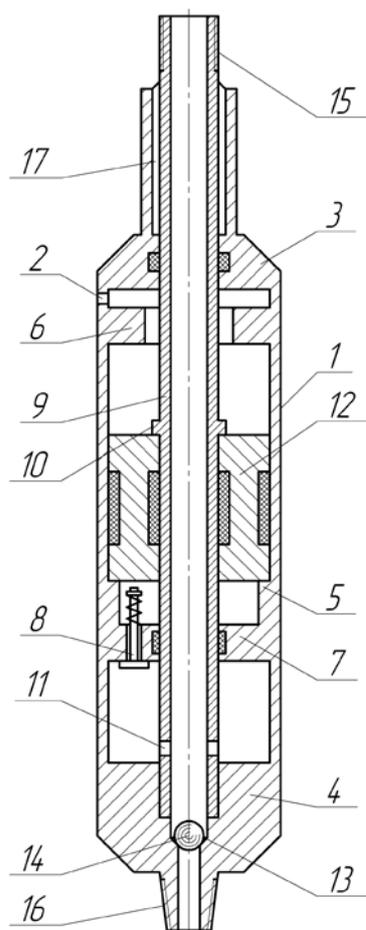


Рис. 3. Конструктивная схема УМЛП [4]: 1 – корпус, 2, 11 – радиальные отверстия, 3, 4 – верхний и нижний переходники, 5 – уступ, 6 – наковальня, 7 – перегородка, 8 – клапаном, 9 – шток, 10 – ограничитель, 12 – поршень-бойок, 13 – седло, 14 – обратный клапан, 15, 16 – резьба, 17 – шлицевое соединение

механизмов в конкретных условиях эксплуатации необходимо установление закономерностей изменения скорости бойка во времени в зависимости от конструктивных и технологических факторов, основанное на детальном анализе рабочего цикла этих устройств.

Исследования были направлены на разработку более точного метода определения параметров гидравлических ударных механизмов, поскольку существующие методы расчёта [7] не всегда соответствует реализуемым рабочим циклам либо приняты с весьма большими допущениями [9].

Так модель для гидроударника не допускает возможной несимметричности рабочего цикла и не учитывает влияния на работу устройства характера перетоков жидкости через элементы гидроударника, динамики клапанной группы и ряда значимых параметров гидравлической системы «насос – бурильная колонна – гидроударник – скважина». Поэтому для обеспечения более достоверного расчёта

Для нанесения удара поднимают бурильные трубы и перемещают шток 9 в крайнее верхнее положение. Радиальные отверстия 11 в штоке поднимаются выше перегородки 7 и соединяются с полостью под поршнем-бойком 12, и в неё поступает жидкость из бурильных труб. Поскольку давление под поршнем-бойком возросло, то он двигается вверх и наносит удар по наковальне 6. Жидкость из полости над поршнем-бойком 12 вытесняется в скважину через отверстия 2.

Для возврата в исходное положение (перед нанесением повторного удара) бурильные трубы опускают. Ограничитель 10 давит на поршень-бойок и перемещает его вниз на уступ 5. Жидкость из-под поршня-бойка вытесняется в бурильные трубы через отверстия 11. Когда они сравняются с перегородкой 7, жидкость из-под поршня-бойка будет вытесняться в бурильные трубы через клапан 8.

Аварийный снаряд освобождается от прихвата под воздействием повторяющихся ударных нагрузок и пульсаций давления в зоне работы механизма.

Устройство также может включаться в состав бурового снаряда. При этом в процессе бурения скважины крутящий момент на забой передается шлицевым соединением 17, осевая нагрузка – ограничителем 10 на поршень-бойок 12 и уступ 5 корпуса 1. В случае прихвата обратный клапан 14 сбрасывают в бурильные трубы, и он садится в седло 13. Дальнейшая работа УМЛП аналогична вышеописанной.

Основным параметром, определяющим эффективность работы описанных выше устройств, является скорость их бойка при соударении с наковальней. Поэтому для определения энергетических характеристик

параметров гидроударника при варьировании технологических и конструктивных факторов в широких пределах необходимо использование новых, более полных, математических моделей.

Это же касается и математической модели работы УМЛП, поскольку распределённые параметры потока жидкости учитываются весьма упрощённо.

При разработке математических моделей рабочего цикла устройств использовались уравнения неустановившегося течения жидкости [8]. Сложность системы не позволяет получить аналитическое решение, не связанное с разложением функций в бесконечные ряды Фурье, поэтому проще получить численное решение, определяемое на прямоугольной сетке характеристик. Для каждого участка расчётной схемы составляется уравнение, связывающее изменение давления и расхода жидкости на прямой и обратной характеристиках. Неустановившееся движение жидкости на каждом участке трубопровода описывается системой уравнений движения и неразрывности потока:

$$\frac{\partial p_i(x_i, t)}{\partial x_i} + m_i \cdot \frac{\partial Q_i(x_i, t)}{\partial t} + n_i \cdot Q_i(x_i, t) \cdot |Q_i(x_i, t)| + \sin_i \cdot \rho \cdot g = 0$$

$$\frac{\partial p_i(x_i, t)}{\partial t} + m_i \cdot \frac{\partial Q_i(x_i, t)}{\partial x_i}, \quad (1)$$

где  $p_i(x_i, t)$  – давление в сечении  $i$ -го участкам с координатой  $x_i$  в момент времени  $t$ ;  $Q_i(x_i, t)$  – расход в сечении  $i$ -го участкам с координатой  $x_i$  в момент времени  $t$ ;  $0 \leq x_i \leq L_i$ ;  $L_i$  – длина  $i$ -го участка;  $m_i$  – коэффициент в формуле Жуковского для определения величины повышения давления при гидравлическом ударе;  $\sin_i$  – синус угла наклона  $i$ -го участка трубопровода к горизонту;  $\rho$  – плотность жидкости;  $n_i \cdot Q_i(x_i, t) \cdot |Q_i(x_i, t)| = f(x_i, t)$  – удельные потери давления на  $i$ -м участке трубопровода;  $c$  – скорость распространения ударной волны;  $S_i$  – площадь сечения  $i$ -го участка;  $d_i$  – его диаметр;  $\lambda_i$  – коэффициент Дарси на  $i$ -м участке трубопровода;  $m_i = \frac{c \cdot \rho}{S_i}$ ;

$$n_i = \frac{\lambda_i \cdot \rho}{2 \cdot S_i \cdot d_i}.$$

Для анализа условий функционирования гидравлических ударных механизмов с учетом распределённых параметров потока жидкости, обеспечивающего его работу, при быстрых изменениях мгновенных значений давления и расхода по длине трубопровода, систему уравнений (1) в частных производных гиперболического типа необходимо рассматривать в характеристической форме. После перехода в характеристических уравнениях от дифференциалов к конечным приращениям, с соблюдением необходимого условия формирования сетки характеристик для численных расчетов

$$\Delta x = \pm \Delta t \cdot c, \quad (2)$$

где  $\Delta x$  – шаг по пространственной координате сетки,  $\Delta t$  – шаг по временной координате сетки, получим:

$$\Delta p_i(x_i, t) + m_i \cdot \Delta Q_i(x_i, t) + (f(x_i, t) + k_i) \cdot \Delta x = 0 \quad (3)$$

$$\Delta p_i(x_i, t) - m_i \cdot \Delta Q_i(x_i, t) - (f(x_i, t) + k_i) \cdot \Delta x = 0 \quad (4)$$

где  $k_i = \sin_i \cdot \rho \cdot g$ .

Уравнение (3) отображает соотношения между приращениями давления и расхода на прямых (С+), а уравнение (4) – на обратных (С-) характеристиках.

В начале трубопровода формируется граничное условие, например, для гидроударника оно имеет вид

$$Q_1(0,t) = Q_o. \quad (5)$$

Аналогично получают описания граничных условий для всех участков трубопровода.

Полученная система уравнений решается методом итераций в программе SciLab, позволяющей не только рассчитать необходимые параметры, но и визуализировать полученные результаты в виде графиков их изменения при различных режимах работы гидроударника (запуск, установившийся режим) или при реализации рабочего цикла УМЛП.

**Список литературы:** 1. Гидравлический ударный механизм для ликвидации прихватов бурового снаряда : Патент на полезную модель №51227 UA E21B 31/00 / А.А. Каракозов, С.Н. Парфенюк, И.Д. Сагайдак, А.М. Антецкая. – Оpubл. 12.07.2010, Бюл. №13. 2. Каракозов, А. А. Перспективы создания ударных механизмов для ликвидации прихватов при бурении скважин в сложных условиях / А. А. Каракозов // Сб. Труды ДонГТУ. Серия «Горно-геологическая». – Донецк, ДонГТУ, 2002. – Вып. 45. – С. 54 – 59. 3. Устройство для ликвидации прихватов бурового снаряда : Декларационный патент №63101 UA E21B 31/113 / А.А. Каракозов, О.И. Калиниченко. – Оpubл. 15.01.2004, Бюл. №1. 4. Устройство для ликвидации прихватов бурового снаряда : Патент на изобретение №96491 UA E21B 31/113 / А.А. Каракозов, С.Н. Парфенюк, А.Н. Рязанов, И.Д. Сагайдак, Д.А. Дерягина. – Оpubл. 10.11.2011, Бюл. №21. 5. Каракозов, А. А. Математическое описание рабочего цикла гидравлических ударных механизмов для ликвидации прихватов / А.А. Каракозов, А.Н. Рязанов, О.И. Калиниченко // Сб. Труды ДонГТУ. Серия «Горно-геологическая». – Донецк, ДонГТУ, 2000. – Вып. 11 – С. 29-37. 6. Александров, Е. В. Прикладная теория и расчет ударных систем / Е. В. Александров, В. Б. Соколинский. – М.: Наука, 1969. – 199 с. 7. Калиниченко, О. И. Гидроударные буровые снаряды и установки для бурения скважин на шельфе / О. И. Калиниченко, П. В. Зыбинский, А. А. Каракозов. – Донецк: «Вебер» (Донецкое отделение), 2007. – 270 с. 8. Фокс. Д. Гидравлический анализ неустановившегося течения жидкости в трубопроводах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 247 с. 9. Каракозов, А. А. Разработка гидравлического ударного механизма для ликвидации прихватов бурового снаряда в геологоразведочных скважинах с низким уровнем промывочной жидкости / А.А. Каракозов, С.Н. Парфенюк, А.Н. Рязанов, А.В. Паршков // Современные тенденции геологоразведочной и нефтяной инженерии: Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции (16 апреля 2021 г.). Каспийский общественный университет, г. Алматы, 2021 г. – 2021. – С. 3–9.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ДЕКОЛЬМАТАЦИИ ФИЛЬТРОВ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Каракозов А.А., Украинцев А.А.

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР)

E-mail: [karakozov@donntu.ru](mailto:karakozov@donntu.ru)

**Abstract:** *The results of the development and improvement of technical means to influence filters of hydrogeological wells, which are made on the basis of dual-acting hydraulic hammers. On the base of double-acting hydraulic hammer, two devices were proposed to oversee productive reservoirs.*

**Keywords:** *Hydrogeological well, filter, hydraulic hammer.*

Ряд футурологов уже сейчас прогнозирует жестокую конкурентную борьбу за обладание источниками питьевой воды – поэтому ценность подземных вод с каждым годом неуклонно возрастает в связи с недостатком поверхностных источников. В то же время сооружение и эксплуатация скважин на воду сопряжены с рядом проблем, в т.ч. со снижением производительности скважин при эксплуатации вследствие кольматации фильтровой части. Из-за этого дебит скважин резко снижается и преждевременно прекращается их работа.

Продуктивность скважин восстанавливается за счёт обработки призабойной зоны пластов гидродинамическими методами [1, 2]. Эта задача может быть решена за счёт использования технических средств, выполненных на основе гидроударников двойного действия, разработанных для бурения тех же гидрогеологических скважин.

В ДонНТУ спроектированы и успешно апробированы гидроударники диаметром 108 мм, предназначенные для интенсификации шарошечного бурения скважин на воду [3], которые могут быть использованы в качестве привода устройств для декольматации фильтровой части гидрогеологических скважин.

Техническая характеристика разработанного гидроударника приведена в табл. 1.

Таблица 1. Техническая характеристика гидроударника для бурения скважин

№ п/п	Параметр	Значение
1	Диаметр корпуса гидроударника, мм	108
2	Длина гидроударника, мм	2175
3	Подача жидкости для привода гидроударника, л/мин	240 – 270
4	Перепад давления в гидроударнике, МПа	2,5 – 3,0
5	Масса гидроударника, кг	106
6	Энергия удара, Дж	80 – 120
7	Диаметр бурения, мм	112 – 132

На базе этого гидроударника двойного действия было предложено два устройства диаметром 127 мм для разглинизации продуктивных пластов, первое из которых включает в себя гидроударник и присоединяемый к нему вибрационный узел (рис. 1).

В состав гидроударника входит переходник 1 с впускным 2 и выпускным 3 каналами. Переходник 1 соединен корпусом 4 с верхней 5 и нижней 6 наковальнями, а кожухом 7 – с нижней наковальней. Переходник 1 соединен с клапанной коробкой 8 с цилиндром 9. В клапанной коробке 8 размещен впускной клапан 10, а внутри цилиндра 9 – поршень 11 с выпускным клапаном 12 и пружиной 13. Клапаны 10 и 12 соединены толкателем 14. Поршень 11 соединён с бойком 15, в нижней части которого выполнен шток 16. Радиальный канал 17 в нижней наковальне 6 соединен с зазором между корпусом 4 и кожухом 7. В состав вибрационного узла входит соединенный со штоком 16 патрубок 18 с каналом 19 и отверстием 20. К патрубку 18 присоединены дисковые мембраны 21, между которыми выполнены отверстия 22.

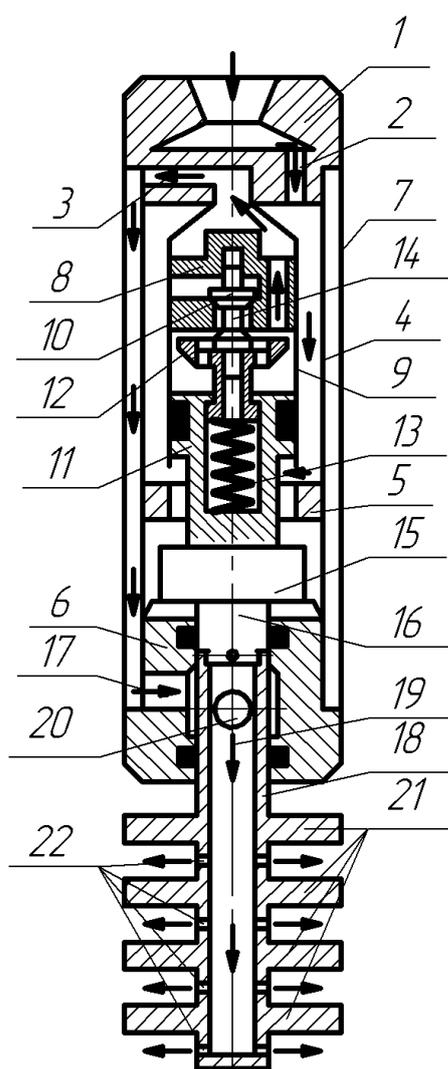


Рис. 1. Схема устройства для разглинизации пластов

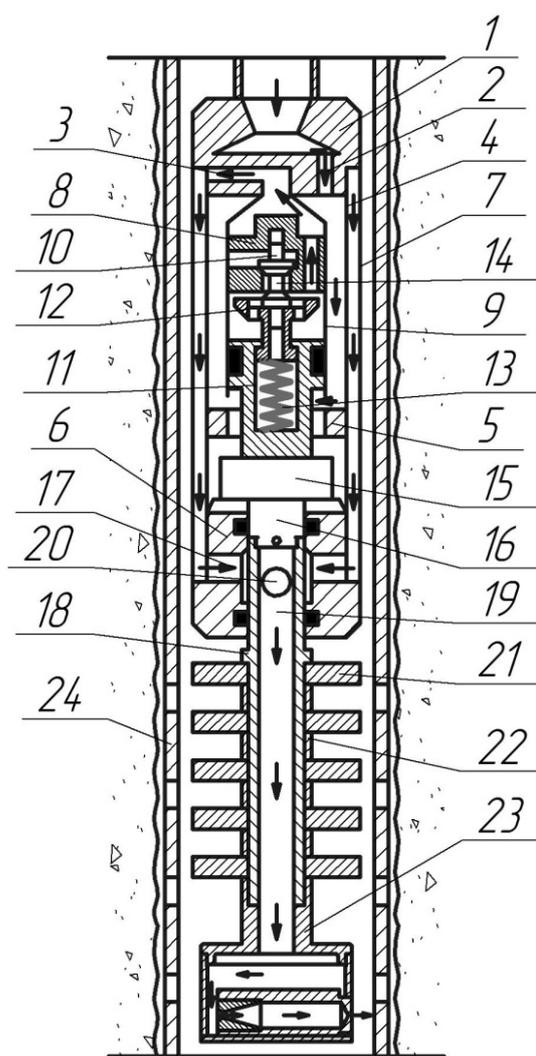


Рис. 2. Схема устройства для разглинизации пластов с дополнительным кавитационным генератором

Устройство спускается в скважину на бурильных трубах, по которым жидкость подается в гидроударник. Под действием давления поршень 11 совершает возвратно-поступательное движение, нанося бойком 15 удары по наковальням. Отработанная в гидроударнике жидкость через каналы 17 и 19, отверстия 20 и 22 выходит в

скважину. Поскольку вибрационный узел соединен со штоком 16, то он перемещается в скважине, генерируя волны давления в жидкости, которые воздействуют на стенки скважины (фильтра), очищая их от различных отложений. Жидкость, выходящая из отверстий 22, также способствует их лучшему очищению. Ударные импульсы, передающиеся на дисковые мембраны 21, способствуют повышению частоты волн давления, что также положительно влияет на процесс разглинизации продуктивных пластов.

Это устройство может дополнительно оснащаться гидродинамическим излучателем импульсов (кавитационным генератором) 23, выполненным, например, в виде трубки Вентури (рис. 2), через которую в зону фильтра 24 проходит жидкость, отработанная в гидроударнике. При этом отверстия в патрубке 18 отсутствуют или перекрываются кольцами 22.

Значения частот импульсов, генерируемых излучателем, в зависимости от подачи жидкости в гидроударник, находятся в пределах 1,9-2,7 кГц (табл. 2).

Таблица 2. Значения частот импульсов, генерируемых излучателем

Расход жидкости, л/мин	Частота импульсов, $\text{с}^{-1} \cdot 10^3$	Расход жидкости, л/мин	Частота импульсов, $\text{с}^{-1} \cdot 10^3$
210	1,89	270	2,43
240	2,16	300	2,7

Разработанные конструкции устройств могут быть адаптированы для гидрогеологических скважин различных диаметров. В настоящее время ведутся исследования, направленные на повышение эффективности данных устройств за счёт применения более рациональных конструкций кавитационных генераторов и обеспечения возможности генерации импульсов более высокого давления и частоты.

**Список литературы:** 1. Ратов, Б.Т. Гидровибрационное освоение флюидосодержащих пластов при строительстве скважин. – Алматы: КазНТУ, 2015. – 124 с. 2. Ивашечкин, В.В. Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения / В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович. – Минск: БНТУ, 2008. – 277 с. 3. Каракозов, А. А. Разработка гидроударников двойного действия с дифференциальным поршнем для бурения скважин различного целевого назначения / А. А. Каракозов, С. Н. Парфенюк // Известия ТулГУ. Серия «Науки о Земле». Вып. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – С. 65-78.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ПГ-12Н-01

Кардаполова М.А., Девойно О.Г., Погудо Е.В., Косякова И.М.

(БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)

Тел./Факс: +375 (17) 3310045; E-mail: scvdmed@bntu.by

**Abstract:** *The wear resistance of coatings under conditions of boundary friction with lubrication of nickel self-fluxing alloys and compositions based on them, deposited by the plasma method and additionally melted both by the gas-flame method and by laser radiation, is investigated in the article. It has been established, that coatings melted by laser radiation have a 2-3 times higher wear resistance compared to coatings of the same composition melted by a gas burner, and the introduction of alloying additives leads to an additional 2-4-fold increase in wear resistance. This is due, depending on the type of additives, to an increase in the amount of the hardening phase, the degree of alloying of the nickel matrix, as well as the presence of a finely dispersed carbide-boride component.*

**Key words:** *wear resistance, plasma spraying, laser reflow, tribological properties, hardening.*

Самофлюсующиеся сплавы на основе никеля ПГ-12Н-01 были созданы в первую очередь из потребностей восстановления пар трения. И одним из критериев качества при разработке таких материалов являлась высокая износостойкость [1, 2]. Поэтому и при появлении таких сплавов большое внимание уделялось оценке их триботехнических характеристик. Варьирование условиями и режимами оплавления покрытий и составом легирующих компонентов приводит к сильному изменению структуры и свойств покрытий. Получение же покрытий с прогнозируемым комплексом эксплуатационных свойств, требует уяснения связи особенностей структурных характеристик покрытий с их эксплуатационными свойствами и механизма процесса изнашивания.

Процесс изнашивания деталей машин определяется большим количеством факторов. Так как целью работы является управление структурой и физико-механическими свойствами восстановленных поверхностей путем дополнительного легирования и варьированием условиями оплавления, то основной группой факторов, представляющей интерес, являются параметры качества поверхности, к которым можно отнести физико-механические свойства поверхностного слоя и характеристики микрогеометрии. Влияние этих факторов на износостойкость с достаточной степенью достоверности может быть изучено в результате лабораторных испытаний.

**Методика исследования.** На поверхность стали 45 наносили следующие составы порошков толщиной 0,6...0,7 мм: сплав на основе никеля ПГ-12Н-01 и 3 механические смеси, состоящие из 80% сплава ПГ-12Н-01 и 20% WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, В<sub>4</sub>C, используя установку плазменного напыления УПУ-3Д с плазмотроном ПП-25. Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой, а также для уменьшения пористости покрытия, после нанесения вышеуказанных механических смесей образцы подвергали оплавлению газовым резаком с внутриголовочным смешением газов Р1-03П и лазерному оплавлению на установке КОМЕТА-2 с мощностью 1000Вт. После плазменного напыления проводилась лазерная обработка их поверхности. Скорость перемещения луча от 0,5 до 3,3 мм/с, диаметр луча 1...3 мм.

При выборе среды для исследований учитывалось, что большая часть деталей работает в условиях граничного трения в присутствии абразива. Поэтому в качестве среды при проведении сравнительных лабораторных испытаний использовалось масло Индустриальное 20 с небольшими добавками абразива. Для оценки структурных превращений, происходящих в процессе трения в поверхностных слоях, проводились металлографические и рентгеновские исследования. Рентгеновские съемки производили

на дифрактометре ДРОН -3,0 при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении. Обработку рентгеновских снимков проводили с использованием программы ARSANAL, разработанной в БНТУ.

Состояние поверхностей трения изучалось электроннографически на растровом электронном микроскопе РЭМ-200п «Geols». Лабораторные испытания проводили на машине трения СМТ-1. Исследования на установке СМТ-1 проводились по схеме «диск-колодка». В качестве образцов использовались диски диаметром 50 мм (рисунок 1). Измерение величины износа проводилось методом искусственных баз. В качестве искусственной базы использовалась канавка глубиной 0,1 мм, проточенная в покрытии. Величина износа определялась по изменению глубины канавки с помощью профилографа-профилометра модели 252.

**Результаты исследования.** Полученные результаты сравнительной износостойкости покрытий с различными способами оплавления и составами покрытий представлены в таблице 1.

Сравнение величин износа, приведенных в таблице, показывает, что введение в

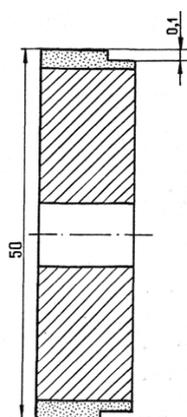


Рис. 1. Образец для исследования износостойкости на машине трения СМТ-1

самофлюсующийся сплав композиционных добавок тугоплавких карбидов приводит к значительному повышению износостойкости покрытий как после лазерного оплавления, так и оплавления газопламенной горелкой. При этом износостойкость покрытий после лазерного оплавления выше износостойкости покрытий, оплавленных газопламенной горелкой. При введении карбидных добавок в случае лазерного оплавления наименьшая величина износа получена для сплава с добавками карбида хрома, а при оплавлении газовой горелкой - карбида бора. Это может быть объяснено тем, что при лазерном нагреве происходит перегрев покрытия, ведущий к разложению некоторых структурных составляющих.

Сравнение различных способов оплавления показывает, что более высокой износостойкостью обладают покрытия, подвергнутые оплавлению лучом лазера. Это связано с тем, что при лазерном оплавлении, характеризующимся высокими скоростями нагрева и охлаждения, имеет место значительное измельчение структуры. Характерным для покрытий, получаемых при лазерном переплаве, является также повышение степени легированности твердого раствора, обуславливающее возрастание концентрации дефектов (дислокаций), создание вокруг них полей упругих напряжений, что сопровождается искажением кристаллической решетки и, соответственно, упрочнением. Результаты исследований показывают, что процесс изнашивания покрытия включает в себя усталостное изнашивание более мягкой составляющей - никелевой фазы, обнажение более твердых составляющих карбидно-боридной фазы и их последующее выкрашивание.

Электроннографическое строение поверхностей после проведения испытаний на изнашивание показало, что наибольшая повреждаемость поверхности имеет место при трении сплавов без добавок. Наблюдается относительно интенсивное изнашивание поверхности материала с образованием царапин и характерным пластическим деформированием, происходит постепенное выработывание никелевой матрицы с последующим выкрашиванием карбидно-боридной фазы. В оплавленных лазерным излучением покрытиях никелевая матрица находится в неравновесных условиях с более высокой степенью пересыщения, а карбидная фаза измельчена по сравнению с газопламенным оплавлением. Поэтому в процессе изнашивания начинают усиливаться процессы упругого оттеснения материала.

Таблица 1. Результаты испытаний износостойкости упрочненных поверхностей

Состав покрытия	Способ оплавления	Величина износа, мкм	Относительная износостойкость
ПГ-12Н-01	оплавление газопламенным методом	25	1
Смесь ПГ-12Н-01 +20% В <sub>4</sub> С		8,1	3,08
Смесь ПГ-12Н-01 +20% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>		9,1	2,76
Смесь ПГ-12Н-01 +20% WС		11,6	2,15
ПГ-12Н-01	оплавление излучением лазера	15,8	1,58
Смесь ПГ-12Н-01 +20% В <sub>4</sub> С		6,7	3,73
Смесь ПГ-12Н-01 +20% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>		4,1	6,09
Смесь ПГ-12Н-01 +20% WС		8,3	3,01

Результаты определения фазового состава и составов фаз покрытий при плазменном напылении на сталь 45 с последующим оплавлением лазерным излучением приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты рентгеновских исследований сплава ПГ-12Н-01 с композиционными добавками

	Фазы в покрытии	Содержание в %	Вероятная примесь	Концентрация примеси или состав фазы
Сплав ПГ-12Н-01.	Ni	56	Fe	7.5% ат. Fe
	Ni <sub>2</sub> B	8	Дефицит В	Ni <sub>2</sub> B <sub>0,9995</sub>
	Ni <sub>3</sub> B	25	Cr	(Ni <sub>85</sub> Cr <sub>15</sub> ) <sub>3</sub> B
	Cr <sub>2</sub> B	11	Si	Cr <sub>2</sub> (B <sub>97</sub> Si <sub>3</sub> )
Смесь ПГ-12Н-01 +20% В <sub>4</sub> С	Ni	51	В	0,4% ат. В
	Ni <sub>3</sub> B	10	Cr	(Ni <sub>97</sub> Cr <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> B
	Cr <sub>2</sub> B	9	Si	Cr <sub>2</sub> (B <sub>99</sub> Si <sub>1</sub> )
	В	14	нет	бор
	В <sub>4</sub> С	16	Дефицит В	В <sub>4</sub> С <sub>0,9996</sub>
Смесь ПГ-12Н-01 +20% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Ni	46	Cr	5% ат. Cr
	Ni <sub>3</sub> B	30	Cr	(Ni <sub>97</sub> Cr <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> B
	Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub>	7	Fe	Ni <sub>4</sub> B <sub>2,9958</sub>
	Cr <sub>2</sub> B	16	С	(Cr <sub>86</sub> Fe <sub>14</sub> ) <sub>2</sub> B
	В	1	С	0,5% ат. С
Смесь ПГ-12Н-01 +20% WС	Ni	16	W	3% ат. W
	Ni <sub>3</sub> B	37	Дефицит В	Ni <sub>3</sub> B <sub>0,97</sub>
	Ni <sub>2</sub> B	8	нет	Ni <sub>2</sub> B
	NiB	6	нет	NiB
	Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub>	13.5	Дефицит В	Ni <sub>4</sub> B <sub>2,97</sub>
	W <sub>2</sub> С	16	В	W <sub>2</sub> (C <sub>91</sub> B <sub>6</sub> )
	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	3.5	Дефицит С	Cr <sub>3</sub> C <sub>1,96</sub>

Как уже указывалось выше, карбидные добавки в основном приводят к упрочнению матрицы с одновременным увеличением количества упрочняющей фазы, что приводит и к изменению характера изношенной поверхности. Так, при трении сплавов с добавками карбида вольфрама и карбида бора следы царапания практически отсутствуют. На поверхности трения преобладает упругое оттеснение материала. Исключение составляет покрытие с добавками карбида хрома. Это может быть причиной того, что такие добавки не приводят к упрочнению твердого раствора за счет его легирования, так как хром является сильно карбидообразующим элементом и нахождение его в твердом растворе имеет низкую термодинамическую вероятность. Матрица в этом случае остается более пластичной и внедрение неровностей контртела при трении приводит к образованию царапин. Однако немалую роль играют и окислительные процессы. Вторичные окисные пленки, возникающие в результате мгновенных температурных всплесков при контактировании микронеровностей и воздействии с окружающей средой, образуют пассивную пленку на поверхностях трения. Прочность и фрикционные свойства таких пленок во многом определяют характер протекания износа. Различные добавки оказывают значительное влияние на этот процесс. Отсутствие узлов схватывания на поверхности трения покрытия с добавками карбида бора свидетельствует о высоких фрикционных свойствах такой поверхности, что в немалой степени связано и с высокой смазывающей способностью пленок, обогащенных бором.

Значительно изменяется характер изношенной поверхности и при различных способах оплавления покрытия. На покрытиях, оплавленных лазерным лучом, повреждения царапанием практически отсутствуют, тогда как поверхности, оплавленные горелкой, имеют отчетливые следы царапания. Это может быть объяснено более высокой равномерностью распределения упрочняющей фазы по никелевой матрице, значительным ее упрочнением за счет легирования твердого раствора, значительным измельчением структуры, что является следствием высоких скоростей кристаллизации.

На поверхностях трения сплава с добавками карбидов, оплавленных лазерным лучом, видны отдельные крупные карбидные включения, которые представляют собой нерастворившиеся в процессе скоростного охлаждения первичные карбиды.

В остальном сплаве карбиды образуются в результате фазовой перекристаллизации из жидкого состояния. В отдельных местах наблюдается выкрашивание крупных частиц, что может быть связано с охрупчиванием зон, окружающих карбид. Однако в целом анализ поверхностей износа свидетельствует, что оплавление лазерным лучом обеспечивает более нормальное протекание износа, чем в случае оплавления газовой горелкой.

Структурные исследования показали, что в процессе трения сплава без карбидных добавок не происходит заметных фазовых повреждений в приповерхностных слоях покрытия. Как при случае лазерного, так и газопламенного оплавления при трении практически не изменяются параметры решетки никеля и размер кристаллитов. Это указывает на то, что преобладающими в этом случае являются процессы выщарапывания продуктами износа мягкой матрицы, представляющей собой легированный  $\gamma$ -твердый раствор никеля. При этом степень пластического передеформирования невелика. В композиционном материале с добавками карбида бора исходная структура после лазерного и газопламенного оплавления различна. На рентгенограммах покрытий такого состава после лазерного оплавления заметно снижение интенсивности линий  $Ni_3B$  и появление линий фазы  $B_4C$ . Это означает, что в условиях скоростного лазерного переплава частицы карбида бора не успевают полностью раствориться в расплаве. При лазерном оплавлении имеет место значительное искажение параметров решетки  $Ni$ , что связано с легированностью твердого раствора бором (до 0,4 ат.%), образующего раствор внедрения. При газопламенном оплавлении фаза  $B_4C$  отсутствует полностью, что связано с длительным нахождением карбида в расплаве. В процессе перекристаллизации дополнительное количество бора и углерода расходуется на образование более устойчивых соединений, таких как  $Ni_3B$ ,  $Cr_2B$  и, предположительно,  $Cr_7O_3$ . Параметры решетки никеля у оплавленного газовой горелкой покрытия практически не изменяются и примерно соответствуют параметрам решетки чистого никеля. В процессе изнашивания происходит уменьшение размеров кристаллитов от 13,8 нм до 10,0 нм у оплавленного лазерным излучением слоя

и от 51,1 нм до 27,6 нм в случае газопламенного оплавления. У оплавленных лазерным излучением образцов наблюдается некоторое снижение степени искажения решетки.

Полученные данные свидетельствуют о том, что износ покрытий с добавками карбида бора сопровождается пластическим передеформированием с выщарапыванием никелевой матрицы в случае газопламенного оплавления. При лазерном оплавлении происходит упрочнение никелевой матрицы, что приводит к уменьшению явлений царапания и степени пластического передеформирования. Повышению износостойкости способствует также интенсификация процесса образования вторичных структур на основе окислов бора, служащих твердой смазкой, что связано с увеличением количества бора в никелевой матрице и твердых боридных составляющих. Структурные исследования покрытий с добавками карбида хрома показали наличие линий этой фазы высокой интенсивности в образцах, оплавленных газопламенной горелкой. В слоях, оплавленных лазерным излучением, наблюдается значительное снижение интенсивности этих линий вплоть до полного их вырождения. Интересным является тот факт, что растворение карбида хрома не приводит к значительному увеличению легированности никелевой матрицы. Согласно проведенным расчетам в никелевой матрице растворяется при лазерном оплавлении только 5 ат. % хрома. Вследствие этого никелевая матрица сохраняет высокую пластичность. Растворившийся карбид хрома легирует борид никеля, образуя соединение следующего стехиометрического состава  $(\text{Ni}_{97}\text{Cr}_3)_3$  и дополнительное количество боридов хрома  $\text{Cr}_2\text{B}$ , легированных железом. То есть в этом случае происходит рост количества упрочняющей фазы, а также ее упрочнение за счет образования легированных боридов  $\text{Ni}_3\text{B}$ , входящих в состав легкоплавкой эвтектики. Такое строение сплава обуславливает и специфический для данного состава характер износа. Мягкая матрица подвергается многократному пластическому передеформированию с образованием царапин продуктами износа. О сильном передеформировании мягкой матрицы свидетельствует значительное измельчение размеров кристаллитов - с 55,5 нм до 22,3 нм в случае газопламенного оплавления, с 35,2 нм до 22,1 нм - при лазерном оплавлении. Значительное повышение износостойкости обусловлено увеличением количества упрочняющей фазы, частицы которой тормозят развитие усталостных процессов в никелевой матрице. Кроме того, все твердые составляющие такого композиционного покрытия имеют полную смачиваемость расплавом никеля, что обуславливает максимальное их сцепление с никелевой матрицей и стойкость к выкрашиванию.

При введении легирующих добавок карбида вольфрама в структуре происходит сильное упрочнение матрицы за счет частичного растворения в никеле вольфрама (до 7 ат. %). В процессе изнашивания покрытия такого состава на поверхности не наблюдалось задиоров и царапин. При этом не было зафиксировано измельчения кристаллитов, а также сколько-нибудь значительного изменения параметров решетки, что свидетельствует о локализации процессов пластического поверхностного деформирования в тончайших, рентгеновски нечувствительных слоях. По-видимому, основным механизмом изнашивания в этом случае является усталостное выкрашивание твердой фазы.

**Вывод.** Таким образом, проведенные исследования изнашивания покрытий из никелевых самофлюсующихся сплавов и композиций на их основе показали следующее. На интенсивность и характер протекания процесса изнашивания оказывают влияние как характер структуры, определяемый способом оплавления покрытия, так и вид композиционной добавки. Лазерное оплавление приводит к повышению износостойкости за счет измельчения структурных составляющих, пересыщения матрицы легирующими элементами, ее текстурирования. Добавки карбида вольфрама и карбида бора обеспечивают сильное упрочнение никелевой матрицы, что уменьшает процессы ее деформирования и царапания. При трении покрытий с добавками карбида хрома упрочнение происходит за счет увеличения количества упрочняющей фазы при сохранении пластичности матрицы, что обуславливает специфический характер износа покрытия.

**Список литературы:** 1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. 2. Борисов, Ю.С. Получение и структура газотермических покрытий на основе Ni-Cr-B-Si – сплавов/ Ю.С. Борисов, И.Н. Горбатов, В.Р. Калиновский и др.// Порошковая металлургия – 1985 - № 9 - С. 22-26.

## ПУТЬ К МЕЧТЕ - СОЗДАНИЕ ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА С НУЛЯ И ОСВОЕНИЕ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС С КРУГОВЫМИ ЗУБЬЯМИ ЗУБОРЕЗНЫМИ ГОЛОВКАМИ НА ФРЕЗЕРНОМ СТАНКЕ С ЧПУ

**Картафенков Д. В.**

Первое знакомство с изготовлением шестерен произошло у меня около 20 лет назад. Будучи школьником, я бывал у отца на работе в ремонтно-механическом цехе, смотрел станки, и даже тогда, лучше всего запомнил именно зубообрабатывающий участок.

После школы я поступил в МГТУ им. Баумана на машиностроительный факультет по специальности «Технология сварочного производства». Сейчас я немного жалею, что не выбрал специальность «Обработка металлов резанием». Но в далеком 2003 году не представлял, что именно металлообработка, а в частности зубообработка станет путем моей жизни.

На старших курсах университета я стал **работать в механическом цехе** помощником мастера смены. Именно там получил свои первые практические знания, начал применять университетскую базу и немного работать на станках.

В этом цехе шестерни делали на фрезерных станках в делительной головке. Там я в первый раз увидел и подержал в руках конические шестерни с круговыми зубьями. Это был далекий 2008 год. А в 2017 году сам сделал первую пару.

**В 2013 году я со своим близким другом и напарником Евгением Нарыковым начал заниматься металлообработкой.** Около года у нас ушло на то, чтобы понять, что именно производство зубчатых колес для нас является самым интересным и приоритетным направлением в работе. Появилось желание сделать мощный зубообрабатывающий цех с большим количеством разнообразных зубообрабатывающих станков позволяющих выполнять сложные и точные работы. Начали мы все это дело с нескольких станков: токарного, фрезерного и зубофрезерного 5E32.

**Зуборезное дело в наше время - это очень ценный и труднодоступный пласт знаний.** Мне посчастливилось начать учиться у опытного зуборезчика-универсала Бобкова Ивана Григорьевича. Именно он дал мне все базовые знания не только в области работы на зубообрабатывающих станках, но и в теории расчетов зубчатых передач.

В 2015 году я нарезал первые шестерни на станке 5E32. Это была огромная радость. Я стал производителем зубчатых колес!!! Сделать самому детали было невероятно приятно.

Но затем в моей жизни произошел **несчастный случай.** При работе на зубофрезерном станке я потерял часть фаланг кисти правой руки. Меня поддержали родные и близкие. Сидя в сквере больничного парка, мы с Евгением решили не сдаваться. Решили работать еще сильнее и идти дальше. Травма начала заживать, и я вернулся в цех.

**С лета 2016 года началось сильное развитие и расширение зубообрабатывающего участка.** К нам пришел работать еще один человек. Мы начали обучать его зуборезному делу. Он схватывал все быстро и через день уже начал резать звездочки.

Мы начали расширять зубообрабатывающий парк: запустили в работу зубофрезерный станок 5K32, зубодолбежный 514, станок 525 для нарезания конических шестерен с круговыми зубьями и контрольно-обкатной станок 5A725. В 2016 году мы начали делать колеса с внутренним зацеплением и блок-шестерни, запустили зубострогальный станок 5A250П. Начали делать конические прямозубые шестерни. Запустили зубошлифовальный станок для цилиндрических колес 5831.

2016 год знаменателен для меня **знакомством с Лагутиным Сергеем Абрамовичем.** Он взял меня под опеку и обучает до сих пор. Сначала простым вещам, затем

более сложным. Тогда, в 2016 году, апогеем зубообработки я считал момент, когда сам нарежу первое колесо с круговыми зубьями. На самом деле это было не за горами.

Когда мы начали активно производить шестерни, стало понятно, что нужен еще и **инструмент**. Желательно побольше, и желательнее новый. Практически весь доступный на данный момент инструмент выпущен до 1990 года при СССР. Иногда фрезы и прочее продаются недорого. Такие варианты старались не упускать и запасали инструмент впрок. Так же я узнал, что на одной из местных металлоприеомок огромное количество червячных фрез и прочего инструмента сдают и отправляют за границу на переплавку. Там по две цены металлолома мы приобрели очень многое. В том числе и резцы для зуборезных головок, зубострогальные резцы и долбяки. Инструмент часто бывает новый, в консерванте. Больно смотреть, как все это уезжает за границу на переплавку. Но поделаться с этим ничего нельзя.

Сейчас производим ремонт и запускаем станок для заточки червячных фрез 3662. Инструмент со временем тупится и требует своевременной заточки. Этим вопросом мы занимаемся сегодня. В планах приобретение станка для заточки зуборезных головок.

**Программа «Эксперт».** До 2018 года карты наладок для нарезания коничек с круговыми зубьями я делал совместно с Сергеем Абрамовичем у него в конструкторском бюро ЭЗТМ. Делали мы их в ПК «Эксперт», разработанном в Московском станкоинструментальном институте СТАНКИН А.Э. Волковым и В.И. Медведевым. Такую программу мне необходимо было иметь у себя на работе для проведения оперативных расчетов и запуска в производство деталей. Сергей Абрамович познакомил меня с профессором Андреем Эриковичем Волковым, и я дважды ездил в СТАНКИН, где получил дополнительные знания и навыки работы с ПК «Эксперт». Наступило время самостоятельной работы в программе. В том же году мы продолжили расширять зубообрабатывающий участок и переехали в новый цех.

**Люди ценнее железа.** Сейчас это как никогда актуально. На остатках станкостроительной империи СССР мы еще можем найти неплохие, а иногда почти не эксплуатировавшиеся зубообрабатывающие станки. А вот со специалистами, которые могут на них работать, сейчас гораздо сложнее. Готового зуборезчика найти практически невозможно. Их очень мало. Поэтому мы обучаем своих людей самостоятельно. Они проходят практическую и теоретическую подготовку. Сами делают расчеты простых цилиндрических, конических и червячных передач. 2019 год. У нас уже три зуборезчика. Всех их мы обучили.

Есть в сфере зубообработки еще более острый вопрос. **Вопрос теории и практики высшего уровня.** Гитару деления худо-бедно кто-нибудь да подскажет, как настроить. А вот сделать расчет геометрических параметров гипоидной передачи или рассчитать глобоидную модифицированную передачу - это гораздо сложнее. Есть безусловно соответствующая литература. Но когда делаешь расчет по ней, появляются вопросы. И иногда без помощи старшего наставника можно зайти в тупик. Я счастлив как специалист и как человек, что на моем пути встретились Сергей Абрамович Лагутин, Иван Григорьевич Бобков, Андрей Эрикович Волков, Сергей Константинович Белосов, Владимир Ильич Прилепский. Эти люди вложили в мою голову большой пласт знаний и умений. С некоторыми я общался не так много. Но это общение позволило мне сдвинуться с тупиковой точки. Нужен был всего один маленький совет опытного человека. Это общение сейчас ценнее золота. И эти люди готовы делиться своим опытом с теми, кто этого хочет.

Иногда от нехватки знаний и опыта происходят некоторые **«недоразумения»**. Мы приобрели два зубострогальных станка 5Т23В для производства мелко модульных конических прямозубых колес. Данные станки работают обоими резцами в одну впади-

ну. Резцы формируют впадину, а не зуб, как например на 5A250П. Станки мы запустили, наладили и уже сделали несколько конических шестерен. А потом выяснилась интересная особенность. Резцы данного типа в продаже просто не найти. То есть станки есть, а инструмента к ним нет. По ГОСТу резцы типа 1 делятся на три подвида. И к этим станкам идет самый редкий вид. Искал везде, даже на Украине. Резцов нет. Станки пришлось сдать в металлолом. Пытались продать их около года. По цене в полтора раза дороже лома. Никто не купил.

Но **нужно двигаться дальше**. В 2020 году мы взяли на обучение еще двух зуборезчиков. Запустили зубозакругляющий и резьбошлифовальный станки. Проволочную эрозию. Сейчас налаживаем зубошлифовку, работающую абразивным червячным кругом. Приобрели три крупногабаритных зубошлифовальных станка. Начали нарезать червячные колеса летучими резцами. Начали теоретическое освоение нарезания глобоидных червячных пар. Нарезали первые гипоидные шестерни. Приобрели второй станок для нарезания конических шестерен с круговыми зубьями и в пару к нему станок для шлифовки круговых зубьев конических передач. Запустили фрезерный станок с ЧПУ, на котором планируется производить спец шестерни, таких как шестерни с закрытым шевроном. И многое многое другое.

**Обработка конических колес с круговыми зубьями зуборезными головками на фрезерных станках с ЧПУ.** Такая обработка на наш взгляд является очень интересным и перспективным направлением. Суть задачи состоит в том, чтобы в рабочем поле фрезерного станка с ЧПУ с четвертой осью в виде наклонно поворотного стола смоделировать рабочее поле зуборезного станка (таких как 525, 528, 5С280П и др.). Рабочие движения фрезера с ЧПУ позволяют повторить все движения зуборезного станка но «зеркально». А именно роль качания люльки будет выполнять сам стол, двигаясь по заданным дугам перемещаясь по координатам X и Y. А ось Z с резцовой головкой на торце шпинделя будет вращать саму головку, и перемещаться при наборе глубины на врезание. Сама заготовка будет закреплена на наклонном поворотном столе, повернутом на угол внутреннего конуса обрабатываемого колеса. Заготовка будет вращаться синхронно с передвижениями стола по дуге (одновременное движение по осям X и Y), обеспечивая обкат.

Все расчетные параметры и монтажные размеры в поле фрезерного станка с ЧПУ целесообразно брать из программ по расчету карт наладок для зуборезных станков, таких как ПК Эксперт, Волга, Зуборез.

Современный фрезерный станок ЧПУ может дать нам существенные преимущества в скорости обработки. Шпиндель фрезерного станка может вращаться с существенно более высоким числом оборотов, чем обычный зуборезный станок. Но это влечет за собой применение инструмента со сменными твердосплавными пластинами. Данный инструмент можно изготовить собственными силами, применив стандартные пластины.

Поле для работы в этом направлении очень большое. Сделать предстоит очень многое. Но я не сомневаюсь, что результат будет достигнут. И возможно найдет свое применение не только у нас на производстве.

**Подытожить** все это я могу тем, что зубообработка это огромное поле для профессионального роста и поддержания машиностроения в нашей стране. Нужно развиваться дальше, запускать оборудование, осваивать новые технологии и виды обработки. Учиться, учиться и еще раз учиться.

**Список литературы:** 1. Волков А.Э., Лагутин С.А., Медведев В.И. Особенности применения ПК ЭКСПЕРТ в производстве конических зубчатых передач для тяжелого машиностроения // В сб. «Теория и практика зубчатых передач», Ижевск, 2004, с. 278-282. 2. Сандлер А.И., Лагутин С.А., Гудов Е.А., Теория и практика производства червячных передач общего вида. Москва-Вологда: Изд-во «Инфра-Инженерия», 2016, 346 с. 3. Штадтфельд Г. Дж. Практическое проектирование зубчатых передач (полный перевод на русский язык Прилепского В.И.), 2020, 392 с.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ДВУХЧАСТОТНОГО МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Киреев А.Н., Киреева М.А. (ЛГУ им. В.Даля, г. Луганск, ЛНР)  
Тел. +38 (072) 1367002; E-mail: [lifter\\_23@mail.ru](mailto:lifter_23@mail.ru)

**Abstract:** *The paper presents a program «NDTRT 2f method» for automating calculations when using a two-frequency method of ultrasonic flaw detection to determine the type of defect when diagnosing machine parts. The two-frequency method of ultrasonic flaw detection makes it possible to determine the type of both point and extended defect. The program allows you to determine the type of defect in machine parts from the measured data.*

**Keywords:** *Technical diagnostics, non-destructive testing, ultrasonic testing, ultrasonic flaw detection, defect.*

Для обеспечения качества, надежной и безопасной эксплуатации, а также продления ресурса, детали машин подвергаются комплексу мероприятий технического диагностирования, как при изготовлении, так и в эксплуатации, при проведении технического обслуживания и ремонта.

Наличие дефектов в отдельных деталях машин может привести к уменьшению их долговечности, неисправности и отказу как самой детали, так машины в целом, что может сказаться не только на экономических показателях ее работы, но и привести к аварийной ситуации.

В комплекс мероприятий технического диагностирования входят операции ультразвукового контроля [1, 2] деталей машин на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей.

Для прогнозирования технического состояния детали необходимо не только знать допустимая несплошность или нет, но и определить ее форму. В работах [3 – 7] предложен двухчастотный метод ультразвуковой дефектометрии определения формы обнаруженной в процессе ультразвукового контроля детали несплошности.

Сущность двухчастотного метода ультразвуковой дефектометрии заключается в следующем:

1) В случае выявления в объекте контроля эхо-сигнала от несплошности в нем измеряются следующие параметры:

- амплитуды донных сигналов на частоте ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц;
- амплитуды эхо-сигналов от несплошности на частоте ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц;
- расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до донной поверхности;
- расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до несплошности.

2) По измеренным данным рассчитывается коэффициент формы несплошности [4].

3) По измеренным данным рассчитываются граничные значения для идеально плоскостной и идеально объемной несплошности [4].

4) Коэффициент формы несплошности сравнивается с граничными значениями.

5) Если коэффициент формы не более чем на 30 % отличается от соответствующего граничного значения, то несплошность считается соответственно либо плоскостной, либо объемной, в противном случае несплошность не является плоскостной, но и не является идеальной объемной.

Для автоматизации расчетов при применении двухчастотного метода ультразвуковой дефектометрии разработана программа «NDTRT 2f method».

Структурно программа «NDTRT 2f method» состоит из двух блоков:

Двухчастотный метод ТН – определение типа точечной несплошности двухчастотным методом дефектометрии;

Двухчастотный метод ПН – определение типа протяженной несплошности двухчастотным методом дефектометрии.

Алгоритм блока «Двухчастотный метод ТН» подпрограммы «NDTRT 2f method» представлен на рис. 1.

Алгоритм блока «Двухчастотный метод ПН» подпрограммы «NDTRT 2f method» представлен на рис. 2.

Идентификация аргументов в функциях программы «NDTRT 2f method» представлена в табл. 1.

Загрузочное окно программы «NDTRT 2f method» представлено на рис. 3.

Окна блоков «Двухчастотный метод ТН» и «Двухчастотный метод ПН» программы «NDTRT 2f method» представлены на рис. 4 и 5.

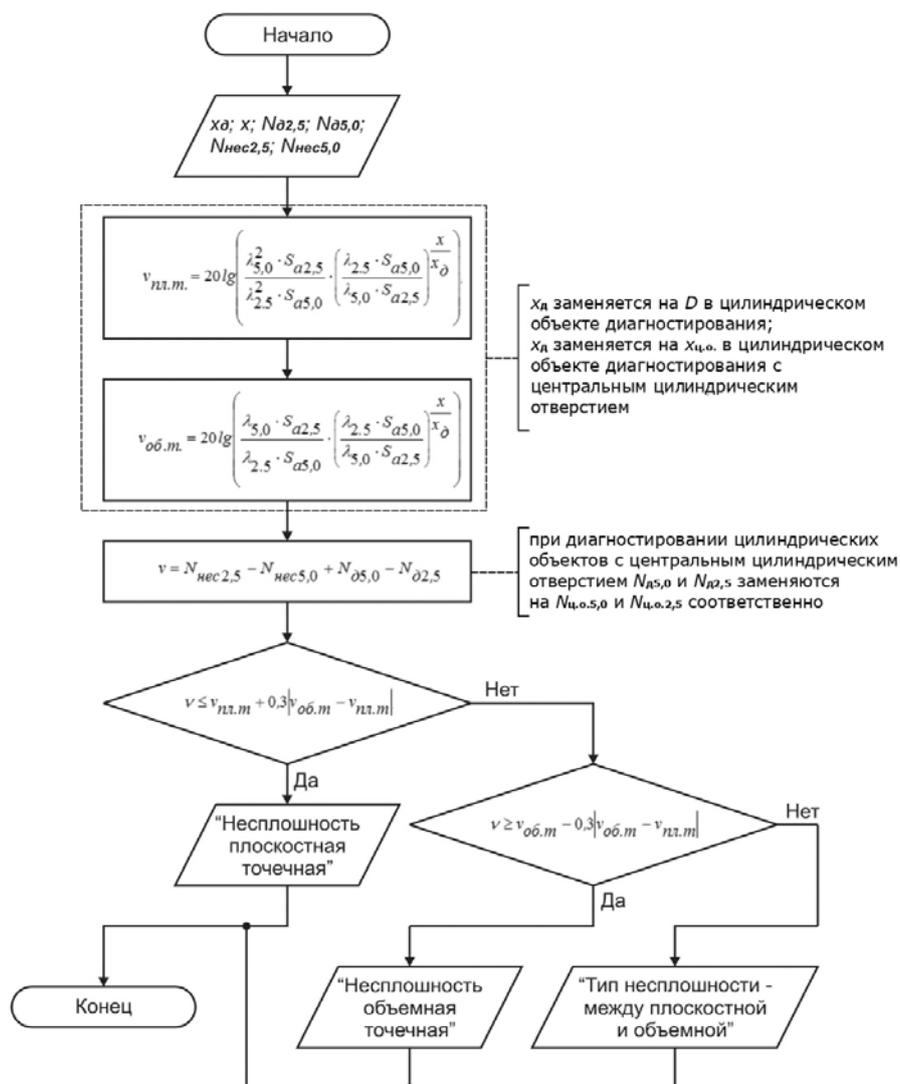


Рис. 1. Алгоритм блока «Двухчастотный метод ТН» программы «NDTRT 2f method»

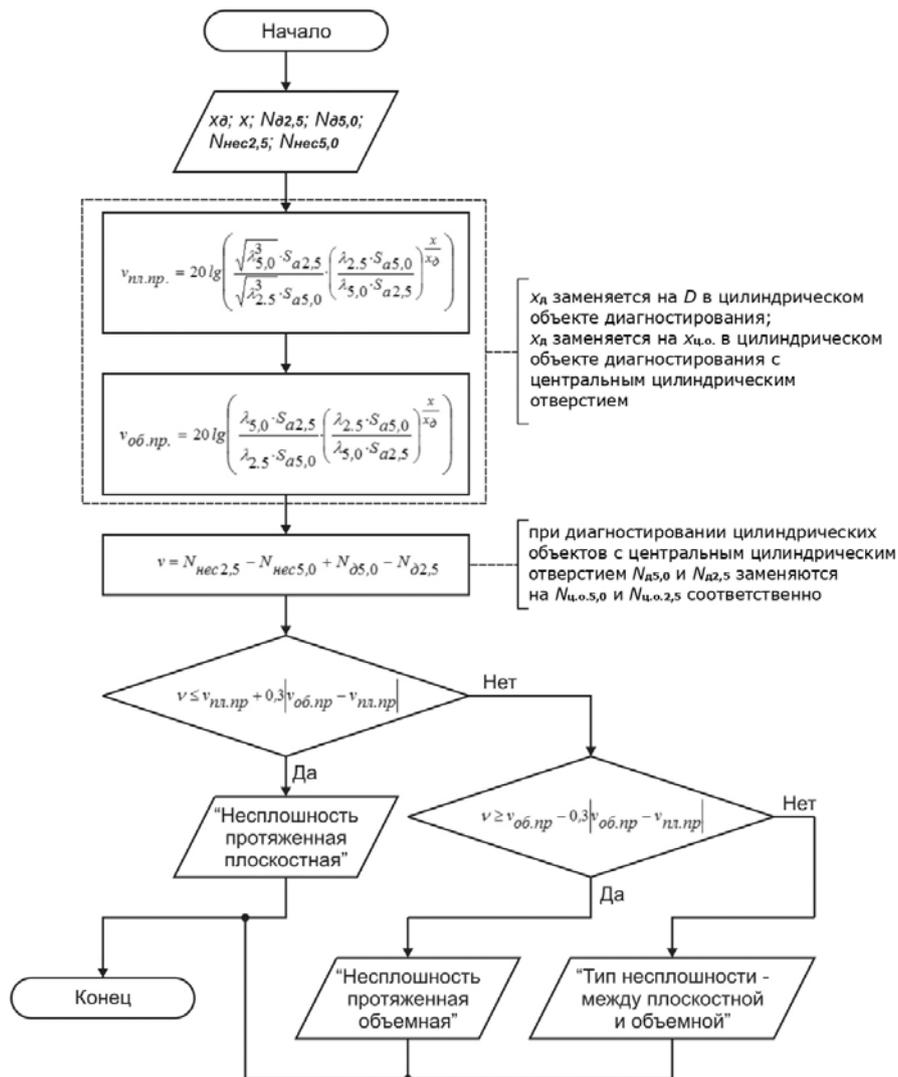


Рис. 2. Алгоритм блока «Двухчастотный метод ПН» программы «NDTRT 2f method»

Таблица 1. Идентификация переменных в функциях программы «NDTRT 2f method»

№	Наименование аргумента	Обозначение в формуле	Значение	Размерность
I	II	III	IV	V
1	Длина ультразвуковой волны на частоте 2,5 МГц	$\lambda_{2,5}$	$c/2500000$	мм
2	Длина ультразвуковой волны на частоте 5,0 МГц	$\lambda_{5,0}$	$c/5000000$	мм
3	Скорость ультразвуковой волны в объекте диагностирования	$c$	-	мм/с
4	Площадь преобразователя с частотой 2,5 МГц	$S_{a2,5}$	113,097	мм <sup>2</sup>
5	Площадь преобразователя с частотой 5,0 МГц	$S_{a5,0}$	28,274	мм <sup>2</sup>

Табл. 1 – продолжение

I	II	III	IV	V
6	Расстояние до донной поверхности	$x_d$	-	мм
7	Диаметр контролируемого участка цилиндрического объекта диагностирования	$D$	-	мм
8	Расстояние до центрального цилиндрического отверстия	$x_{ц.о.}$	-	мм
9	Расстояние до несплошности	$x$	-	мм
10	Амплитуда донного сигнала на частоте 2,5 МГц	$N_{д2.5}$	-	дБ
11	Амплитуда донного сигнала на частоте 5,0 МГц	$N_{д5.0}$	-	дБ
12	Амплитуда эхо-сигнала от центрального цилиндрического отверстия на частоте 2,5 МГц	$N_{ц.о.2.5}$	-	дБ
13	Амплитуда эхо-сигнала от центрального цилиндрического отверстия на частоте 5,0 МГц	$N_{ц.о.5.0}$	-	дБ
15	Амплитуда эхо-сигнала от несплошности на частоте 5,0 МГц	$N_{5.0}$	-	дБ



Рис. 3. Загрузочное окно программы «NDTRT 2f method»

Программа «NDTRT 2f method» по измеренным в объекте диагностирования данным позволяет определить тип обнаруженной в процессе ультразвукового контроля как точечной, так и протяженной несплошностей.

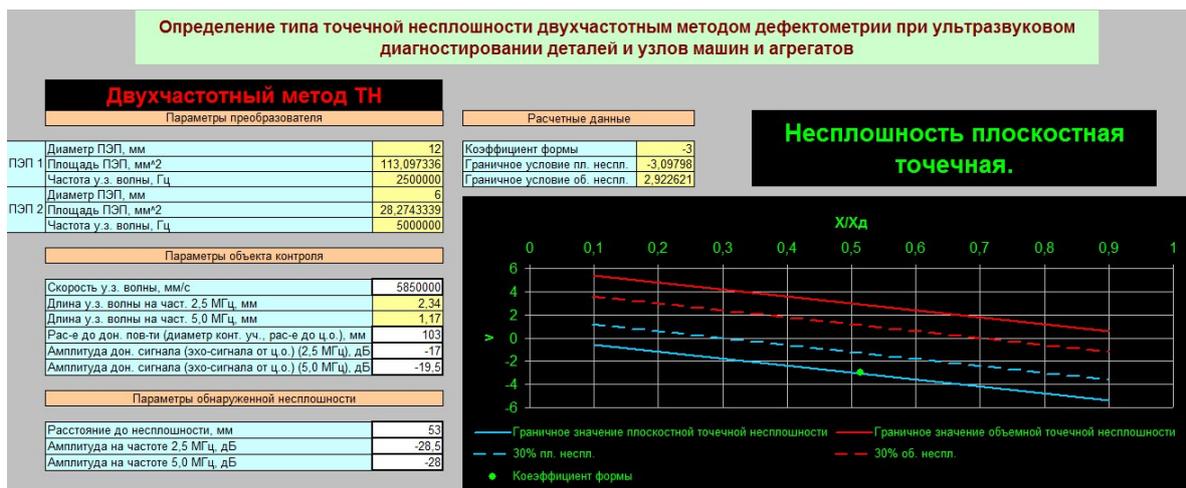


Рис. 4. Окно «Двухчастотный метод ТН» программы «NDTRT 2f method»

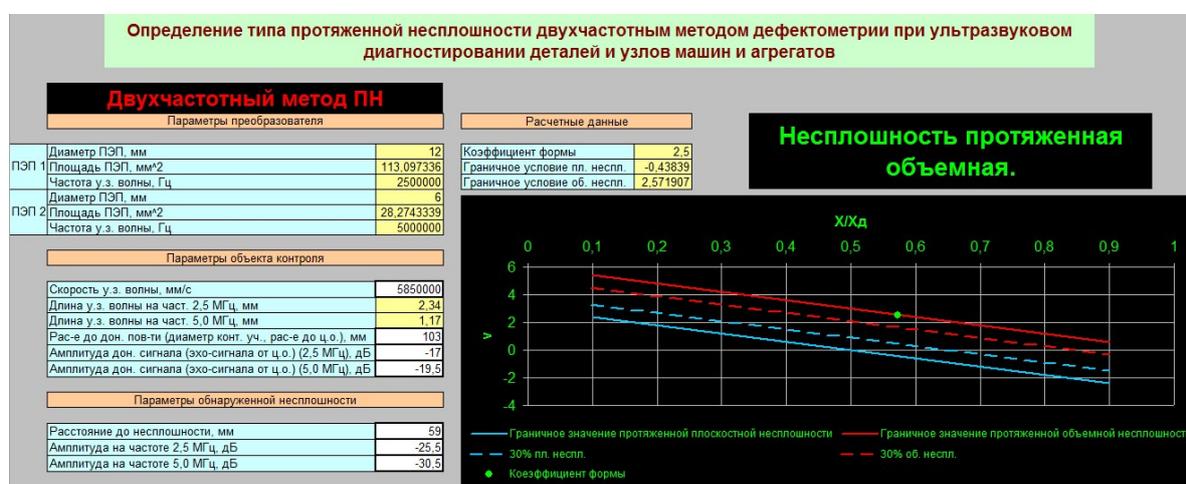


Рис. 5. Окно «Двухчастотный метод ПН» программы «NDTRT 2f method»

**Список литературы:** 1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. Изд. 2-е испр. и доп. –Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656с. 2. Капранов, Б.И., Коротков, М.М. Акустические методы контроля и диагностики. Часть 1: Учебное пособие – Томск: изд-во ТПУ, 2008. – 186с. 3. Киреев, А.Н. Дефектометрия при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог: Монография – Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2016. – 147с. 4. Киреев, А.Н., Быкадоров, В.В., Киреева, М.А. Двухчастотный метод ультразвуковой дефектометрии: Монография – Донецк (РФ): ООО «НПФ «Фолиант», 2021. – 107с. 5. Киреев, А.Н. Дефектометрия при ручном контроле элементов и систем подвижного состава железных дорог ультразвуковым эхо-методом – Вестник Ростовского Государственного университета путей сообщения. – Ростов на Дону, 2015. – №2 (58). – С. 24-30. 6. Киреев, А.Н. Расширение области применения двухчастотного метода дефектометрии при ручном ультразвуковом контроле – Контроль. Диагностика. – М., 2018. – №4 – С. 58-63. 7. Киреев А.Н. Повышение информативности двухчастотного метода дефектометрии при ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог – Вестник ВНИИЖТ. – М.: 2018. – Том 77 – №3 – С. 182-187.

# ИНЖЕНЕРНАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ И БИОРИТМОВ

Коваленко В.И. (ДонНТУ, г. Донецк)

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

**Abstract:** In the work, from an engineering point of view, the interaction of blood pressure (systolic and diastolic) and biorhythms is considered. A period of one year is considered. The initial data are the experimental values of blood pressure. Using the methods of mathematical statistics, the change in pressure was studied for all months and for the whole year. In the same period, the change in the periods of triple interaction of biorhythms was analyzed. A stochastic relationship has been established between blood pressure values and biorhythms.

**Key words:** mathematical statistics, blood pressure, biorhythms.

## 1. Введение

Автором получены многочисленные экспериментальные данные по измерению некоторых параметров жизнедеятельности человека, в том числе артериального (систолического  $dv$  и диастолического  $dn$ ) давления. Для анализа выбран 70-й год автора. За это время было выполнено 1625 пар измерений артериального давления автоматическим тонометром мод. UA-668 фирмы AND; выполнены предусмотренные инструкцией правила пользования тонометром.

Полученные данные были систематизированы и проанализированы с инженерной (математической) точки зрения: с использованием методов математической статистики (корреляционный и регрессионный анализы) [1-3] и с учетом биоритмов, относящихся к автору [4]. Статья написана на основании материалов, изложенных в работе [5], где приводятся исходные экспериментальные данные, на основании которых делается вывод об установлении взаимосвязи биоритмов и артериального давления. В качестве инструмента анализа принята величина достоверности аппроксимации  $R^2$ . При анализе данных, наряду с другими, использован аппарат программного продукта Excel [6].

## 2. Основное содержание и результаты работы

2.1 Применение величины достоверности аппроксимации  $R^2$  для анализа исследуемых величин

При предварительном исследовании было «протарировано» применение величины достоверности аппроксимации  $R^2$  для различных (противоположных) случаях: а) когда достоверно наблюдается высокая корреляционная зависимость между анализируемыми величинами, и б) когда изначально известно, что анализируемые величины являются независимыми друг от друга.

а) Исследовалась взаимосвязь диастолического  $dn$  и систолического  $dv$  давлений на протяжении активных часов суток (с 5 ч утра по 23 ч вечера). Исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения систолического  $dv$  ( $x_i$ ) и диастолического  $dn$  ( $y_i$ ) давлений на протяжении активных часов суток

Давление	Часы суток																		
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$dv$ ( $x_i$ )	127,2	130,0	130,5	131,9	117,6	113,3	110,5	115,8	116,5	122,8	123,0	124,5	124,4	127,2	128,9	125,6	120,7	115,9	114,5
$dn$ ( $y_i$ )	74,1	76,2	75,8	75,6	71,1	70,2	69,1	69,0	68,7	72,6	72,6	72,5	71,6	73,4	74,8	73,2	69,7	67,0	64,1

Установлена корреляционная зависимость между анализируемыми величинами; значение коэффициента корреляции равно  $r_{dv,dn} = 0,877$ .

На основании данных табл. 1, применяя регрессионный анализ, получена диаграмма, представленная на рис. 1. На диаграмме приведена линия тренда, уравнение

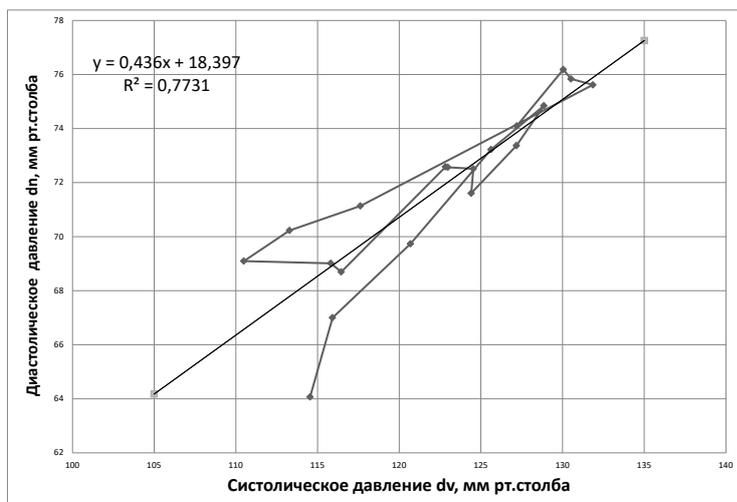


Рис. 1. Зависимость диастолического  $dn$  давления от систолического  $dv$

регрессии  $y = 0,436x + 18,397$ , а также величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,7697$ . Показатель  $R^2$  оценивает степень приближения анализируемых экспериментальных данных к тому или иному теоретическому виду регрессии; чем выше величина  $R^2$ , тем уравнение регрессии является более адекватным.

б) Используя генератор случайных чисел, создали 2 серии независимых случайных величин, которые находятся в табл. 2. Поменяем местами числа, принадлежащие к рядам  $x$  и  $y$ ; поместим эти числа в табл. 3.

Таблица 2. Две серии независимых случайных величин,  $y = f(x)$

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x$	9851	2269	271	8334	4121	3934	8808	656	9106	1783
$y$	8141	99	7187	3123	4018	9643	8844	2834	395	6735

Таблица 3. Две серии независимых случайных величин,  $x = f(y)$

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x$	8141	99	7187	3123	4018	9643	8844	2834	395	6735
$y$	9851	2269	271	8334	4121	3934	8808	656	9106	1783

Создадим диаграммы  $y = f(x)$  и  $x = f(y)$ . Эти диаграммы помещены на рис. 2:  $y = f(x)$  – левая диаграмма (а), и  $x = f(y)$  – правая диаграмма (б).

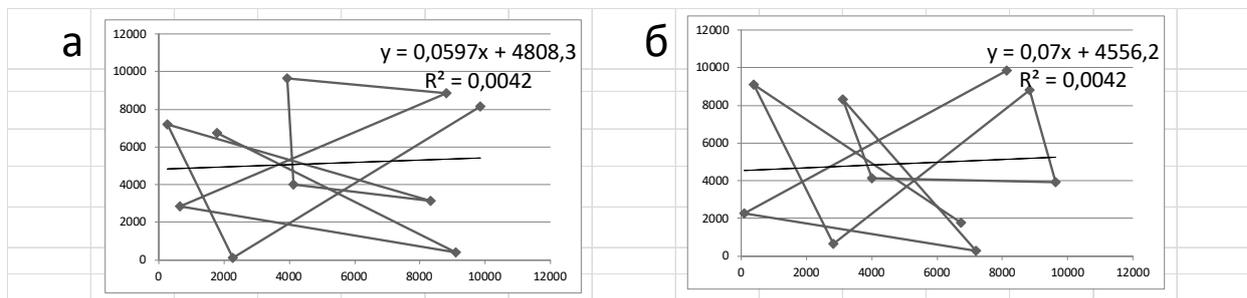


Рис. 2. Диаграммы зависимости случайных чисел  $y = f(x)$  (а) и  $x = f(y)$  (б)

Проанализируем полученные диаграммы (см. рис. 2). Вид диаграмм совершенно различный; отличаются также уравнения регрессии:  $y = 0,0597x + 4808,3$  (диаграмма «а») и  $y = 0,07x + 4556,2$  (диаграмма «б»). В то же время, отметим, что величина достоверности аппроксимации является одинаковой для обеих диаграмм: аппроксимации  $R^2 = 0,0042$ . Эта величина намного меньше значения  $R^2 = 0,05$ ; при  $R^2 \leq 0,05$  анализируемые величины считаются независимыми. Таким образом,

установлено, что величина  $R^2$  адекватно оценивает степень приближения анализируемых экспериментальных данных к выбранному виду регрессии.

2.2 Изменение артериального давления по дням месяца в период 70-го года  
В табл. 4 приведены значения  $R^2$  для всех месяцев и в целом по 70-му году.

Таблица 4. Аппроксимация (величина достоверности  $R^2$ ) распределений систолического и диастолического давления по месяцам 70-го года

Месяц	Систолическое давление				Диастолическое давление			
	Линейная	Направление	Полином	Направление	Линейная	Направление	Полином	Направление
1	2	3	4	5	6	7	8	9
70.01	0,0926	пол.	0,1085	горб	0,1875	пол.	0,1875	седло
70.02	<0,05	*	<0,05	*	<0,05	*	<0,05	*
70.03	<0,05	*	<0,05	*	0,1659	пол.	0,1803	седло
70.04	<0,05	*	0,2251	горб	<0,05	*	<0,05	*
70.05	0,141	пол.	0,1445	горб	0,1601	пол.	0,1986	седло
70.06	<0,05	*	<0,05	*	0,2274	отр.	0,2931	седло
70.07	0,0942	пол.	0,2047	горб	0,1076	пол.	0,223	горб
70.08	<0,05	*	0,0707	седло	0,1412	отр.	0,1864	седло
70.09	<0,05	*	0,0523	горб	<0,05	*	<0,05	*
70.10	0,0748	отр.	0,098	горб	<0,05	*	<0,05	*
70.11	недостаточно данных				недостаточно данных			
70.12	0,6784	пол.	<b>0,6788</b>	седло	0,6535	пол.	<b>0,6694</b>	седло
По 70-му году	0,2757	пол.	<b>0,2765</b>	седло	0,101	пол.	<b>0,1813</b>	седло

Примечание. При  $R^2 \leq 0,05$  (обозначено звездочкой \*) направление линии регрессии не определялось.

2.3 Учет тройного взаимодействия биоритмов (табл. 5); это один из примеров анализа.

Таблица 5. Анализ тройного взаимодействия биоритмов, находящихся в возрастающей фазе; систолическое давление

№ п/п	Месяц	70.01	70.02	70.03	70.04	70.05	70.06	70.07	70.08	70.09	70.10	70.11	70.12	$\Sigma$
1	m-i	1   30	31-61	62-91	92-122	123-153	154-181	182-212	213-242	243-273	274-303	304-334	335-365	
2	p-i	3,4,5	48-51,5	76-81	104, 116-117	139-145	168-173		216-216,5		277-282,5; 300-303	304-311, 333-334		
3	p	3	4,5	6	3	7	6	0	1,5	0	10,5	10	0	51,5
4	$R^2$	0,1085	0	0	0,2251	0,1445	0	0,2047	0,0707	0,0523	0,098	0	0,6788	
5	p	0			1	1,5	3	4,5	6		9	10	10,5	
6	$R^2$	0,0523	0,2047	0,6788	0,2251	0,0707	0,1085	0	0	0	0,1445	0	0,098	
7	p	0	1	1,5	3	4,5	6	9	10	10,5				
8	$R^2$	0,3119	0,2251	0,0707	0,1085	0	0	0,1445	0	0,098				

В табл. 5 приведены следующие данные. В строках 1-4 приведены сведения по каждому из 12-ти месяцев 70-го года:  $m_i$  - дни месяцев;  $p_i$  - периоды и  $p$  - количество суток тройного воздействия биоритмов;  $R^2$  - значение величины  $R^2$  (из табл. 4, столбец 4).

Используя строки 7 и 8 табл. 5, построены соответствующие диаграммы, приведенные на рис. 3.

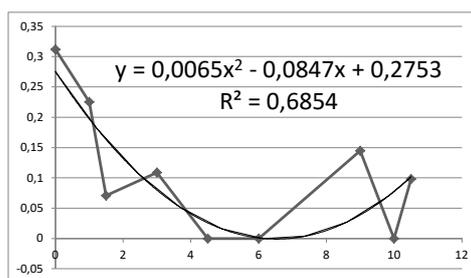
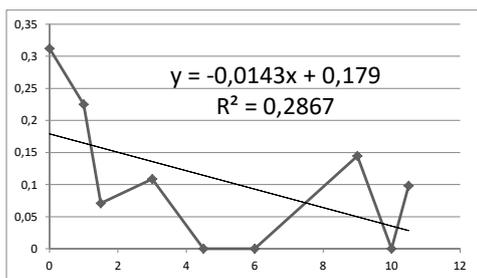


Рисунок 3. Изменение величины  $R^2$  в зависимости от периодов тройного воздействия биоритмов, находящихся в возрастающей фазе; систолическое давление

Результаты аппроксимации (см. рис. 3): линейной -  $R^2 = 0,2867$ , полиномом 2-й степени -  $R^2 = 0,6854$ .

#### Закключение.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложена методика выявления взаимосвязи биоритмов и артериального давления.
2. Представленные результаты можно рассматривать как пример применения предложенной методики.
3. Среднеарифметическое значение достоверности  $R^2$  аппроксимации для систолического давления ( $R^2 = 0,4882$ ) больше соответствующей величины ( $R^2 = 0,3529$ ) для диастолического давления.
4. Значение достоверности  $R^2$  при аппроксимации полиномом 2-й степени всегда выше, чем при линейной аппроксимации.
5. Для возрастающей фазы биоритмов значение ( $R^2 = 0,4829$ ) значительно выше по сравнению с убывающей фазой ( $R^2 = 0,3582$ ). Общее значение по году:  $R^2 = 0,4206$ .
6. Используя предложенную методику, можно провести контрольные измерения артериального давления с соблюдением всех необходимых медицинских и метрологических требований, а затем сравнить полученные при этом данные с результатом исследования автора.

*Замечание.* Можно предположить, что подобные результаты не были ранее получены по двум причинам: 1) исследования не были привязаны к конкретному индивидууму; 2) возможно, был выполнен недостаточный объем исследований.

**Список литературы:** 1. Орлов А. И. Прикладная статистика. Учебник. — М.: Экзамен, 2006. — 671 с. 2. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход : монография / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, С.Н. Постовалов, Е.В. Чимитова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с. 3. Лекции по эконометрике: учебное пособие /Шанченко Н.И., Ульяновск: УлГТУ, 2008. . – 184 с. 4. [Биоритмы онлайн: Расчет 3-х биоритмов человека, таблица биоритмов...geocult.ru/bioritmyi-online-raschet](http://geocult.ru/bioritmyi-online-raschet). 5. Илья Крос. Биоритмы и артериальное давление. Изд-во «ДокументКопиЦентр», Донецк, 2022 г. – 97 с. 6. Уокенбах, Джон. Microsoft Excel 2010. Библия пользователя. : Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2013. – 912 с.

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

Колганова Е.Н., Мельникова Е.П., Лебедев В.А., Шишкина А.П.

(ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет (ДГТУ)»,  
Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Ростов-на-Дону, г. Горловка, Россия, ДНР)  
Тел./Факс: +7 (909) 430-95-99; E-mail: [elenkolg@list.ru](mailto:elenkolg@list.ru)

**Abstract:** *The article is devoted to improving the reliability of electronic equipment parts due to the introduction of finishing and stripping processing technology into production. The developed method of designing the technological process of vibration treatment with natural media on the example of processing parts "Housing" allowed to reduce labor intensity due to mechanization and reduce the cost of technology development by 15-20%.*

**Key words:** *technological process, detail, electronic equipment, mechanization, walnut shell granulate.*

Развитие науки и техники ставит перед современным машиностроением многообразие задач, которые должны надежно обеспечивать технические характеристики изделий на период их «жизненного цикла», что в значительной мере зависит от условий и качества технологии обработки. В процессе эксплуатации большинство деталей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) подвергаются значительным тепловым, статическим, динамическим, вибрационным нагрузкам и влиянию агрессивной окружающей среды. Детали РЭА представляет собой тонкостенные осесимметричные изделия, в конструкции которых, для выполнения ими функциональных задач, предусмотрены такие элементы, как пазы и отверстия малого размера, глухие отверстия, отверстия с резьбой. Обеспечить предъявляемые высокие требования, касающиеся точности формы, размеров и качества поверхностного слоя возможно на основе совершенствования и разработки эффективных технологий их обработки [1, 2, 3]. В связи с этим в работе решается актуальная научно-техническая задача совершенствования технологического процесса обработки деталей радиоэлектронной аппаратуры, что позволит улучшить параметры качества поверхности деталей с целью удаления заусенцев и подготовки поверхностей под нанесение покрытия.

**Целью работы** является повышение надежности деталей радиоэлектронной аппаратуры за счет разработки методики проектирования технологического процесса.

Для достижения поставленной цели рассмотрим процесс проектирования технологии вибрационной обработки природными средами на примере обработки деталей «Корпус», которые применяются в узлах приборов РЭА, изготавливаемых и ремонтируемых на ПАО «Завод Атлант», специализированном российском предприятии по разработке и производству электрических соединителей.

После операций формообразования у деталей «Корпус» образуются заусенцы, которые по условиям эксплуатации и требованиям отраслевого ОСТ 4ГО.070.014 не допускаются [4]. В настоящее время в технологическом процессе изготовления деталей «Корпус» на предприятии предусмотрена операция ручной зачистки заготовок.

Предлагается заменить операцию ручной зачистки заготовок на вибрационную отделочно-зачистную обработку с применением природной среды – дробленой скорлупы грецкого ореха.

Отверстия и пазы в детали не требуют обработки, после удаления заусенцев должен быть обеспечен радиус скругления кромок и шероховатость обработанной

поверхности, в пределах установленных КД ( $R \leq 0,3$  мм). Шероховатость заданная  $Ra = 0,32$  мкм.

Для разработки методики проектирования технологического процесса ВиО были определены исходные данные.

Деталь – «Корпус»: материал – алюминиевый сплав АМг6; масса  $m_d = 8,6$  гр; исходная шероховатость поверхности  $Ra = 0,4$  мкм; объём детали  $V_d = 1,47 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>; средняя высота заусенцев  $H_i = 0,3-0,5$  мм; толщина основания заусенцев  $L_o = 0,2-0,3$  мм.; предел текучести материала детали  $\sigma_s = 155$  МПа; плотность материала детали  $\rho_{н.о.д.} = 2600$  кг/м<sup>3</sup>.

Оборудование: вибрационный станок СВТ-5; объём рабочей камеры  $V_{р.к.} = 5$  дм<sup>3</sup> =  $5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>; амплитуда колебаний рабочей камеры станка  $A = 0-4$  мм; частота колебаний рабочей камеры станка  $f_V = 15-35$  Гц.

Обрабатываемая среда: гранулят скорлупы грецкого ореха.

Размер гранул среды:

$$D_{оп} = K_{и} \frac{(L+2h_3)^2 + h_{\phi}^2}{4h_{\phi}} \quad (1)$$

$$D_{оп} = 1,1 \frac{(0,004+2 \cdot 0,0004)^2 + 0,0003^2}{4 \cdot 0,0003} = 0,0018 \text{ м} = 1,8 \text{ мм.}$$

Принимаем размер фракции обрабатываемой среды  $D_{оп} = 1,5-2,5$  мм., насыпная плотность среды  $\rho_{ср} = 390$  кг/м<sup>3</sup>.

Проектирование операции осуществлялось с использованием программного обеспечения MathCAD.

Расчет предельно допустимого количества деталей, которое может быть загружено в рабочую камеру, шт.:

$$N_{о.д.} = \frac{2V_{р.к.} \rho_{н.о.д.}}{3v_d \rho_d (1+K_r)} \quad (2)$$

$$N_{о.д.} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 2,6 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 1,47 \cdot 10^{-3} \cdot 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot (1+1,2)} = 128 \text{ шт.}$$

Определение массы загрузки обрабатываемой среды:

$$M_{о.с.} = \frac{2V_{р.к.} K_r \rho_{н.о.с.}}{3(1+K_r)} \quad (3)$$

$$M_{о.с.} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 0,39 \cdot 10^{-6}}{3(1+1,2)} = 1,328 \text{ кг.}$$

Оценка возможности обеспечения циркуляционного движения:

$$\frac{(2A\pi f)^2}{gH} < 0,5; \quad \frac{H}{L} \cong 1; \quad \frac{H}{D_{о.п.}} > 6 \quad (4)$$

$$\frac{(2 \cdot 1,5 \cdot 3,14 \cdot 25)^2}{9,8 \cdot 72} < 0,5; \quad \frac{H}{D_{\text{о.п.}}} = \frac{72}{3} = 24 > 6$$

Масса загрузки может быть приведена в циркуляционное движение. За наибольший размер  $D_{\text{о.п.}}$  принимается размер гранулы обрабатываемой среды  $D_{\text{о.п.}} = 6$  мм.

Комплексный коэффициент условий обработки [2]:

$$M = \frac{c^2 k_{\phi}}{4\pi k_{\text{д}}(1-f^2) \text{ctg} \alpha \cdot t g \frac{\beta}{2}} = \frac{3^2 \cdot 1,5}{4 \cdot 3,14 \cdot 2,75 \cdot (1-0,25^2) \cdot \text{ctg} 28^\circ \cdot t g \frac{30^\circ}{2}} = 0,89 \quad (5)$$

Продолжительность обработки [2]:

$$T_3 = M \frac{D_{\text{о.п.}}^3 L_0 H_i \sigma_s^2}{r_{\beta}^4 \rho_{\text{ср}}^2 A f_V P_2} (40 k_{\text{д}}^2 A^2 f_V^2 \cos \alpha + g L_{\text{ст}})^{-2} \quad (6)$$

$$T_3 = 0,89 \frac{0,002^3 \cdot 0,0002 \cdot 0,0005 \cdot 155^2}{0,0015^4 \cdot (0,39 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,002 \cdot 33 \cdot 0,02} (40 \cdot 0,9^2 \cdot 0,002^2 \cdot 33^2 \cdot \cos 28 + 9,8 \cdot 0,08)^{-2} = 57,94 \text{ мин.}$$

Принимаем время обработки  $T_3 = 60$  мин.

Расчет толщины слоя металла, снимаемого с открытых поверхностей детали за время, требуемое для удаления заусенца [2]:

$$\Delta B = \frac{r_{\beta}^2 \rho_{\text{ср}} L_0 H_i (1-f^2)^{0,5}}{D_{\text{о.п.}}^3 c \sigma_s} (40 k_{\text{д}}^2 A^2 f_V^2 \cos \alpha + g L_{\text{ст}}) \quad (7)$$

$$\Delta B = \frac{0,0015^2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0002 \cdot 0,0005 \cdot (1-0,25^2)^{0,5}}{0,002^3 \cdot 3 \cdot 155} (40 \cdot 0,9^2 \cdot 0,002^2 \cdot 33^2 \cdot \cos 28 + 9,8 \cdot 0,08) = 2,4 \times 10^{-7} \text{ м} = 0,24 \text{ мкм}$$

Проверка годности качества [2]:

$$Ra_{\text{исх}} - \Delta B < [Ra_{\text{imin}}] \quad (8)$$

$$0,4 \text{ мкм} - 0,24 \text{ мкм} < 0,32 \text{ мкм.}$$

Условие, свидетельствующее о годности качества поверхности детали после ВиО в гранулах произвольной формы, выполняется.

Производительность обработки, шт/с.

$$П_p = \frac{N_{\text{о.д.}}}{T} \quad (9)$$

$$П_p = \frac{128}{3600} = 0,035 \text{ шт/с.}$$

На рисунке 1 представлены результаты отделочно-зачистной обработки после слесарной (ручной) зачистки (а) и после ВиО детали в обрабатываемой среде из

скорлупы грецкого ореха (б): заусенцы удалены, радиус скругления кромки в пределах требований.

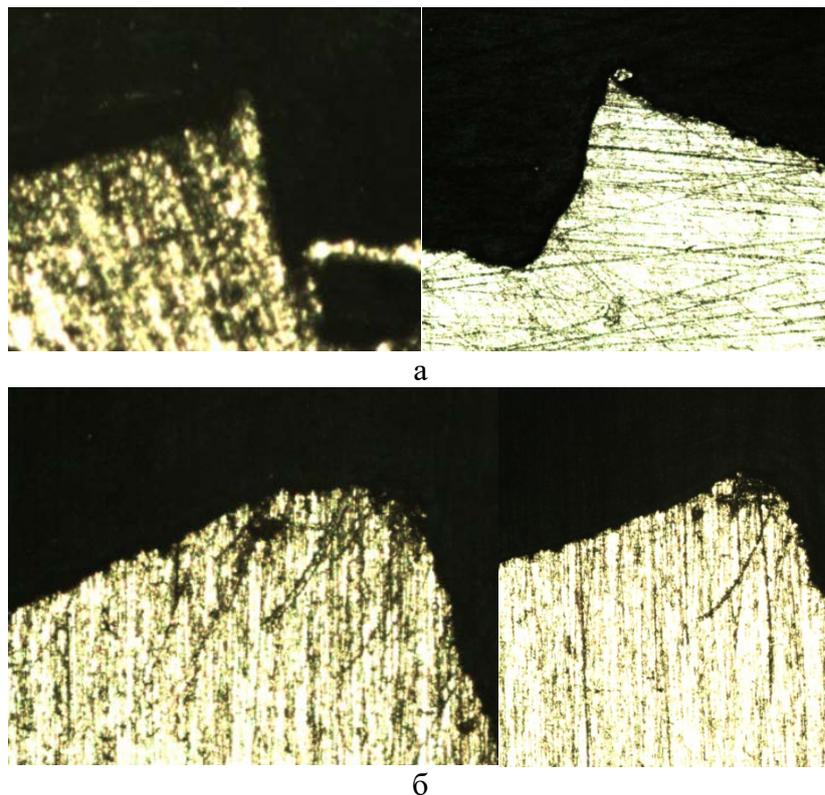


Рис. 1. Состояние кромок после ручной зачистки, материал образцов ЛС59-1: а – слесарная зачистка; б – ВиО в среде скорлупы грецкого ореха

Вышерассмотренная технология внедрена на ПАО «Завод Атлант» для отделочно-зачистной обработки деталей РЭА и высокоточных деталей специальных изделий. Внедрение в производство технологии отделочно-зачистной обработки деталей РЭА позволило уменьшить трудоемкость за счет механизации и сокращения затрат на отработку технологии на 15-20%.

**Список литературы:** 1. Повышение эффективности вибрационной обработки путем комбинирования обрабатывающих сред / М. А. Тамаркин, Е. Н. Колганова, Ю. В. Корольков, В. М. Троицкий // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – № 6(120). – С. 12-17. – DOI 10.30987/2223-4608-2021-6-12-17. – EDN VTCTWS. 2. Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Ягмуров М.А. Обоснование гранулометрических характеристик рабочей среды при вибрационной обработке деталей с малыми пазами и отверстиями. *Advanced Engineering Research*. 2020; 20(4):382-389. 3. Колганова, Е.Н. Технологическое обеспечение вибрационной обработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 2.5.6 (05.02.08) Технология машиностроения / Е.Н. Колганова. – Ростов н/Д, 2022. – 169 с. 4. Отраслевой стандарт ОСТ 4 ГО.070.014. Детали радиоэлектронной аппаратуры. Общие технические условия.

## ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ГОРНЫХ МАШИН (НА ПРИМЕРЕ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ)

Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Набиуллин Р. Ш., Хорошавин С. А.

(ФГБОУ УГГУ, г. Екатеринбург, Россия)

Тел. 8(343) 283-06-71; E-mail: [gmf.gmk@m\\_ursmu.ru](mailto:gmf.gmk@m_ursmu.ru)

**Abstract:** *The results of analytical studies of the functioning of the main mechanisms of quarry excavators are presented. On the basis of a mathematical model of the main mechanisms, the dependences of the operating parameters on the bucket position are obtained. The results of the work can be used in the development of an intelligent control system for the drives of the main mechanisms.*

**Keywords:** *quarry excavator, main mechanisms, lever mechanism, kinematic transfer functions, intelligent control system.*

Введение. Приведены результаты аналитических исследований процесса функционирования главных механизмов карьерных экскаваторов (мехлопат), направленных на создание интеллектуальной системы управления приводами главных механизмов карьерного экскаватора (мехлопаты). Показано, что привода главных механизмов (подъемного и напорного механизмов) образуют замкнутую кинематическую цепь, состоящую из двигателей, главных механизмов и рычажного механизма, соединяющего главные механизмы с ковшом. Установлено, что начальным звеном рычажного механизма, имеющего две степени подвижности, является звено «рукоять-ковш», положение которого определяет положения всех звеньев как рычажного, так и главных механизмов. На основе математической модели процесса функционирования рычажного и главных механизмов получены выражения для кинематических и динамических передаточных функций рычажного механизма, определяющих зависимость соотношений между скоростью и усилием копания и режимными параметрами главных механизмов от положения ковша в рабочей зоне экскаватора (координат вершины режущей кромки ковша). Результаты работы могут быть использованы при разработке системы интеллектуального управления приводами главных механизмов, обеспечивающей согласование режимных параметров механизмов и повышение производительности экскаватора.

Переход к новому типу экономики обуславливает проведение качественных изменений средств производства. Совершенствование технологического оборудования, рост наукоемкого производства напрямую связано с интеллектуализацией как процесса проектирования и создания машин и оборудования, так и непосредственно с их эксплуатацией.

Обзор публикаций по карьерным экскаваторам [2 – 5] показал, что, в основном, они посвящены вопросам поиска новых технических решений, моделирования рабочих процессов, автоматизации, роботизации и оптимизации параметров оборудования.

Вместе с тем вопросы, касающиеся формирования режимных параметров главных механизмов экскаватора, определяющих энергосиловые параметры рабочего процесса экскавации и, в целом, качество управления и эффективность функционирования карьерного экскаватора, изучены недостаточно.

В технической литературе отсутствуют сведения о фактических режимах совместной работы главных механизмов в процессе экскавации, приводятся лишь усредненные диаграммы скоростей и нагрузок, разрабатываемые системы управления процессом экскавации основываются на абстрактных моделях – нечеткой логике [9], мультиагентном подходе [10] и др.

Цель работы – повышение эффективности управления процессом экскавации за счет согласования режимных параметров главных механизмов при их совместной работе при экскавации горной массы.

Задачи, решаемые в работе:

- определение кинематических и динамических передаточных функций рычажного механизма;
- разработка математической модели общего передаточного механизма приводов главных механизмов;
- разработка имитационной цифровой модели процесса экскавации горных пород.

Объектом исследования является рабочий процесс экскавации горной массы, заключающийся в перемещении ковша (вершины режущей кромки) по эквидистантным траекториям, параллельным откосу уступа, и отделении слоя («стружки») горной массы с одновременным заполнением ковша.

Предмет исследования – изучение кинематических свойств рычажного механизма.

Методы исследования – математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

При совместном действии главных механизмов (механизма подъема и напора) в процессе экскавации горных пород образуется общий передаточный механизм приводов главных механизмов, состоящий из главных механизмов и рычажного механизма (рис. 1), соединяющего главные механизмы с ковшом. Начальным звеном рычажного механизма, имеющего две степени подвижности, является звено «рукоять-ковш». В этом случае режимные параметры главных механизмов определяются в зависимости от положения начального звена рычажного механизма (координат вершины режущей кромки ковша).

Кинематические и динамические свойства рычажных механизмов определяются кинематическими и динамическими передаточными функциями, характеризующими зависимость соотношений между скоростью и усилием копания и режимными параметрами главных механизмов от положения звена «рукоять-ковш».

Выполнен кинематический анализ рычажного механизма.

Для определения скоростей рабочих движений (подъема и напора) необходимо задать законы движения начального звена, т. е. траекторию перемещения ковша (вершины режущей кромки) и скорость копания, а также размеры звеньев передаточного механизма.

Зависимости для определения кинематических передаточных функций (соотношений между скоростями подъема и напора, и скоростью копания) составят в общем виде:

$$\text{КПФН} = \frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{к}}} = f_1(X_{\text{к}}, Y_{\text{к}}, l_{\text{п}}, l_i, \psi, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, \gamma, \delta, \varepsilon);$$

$$\text{КПФП} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{к}}} = f_2(X_{\text{к}}, Y_{\text{к}}, l_{\text{п}}, l_i, \psi, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, \gamma, \delta, \varepsilon),$$

где КПФН, КПФП – кинематические передаточные функции движений напора и подъема;  $l_{\text{п}}$ ,  $l_i$  – длины звеньев с неизменяющейся и изменяющейся длиной;  $\psi$  – угол наклона касательной к траектории перемещения ковша в точке К;  $\alpha$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$  – углы, определяющие положения звеньев.

Для решения задач исследования выполнено имитационное моделирование процесса экскавации на основе математической модели рычажного механизма.

При моделировании процесса экскавации при заданных значениях параметров, определяющих положение ковша в рабочей зоне экскаватора (координаты вершины режущей кромки, скорость копания, угол наклона касательной к траектории перемещения ковша, т. е. вершины режущей кромки, и др.), находятся значения режимных параметров главных механизмов. В общем виде результаты имитационного моделирования представляют собой функционалы, т. е. зависимости между расчетными значениями энерго-силовых параметров, реализуемых на ковше в конкретной точке (или зоне) рабочей зоны, и соответствующими режимными параметрами главных механизмов и двигателей.

В таблице приведены результаты расчета режимных параметров главных механизмов (скорости подъема  $V_{п}$  и напора  $V_{н}$ , усилия подъема  $F_{п}$  и напора  $F_{н}$ ) при перемещении ковша в пределах рабочей зоны по начальной, средней (т. е. в центре рабочей зоны экскаватора) и конечной траекториям с углом наклона, соответствующим углу откоса уступа.

Таблица 1. Режимные параметры главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А

Номер позиции	Исходные данные			Расчетные данные			
	$X_k$ , м	$Y_k$ , м	$G_{к+п}$ , кН	$V_{п}$ , м/с	$V_{н}$ , м/с	$F_{п}$ , кН	$F_{н}$ , кН
Начальная траектория ( $X_{к0} = 9$ м)							
1	9,00	0	400	0,95	-0,87	290	-630
2	10,15	2	435	0,92	-0,81	350	-620
3	11,30	4	470	0,84	-0,70	420	-605
4	12,45	6	500	0,70	-0,51	520	-580
5	13,60	8	540	0,52	-0,19	700	-555
6	14,75	10	575	0,50	0,19	975	-590
7	15,90	12	610	0,66	0,50	1270	-700
8	17,05	14	650	0,80	0,70	1560	-850
9	18,20	16	680	0,89	0,81	1810	-1005
10	18,80	17	700	0,91	0,84	1910	-1060
Средняя траектория ( $X_{к0} = 13,5$ м)							
11	13,50	0	400	0,88	-0,64	610	-310
12	14,65	2	435	0,83	-0,51	640	-300
13	15,80	4	470	0,76	-0,34	680	-280
14	16,95	6	500	0,70	-0,12	710	-230
15	18,10	8	540	0,66	0,11	780	-155
16	19,25	10	575	0,65	0,32	830	-40
17	20,40	12	610	0,62	0,50	885	140
18	21,55	14	650	0,50	0,63	930	420
19	22,70	16	680	0,22	0,72	105	845
20	23,30	17	700	0,02	0,76	1125	1130
Конечная траектория ( $X_{к0} = 18$ м)							
21	18,00	0	400	0,79	-0,39	1020	110
22	19,15	2	450	0,73	-0,25	1060	150
23	20,30	4	500	0,68	-0,09	1100	210
24	21,45	6	550	0,61	0,07	1150	320
25	22,60	8	600	0,53	0,23	1210	480
26	23,75	10	650	0,42	0,38	1290	710
27	24,90	12	700	0,27	0,50	1420	1030

Из приведенных данных видно, что режимные параметры главных механизмов (скорости и усилия подъема и напора) изменяются в пределах рабочей зоны экскаватора в широком диапазоне и зависят как от высоты копания (координаты  $Y_k$  вершины режущей кромки ковша), так и от радиуса копания (координаты  $X_k$ ) или удаления траектории перемещения ковша от экскаватора.

Имитационная модель процесса экскавации определяет алгоритм цифрового управления, который формирует управляющее воздействие на приводы главных механизмов. Разработанная программа расчета скоростей рабочих движений позволит реализовать практически любую траекторию перемещения ковша за счет координации движений подъема и напора при заданных энергосиловых параметрах, реализуемых на ковше.

Оценка кинематических свойств рычажного механизма позволит разработать интеллектуальную цифровую систему цифрового управления приводами главных механизмов в режиме реального времени при их совместной работе в процессе экскава-

ции горной массы, реализующей рациональные значения режимных параметров главных механизмов для конкретных горнотехнических условий эксплуатации.

**Выводы.** Интеллектуальное управление приводами главных механизмов карьерного экскаватора позволит обеспечить координацию движений главных механизмов в процессе экскавации горных пород, снизить уровень противодействия главных и исключить резкие изменения рабочих усилий.

В конечном счете, цифровая система управления приводами главных механизмов карьерного экскаватора может служить основой для создания автоматизированной системы управления.

**Список литературы:** 1. Владимиров Д. Я. Интеллектуальный карьер: эволюция или революция? // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. Отдельный выпуск. № 45-1. С. 77-82. 2. Воронов Ю. Е. Решение задачи оптимизации параметров карьерных одноковшовых экскаваторов / Ю. Е. Воронов, П. А. Зыков // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 8. С. 12-15. 3. Гафурьянов Р. Г., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. Моделирование рабочего процесса карьерных экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 6. С. 40 – 45. 4. Кузнецов А. Л. Карьерные экскаваторы ПАО «Уралмашзавод» – настоящее и будущее российской горнодобывающей промышленности / А. Л. Кузнецов, К. Ю. Анистратов // Уголь. 2016. № 8. С. 77 – 81. 5. Лагунова Ю. А., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. и др. Горные машины. Энциклопедия. Т. IV-24. М.: Машиностроение, 2011. 493 с. 6. Малафеев С. И., Малафеев С. С., Серебренников Н. А. Компьютерное моделирование мехатронных систем одноковшовых экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 5. С. 24-29. 7. Малафеев С. И., Тихонов Ю. В. Компоненты интеллектуального управления для карьерных экскаваторов // Автоматизация в промышленности. 2013. № 10. С. 33-37. 8. Певзнер Л. Д., Бабаков С. Е. Управление операцией черпания карьерного экскаватора-мехлопаты с применением нечеткой логики // Уголь. 2012. № 8. С. 64 – 65. 9. Повышение качества управления одноковшовыми экскаваторами на основе мультиагентного подхода / А. В. Дружинин [и др.] // Новые огнеупоры. 2016. № 3. С. 11 – 12. 10. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров: учеб. для вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Майнинг Медиа Групп, 2013. 593 с. 11. Савченко А. Я. Совершенствование методологии оценки качества высокопроизводительного экскавационного оборудования большой единичной мощности на этапе эксплуатации // Горные машины и автоматика. 2001. № 1. С. 4 – 6. 12. Тихонов Ю. В. Разработка программного комплекса для интеллектуального экскаватора / XXXIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения». Научные труды международной молодежной научной конференции в 8-ми т. Т. 1. М.: МАТИ, 2013. С. 179-180. 13. Bender F. A., Sawodny O. A. Predictive Driver Model for the Virtual Excavator // The 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), 2014, pp. 187-192. 14. Berns K., Proetzsch M., Schmidt D., Simulation and control of an autonomous bucket excavator for landscaping tasks // in Proceedings of the IEEE ICRA, Anchorage, Alaska, USA, May 3-8, 2010, pp. 5108-5113. 15. Le Q. H., Jeong Y. M., Nguyen C. T., Yang S. Y. Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic // Journal of Drive and Control. 2013. Vol. 10 Iss. 1. P. 29-36. 16. Lee B., Kim H. J. Trajectory Generation for an Automated Excavator // Proceedings of the 14 International Conference on Control, Automation and Systems (Iccas'14). – Seoul, 2014. P. 716-719. 17. Liu J. Integrated mechanical and electrohydraulic system modeling and virtual reality simulation technology of a virtual robotic excavator // Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. IEEE 10th International Conference, 2009. pp. 797-802. 18. Tao N. A Low-cost Solution for Excavator Simulation with a Realistic Visual Effect // IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics, 2008, pp. 889-894.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВЫЗОВ: ПАРТНЕРЫ, СОПЕРНИКИ ИЛИ ПРОТИВНИКИ

Кондуров Е.П., Кругликов П.А., Сухоруков Ю.Г. (ОАО «НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова, Санкт-Петербург, Россия)  
Тел./Факс: +79215720039; E-mail: [pak47@mail.ru](mailto:pak47@mail.ru)

**Abstract:** The structure of the energy production of the leading countries in the total world electricity production and the specific electricity generation per 1 inhabitant are considered. The urgency of the development of renewable energy sources in the Russian Federation is shown. The political component in the development of energy production in various countries is revealed. The state and prospects of the gas industry in the Russian world are considered.

**Key words:** Thermal and nuclear power plants, renewable energy sources, hydroelectric power plants, installed capacity utilization factor, global gas market

Вся цивилизация, созданная человечеством к началу XXI века, базируется на энергетических и электрических технологиях и возможностях их транспортировки. На этом базируются разнообразные производственные комплексы и производства, добыча полезных ископаемых, комфортное обеспечение быта и жизнедеятельности, связь, интернет, транспорт и коммуникации.

Если отвлечься от философски-филологических упражнений о суверенности всех государственных образований, равноправии и независимости наций и народов, то можно выделить лидеров в обеспечении планеты энергоресурсами и энергоисточниками, в производстве так необходимой человечеству электроэнергии.

К таким лидерам мы отнесем Китай, США, Индию, Россию и Японию, которые являются самыми крупными производителями электроэнергии в абсолютном выражении в млрд. кВт-час в год, что в сумме составляет около 60% мирового производства.

Попробуем проанализировать состояние и структуру энергетики в каждой из этих стран.

В таблице 1 приведены установленная мощность энергоисточников по странам и количество произведенной электроэнергии на 2021 г. [1]

Таблица 1. Установленная мощность энергоисточников по странам и количество произведенной электроэнергии на 2021 г.

Показатель	Производитель	Суммарно в мире	Китай	США	Индия	Россия	Япония
Установленная мощность	ГВт	7172	1962	1212	396	247	317
	%	100	27,3	16,9	5,5	3,5	4,4
Производство электроэнергии	Млрд. кВт-час	26615	7779	4060	1598	1115	902
	%	100	29	15,3	6	4,2	3,4

Целесообразно при оценке этого производства учитывать население страны и соответствующую удельную выработку эл. энергии на одного жителя.

Эти данные представлены в таблице 2. Данные, представленные в таблице 2 несколько меняют представление о лидерстве в энергетической отрасли. При этом необходимо иметь в виду, что энергетика является направлением важнейшей для любого государства, обеспечивая не только его промышленное развитие и экономическую стабильность, но и стратегическую безопасность.

Таблица 2. Население страны и соответствующая удельную выработку эл. энергии на одного жителя

Страна	Мир	Китай	США	Индия	Россия	Япония
Численность в млн. чел.	7723	1440	331,4	1382,0	146,7	126
Выработка эл. энергии МВт-час на 1 жителя в год	3,44	5,4	12,2	1,15	7,6	7,16

Анализируя и обобщая данные, приведенные в источниках [1], [2], [3], [5], [7], [9] можно представить объем и структуру генерации электроэнергии в странах-лидерах. В таблицах 3-6 представлены данные по этому показателю для основных источников электрогенерации: тепловых станций, атомных, гидроэлектростанций и возобновляемых источников (ветер, солнце, геотермика).

Таблица 3. Общие и удельные показатели производства электроэнергии на ТЭС (уголь, газ, нефть) по ведущим странам

Страна	Китай	США	Индия	Россия	Япония
Показатель					
Установленная мощность, ГВт	1195	820,4	236	163,1	158
Выработка эл. энергии годовая, млрд. кВт-час	5531	2515	1260	676,9	664,2
% от общей выработки в стране	71	62	78,9	60,7	73,6
Выработка эл. энергии на ТЭС на 1 жителя, МВт-час/год	3,84	7,58	0,91	4,61	4,92

Таблица 4. Общие и удельные показатели производства электроэнергии на АЭС по ведущим странам

Страна	Китай	США	Индия	Россия	Япония
Показатель					
Установленная мощность, ГВт	47,5	102	7,0	29,6	33,1
Выработка эл. энергии годовая, млрд. кВт-час	319	823	43	223	39,5
% от общей выработки в стране	4	20,3	2,7	20	4,4
Выработка эл. энергии на АЭС на 1 жителя, МВт-час/год	0,22	2,48	0,03	1,51	0,31

Таблица 5. Общие и удельные показатели производства электроэнергии на ГЭС по ведущим странам

Страна	Китай	США	Индия	Россия	Япония
Показатель					
Установленная мощность, ГВт	346,6	102	47	49,9	49,2
Выработка эл. энергии годовая, млрд. кВт-час	1384,5	204	160	209,2	84,6
% от общей выработки в стране	18	5	10	18,8	9,5
Выработка эл. энергии на ГЭС на 1 жителя, МВт-час/год	0,96	0,61	0,12	1,43	0,67

Таблица 5. Общие и удельные показатели производства электроэнергии на ВИЭ (ветер, солнце, геотермика) без ГЭС по ведущим странам

Показатель \ Страна	Китай	США	Индия	Россия	Япония
Установленная мощность, ГВт	372,2	185,6	106	4	76
Выработка эл. энергии годовая, млрд. кВт-час	544,5	518	135	6	112,3
% от общей выработки в стране	7	12,7	8,4	0,5	12,5
Выработка эл. энергии на 1 жителя, МВт-час/год	0,38	1,56	0,1	0.04	0.89

Основные выводы, которые следуют из составленных таблиц сводятся к следующему. У всех стран-лидеров подавляющая часть выработки электроэнергии производится с помощью ископаемых источников энергии: уголь, газ, нефть. Доля этого производства варьируется от 61 до 79%. Несомненными лидерами по развитию атомной энергетики и производству электроэнергии на АЭС являются США и Россия (20% от общего производства в каждой из стран). По развитию гидроэнергетики несомненными лидерами являются Россия и Китай. В развитии ВИЭ лидируют США и Япония, которые более 12% электроэнергии производят на этих источниках, а в аутсайдерах развития этого вида электрогенерации находится Россия.

Входя в первую пятерку стран мира по суммарному производству электроэнергии Россия занимает 2-ое место по производству электроэнергии на 1 жителя, уступая только США. При этом несмотря на то, что около 61% производимой в РФ электроэнергии производится из органического сырья, она занимает по этому показателю в пятерке рассматриваемых последнее место. Более того, российская топливно-энергетического баланса одна из самых «зеленых», т.к. на угле вырабатывается примерно 15% электроэнергии. В Китае этот показатель около 70%, в США около 40%.

По данным на 2018 г. доля стран в мировой угольной генерации составляла: Китай – 47%, США - 14%, Индия – 11%, Россия - 2%.

Одной из наиболее бурно развивающихся технологий электроэнергетики на сегодня являются ВИЭ. В то же время их развитие порождает зачастую и ряд нерешаемых вопросов. Для России одной из очевидных причин отставания в развитии этого направления является географическое и климатологическое расположение.

Применительно к развитию энергоустановок на возобновляемых источниках энергии, таких как ветровая и солнечная, чрезвычайно важна возможность регулярного использования этих источников или же создание мощных аккумулирующих установок при периодическом использовании этих источников.

Важным показателем эффективности энергоустановок является коэффициент использования установленной мощности.

Так по данным Управления EIA (Управление энергетической информации США) этот коэффициент на 2018г. составлял для АЭС – 90%; ТЭС на угле - 84%; ТЭС на газе – 42,5%; объекты ветроэнергетики (ВЭС) – 34%; солнечные электростанции (СЭС) – 25%; геотермальные электростанции – 92% [3].

Для станций с ВИЭ ограничением КИУМ является неравномерность и нерегулярность источника (ветра, солнца). В РФ в последние годы КИУМ ВЭС находится на уровне 18%, а СЭС – 14%. При этом КИУМ российских ТЭС был на уровне 47%, а АЭС – 82% [8]. Успешным внедрение ВИЭ может быть только при учете индивидуальных климатических особенностей страны. КИУМ ВИЭ в России значительно ниже, чем во многих зарубежных странах и соответственно стоимость электроэнергии на отечественных

ВИЭ кратно выше. Использование нестабильных источников энергии диктует необходимость дополнительных затрат на повышение надежности энергосистемы, резервирования мощностей, создания систем аккумуляции. Во многих странах ВИЭ по сути выведены из-под действия законов рыночной экономики, что создает иллюзию их низкой стоимости. Вводятся дополнительные стимуляторы для развития ВИЭ. Их субсидирование идет через специнвестконтракты, налоговые льготы и льготные банковские кредиты. Введение штрафов за выбросы CO<sub>2</sub> также способствуют более широкому пропагандированию и внедрению ВИЭ. При том, что тарифы на электроэнергию ВИЭ в РФ в 2-3 раза превышают тарифы энергосистемы, лоббируется внедрение 2 этапа поддержки зеленой энергетики с 2025 по 2035 гг. [9].

Несомненно, существует и политическая составляющая в тенденции к усилению роли ВИЭ и осуждению использования минерально-сырьевых источников энергии, а точнее стран имеющих и использующих эти источники, прежде всего – РФ. На это же направлена и политика введения санкций на РФ по экспорту ископаемого сырья для электростанций.

Характерной иллюстрацией роли сырьевых ресурсов в жизни современного общества служит состояние газовой отрасли, которую трудно переоценить. Общий объем природного газа в мировом энергетическом балансе с учетом различных оценок составляет не менее 25%.

Роль РФ в газовом мировом рынке очень значительна.

Основные преимущества газа по сравнению с другими ископаемыми видами топлива состоят в его экологичности, а также широкими возможностями применения: производство электрической и тепловой энергии, использование в металлургии и химической промышленности, производство удобрений, использование как газомоторное топливо. Запасы газа распространены практически по всему миру, хотя и неравномерно. Цифры, приводимые ниже в таблицах, могут несколько отличаться по приводимым в разных источниках, что объясняется анализом проводимым различными организациями по разным методикам, а также прогнозными оценками претерпевающими постоянные обновления [1], [6], [10].

В таблице 6 приведены ориентировочные данные по странам на 2021 год.

Таблица 6. Запасы и добыча газа по некоторым странам

Показатель Страна	Запасы газа, трлн. м <sup>3</sup>	Добыча газа, млрд. м <sup>3</sup>
Россия	47,8	649.1
Иран	34	253.7
Катар	23,8	184,8
США	13,1	948,4*
Китай	6.6	187,3

\* В США более 40% добычи газа приходится на нетрадиционные источники: сланцевый газ и метан угольных пластов. Технология добычи и очистки сланцевого газа подразумевает гораздо большие затраты по сравнению с традиционным газом и более тяжелые экологические последствия.

Представляют интерес по странам лидерам экспортерам газа и импортерам на 2020 г.

Таблица 8. Основные страны экспортеры газа млрд. м<sup>3</sup>/год

Россия	США	Катар	Норвегия	Австралия
199,9	149,5	143,7	112,9	102,5

Таблица 9. Основные страны импортеры газа млрд. м<sup>3</sup>/год

Германия	Китай	Япония	США	Италия
155	138	107	72,2	66.2

В таблице 10 приведены основные поставки российского газа в страны Западной Европы в млрд. м<sup>3</sup>/год

Таблица 10. Основные поставки российского газа в страны Западной Европы в млрд. м<sup>3</sup>/год

Германия	Италия	Турция	Австрия	Франция
45,8	20,8	16.4	13,2	12.4

По различным причинам экспорт газа в Европу имеет тенденцию к сокращению. Не последнюю роль в этом играют причины политические.

#### Выводы

1. Пять стран-лидеров по производству электроэнергии необходимой человечеству для выживания и развития обеспечивают около 60% мирового производства. При этом по годовой выработке электроэнергии на 1 жителя, среди указанных стран-лидеров, Россия занимает второе место.

2. У всех стран-лидеров производство электроэнергии от ископаемых источников варьируется от 61 до 79%, при этом наименьшее значение по этому показателю у России. Одновременно Россия занимает первое место среди стран-лидеров по доле производства электроэнергии от гидроисточников и делит 1-2 места с США по доле производства от АЭС.

3. Серьезное отставание России в развитии энергопроизводства от ВИЭ диктуется объективными и субъективными факторами. К объективным относятся климатические условия, географическое расположение страны, отсутствие в мировой практике мощных аккумуляционных систем электроэнергии, высокая стоимость электроэнергии на отечественных ВИЭ. К субъективным факторам развития ВИЭ в ряде стран относятся введение дополнительных стимуляторов, налоговых льгот и льготных банковских кредитов, штрафов за выбросы CO<sub>2</sub>.

4. Усиливается политическая составляющая давления на Россию, сводящаяся к введению санкций на экспорт сырьевых энергоисточников и критике их использования для производства электроэнергии.

5. Россия является мировым лидером по разведанным запасам, добыче природного газа и его экспорту. При том, что газовая отрасль является одной из наиболее экологичных и важнейшей по спектру применения этого сырья, продолжается политическое давление на РФ с целью минимизации российского экспорта

**Список литературы:** 1. Statistical Review of World Energy 2020-2021. 2. Энергетика в России и в мире info.peretok.ru. 3. США: экономика и энергетика «Энергохозяйство за рубежом», № 2, 2021. 4. Electricity sector in India/en.wikipedia.org. 5. EES EAEC.org/elektroenergeticeskij kompleks. 6. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году. Сайт АО «СО ЕЭС» [www.soups.ru](http://www.soups.ru). 7. EES EAEC Мировое энергетическое хозяйство/eeseaes.org. 8. О неизбежности разнообразия энергетических технологий в XXI веке. Кругликов П.А., Сухоруков Ю.Г. «Энергия: экономика, техника, экология», № 12, 2021г. 9. Big power News 09.10;30.10; 13.12.2018 URL: [www.proatom.ru](http://www.proatom.ru). 10. Нефтегазовый комплекс России и мира. Состояние и перспективы развития. Neftegaz.ru, № 6, 2021.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Костенко А.В., Пожидаева Л.А., Аликина А.Д.  
(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)  
Тел.: +7 984 163 74 36; E-mail: andr13kost@list.ru

**Abstract:** The possibility of applying the model of deformation of a beam on an elastic foundation with two bed coefficients (Pasternak model) is considered and substantiated in relation to the calculation of the stress-strain state of functionally oriented coatings.

**Keywords:** functionally oriented coating, stress-strain state, Pasternak model, modeling, bed coefficient.

Одним из путей решения проблемы создания агрегатов на основе принципа единого или кратного ресурса его составляющих является реализация в поверхностном слое изделия необходимых параметров качества. Это возможно путем создания функционально-ориентированных покрытий (ФОП).

Для более эффективного решения задачи по нанесению покрытия, которое бы учитывало условия эксплуатации, требования к ресурсу, следует использовать различные методы моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) ФОП, с учетом его взаимодействия с поверхностью детали.

Разработка альтернативных методов расчета на основе аналитических моделей не только не утратила, но и приобрела дополнительную актуальность. Так, создание математической модели взаимодействия ФОП с поверхностью детали позволит определять необходимые параметры покрытия с учетом действия эксплуатационных функций, а также, на ее основе, определение схем технологических воздействий (ТВ).

Представляет интерес использования модели деформирования балки на упругом основании с двумя коэффициентами постели (модель Пастернака). Особенностью модели Пастернака является то, что помимо реакции со стороны упругого основания на вертикальное перемещение учитывается также реакция на угол поворота. А, принимая во внимание, что слой ФОП совместно деформируется с основанием, модель Пастернака дает более объективную возможность применения балочной модели к анализу НДС слоев покрытия. Таким образом, будем рассматривать слой покрытия, нанесенного на основу, как балку на упругом основании с двумя коэффициентами постели.

Предложенный метод расчета является простым и эффективным инструментом анализа НДС ФОП, однако для широкого его применения требуются дополнительные исследования для проверки адекватности результатов расчета и уточнению коэффициентов постели. Модель позволяет определять НДС слоя покрытия в зависимости от вида действующей нагрузки и разных граничных условий. Таким образом, моделируется изменение интенсивности НДС по всей поверхности рассматриваемого элемента, что является основанием для выделения функциональных элементов деталей при делении ее на элементы по глубине технологии и назначения схем ТВ.

**Список литературы. 1.** Костенко А.В. Принцип единого ресурса при проектировании и производстве деталей судовых дизелей / А.В. Костенко, А.Н. Полетайкин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2018. – №4 (63). – С. 43-48. **2.** Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. **3.** Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П.Л. Пастернак. – М. : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1954. – 56 с.

## СИСТЕМА ТОРМОЖЕНИЯ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ

Красильников Д.В., Ян А. Игнаткина Е.Л.  
(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)  
Тел.: +7 908 495 39 16; E-mail: sel\_post@mai.ru

**Abstract:** A simplified diagram of the braking system of a mine suspension monorail is presented and described. It is concluded that it is necessary to create brake devices of a new technical level to expand the scope of suspended monorails.

**Key words:** braking system, braking device, braking efficiency, monorail, brake pads, environment, overhead monorail

В связи с постоянно повышающимися требованиями к эффективности управления и безопасности эксплуатации шахтной подвесной монорельсовой дороги (ШПМД), существует необходимость совершенствования тормозных устройств и систем. От обоснованности их параметров во многом зависит производительность и экономичность эксплуатации.

Тормозное устройство, предназначенное для оперативного управления ШПМД, является важным элементом. В общем случае тормозное устройство позволяет изменять скорость движения подвижного состава, останавливать и удерживать его на уклоне монорельсового пути. Конструкция тормозных устройств для ШПМД и их условия эксплуатации имеют ряд существенных отличий от других горнотранспортных и грузоподъемных машин.

В общем случае работа системы торможения связана с гашением кинетической энергии или переходом ее в другой вид в результате воздействия различных возмущений, внутренних и внешних сил.

Упрощенно тормозную систему можно представить в виде схемы, показанной на рис. 1.

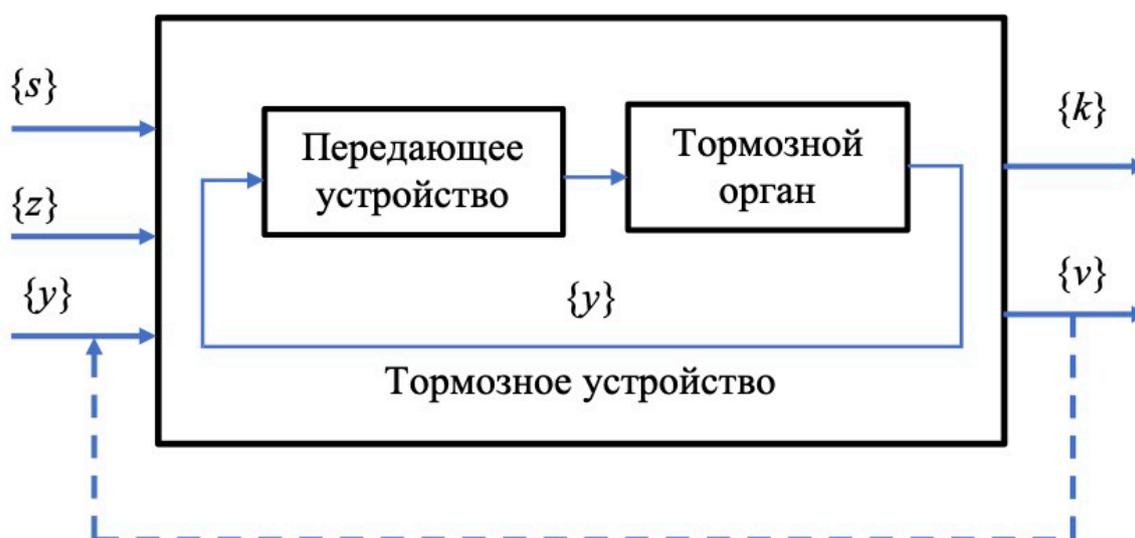


Рис. 1. Упрощенная схема тормозной системы

На схеме обозначены  $\{z\} = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$  – возмущающие воздействия, вызванные наличием внешней среды, действием температуры и влажностью окружающей среды, а также случайными воздействиями от внешней среды;  $\{s\} = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$  – воздействия, вызванные уклоном и неровностями монорельсового пути, инерционностью подвижного состава и других элементов ШПМД;  $\{y\} = \{y_1, y_2, \dots, y_j\}$  – входные управляющие воздействия, связанные с изменением режима движения ШПМД;  $\{k\} = \{k_1, k_2, \dots, k_l\}$  – выходные параметры, воздействующие на окружающую среду и элементы ШПМД;  $\{v\} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – выходные параметры, характеризующие процесс торможения.

При этом обратная связь между выходными параметрами  $\{v\}$  и входными управляющими воздействиями  $\{y\}$  обуславливает возможность действия на группу входных воздействий  $\{s\}$  и  $\{y\}$ .

По способу реализации тормозной силы можно выделить устройства, которые используют в качестве тормозного органа:

- ходовые или приводные колеса путем приложения к ним тормозного момента (частично или в полной мере);
- фрикционные тормозные колодки, прижимаемые к монорельсу;
- электромагнитные устройства, взаимодействующие с монорельсом или приводными колесами.

Для расширения области применения подвесных монорельсовых дорог требуется создание тормозных устройств нового технического уровня, работа которых не связана с дополнительно формирующимися динамическими нагрузками в сцепках тележек во время остановки подвижного состава и передающихся на монорельсовый путь и крепь горной выработки.

**Список литературы:** 1. Исаков, В.С. Инерционные тормозные устройства на основе замкнутых кинематических контуров / В. С. Исаков // – Ростов на Дону: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки». – 2005. –140 с. 2. Игнаткина, Е.Л. Проблемы и направления совершенствования тормозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог / Е. Л. Игнаткина // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XXIV международной научно-технической конференции 11-17 сентября 2017 г. – Донецк : ДонНТУ, 2017. – С. 118-121. 3. 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. 4. Гутаревич, В. О. Динамика шахтных подвесных монорельсовых дорог [Текст] : монография / В. О. Гутаревич. – Донецк : ЛАНДОН-XXI, 2014. – 205 с. 5. Игнаткина Е.Л. Обоснование параметров и совершенствование тормозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог [Текст]: диссертация / Е.Л. Игнаткина – Донецк:ДонНТУ, 2022 – 150 с.

# СОДЕРЖАНИЕ ГИДРОКСИЛА В РЕАКТИВНЫХ ВЫБРОСАХ СОВРЕМЕННЫХ ЖИДКОТОПЛИВНЫХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ: УТОЧНЕННАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Ладоса 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:** Improved scientific estimation for rocket-produced ozone hole characteristics is performed. New approach is purposed at modern rocket carriers. Computer experiments enable to evaluate all important ozone hole parameters quite rigorously.

**Key words:** liquid fuel rocket carriers, ozone hole characteristics.

Гидроксил-радикал и оксид азота – малые составляющие в продуктах сгорания жидких ракетных топлив – являются важным антропогенным фактором в разрушении стратосферного озона. Предшествующие теоретические оценки размера и времени существования озоновых дыр [1-2] выполнялись применительно к ракетам-носителям (РН), составлявшим основную часть космического парка в прошлые десятилетия. Однако передел мирового рынка космических запусков и существенное изменение парка основных РН требуют определенной коррекции этих оценок. Поэтому целью данного исследования является сравнительный анализ озоновой экологичности современных средств космического извоза.

Динамика запусков тяжелых орбитальных и различных трансорбитальных космических аппаратов (КА) за последние два десятилетия показана на рис. 1.

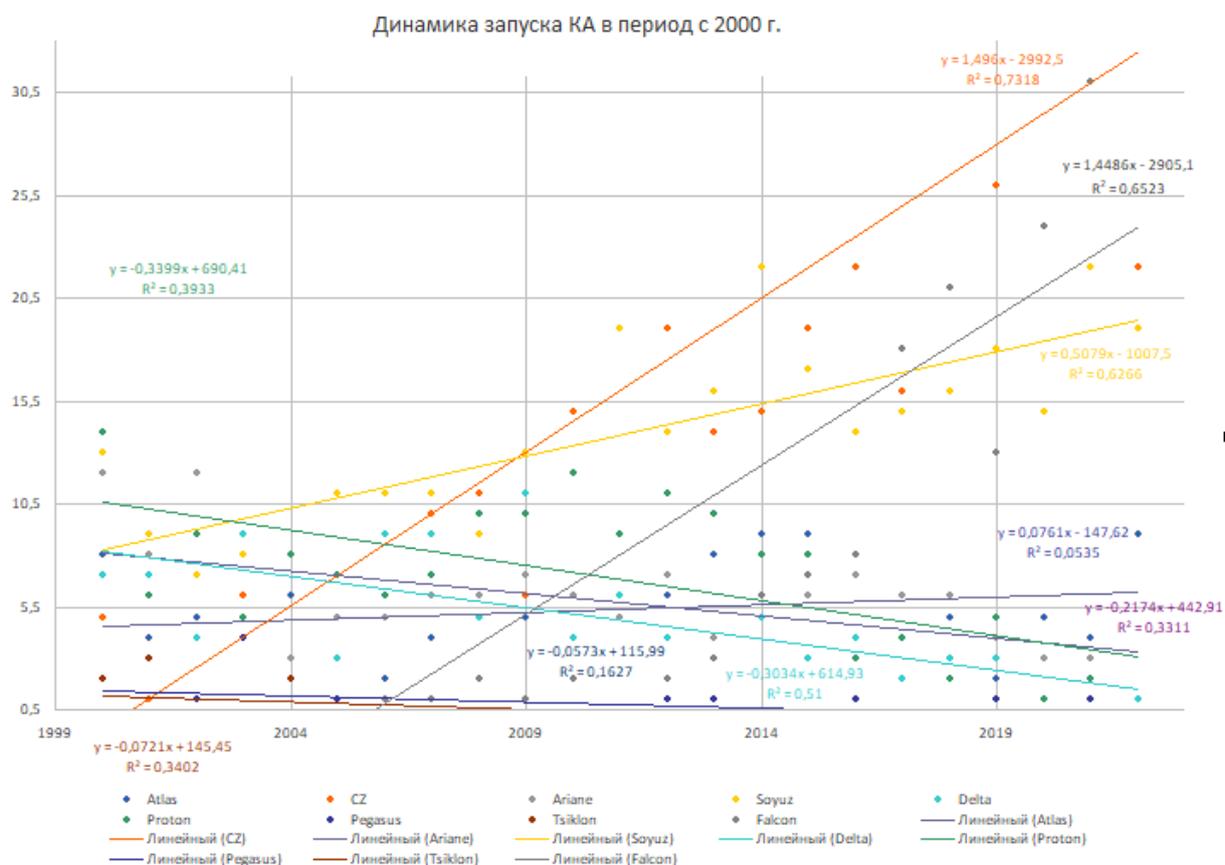


Рис. 1. Динамика запуска различных РН в два последние десятилетия

Предполагая тренды использования различных типов РН для запуска КА линейными, можно определить (рис. 1), что опережающими темпами растет использование РН типа CZ и Falcon (+1.5 запуска в год каждый), которые вытесняют с рынка «космического извоза» отечественный Союз (годовой прирост составляет +1/2 запуска) и прочие изделия (их совокупное использование сокращается на одну единицу в год).

В контексте нашей цели важными показателями РН являются их массовые, энергетические, расходные, а также собственно химические – т.е. используемое топливо, окислитель и их количественное соотношение. Соответствующие данные, полученные из открытых источников, приведены в табл. 1. Недоступные значения здесь восполнены оценками и помечены звездочкой.

Таблица 1. Технические характеристики современных РН, важные для оценки озоновой экологичности

РН Параметр	<i>Atlas V</i>	<i>C Z</i>	<i>Союз VI</i>	<i>Циклон III</i>	<i>Falcon IX</i>	<i>Протон M</i>
<i>M</i> , т	390	850	307	260	550	700
<i>M</i> <sub>1</sub> , т	183	590	159	140*	409	430
Топливо	керосин	керосин	керосин	керосин	керосин	гепти
Окислитель	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	амил
τ <sub>1</sub> , с	184	173	140	170*	162	121
Окислитель / Топливо	73/27	2.5*	2.47	2.5*	2.5*	2.6
Расход, кг/с	1000	3400	1140	820	2520	3560
<i>P</i> , атм	250	60 - 250*	60	60 - 250*	97	169

Как видно из представленных в табл. 1 данных, большинство современных РН используют в качестве топлива керосин с условной формулой C<sub>7</sub>H<sub>13</sub> и жидкий кислород. При этом соотношение окислитель – топливо близко к 2.5, давление в камере сгорания ограничивается диапазоном 60 – 250 атм., а секундный расход компонентов топлива (и соответственно продуктов сгорания) заключен в пределах 800 – 3500 кг/с. Исключение составляет устаревшая РН «Протон», озон-токсические характеристики которой ранее оценивались в работах [2-3]. Особенностью последней является загрязнение озоносферы сразу двумя параллельно действующими разрушителями O<sub>3</sub> – радикалами OH и NO.

Согласно [2,3] расчет погонной плотности [ОН](*H*) в реактивном следе РН (*H* – высота) базируется на модели разгонной динамики и методике расчета равновесного состава продуктов сгорания [3]. Последняя может состоять как в решении системы уравнений материального баланса, содержащей константы равновесия для химических реакций между учитываемыми веществами, так и в минимизации термохимического потенциала [3] методами математического программирования [4].

Ключевым моментом в расчетах химических равновесий обоими возможными способами является выбор адекватного «химического базиса» – набора учитываемых в модели веществ [5]. Анализ термохимических показателей участвующих в горении ракетных топлив веществ позволяет остановиться на следующем составе продуктов реакции: CO – O – CO<sub>2</sub> – O<sub>2</sub> – **ОН** – H – H<sub>2</sub>O – H<sub>2</sub> – C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, среди которых разрушитель озона, выделенный жирным шрифтом.

Соответственно первичное термохимическое возмущение озоносферы реактивным выбросом РН описывается уравнениями:

$$v(H) \approx 0.025 \cdot (H + 10000), \quad (1)$$

$$r_{ini}(H, \dot{m}_1) \approx 0.1 \sqrt{2.7 - 2.8 \cdot 10^{-5} H} e^{H/16000} \sqrt{\dot{m}_1}, \quad (2)$$

$$\Delta c/c(H) \approx \Delta \rho/\rho(H) \approx 45.8 \cdot 10^6 / [(9.8 \cdot 10^4 - H)(H + 10000)] - \text{уплотнение}, \quad (3)$$

$$\Delta c_{i,H}/c(H) \approx 1.15 \cdot 10^9 / [\mu_i (9.8 \cdot 10^4 - H)(H + 10000)] - \text{химическое возмущение}, \quad (4)$$

$$\Delta T_H/T_H(H) \approx (9.8 \cdot 10^4 - H)/(H + 10000) - \text{степень нагрева}, \quad (5)$$

$$G(P, T) = \sum_j e^{c_j} [g_j(T) + RT \ln(\frac{e^{c_j}}{\sum_j e^{c_j}} \cdot P)] \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$g_j(T) = H_j(T_0) + C_{p,j}(T - T_0) - C_{p,j} T_0 \ln \frac{T}{T_0} - S_j(T - T_0), \quad (7)$$

$$n_j = e^{c_j}, \quad \sum_j n_j = \sum_j e^{c_j} = n, \quad (8)$$

$$j = \{CO, O, CO_2, O_2, OH, H, H_2O, H_2, C_2H_2\}, \quad (8)$$

$$\alpha n = \beta. \quad (9)$$

В этих формулах  $r_{ini}$  – начальный радиус следа;  $H$  – высота;  $\dot{m}_1$  – секундный расход горючего;  $g_j(T)$  – термодинамический потенциал  $j$ -го вещества,  $H_j(T_0)$  – энтальпия его образования в стандартных условиях (298 К);  $C_{p,j}$  и  $S_j$  – молярные теплоемкость и энтропия;  $n_j$  – молярная концентрация;  $c_j$  – исключительная отрицательность концентрации переменная;  $\alpha$  – матрица содержания составляющих вещества элементов (углерода С, и водорода Н) в компонентах смеси;  $\beta$  – вектор количества химических элементов, из которых состоят рассматриваемые вещества. В расчетах использовались числовые параметры модели (1)-(9) согласно [3].

Для проверки адекватности общего подхода, модели, точности исходных данных (коэффициентов и параметров) результаты расчетов сопоставлялись с доступными надежными данными [6]. Кроме того, учитывая, что решение подзадачи (6)-(9) должно непрерывным образом зависеть от всех фигурирующих в ней параметров, результаты вычислений проверялись на устойчивость к слабым коэффициентным и параметрическим возмущениям.

Данные работы [6] представляют собой расчетный состав продуктов сгорания и температуры при сжигании аммиака в кислороде в зависимости от соотношения  $n_O/n_H$ . Выявлено отличное согласие результатов по всем главным компонентам, если использовать одинаковый химический базис (с этой целью модель (6)-(9) дополнялась компонентами  $N_2$  и  $NO$ ). Сопоставление нашего и эталонного расчетов приведено на рис. 2. Определенное расхождение вызвано, главным образом, погрешностью оцифровки эталонных кривых. Если же использовать более подробную модель, которая включает разные окислы азота и водорода, концентрация малых составляющих оказывается ожидаемо ниже чем в модели [6]. Это объясняется тем, что ограниченное число атомов всех трех сортов теперь перераспределяется на большее число реагентов.

Также разработка тестировалась на устойчивость к возмущениям коэффициентов ( $\Delta H_i$ ,  $C_{p,i}$ ,  $S_i$ ) и условий расчета. Оказалось, что случайные вариации коэффициентов  $\Delta H_i$ ,  $C_{p,i}$ ,  $S_i$  на уровне  $\pm 1\%$  приводят к изменениям результатов  $n_i(n_O/n_H, P, T)$  на  $\pm 3\%$ , изменение давления на  $1\%$  сопровождается изменением  $n_i(n_O/n_H, P, T)$  на доли процента, а  $1\%$ -е изменение температуры – изменением расчетных концентраций не более чем на несколько процентов. Таким образом, модель и реализующие алгоритмы устойчивы к естественным параметрическим возмущениям.

Вкупе соответствие модельных расчетов надежным тестовым данными и комплексная устойчивость результатов расчетов позволяют использовать разработку для расчетов продуктов сгорания актуальных в настоящее время керосин – кислородных пар.

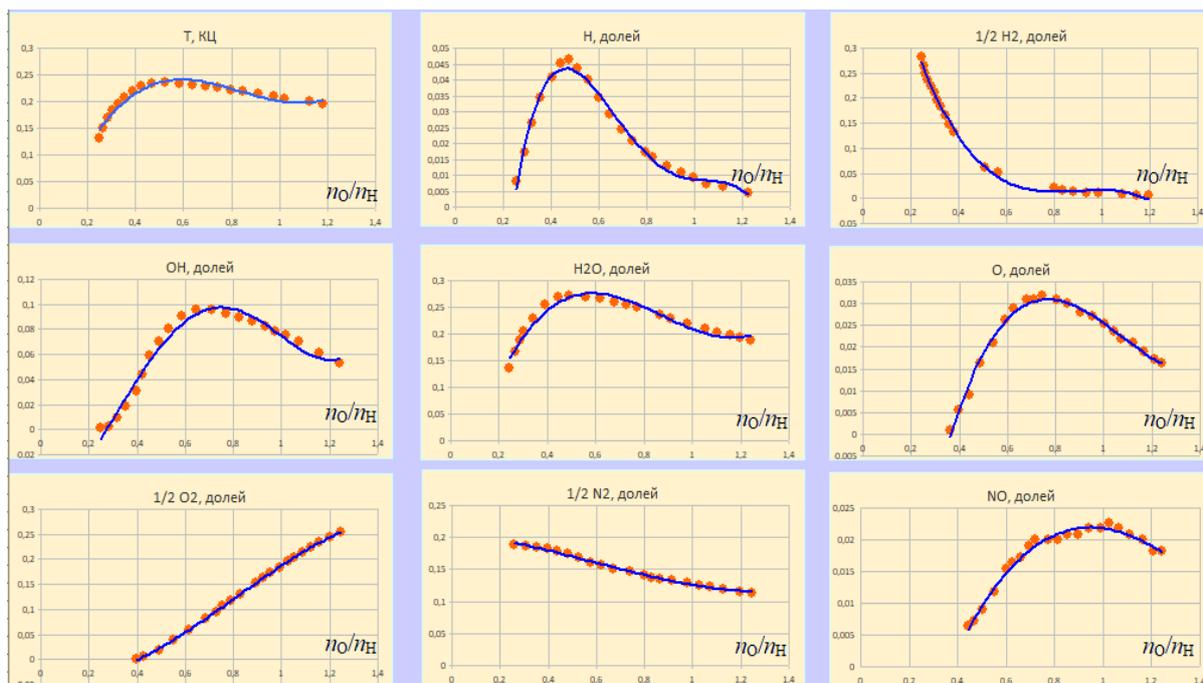


Рис. 2. Сопоставление результатов расчетов  $n_i(n_O/n_H)$  и  $T(n_O/n_H)$  согласно субмодели (6)-(9) с данными [6] при одинаковом наборе компонентов

Оценка максимального содержания радикала OH в реактивной струе производилась путем последовательных расчетов на сетке давления 50 – 100 – 150 – 200 – 250 атм и температуры 2500 – 2600 – 2700 – 2800 – 2900 – 3000 град. Ц. При этом соотношение окислитель/топливо принималось равным 2.5. Соответствующий результат показан в табл. 2 и на рис. 3. Видно, что [OH] существенно зависит от температуры и в меньшей степени от давления. Это обусловлено резкой интенсификацией диссоциации конечного продукта H<sub>2</sub>O с ростом температуры и, наоборот, замедлении при увеличении давления в камере сгорания. Содержание этого компонента в реактивном выхлопе РН особо велико при использовании двигателей с высокой температурой и малым давлением в камере сгорания.

Таблица 2. Относительная концентрация гидроксила OH в реактивном ракетном следе

Давление, атм	Температура, К					
	2500	2600	2700	2800	2900	3000
50	0,00322	0,007003	0,010827	0,016186	0,020854	0,029774
100	0,002107	0,00501	0,007887	0,011604	0,016138	0,020078
150	0,001917	0,003973	0,00661	0,009229	0,01287	0,016205
200	0,001512	0,003504	0,0059	0,00807	0,0119	0,014588
250	0,001342	0,003269	0,004763	0,007894	0,009558	0,013529

С погрешностью в несколько процентов данные расчета рис. 3 описываются формулой:

$$[\text{OH}] \approx 0.000001 \cdot (T - 2350)^{1.5} / (P/100)^{-0.5} . \quad (10)$$

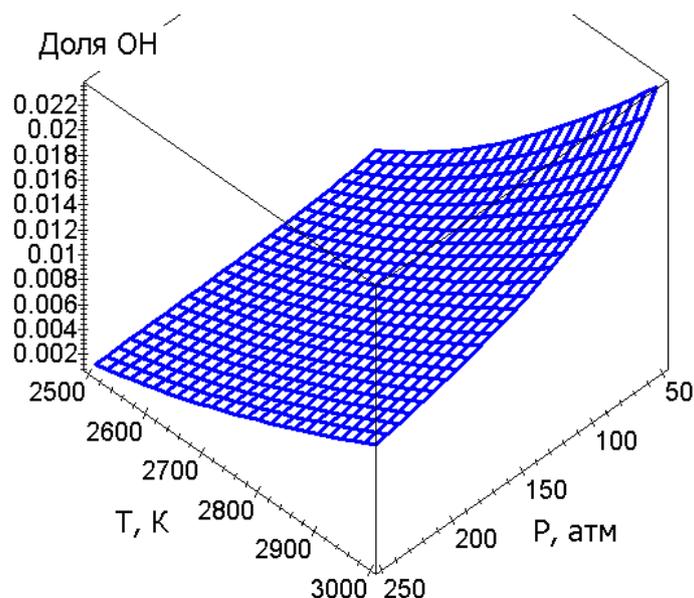


Рис. 3. Зависимость содержания гидроксила в следе керосин – кислородных РН (приведена в сглаженном методами математического программирования [4] варианте (10))

Обобщают результаты проведенных авторами компьютерных экспериментов следующие выводы: 1) реализована модель образования токсичного для озоносферы компонента ОН, принципиально позволяющая рассчитывать состав продуктов сгорания современных и перспективных жидкотопливных ракет; 2) выброс ОН сильно зависит от температуры и слабо от давления; 3) с ростом температуры в камере сгорания выход ОН увеличивается; 4) максимальное содержание ОН в струе керосин-кислородного двигателя может достигать 2 %, что более на порядок превышает сделанные ранее оценки; 5) практический интерес также представляет возможность рассчитывать состав реактивного выхлопа для прочих используемых топливных пар.

**Список литературы:** 1. Фадин И.М., Полетаев Б.И., Сидоров В.Н. Экология комоса. С.-Пб.: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2005. 280 с. 2. Яценко О.В., Ладоса Е.Н. Космическая экология: антропогенные воздействия на стратосферный озон при запусках жидкотопливных ракет-носителей (теоретические оценки, компьютерная имитация) // Инженерная экология. 2005. № 6. С. 27-45. 3. Бакулин В.Н., Ладоса Е.Н., Месхи Б.Ч. и др. Научные основы защиты озонового слоя стратосферы в условиях освоения космического пространства при помощи ракет на химическом топливе. – Ростов н/Д.: Изд-во ДГТУ, 2009. – 188 с. 4. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Математическое программирование. Теория, алгоритмы, программы. – Самара: РИЦ «Гольфстрим», 2007. – 222 с. 5. Степанов Н.Ф., Ерлыкина М.Е., Филиппов Г.Г. Методы линейной алгебры в физической химии. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 360 с. 6. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 740 с.

## РИСКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

Лапаева И.В., Горобец И.А. (МБОУ «Профильная гимназия №122 г. Донецка»,  
ГОУВПО «ДОННТУ», г. Донецк, ДНР)  
E-mail: [iren.vit@mail.ru](mailto:iren.vit@mail.ru)

**Abstract:** *The article considers the main tasks of universities in the preparation of engineering personnel. An analysis of the results of distance learning is given. The problems encountered when studying courses in remote mode are indicated. The risks that arise when conducting distance learning are described. An analysis of risks in the case of subsidence of remote trading is given. Recommendations for the training of qualified engineers in the current situation are given.*

**Key words:** *education, competence, problems, risks, analysis.*

Получение качественного инженерного образования является одним из приоритетов современного общества, ещё большую актуальность эта задача приобретает во время перехода к импортозамещению, смене технологических укладов на внутренние, в период жёсткой конкуренции и экономической конфронтации мирового сообщества [1].

Вместе с тем, согласно Федеральному государственному образовательному стандарту (ФГОС) 3++, важным является не только обучение будущего специалиста, путём передачи ему необходимого уровня знаний, но и формирование у него соответствующих универсальных и профессиональных компетенций [2], согласно формулы З-У-В (Знать – Уметь – Владеть). Последнее реализуются в способностях обучающегося правильно оценить поставленную задачу, отыскать в установленные сроки и с минимальными затратами пути решения, выполнить анализ и осуществить обоснованный выбор наилучшего решения с публичной его защитой. Сформулированные наборы компетенций, таким образом, являются поставленными задачами перед учебным заведением и обучающимся, достижению которых способствуют правильно подобранные инструменты, в качестве которых выступают изучаемые дисциплины (с их определённой продолжительностью, удельным весом в общем объёме дисциплин, структурой, распределением времени на выполнение видов учебных работ и пр.).

Однако, современные вызовы Человечеству в виде пандемии COVID-19, военных действий, природных стихий, привели в 2020 – 2022 гг. к невозможности проведения полноценного очного обучения, согласно учебным планам образовательных организаций. Для дальнейшей реализации текущего учебного процесса в образовательных учреждениях была принята стратегия применения электронного обучения с использованием дистанционных образовательных технологий (далее - дистанционное обучение) [3], способы проведения и инструменты которых изложены в [4-6]. Проанализировав результаты такой формы обучения за прошедшее время, авторы пришли к выводу о наличии как положительных, так и отрицательных сторон. К положительной стороне, безусловно, можно отнести: интенсивное овладение преподавателями, администраторами и учащимися современными ИТ-средствами (и платформами) проведения учебного процесса и администрирования текущей работы, внедрение информационных технологий в учебных заведениях, введение электронного архива, документооборота и коммуникаций вспомогательного характера (оповещения участников образовательного процесса, родителей школьников и пр.) [7].

Вместе с тем, авторами были выявлены и негативные стороны в поведении обучающихся и определённые тенденции возникновения рисков, основными из которых являются, рис.1:

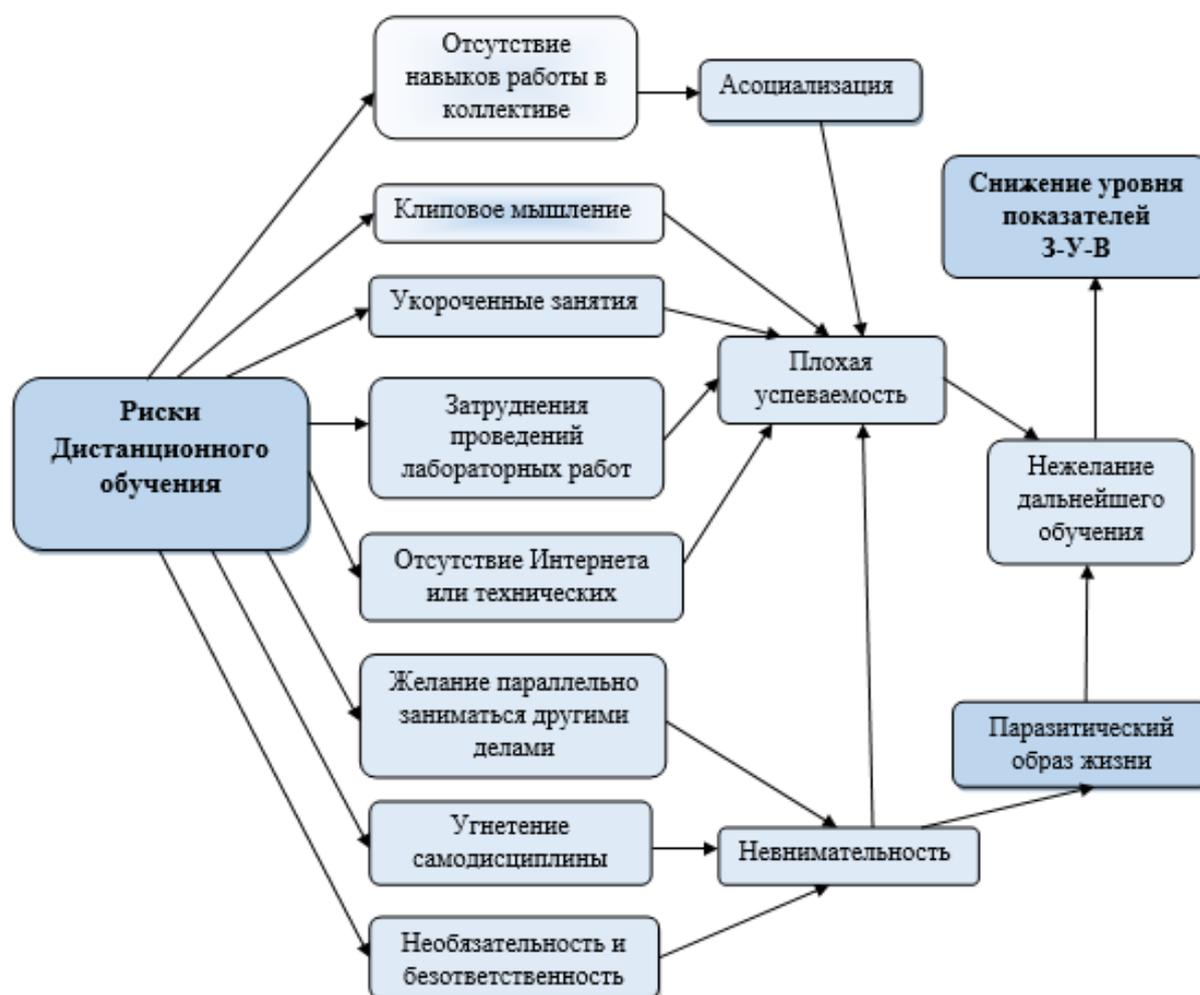


Рисунок 1 - Структура рисков электронного обучения с использованием дистанционных образовательных технологий

- Отсутствие навыков работы в коллективе. Каждый из обучаемых находится в домашних условиях и не чувствует физического присутствия коллектива обучающихся и преподавателя. Для каждого из обучающихся, ввиду особенностей психологического характера [8,9] процесс обучения и действующие лица представляются виртуальными, а не реальными физическими. В таких условиях получение навыков работы в коллективе является маловероятным. Между тем, сам характер дальнейшей работы выпускника ВУЗа на предприятии или в организации является коллективным со строгим распределением роли, регламентов, объёмов и времени выполнения порученной работы [7, 10];
- Клиповое мышление, вызванное притоком разнородной (в том числе и недостоверной) информации из телекоммуникационной среды в виде ярко подобранных картинок, видеоряда событий в форме шоу, отсутствия возможности живого общения, обсуждения событий и нахождения в физическом коллективе. Эти события превращаются в калейдоскоп разрозненных эклектических фактов и осколков

информации. Индивид привыкает к постоянной смене примитивных сообщений (зачастую не требующих размышлений и критического анализа) и требует новых. В результате появляется привыкание к такому образу жизни, усиливаются желания искать «цепляющие» заголовки, вирусные видеоролики, «чатиться» в разнообразных социальных сетях, быстро фотографироваться на фоне каких-либо новых событий, выпускать «стримы» происходящих событий, включать свои комментарии (как правило односложные), и уже не важно, что они с ошибками как орфографическими, так и смысловыми и, наконец, становится узнаваемым блогером;

- Укороченные до 50% по времени занятия в связи с рекомендациями санитарно-гигиенических норм, правил и рекомендаций [4, 11], которые не дают возможности преподавателю полностью передать необходимый материал, а обучаемому – его освоить;
- Онлайн обучение существенно затрудняет проведение лабораторных работ на материальном оборудовании, поскольку оно находится в лабораторных корпусах образовательной организации, поэтому обучаемый не чувствует физически материального оборудования, не получает соответствующих умений и навыков (в лучшем случае работа проводится на цифровых моделях – имитаторах);
- Отсутствие средств связи (Интернета) или необходимых технических средств у обучаемого полностью лишает его возможности дальнейшего обучения и сводит к нулю использование дистанционных образовательных технологий;
- Участие в онлайн обучении не позволяет преподавателю полноценно контролировать внимание и текущее/фактическое нахождение обучаемого, что приводит к соблазну учащихся заниматься параллельно другими «важными» делами. Это влияет на общую дисциплину и самодисциплину обучаемого. Появляются вольности и необязательность, отсутствие принципиальности и педантичности, что в конечном итоге может привести к неуважительному отношению к преподавателю и нивелированию его роли.

Необязательность, недисциплинированность, соблазн заниматься параллельно другими «важными» делами приводят к невнимательности обучаемого, к потере мотивации дальнейшего обучения, а в дальнейшем – к не компетенции и паразитическому образу жизни в обществе [12,13]. К этому же результату приводят и асоциализация обучаемого, клиповость мышления, плохая успеваемость в виду резкого уменьшения получаемой информации из-за ограничений во времени проведения занятий, затруднений онлайн-занятий и проведения определённой части лабораторных работ, отсутствия Интернет-связи и технических средств. Все перечисленные риски, безусловно, приводят к отсутствию достижения потребного Обществу уровня профессиональных и общих компетенций, запланированных на период обучения.

Перечисленные риски, согласно нашим исследованиям, имеют корреляцию и с появившимся диссонансом соответствия уровня подготовки абитуриентов к требованиям высших учебных заведений и современного высокотехнологического общества [4,7].

Причинами такого диссонанса являются:

- недостаточный уровень подготовки абитуриентов по фундаментальным и общеобразовательным дисциплинам (математика, физика, химия, иностранный язык);
- невысокий уровень логики обучающихся, способности обоснованного выбора вариантов решений;

- неумение последовательно и логично изложить своё мнение в устной и письменной форме;
- неумение и боязнь публичного выступления, проблемы риторики и логического мышления при построении высказываний в профессиональной среде;
- недостаточный уровень подготовки к самостоятельной работе с большими объёмами информации;
- недостаточные желания работать самостоятельно с большими объёмами информации;
- заниженная мотивация обучения;
- иждивенческие принципы поведения (желания получать регулярные подсказки, завышенные оценки, лояльность преподавателей);
- слабые знания истории, отсутствие анализа её ключевых моментов;
- недостаточный уровень общей грамотности и культуры поведения в обществе.

Последствия online-обучения при длительном использовании могут привести к нежелательным явлениям, среди которых: развивающийся «цифровой аутизм» [14], приводящий к проявлениям асоциальности индивида, правового нигилизма, неуважения к обществу, эгоизм, клиповому мышлению, проблемам воспитания и отсутствию успешности работы в коллективе.

**Выводы.** Для современного конкурентоспособного общества необходим рынок креативных высокоинтеллектуальных инженерных кадров, подготовка которых является задачей образовательной системы государства. Решение задачи лежит в дальнейшем содержательном реформировании цепочки образовательной системы: дошкольные учреждения – школа - техническое училище - университет. Этому способствуют: исключительно очное ведение аудиторных занятий; увеличение доли практикумов и семинарских занятий с обязательными публичными выступлениями обучающихся, активное использование метода коллективных проектов. Режим массового электронного обучения с использованием дистанционных образовательных технологий необходимо использовать в исключительных случаях (пандемия, военные действия, стихийные бедствия и др.) и непродолжительное время, предусмотрев возможность комбинаций с очным обучением для проведения лабораторных работ и семинарских занятий, публичных защит курсовых работ, проектов, индивидуальных, коллективных и выпускных работ. Общение преподавателя и обучающихся должно оставаться активным физическим и не превращаться в общение электронных образов.

**Список литературы:** 1. Закон об образовании ДНР № 55-ІНС от 19.06.2015, действующая редакция по состоянию на 31.03.2021 [Электронное издание] – Режим доступа: <https://dnrsovet.su/zakon-dnr-ob-obrazovanii>. 2. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 17 августа 2020 г. N 1044 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования - бакалавриат по направлению подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" [Электронное издание] – Режим доступа: [https://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Bak/150305\\_B\\_3\\_14092020.pdf](https://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Bak/150305_B_3_14092020.pdf)

3. Приказ Министерства образования и науки ДНР от 21.03.2022 № 197 "О возобновлении образовательной и научной деятельности в образовательных и научных организациях Донецкой Народной Республики". 4. Дистанционное обучение в школе. Методические рекомендации. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://yandex.ru/promo/education/distancionnoe-obuchenie-shkola-metodicheskie-rekomendacii>. 5. Лапаева, И.В. Методические аспекты использования дистанционного обучения / И.В. Лапаева, О.В. Белокрыницкая, И.А.Горобец // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-19 сентября 2021 г. – Донецк: ДОННТУ, 2021. – С. 273-278. 6. Лебедева, М.Б. Дистанционные образовательные технологии: проектирование и реализация учебных курсов / Под общ. ред. М.Б. Лебедевой. - СПб: БХВ - Петербург, 2010 - 336 с. 7. Горобец, И.А. Современные вызовы и особенности подготовки квалифицированных инженерных кадров / И.А.Горобец, И.В.Лапаева, Н.В.Голубов // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДОННТУ, 2020. – С. 86-89. 8. Немов, Р.С. Психология: Учеб. для студентов высш. пед. учеб. заведений: В 3 кн. Кн. 1. Общие основы психологии. – 3-е изд. – М.: Гуманит. изд. Центр ВЛАДОС, 1997. – 688 с. 9. Дружилов, С.А. Социально-психологические проблемы университетской интеллигенции во времена реформ: взгляд преподавателя. (Преподаватель вуза: «Дореформировались, и вот я безработный...») [Электронное издание]. – Montreal: Издат-во AccentGraphicsCommunications; Т/О "Neformat", 2015. — 241 с. 10. Горобец, И.А. Использование метода проектов и CALS – технологий для повышения эффективности обучения студентов инженерных специальностей / И.А.Горобец, И.В.Лапаева, Н.В.Голубов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XX между. науч.-тех. конф. в г. Севастополе 16 – 21 сентября 2013 г. В 3-х т. – Донецк: ДонНТУ, 2013. Т.1. – с. 162-164. 11. Безопасность цифровой среды в условиях дистанционного обучения детей до 18 лет. [Электронный ресурс] <https://express-externat.spb.ru/extern/49-2009-12-19--12-19-18-59-01/1534-bezopasnost-tsifrovoj-sredy-v-usloviyakh-distantsionnogo-obucheniya-detej-do-18-let>. 12. Ахметжанова, Г.В. Недостатки и перспективы дистанционного обучения: социологический аспект / Г.В. Ахметжанова, Т.В. Емельянова // Педагогика, психология, общество: новая реальность : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (Чебоксары, 22 янв. 2021 г.) – Чебоксары: ИД «Среда», 2021. – С. 109-113. 13. Смирнова, О. "Ненастоящее образование". Как пандемия вскрыла проблемы онлайн-обучения [Электронное издание] - Режим доступа: <https://www.bbc.com/russian/vert-cap-54027632> 14. Газзаева, Л. «Это эпидемия цифрового аутизма»: о чем доктор Курпатов и йог Садхгуру рассказали на завтракe Сбербанка в Давосе 23.01.2020г. [Электронное издание]. – Режим доступа: <https://www.forbes.ru/finansy-i-investicii/391757-eto-epidemiya-cifrovogo-autizma-o-chem-doktor-kurpatov-i-yog-sadhguru>, - АО "АС РУС МЕДИА", 2020.

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНОЙ ОСНАСТКИ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Лахин А.М., Горобец И.А., Цокур В.П., Салосин В.И.  
(ГОУВПО ДОННТУ, г. Донецк, ДНР)

**Abstract:** In article discusses the possibility of creating a 3D printing foundry technique for casting products from engineering plastic. This technology reduces costs of producing small batches of complex shapes.

**Keywords:** Casting, 3D printing, productivity

В настоящее время в машиностроении часто возникает потребность изготовления изделий малых размеров со сложной формой поверхностей, при единичных объемах выпуска. Их получение как правило, влечет за собой высокие затраты на механическую обработку или на изготовление сложной оснастки для литья или штамповки, что является причиной высокой себестоимости таких изделий и низкой экономической эффективности их производства.

Последнее десятилетие активно развивается направление аддитивных технологий производства [1], которые позволяют изготавливать любое изделие послойно на основе компьютерной 3D-модели. В отличие от традиционного производства, где в начале мы имеем заготовку, от которой отсекается все лишнее с целью придания окончательной формы, в случае с аддитивными технологиями изделие выстраивается послойно, из аморфного расходного материала. Это позволяет получать детали сколь угодно сложной конфигурации из широкого спектра расходных материалов. При этом в технологическую подготовку производства входит только создание 3D модели в CAD программе, загрузке ее в устройство печати (слайсинге) и выводе изделия на печать [3]. Благодаря данной технологии возможно изготовление изначально нетехнологичных изделий, в том числе сборных без применения сборочных операций.

Отметим некоторые преимущества данной технологии.

Улучшенные механические свойства готовой продукции для некоторых технологий печати. Благодаря послойному построению, изделия обладают уникальным набором свойств с возможностью комбинировать различные материалы.

Большая экономия сырья, что обусловлено тем, что используется только то количество материала, которое требуется для одного изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья в стружку или облой могут составлять до 80-85%.



Рис. 1. Общий вид детали каретка в цепной передаче

Возможность изготовления изделий сложной геометрической формы.

Мобильность производства и ускорение обмена данными, поскольку в основе аддитивных технологий лежит компьютерная модель будущего изделия, которую можно моментально передать и сразу начать производство.

Целью данной работы является разработка технологического обеспечения изготовления изделий общего

машиностроения на базе аддитивных технологий.

Рассмотрим технология производства детали каретка, которая используется на производственных линиях для крепления и транспортировки рамок силиконовых форм для кондитерских изделий.

Деталь «каретка» (рис.1) изначально изготовлена методом литья пластика под давлением на термопластавтомате. При этом формы для литья в термопластавтомате изготовлены путем сложной и дорогостоящей обработки на фрезерных с ЧПУ станках. Данная технология не эффективна для небольшого объема партии изделий, и экономически не выгодна.

Целесообразным является отливка деталей в силиконовые формы напечатанные на 3D принтере [2]. Благодаря эластичности силикона есть возможность свободного извлечения детали после затвердевания при сохранении цельности формы.

Этапы изготовления детали каретка с подготовкой формообразующей оснастки заключается в следующем:

1. Формирование мастер модели, формообразующей полости формы и оснастки на 3D принтере.
2. Обработка и подготовка мастер модели и формообразующей полости формы. Сборка оснасти.
3. Создание силиконовой формы.
4. Заливка пластика в силиконовую форму.

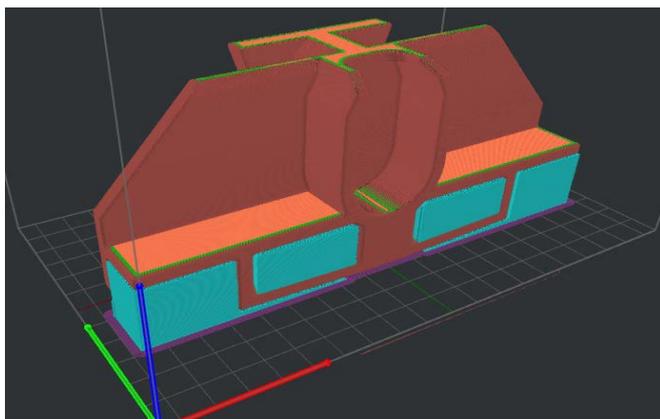


Рис. 2. Подготовленная модель к печати в слайсере

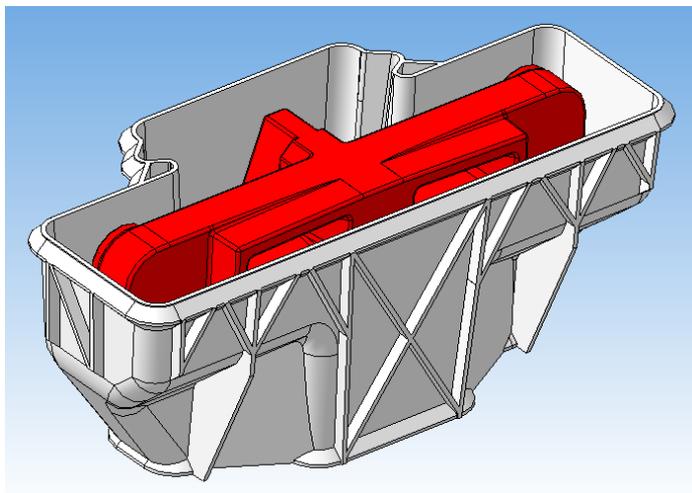


Рис. 3. Общий вид формообразующей для получения силиконовой формы

5. Постобработка отливок (удаление облоя, обработка отверстий).

Основными требованиями к мастер-модели являются, высокое качество поверхности, точность получаемых размеров (до 6 качества). При этом необходимо учитывать усадку силикона и литейного пластика. Для уменьшения расхода материала, деталь печатается с малым заполнением 20%, толщина стенки 4 мм для сопла 0,4мм, и с минимальным количеством поддержек (рис. 2). Для обеспечения низкой шероховатости после 3D печати деталь подвергается выглаживанию путем ее обработки вытравливающими растворами.

Для создания силиконовой формы необходимо изготовить формообразующую, которая определит наружные очертания силиконовой формы для заливки пластика. (рис. 3). Она должна быть тонкостенной и печататься без поддержек (для сокращения

затрат пластика при изготовлении) иметь литейные уклоны для простоты извлечения силикона. Внутренний объем формообразующей должен быть минимально допустимым, для сокращения затрат силикона при изготовлении формы. Оптимальное расстояние между моделью и формообразующей ~ 10мм. Так же, для предотвращения деформаций силиконовой формы, ее модель должна иметь достаточную жесткость предотвращающую нарушение геометрической формы отливки. Поэтому в ее конструкции предусмотрено большое количество ребер жесткости.

Ввиду требований к высокой точности позиционирования отверстий в детали каретка, их обработка выполняется традиционным методом, сверлением, по кондуктору. Для этого изготовлен шаблон в виде металлической пластины с кондукторными втулками, устанавливаемой в удерживающие элементы специальной технологической оснастки.

Для изготовления детали используется двух компонентный литейный инженерный пластик. Инженерные пластики имеют лучшие механические, термические и технологические характеристиками в отличие от других типов материалов. Во многих случаях они успешно могут заменять привычные материалы такие как керамика или металл, при этом обладая возможностью работать в широком диапазоне температур: от -80 С до +150 С. Процесс отверждения пластика занимает 8 – 10мин (рис.4).

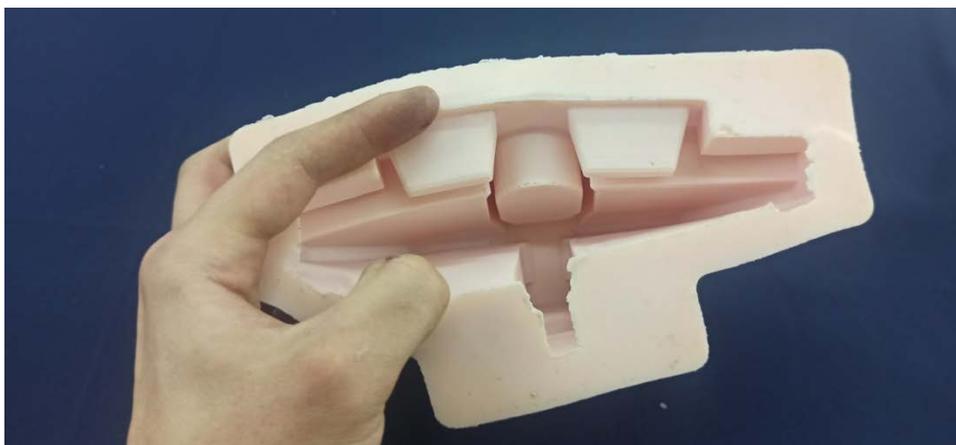


Рис. 4. Общий вид силиконовой формы для отливки детали «Каретка»

За счет контакта силиконовой формы с горячим пластиком происходит ее термический износ, поэтому в среднем такая силиконовая форма рассчитана на 25-30 отливок. Для последующего изготовления силиконовых форм могут также использовать ранее напечатанные модели формообразующей и мастер модели детали.

Таким образом предложенный способ изготовления форм для отливки моделей из инженерного пластика позволяет значительно снизить себестоимость изделий за счет исключения механической обработки элементов литейной оснастки на станках с ЧПУ и может быть использован для изготовления относительно малых партий деталей сложной формы.

**Список литературы:** 1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. «Аддитивные технологии в машиностроении», Издательство политехнического университета Санкт-Петербург 2013. 2. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 68 с. 3. Горьков Д. 3D-печать с нуля. 2015г. 400 с.

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Малашенко Т.И., Малашенко В.В. (ДонНТУ, ДонФТИ, г. Донецк,  
г. Донецк, ДНР, ДНР)  
E-mail: [malashenko@donfti.ru](mailto:malashenko@donfti.ru)

**Abstract:** *The work hardening of aged binary alloys under high loads is theoretically analyzed. The dependence of this hardening on the dislocation density is obtained. It is shown that this dependence is nonmonotonic and has a maximum.*

**Keywords:** *aged binary alloys, high strain rate deformation, Taylor ratio.*

Состаренные бинарные сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности, в частности, алюминиевые сплавы используют в качестве конструкционного материала в строительстве, ракетостроении, авиастроении. Старение сплавов является одним из эффективных способов улучшения их механических свойств. Зависимость этих свойств от плотности дислокаций при квазистатической деформации удовлетворительно описывается соотношением Тейлора, согласно которому, в частности, предел текучести металлов и сплавов пропорционален квадратному корню из плотности дислокаций [1]. Это соотношение является довольно универсальным. Однако в случае высокоскоростной деформации состаренных бинарных сплавов, содержащих зоны Гинье-Престона, ситуация становится более сложной. Высокоскоростная деформация имеет место при высокоэнергетическом воздействии на функциональные материалы. Она реализуется в таких технологически важных приложениях, как высокоскоростная обработка и формовка материалов, создание ударостойких материалов, пробивание защитных оболочек, ударное повреждение авиационных и космических летательных аппаратов и конструкций, при использовании сварки взрывом, при воздействии на материалы лазерными импульсами высокой мощности, при использовании метода динамического канально-углового прессования [2-4]. В ходе перечисленных процессов скорость пластической деформации достигает значений  $10^3 - 10^9 \text{ с}^{-1}$ , а дислокации совершают надбарьерное скольжение, перемещаясь со скоростями порядка сотен и даже тысяч метров в секунду и преодолевая структурные дефекты на своем пути динамическим образом. При этом механизм диссипации дислокационной энергии заключается в необратимом переходе кинетической энергии поступательного движения дислокации в энергию ее поперечных колебаний в плоскости скольжения, которые возникают при взаимодействии дислокаций с другими дефектами структуры. Амплитуда раскачки дислокации может на несколько порядков превзойти амплитуду тепловых колебаний, при этом раскачка собственных колебаний происходит тем эффективней, чем большее искажение вносят точечные дефекты в решетку кристалла, то есть возрастает с увеличением параметра несоответствия. Как следует из теории динамического взаимодействия дислокаций со структурными дефектами [5-7], динамика дислокаций при таком механизме диссипации зависит от вида спектра дислокационных колебаний, в первую очередь от наличия щели в дислокационном спектре. При высокоскоростной деформации плотность дислокаций значительно возрастает и может достигать значений  $\rho = 10^{15} \text{ м}^{-2}$ . Благодаря этому именно коллективное взаимодействие дислокаций вносит главный вклад в формирование щели в спектре дислокационных колебаний. Наличие такой щели означает, что дислокация совершает колебания в параболической потенциальной яме, перемещающейся по кристаллу вместе с ней. Увеличение плотности дислокаций приводит к увеличению щели, т.е. углублению потенциальной ямы, которая ограничивает амплитуду дислокационных колебаний, а, следовательно, снижает

эффективность динамического торможения. При высокой концентрации в сплаве зон Гинье-Престона именно они вносят главный вклад в динамическое торможение дислокаций. Поскольку с ростом плотности дислокаций величина этого торможения снижается, возникает отклонение зависимости предела текучести от соотношения Тейлора, что и показано в настоящей работе.

Зоны Гинье-Престона оказывают весьма существенное влияние на механические свойства сплавов, изучению этого влияния посвящено значительное количество работ, однако зависимость механических свойств состаренных сплавов от плотности дислокаций при высокоскоростной деформации ранее не изучалась.

Рассмотрим движение ансамбля бесконечных краевых дислокаций под действием постоянного внешнего напряжения  $\sigma_0$  в положительном направлении оси  $OX$  с постоянной скоростью  $v$  в кристалле, содержащем зоны Гинье-Престона и атомы второго компонента. Линии дислокаций параллельны оси  $OZ$ , их векторы Бюргерса  $\mathbf{b} = (b, 0, 0)$  одинаковы и параллельны оси  $OX$ . Плоскость скольжения дислокаций совпадает с плоскостью  $XOZ$ . Положение  $k$ -ой дислокации определяется функцией

$$W_k(y=0, z, t) = vt + w_k(y=0, z, t) \quad (1)$$

Здесь  $w_k(y=0, z, t)$  – случайная величина, описывающая изгибные колебания дислокации, возбужденные ее взаимодействием с хаотически распределенными дефектами. Среднее значение этой величины по длине дислокации и по хаотическому распределению дефектов равно нулю.

Плоскости зон Гинье-Престона параллельны плоскости скольжения дислокаций, а их центры распределены в кристалле случайным образом. Для простоты все зоны будем считать одинаковыми, то есть имеющими одинаковые радиусы  $R$ , одинаковую толщину равную диаметру атома второго компонента и одинаковые векторы Бюргерса  $\mathbf{b}_0 = (0, -b_0, 0)$  параллельные оси  $OY$ .

Прочность состаренного бинарного сплава определяется выражением

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_G + \sigma_d + \sigma_f \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_T$  – слагаемое, определяемое соотношением Тейлора

$$\sigma_T = \alpha \mu b \sqrt{\rho}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – безразмерный коэффициент порядка единицы  $\mu$  – модуль сдвига,  $\rho$  – плотность дислокаций,  $\sigma_f$  – вклад фононного торможения

$$\sigma_f = \frac{B \dot{\epsilon}}{\rho b c} \quad (4)$$

Здесь  $B$  – константа демпфирования, обусловленная фононными, магннными или электронными механизмами диссипации,  $\dot{\epsilon}$  – скорость пластической деформации,  $c$  – скорость распространения поперечных звуковых волн в кристалле,  $\sigma_G$  – вклад силы динамического торможения дислокации зонами Гинье-Престона,  $\sigma_d$  – вклад силы торможения точечными дефектами (атомами второго компонента).

Аналитическое выражение для величины  $\sigma_G$  можно получить, воспользовавшись результатами теории динамического взаимодействия

$$\sigma_G = \mu \frac{n_G b R}{\sqrt{\rho + \rho_0}}; \quad \rho_0 = \frac{\sqrt{n_d} \chi^2}{b^2}; \quad (5)$$

Здесь  $n_G$  – объемная концентрация зон Гинье-Престона,  $n_d$  – безразмерная концентрация атомов второго компонента,  $\chi$  – параметр их размерного несоответствия. Это выражение справедливо для скоростей пластической деформации, определяемых условием

$$\dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_{cr} = \rho b^2 c \sqrt{\rho + \rho_0} \quad (6)$$

При таких скоростях торможение дислокаций зонами Гинье-Престона имеет характер сухого трения, т.е. не зависит от скорости движения дислокаций, а, следовательно, и от скорости пластической деформации.

Аналогично получим выражение для вклада атомов второго компонента

$$\sigma_d = \mu \frac{n_d \chi^2}{\rho b^4 (\rho + \rho_0)} \left( \frac{\dot{\epsilon} b}{c} \right) \quad (7)$$

Нас интересует случай, когда главный вклад в формирование спектральной щели вносит коллективное взаимодействие дислокаций, а главный вклад в динамическое торможение дислокаций вносит их взаимодействие с зонами Гинье-Престона. Такая ситуация реализуется в случае больших значений плотности дислокаций и концентраций зон Гинье-Престона:  $\rho = 10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ,  $n_G = 10^{23} - 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

Оценим величину критической скорости пластической деформации. Для значений  $n_d = 10^{-4}$ ,  $\chi = 10^{-1}$ ,  $\rho = 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ ,  $b = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $c = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$  получим  $\dot{\epsilon}_{cr} = 10^8 \text{ с}^{-1}$ . Выполним численные оценки основных вкладов в деформационное упрочнение состаренных сплавов. Для значений  $n_G = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ,  $c = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ ,  $\rho = 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ ,  $b = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $R = 4 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ ,  $n_d = 10^{-4}$ ,  $\chi = 10^{-1}$ ,  $B = 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $\dot{\epsilon} = 10^6 \text{ с}^{-1}$  получим следующие оценки порядка величины:  $\sigma_f = 10^7 \text{ Па}$ ,  $\sigma_d = 10^5 \text{ Па}$ ,  $\sigma_T = 10^8 \text{ Па}$ ,  $\sigma_G = 10^8 \text{ Па}$ .

При таких значениях параметров основной вклад в торможение ансамбля движущихся дислокаций вносят торможение зонами Гинье-Престона и торможение дислокациями, определяемое соотношением Тейлора. Зависимость динамического предела текучести бинарного сплава от плотности дислокаций в этом случае становится немонотонной: корневой рост сменяется спадом. Максимум соответствует значению плотности, при которой дислокации начинают вносить главный вклад в формирование дислокационного спектра.

Учет описанного выше эффекта может играть существенную роль при анализе высокоскоростной деформации бинарных сплавов.

**Список литературы:** 1. Дж. Хирт, И. Лоте. Атомиздат, М. (1972). 600 с. 2. Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers // Europhysics Letters.- 2016.- V. 114.- P. 65001(1-7). 3. Варюхин В.Н., Малашенко В.В. Динамические эффекты в дефектной системе кристалла // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82, № 9. С. 37– 42. 4. Alshits V I, Darinskaya E V, Koldaeva M V, Kotowski R K, Petrzhik E A, Tronczyk P. Dislocation kinetics in nonmagnetic crystals: a look through a magnetic window // Phys. Usp.- 2017.- V.60.-P. 305–318. 5. Malashenko V.V. The effect of Guinier–Preston zones on the dynamic yield stress of alloys under the shock-wave load // Technical Physics. 2017.-V. 62.- № 5.- P. 810-811. 6. Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B: Phys. Cond. Mat. 2009. V. 404, № 2. P. 3890–3892. 7. Малашенко В.В. Нарушение соотношения Тейлора в условиях высокоэнергетических внешних воздействий. Физика твердого тела. Т. 64, № 8. С. 1012-1017.

## ОБ АЛГОРИТМЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХСЛОЙНОГО ШТАМПА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ПО СХЕМЕ РЕВЕРСИВНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Мирошниченко С.В. (ГУ ДонФТИ им. А.А. Галкина, г. Донецк, ДНР)  
Тел.: +38 (071) 4382056; E-mail: [svmiro@mail.ru](mailto:svmiro@mail.ru)

**Abstract:** *The article presents a procedure for software development that calculates the design parameters of a two-layer die for processing billets by reversive extrusion. The algorithm is based on an engineering technique that summarizes the standard methods of strength calculation of composite cylinders and the results of the study of the influence of the nature of the loading of the inner layer of the node on its limiting state. The calculation uses the Microsoft Excel spreadsheet processor and the Visual Basic for Application programming language.*

**Key words:** *calculation algorithm, reversive extrusion, two-layer die, bandage, design parameters, banding pressure.*

К настоящему времени установилась тенденция к использованию деформационных обработок в технологиях достижения в металлах и сплавах особых структурных состояний, обеспечивающих формирование свойств заданного уровня или их градиента. К такому относится реверсивное выдавливание – процесс ИПД, при котором достижение необходимых свойств осуществляется за счет многократного деформационного воздействия на заготовку в условиях высоких гидростатических давлений [1]. Такой режим требует значительного расширения диапазона силовых параметров обработки и увеличения числа переходов, что приводит к преждевременному выходу из строя штамповой оснастки.

Повышение долговечности инструмента возможно за счет выбора оптимальных конструктивных параметров инструмента, а также создания наиболее благоприятной схемы напряженного состояния путем бандажирования. Использование конструктивно-технологических приемов, обеспечивающих оптимальную комбинацию упругих и прочностных характеристик элементов конструкции, требует особого подхода к проектированию инструмента.

Известные методики проектирования штампов и пресс-форм для осесимметричной обработки, базирующиеся на моделях плоской деформации полых цилиндров [2,3], могут привести к неточностям при расчете его конструктивных параметров. Это объясняется тем, что при реализации реверсивного выдавливания высота зоны нагрузки штампа существенно меньше высоты узла. В связи с этим возникают погрешности из-за несоответствия реального напряженно-деформированного состояния инструмента результатам расчетов. Кроме того, использование модели плоской деформации при выборе величины давления бандажирования также приводит к ошибкам вычисления оптимальных натягов и геометрических размеров элементов штампа [4], что способствует их быстрому выходу из строя.

Таким образом, если к моменту достижения рабочей нагрузки длина участка нагружения составляет менее 60% высоты штампа, расчет целесообразно выполнять с учетом влияния характера распределения рабочей нагрузки и условий бандажирования внутреннего слоя. С этой целью нами предложена оригинальная методика проектирования двухслойных штампов, учитывающая комплексный механизм влияния силовых параметров прессования и геометрических параметров узла на напряженное состояние такового путем введения поправок в известные расчетные выражения, полученные на основе модели плоской деформации [5].

На базе данной методики разработан алгоритм расчета геометрических параметров соединения с натягом слоев цилиндрического штампа, выполненных из разных материалов, для осуществления процесса реверсивного выдавливания. Входными параметрами являются:

– максимальное рабочее давление в штампе  $P_1$ , определяемое режимом выдавливания;

– габариты рабочего цилиндра и бандажного кольца, определяемые диаметром  $d_1$  и длиной  $L$  рабочего канала; коэффициент толстостенности элементов штампа:  $m=d_3/d_1$ ;  $m_1=d_2/d_1$ ;  $m_2=d_3/d_2$ , где  $d_2$ ,  $d_3$  – промежуточный и наружный диаметры штампа соответственно;

– параметры, характеризующие геометрию очага деформации (рис.1): высота зоны нагрузки рабочим и сборочным давлением, соответственно  $H_{L1}$ ,  $H_{L2}$ ; расстояние от торца штампа до начала зоны нагружения:  $H_{0,1}$   $H_{0,2}$ ;

– характеристики конструкционных материалов:  $\chi_1$  – коэффициент хрупкости материала внутреннего слоя,  $\chi_1=\sigma_{1S}/\sigma_{1C}$ , где  $\sigma_{1S}$ ,  $\sigma_{1C}$ ,  $\sigma_{2S}$ ,  $\sigma_{2C}$  – пределы текучести материала внутреннего и наружного слоев соответственно при растяжении и сжатии;  $E_1$ ,

$E_2$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – упругие характеристики материалов внутреннего слоя и бандажа.

Расчет построен на вычислении значения контактного давления  $P_{cб}$  на поверхности сопряжения слоев по результатам расчета предельного давления бандажирования  $P_{2max}$  и давления догрузки бандажа рабочим давлением  $P_{2r}^R$ . Расчет последнего производится с учетом влияния параметров участка нагружения введением поправочных коэффициентов [5].

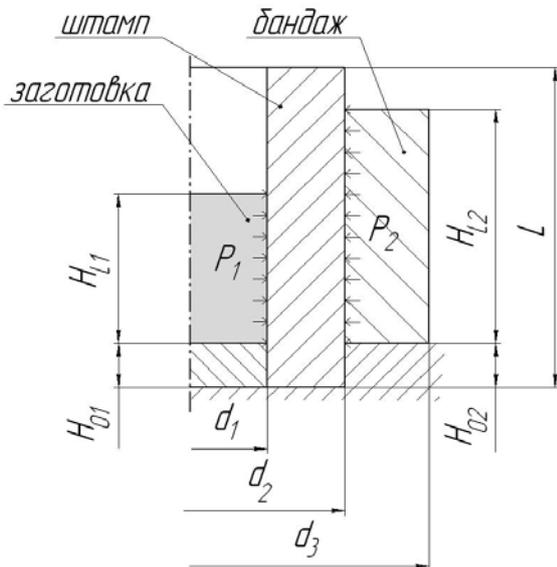


Рис. 1. Расчетная модель штампа

$$P_{2cб} = P_{2max} - P_{2r}^R, \quad (1)$$

$$P_{2max} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{m_2^2 - 1}{m_2^2} \sigma_{s2}, \quad (2)$$

$$P_{2r}^R = K P_1 \frac{2(m^2 - m_1^2)}{m_1^2 C}, \quad (3)$$

$$C = \left( \frac{E_1}{E_2} (m_1^2 - 1) \right) \frac{((1 - \mu_2)m_1^2 + (1 + \mu_2)m^2) + (m^2 - m_1^2)((1 - \mu_1)m_1^2 + (1 + \mu_1))}{m_1^2}.$$

Здесь  $C$  – параметр, учитывающий неоднородность упругих характеристик материалов внутреннего и наружного слоев узла,  $K(K', K'')$  – поправочные коэффициенты, учитывающие осесимметричность нагрузки сборки при размещении ее вблизи торца или на удалении от него соответственно.

Проводят расчет диаметральных размеров посадочных поверхностей, вычисляют значения сборочного натяга  $\Delta d_{cб}$  и соответствующего ему относительного смещения слоев  $\Delta h_{cб}$ :

$$\Delta d_{cб} = P_2 d_2 \left[ \frac{((m_1^2 + 1)/(m_1^2 - 1)) - \mu_1}{E_1} + \frac{((m_2^2 + 1)/(m_2^2 - 1)) - \mu_2}{E_2} \right], \quad (4)$$

$$\Delta h_{cб} = \frac{\Delta d_{cб}}{2tg\alpha}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол наклона образующей конуса сопрягаемых поверхностей.

По приведенному алгоритму с использованием редактора Excel Visual Basic разработана программа, представляющая собой определение параметров сборки двухслойного штампа, расчетная схема которого представлена на рис.1. В качестве отправ-

ной точки использовали результаты моделирования процесса реверсивного выдавливания заготовки из сплава М1 диаметром и высотой 30мм среде конечно-элементного комплекса Deform-2D [1].

Работа программы на примере расчета штампа с внутренней втулкой, выполненной из стали 5ХВ2С, упрочненной наружным слоем из стали ДИ32, начинается с ввода исходных данных в соответствующие поля формы (рис.2).

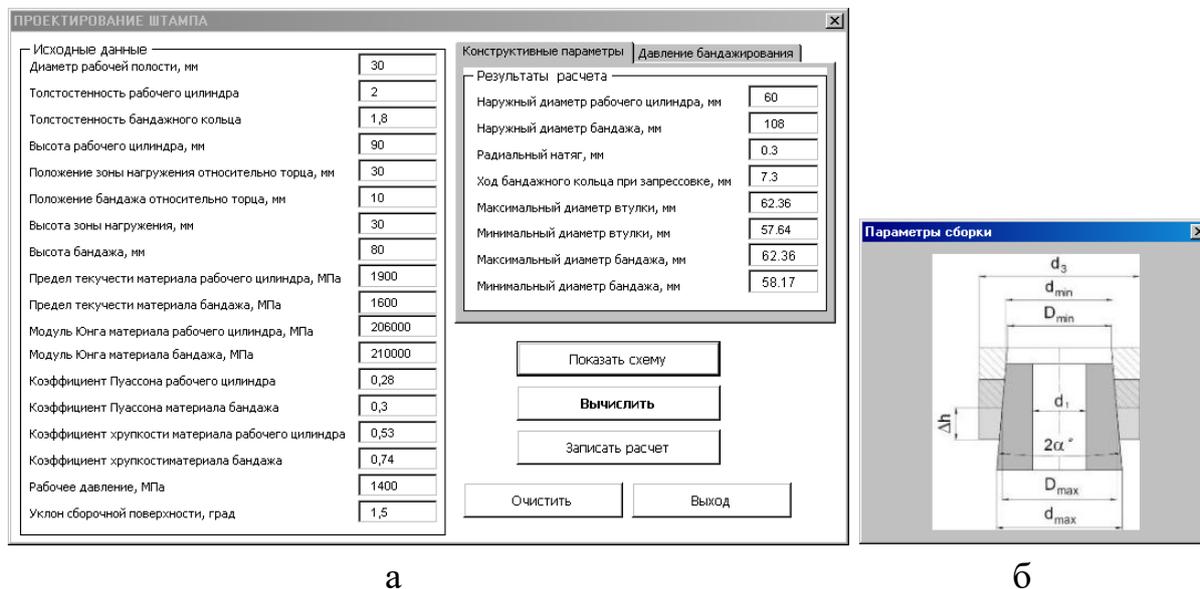


Рис. 2. Интерфейс программы расчета элементов штампового узла: а – окно представления данных, б - вывод окна «Параметры сборки»

Диаметр и высота рабочей полости заданы параметрами выдавливаемой заготовки.

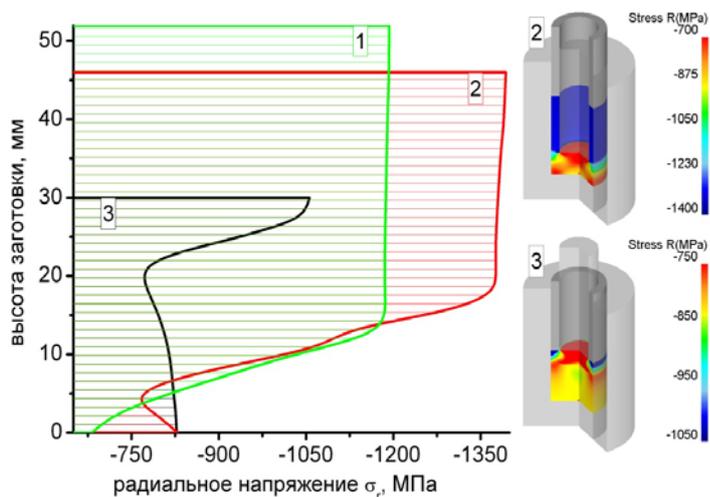


Рис. 3. Распределение радиального напряжения  $\sigma_r$  по высоте наружной поверхности заготовки в течение этапа реверсирования первого цикла обработки:

- 1 – начало реверсирования;
- 2 – смещение пуансона  $\delta$ мм;
- 3 – конец реверсирования

Величину рабочего давления, высоту и положение зоны нагружения определяли из эпюр нагружения матрицы: использовали полученное методом конечных элементов распределение радиальной компоненты напряженного состояния  $\sigma_r$  вдоль наружной поверхности заготовки. В качестве наиболее опасного случая нагружения выбрана амплитуда  $\sigma_r$  при реверсировании в первом цикле обработки (рис.3) [1].

Для определения оптимальной толстостенности внутреннего слоя узла использовали соотношение А.В. Гадолина или Н.М. Беляева [6]:

$$m_1 = \sqrt[4]{m^2 / S}, \quad (6)$$

где  $S = \sigma_{2s}/\sigma_{1s}$  или  $[S] = [\sigma_2]/[\sigma_1]$ , где  $[\sigma_2]$ ,  $[\sigma_1]$  – допускаемые напряжения при растяжении в наружном и внутреннем слоях соответственно.

Характеристики конструкционных материалов для рабочего цилиндра (5XB2C):  $\sigma_{1s}=1900$  МПа,  $\sigma_{1c}=3600$  МПа,  $\chi_1=0.53$ ,  $E_1=206$  ГПа,  $\mu_1=0.28$ ; для бандажа (ДИ32):  $\sigma_{2s}=1600$  МПа,  $\sigma_{2c}=2160$  МПа,  $\chi_2=0.74$ ,  $E_2=210$  ГПа,  $\mu_2=0.3$ .

Расчет проводили по допускаемым напряжениям, установив коэффициент запаса  $K_3=1.5$ . Тогда  $[\sigma_1]=1267$  МПа,  $\chi_1=0.15$ ,  $[\sigma_2]=1067$  МПа,  $S=0.84$ ,  $\bar{P}_1 = P_1/[\sigma_1]=1.1$ . По номограмме (см. рис. 1,б) выбран коэффициент толстостенности сборки  $m=3.5$ , а из соотношения (6) –  $m_1=2$ ;  $m_2=m/m_1=1.8$ .

Активация кнопки "Вычислить" выводит результаты расчета силовых параметров бандажирования и геометрических параметров элементов сборочного узла в поля вкладок «Давление бандажирования» и «Конструктивные параметры» соответственно.

Значения давления догрузки наружного слоя внутренним давлением и давление сборки согласно (1) - (3), составляют:  $P_{2r}^H = 340$  МПа,  $P_{2c\sigma} = 300$  МПа, причем значения коэффициентов  $K'$ ,  $K''$  из (3) определяли из соотношений, полученных аппроксимацией результатов [5]:

$$K' = 0.49 - 1.65 \left( \frac{H_{L1}}{L} \right)^2 - 0.2 \left( \frac{L}{d_3} \right)^2 + 2.21 \frac{H_{L1}}{L} + 0.76 \frac{L}{d_3} - 1.165 \frac{H_{L1}}{L} \frac{L}{d_3},$$

$$K'' = -0.63 - 3.79 \left( \frac{H_{L1}}{L} \right)^2 - 0.6 \left( \frac{L}{d_3} \right)^2 + 4.83 \frac{H_{L1}}{L} + 1.99 \frac{L}{d_3} - 1.11 \frac{H_{L1}}{L} \frac{L}{d_3}$$

Рассчитаны размеры сопрягаемых поверхностей элементов бандажного узла  $d_{1max}$ ,  $d_{1min}$ ,  $d_{2max}$ ,  $d_{2min}$ . Согласно (4) получены значения сборочного натяга  $\Delta d_{c\sigma}$  на сопрягающихся по конусу ( $\alpha=1,5^\circ$ ) поверхностях внутреннего и внешнего слоев бандажного узла. Данный параметр контролируется по высоте выступающей части вставки  $\Delta h_{c\sigma}$ , рассчитанной по формуле (5). Для визуализации параметров сборки предусмотрен вывод одноименного окна кнопкой «Показать схему» (рис.2, б). В случае необходимости проводится корректировка введенных данных.

Программой предусмотрено сохранение полученных расчетных данных в виде электронной таблицы активацией кнопки «Записать расчет».

**Выводы:** На основе теории прочности составных цилиндров и результатов исследования влияния характера нагружения внутреннего слоя узла на его предельное состояние разработан алгоритм автоматизированного расчета конструктивных параметров двухслойного штампа для обработки заготовок по схеме реверсивного выдавливания.

**Список литературы:** 1. Мирошниченко С.В. Сынков В.Г. Накопление пластических деформаций реверсивной закрытой прошивкой и расчет инструмента для осуществления процесса. *Металлургические процессы и оборудование*, 2013. – 2013. – №4(34). – с.24-30. 2. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. / Харьков: Выща школа, 1987, – 144 с. 3. Ганаго О.А., Марченко В.Л., Ковтун В.В. Расчет и оптимизация конструкций осесимметричных матриц для холодной штамповки. *КШП*, – 1985. – № 9. – С. 21-24. 4. Мирошниченко С.В., Сынков В.Г., Лебедев А.А. Предельное состояние камер высокого давления. *Проблемы прочности*, – 2002. – № 4. – с. 32-38. 5. Мирошниченко С.В. Сынков В.Г. Методика проектирования штампов для прессования порошков и холодного выдавливания прутков. *ОМД*, – 2010. – № 2 (23) . – с.249-252. 6. Беляев Н.М. Труды по теории упругости и пластичности. – М.: ГИИТЛ, 1957. – 632с.

# ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С., Недашковский А.П. (ДОННТУ, УФ УГТУ, ООО «Авиатех», г. Донецк, г. Усинск, г. Снежное, ДНР, Россия)  
Тел.: +79493497428; E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

**Abstract:** *The article discusses the main features of the design of the technological process for increasing the life of the turbine blades of a gas turbine engine based on a functionally oriented approach and the principle of providing equivalent properties of functional elements. The main features of the synthesis of the structure of the technological process and the algorithm for the synthesis of its structure are given, its stages are considered. The goals of further research are determined.*

**Key words:** *gas turbine engine, blade, resource, technological process, coating, structure.*

## 1. Введение

Надежная работа газотурбинного двигателя (ГТД) в значительной мере зависит от работоспособности лопаточного аппарата, являющегося его неотъемлемой частью. При этом лопатки турбины (ЛТ) работают в условиях постоянного воздействия высоких температур, которые могут достигать до 80% от величины температуры плавления, комплексных воздействий вызванных статическими, динамическими и термическими нагрузками. Следствием этого является неравномерный износ различных элементов пера лопатки, приводящий к преждевременному выходу из строя, и увеличению трудоемкости процессов восстановления. Соответственно, повышение ресурса путем выравнивания ресурса различных элементов является актуальной задачей. Для обеспечения процесса равномерного износа элементов лопатки турбины необходимо обеспечивать её функционально-ориентированные свойства (ФОС) [1], которые могут быть достигнуты нанесением функционально-ориентированных покрытий (ФОП), учитывающих неравномерность эксплуатационных воздействий, за счет изменяющихся свойств покрытия [2].

Цель работы – определить основные особенности конструирования технологического процесса повышения ресурса ЛТ ГТД на основании ФОП и принципа обеспечения эквивалентных свойств функциональных элементов.

Для решения поставленной цели необходимо решение следующих задач: выделение основ синтеза технологического процесса, разработка алгоритма синтеза его структуры и рассмотрение особенностей процесса синтеза структуры ТП.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Применение ФОП и принципов особой ориентации позволяет реализовать различные схемы изменяющихся свойств покрытия, такие как:

- изменяющиеся по заданному закону;
- с постоянно изменяющимися свойствами;
- с переменными изменяющимися свойствами;
- с градиентными свойствами [3].

Тем самым, применение ФОП может обеспечить повышение ресурса лопаток, адаптацию свойств их элементов, к особенностям действующих нагрузок и повышению ремонтпригодности, за счет увеличения равномерности износа. При этом, для реализации таких покрытий необходимо соответствующее техническое обеспечение, а именно – технологические процессы (ТП) и функционально-ориентированное материальное обеспечение (ФОМО) [3].

Методика синтеза ТП повышения ресурса ЛТ ГТД должна включать в себя следующие этапы [4, 5]:

1. Синтез технологии отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) ЛТ до нанесения защитного покрытия.
2. Синтез технологии нанесения покрытия.
3. Синтез технологии ОУО ЛТ после нанесения защитного покрытия.

При этом должны обеспечиваться следующие особенности конструирования технологического процесса (ТП):

1. Необходимо провести анализ эксплуатационных воздействий на все функциональные элементы и зоны, согласно положениям функционально-ориентированных технологий.

2. Каждый этап синтеза ТП должен иметь обратные связи, предназначенные для реализации принципов функционально-ориентированного подхода [1, 6].

На рис. 1 представлен алгоритм синтеза структуры ТП, который включает в себя:

1. Определение исходных данных.
2. Осуществление первого этапа ТП, заключающегося в синтезе технологии ОУО ЛТ до процесса нанесения защитного покрытия.

3. Осуществление второго этапа ТП, заключающегося в синтезе технологии нанесения защитного покрытия. Данный этап может включать в себя множество подэтапов процесса синтеза и нанесения покрытий.

4. Осуществление третьего этапа ТП, заключающегося в синтезе технологии ОУО ЛТ после процесса нанесения защитного покрытия.

5. Этап эксплуатации ЛТ ГТД.

При этом все этапы алгоритма объединены обратными связями, обеспечивающими реализацию принципов ФОР при конструировании технологического процесса повышения ресурса ЛТ.

Следует учитывать, что алгоритм представляет собой лишь структуру конструируемого ТП, и реальное количество составных частей каждого этапа может быть значительно больше. Так, гипотетическая структура второго этапа может иметь вид, представленный на рис. 2. и включать в себя такие операции:

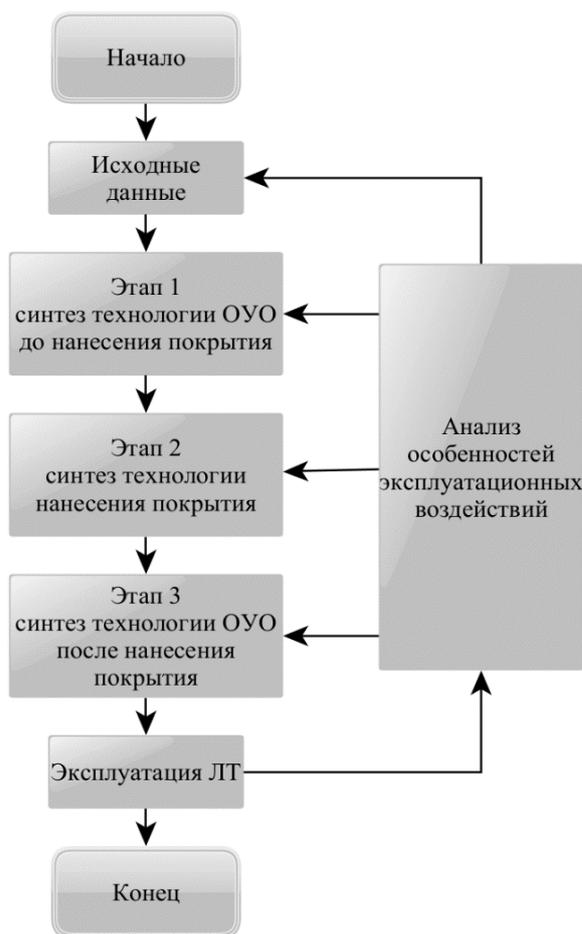


Рис. 1. Алгоритм синтеза структуры ТП

1. Подбор материала покрытия (исходя из материала ЛТ, её функциональных особенностей и эксплуатационных воздействий).

2. Подготовка поверхности, в зависимости от имеющихся рекомендаций выбранного покрытия.

3. Нанесение необходимого связующего покрытия.

4. Нанесение собственно теплозащитного покрытия необходимой конфигурации и толщины, учитывающего функциональные особенности всех соответствующих элементов.

5. Нанесение износостойкого покрытия

### 3. Заключение

Таким образом, приведенные в данной работе результаты направлены на повышение ресурса лопаток турбины ГТД на основе применения ФОП и выравнивание ресурса отдельных функциональных элементов и зон лопаток путем синтеза структуры технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины за счет реализации принципа ЭСФЭ.

**Список литературы:** 1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов ; А. Н. Михайлов. – Донецк : Технополис, 2009. – 346 с. – ISBN 9667907244. 2. Методика и алгоритм синтеза технологического обеспечения комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора газотурбинной установки / Д. А. Михайлов, А. П. Пичко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2019. – № 2(65). – С. 16-25. – EDN VDJJRD. 3. Хавлин, Т. В. Метод разработки функционально-ориентированных технологических решений для обработки поверхности пера лопаток турбин газотурбинных двигателей / Т. В. Хавлин, Д. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2019. – № 2(65). – С. 65-76. – EDN XVNKHN. 4. Михайлов, Д. А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. – № 1(72). – С. 40-57. – EDN GTKZHP. 5. Пичко, А. П. Технологические особенности синтеза структуры процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными покрытиями / А. П. Пичко, Д. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2019. – № 4(67). – С. 56-71. – EDN ZYPGVF. 6. Методика синтеза связного технологического процесса формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия лопаток газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2020. – № 4(71). – С. 44-63. – EDN UZUVWV.

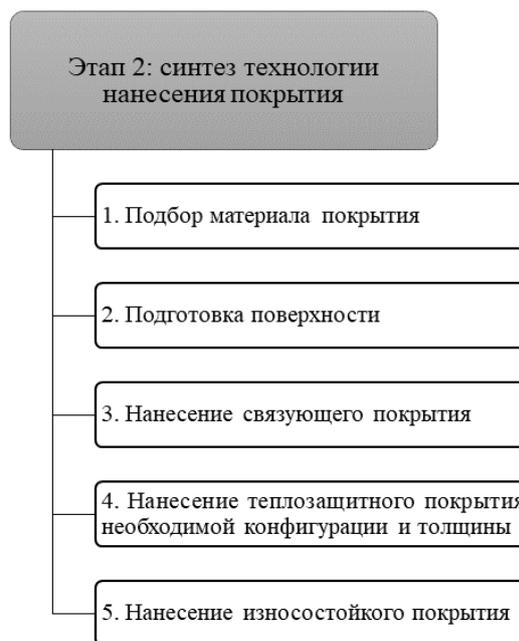


Рис. 2. Гипотетическая структура этапа синтеза нанесения покрытия

## ПОРЯДОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ФОТ ОРЕБРЕННЫХ МЕДНЫХ ТРУБ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ МАНЕВРОВЫХ ТЕПЛОВЗОВ

Михайлов А.Н., Котляров В.Б., Котляров Б.С., Котляров С.Б., Пичко А.П.

(ДОННТУ, ВФ УГТУ, г. Донецк, г. Москва, г. Усинск, г. Ялта, ДНР, Россия)

Тел: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 70-45-362;

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org); [validarkotlarov@mail.ru](mailto:validarkotlarov@mail.ru); [boris.kotlyarov@mail.ru](mailto:boris.kotlyarov@mail.ru)

**Abstract:** *This paper describes the results of studies aimed at calculating the elements of tools for the technological support of the shaping of copper finned pipes of oil coolers of diesel locomotive power plants. A system for calculating the forming elements of tool rolling rollers for profiling the edges of copper pipes is given. Algorithms and a sequence of calculations of the profile of the rollers forming the profiles of the pipe ribs have been developed, while processing into final dimensions with specified tolerances without the formation of waste material. The calculation of the workpieces and the scheme of mutual orientation of the rolling rollers in the installation for rolling ribs and processed pipes are given. An example of calculating the displacement of the volumes of material displaced from the body of the pipe-billet and transferred to the zone of formation of geometric profiles of pipe ribs in the dimensions specified in the design documentation is given. The issues of the formation of qualitative indicators of the side and end surfaces of pipe profiles that provide high-quality heat exchange under operating conditions are explained.*

**Keywords:** *copper pipe, finning, part, section, zone, PHOTO-impact, profile formation, plasticity, movement of a part of the material, waste-free processing, profile surface.*

Одним из наиболее перспективных и эффективных направлений формообразования в машиностроении является разработка и применение функционально-ориентированных технологий создания деталей с заданными конечными геометрическими формами и размерами без образования отходов, требующих дальнейшей утилизации. Рассмотренные ранее [1,2] аспекты применения функционально-ориентированных технологий (ФОТ) при изготовлении продукции машиностроения можно дополнить примером изготовления оребренных медных труб маслоохладителей. Это один из процессов безотходной технологии формообразования геометрических элементов и формирования качественных показателей поверхностных свойств, позволяющих осуществлять экономичные технологии с применением минимального количества оборудования, инструментов и единичных технологических операций.

В качестве примера расчетов и иллюстрации алгоритма для рассмотрения системы технологического обеспечения приводится применение безотходной технологии формирования геометрии и поверхностных свойств оребренных труб маслоохладителей, выполненных из медных труб для маневровых тепловозов.

Целью исследований данной работы является разработка системы расчетов при создании технологии изготовления оребренных медных труб, позволяющей обеспечить безотходное изготовление детали в конечных размерах, и пояснение полученных результатов при минимизации количества технологических операций.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Обоснование возможности изготовления оребренных труб для маслоохладителей гидropередач маневровых тепловозов без образования отходов производства.

2. Разработка последовательности действий при разработке безотходной технологии изготовления оребренных труб маслоохладителей.

3. Предложение схемы расчета инструментальных профилей накатных роликов, формирующих геометрию профиля.

4. Выделение функционально значимых связей конструктивных признаков детали и элементов инструментального профиля.

5. Установка укрупненных взаимосвязей между конструктивно значимыми функциональными признаками труб и технологическими признаками ФОР-воздействий в общей и локальных системах координат.

На рис. 1а представлен эскиз оребренной медной трубы, на примере которой приведен порядок осуществления расчетов и организации рабочего места, обеспечивающих получение в конечных размерах готовой детали технологическим исполнением без образования и передачи на дальнейшую переработку отходов рабочего материала. На рисунке 1а условно указаны принципиальные размеры элементов оребренной трубы в обобщенном представлении. Указаны также координатные оси OXYZ общей декартовой системы координат трубы, являющейся основанием для локализации всех функционально и конструктивно значимых элементов готового изделия. На рис. 1б приведен эскиз трубы-заготовки, из которой изготовлена оребренная труба маслоохладителя, с указанием соответствующей системы координат.

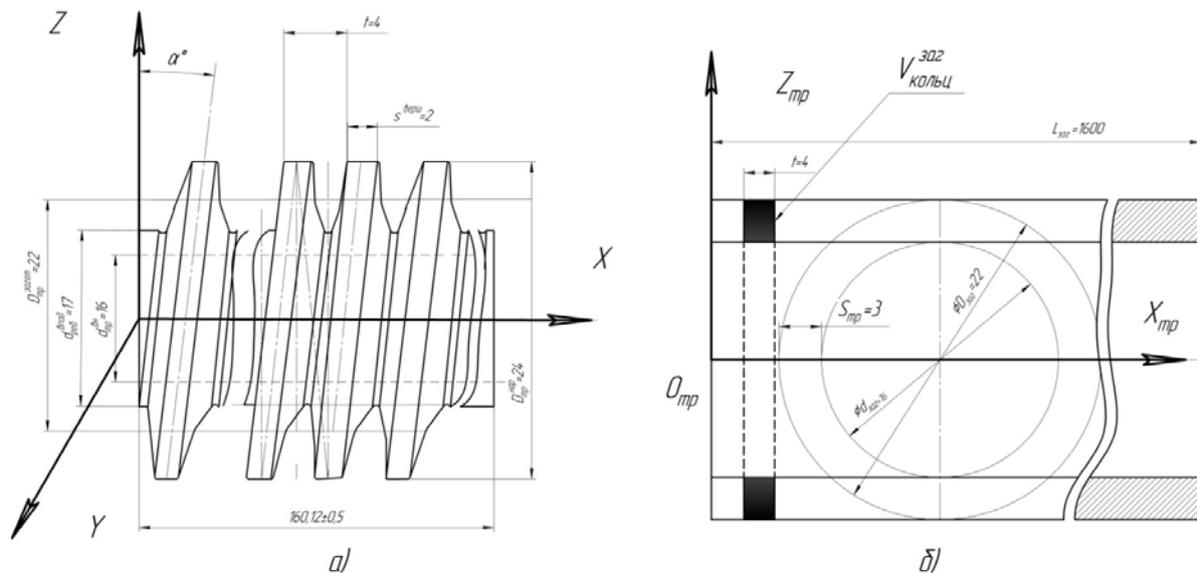


Рис. 1. Общий вид оребренной трубы маслоохладителя: а) вид профиля оребрения по винтовой линии; б) вид трубы-заготовки с указанием размеров трубы по длине и указанием начальных диаметров

На рис. 1 приведены оси декартовой системы координат готовой оребренной трубы и системы координат заготовки с выделенным кольцевым участком, соответствующим шагу винтовой накатки профиля. Кольцевой участок трубы с шагом  $t$  имеет кольцевой объем материала  $V_{кольц}^{заг}$ , который формирует профиль ребер и обеспечивает наличие сплошного основания оребрения. Этот кольцевой участок условно выделен заливкой на эскизе как единичный участок профилирования. Безотходное профилирование оребрения возможно при соблюдении условия:

$$V_{кольц}^{проф} = V_Q + V_R + V_M = V_{кольц}^{заг}, \quad (1)$$

где в левой части выражения (1) записан полный объем материала кольцевого участка на шаге профиля, включающий в себя отдельные кольцевые участки, отраженные в средней части выражения (1). Здесь  $V_Q$  – объем материала, который заключен в участок профиля, находящийся в кольце, вытесненном из материала трубы-заготовки в пространство, размеры которого больше наружного диаметра трубы заготовки. Символом  $V_R$  обозначен объем материала сформированного профиля, который остался в пределах наружного диаметра кольца трубы заготовки. Символом  $V_M$  обозначен объем материала профиля, можно записать ( $V_M=V_{Och}$ ), который после формирования профиля остался не вытесненным и практически не изменил своего геометрического положения в основании внутреннего диаметра заготовки трубы.

Другим условием может служить равенство кольцевых объемов профилированных участков, на одном из которых находится вытесненный из заготовки материал, а на втором освобожденный от материала профиль оребрения:

$$V_Q = V_P, \quad (2)$$

где  $V_Q$  – объем формообразующего тело профиля материала, а  $V_P$  – объем замещенного вытесненного материала. Пояснения проиллюстрированы эскизами на рис. 2.

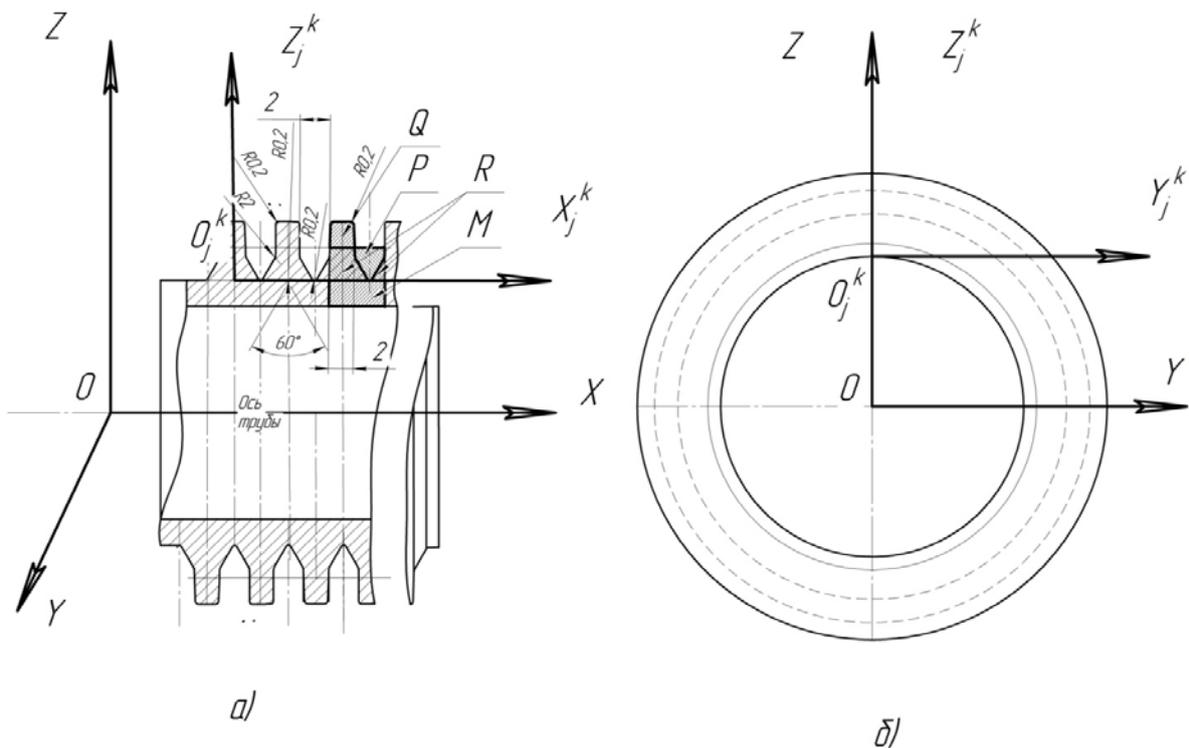


Рис. 2. Эскиз общего вида профиля оребренной трубы: а) формируемый профиль ребер трубы маслоохладителя; б) вид трубы торцевой с указанием расположения начал общей и частной систем координат

Системы координат трубы  $OXYZ$  - общей, и частной системы  $O_j^k X_j^k Y_j^k Z_j^k$  координат профиля трубы указаны для указания локализации функционально значимых участков, частей и зон элементов трубы. Локализация и привязка по координатам частей и элементов профиля позволяет осуществить расчет объемов

металла и зон расположения металла до вытеснения их в зоны, в которые металл вытесняется.

На рис. 3 приведены детальные эскизы профилей оребренной трубы и профилей накатных роликов, принимающих участие в вытеснении металла из зон заготовки в формируемые профиль ребер зоны.

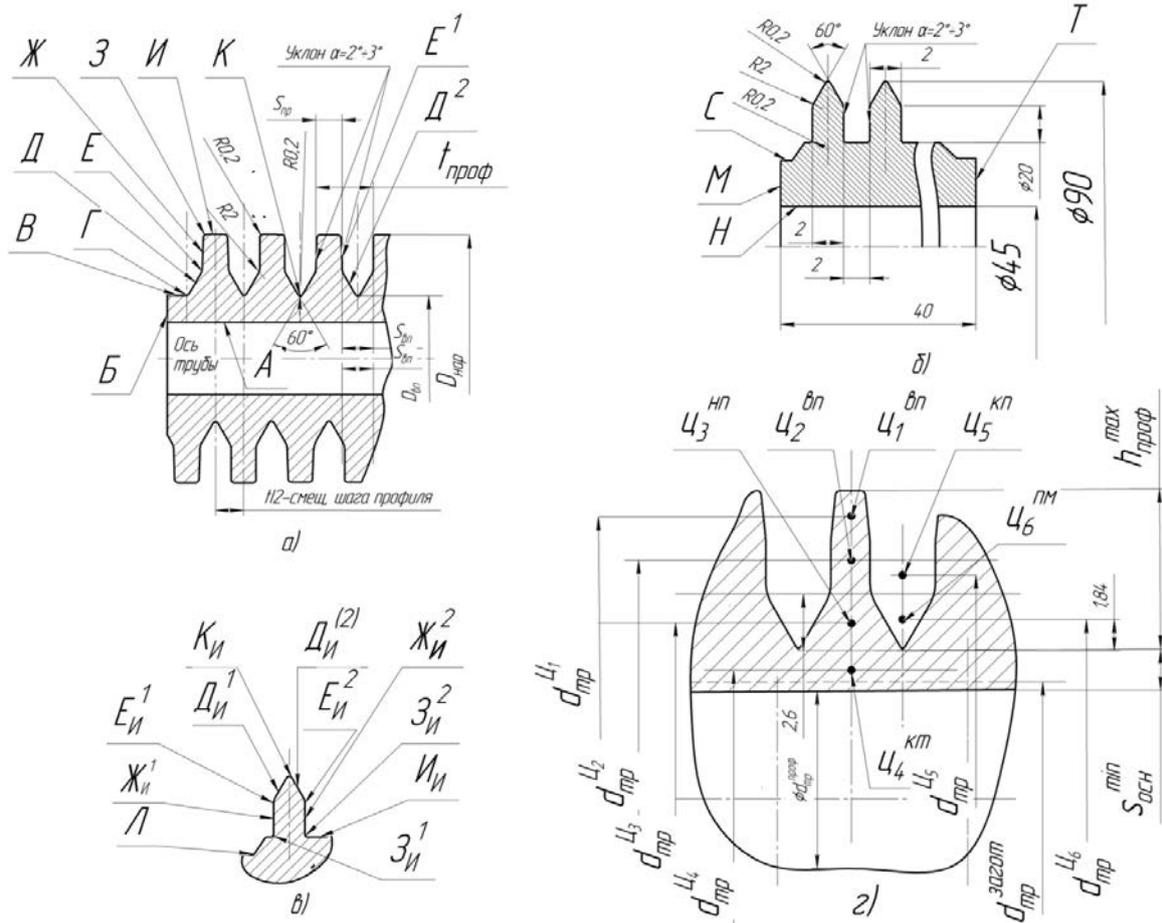


Рис. 3. Эскизы элементов профиля ребер трубы: а) профиль трубы с буквенным обозначением всех функциональных и переходных участков поверхностей; б) профиль накатного ролика; в) буквенное обозначение поверхностей профиля ролика в соответствии с образуемыми поверхностями профиля трубы; г) локализация центров сечений кольцевых зон, в которых осуществляется перенесение металла по зонам

Линия, образующая профиль ребра выражается как функция  $z = f(y)$  в плоскости  $YOZ$  в принятой на рис. 1 системе координат  $XYZ$  оребренной трубы. Поскольку профиль ребер ограничен сложной кривой линией, то линию можно разделить на простые участки, площадь каждого из которых можно вычислить интегрированием функций линий на каждом участке профиля. Следует отметить, что площади кольцевых сечений участков профиля, отмеченных на рис. 2а литерами  $Q, P, R$ , в сумме своей не равны площади кольцевого сечения  $M$  заготовки трубы. Это связано с тем, что центры площадей сечений каждого отдельного участка расположены на разных диаметральных расстояниях от оси трубы. Выражение для вычисления площади  $i$ -го участка  $n$ -го профиля может быть представлено в виде:

$$S_i^n = \int_a^b f(y)dy, \quad (3)$$

где подинтегральное выражение определяется функцией  $f(y)$  кривой на каждом участке профиля ребер.

Участки профиля на рис. 3а, обозначенные буквами русского алфавита, соответствуют обозначениям участков профиля ролика с теми же буквами, но с добавлением индекса «И», означающего принадлежность к инструменту. Для конкретно рассматриваемого варианта оребрения площадь  $S_Q, S_R, S_M$  - каждого участка  $Q, R, M$  - на рис. 2а профиля ребер определяется следующим видом:

$$S_\Sigma = S_Q + S_R + S_M, \quad (4)$$

где  $S_\Sigma$  - суммарная площадь сечения, заполненного металлом.

Принимая во внимание, что в оребренной трубе как в теле вращения диаметры расположения центров площадей сечений из выражения (4) по рис. 2г можно указать в виде  $d_{Ц_1}^S, d_{Ц_2}^S, d_{Ц_3}^S$  и т.д., где индексы  $Ц_1, Ц_2, Ц_3$  и т.д. указывают место расположения центра сечения в плоскости, перпендикулярной оси вращения трубы.

Тогда кольцевой объем  $V_{S_i}$  металла, соответствующий каждому функциональному сечению по выражению (4), определяется упрощенной формулой:

$$V_k^{S_i} = S_i \times \pi(d_{S_i}^Ц), \quad (5)$$

где  $d_{S_i}^Ц$  - обозначает диаметр расположения  $S_i$ -го сечения профиля по выражению (4).

При этом реальный объем материала каждого витка профиля отличается от вычисленной величины по выражению (5), т.к. он расположен вдоль винтовой линии с углом подъема  $\alpha$ , как на рис. 1а, а не перпендикулярен оси трубы, и определяемого шагом профиля на образующей цилиндра трубы на расчетном диаметре.

Тогда реальный объем  $V^R$  каждого кольцевого сектора профиля с соответствующим сечением профиля будет определяться выражением:

$$V_{K_S}^R = \frac{V_k^{S_i}}{\cos \alpha}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  - угол подъема винтовой линии. В нашем случае угол  $\alpha$  равен  $3^\circ$ , определен исходя из шага профиля  $t=4$ мм имеющих роликов на внешнем диаметре роликов  $D_{рол} = 90$  мм.

Следует иметь в виду, что во время процесса накатки профиля на трубе методом холодной объемно-поверхностной пластической деформации внутренний диаметр трубы-заготовки изменяется в сторону уменьшения вследствие того, что внутренние слоя материала трубы подвергаются динамической нагрузке через вытесняемый давлением материал.

Последовательное перемещение материала с изменением внутреннего диаметра трубы в процессе накатки можно представить так, как приведено на рис. 4.

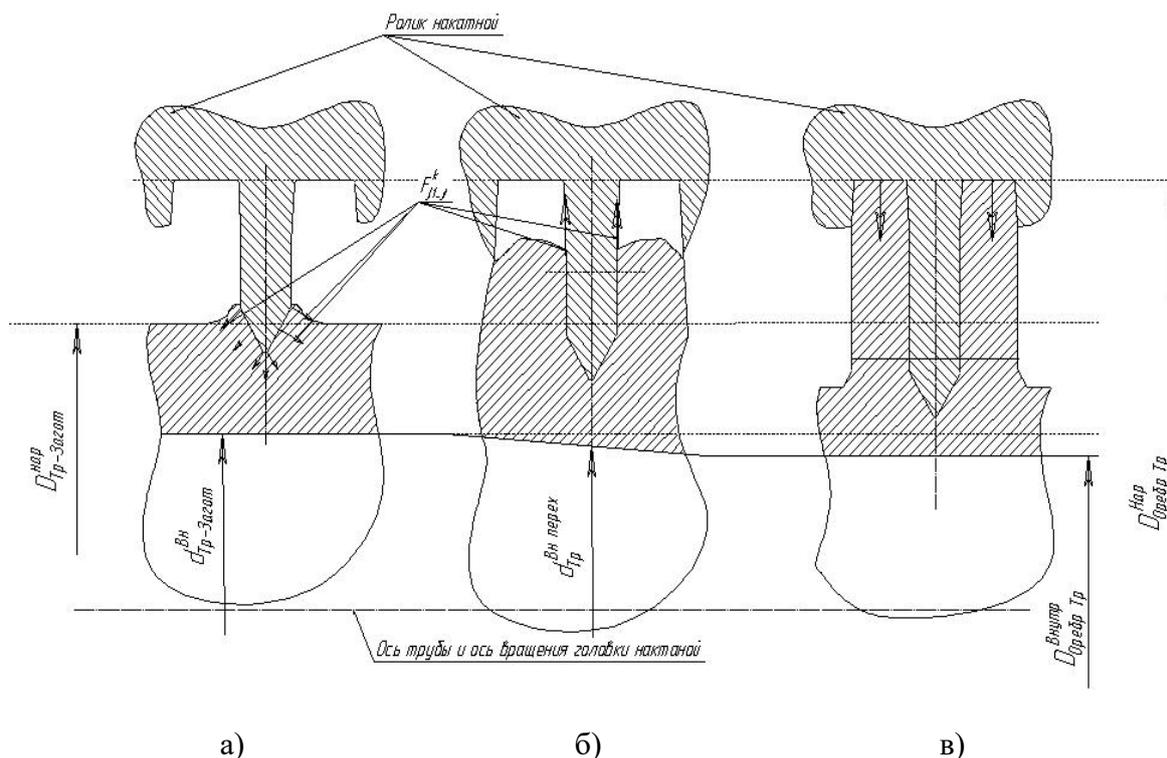


Рис. 4. Динамика преобразования объемов материала при накатывании ребер:  
 а) начальная стадия внедрения ролика в материал поверхности трубы, начало формирования профиля ребер; б) средняя стадия заполнения свободного объема пространства профиля накатного ролика, перехода середины уровня объема и уменьшение внутреннего диаметра трубы; в) окончательное заполнение объема пространства профиля ролика материалом и формирование профиля оребренной трубы

Первый профильный диск накатного ролика имеет уменьшенный наружный диаметр, позволяющий без предельных радиальных усилий внедриться в материал заготовки и начать выдавливать материал из зоны впадин профиля оребренной трубы. При этом начинает формироваться некоторое превышение в зоне пространства профиля ролика. Второй диск также имеет меньший диаметр, чем необходим для формирования полного профиля, но больше, чем диаметр первого диска. Последующие диски накатного ролика практически полнопрофильные и являются формирующими полный профиль и калибровку профиля ребер трубы. При этом одновременно осуществляется прикатка боковых поверхностей профиля ребер и выглаживание поверхностей с целью уменьшения шероховатости и достижения высокого класса чистоты поверхностей.

Перемещение материала осуществляется за счет приложения радиального усилия на каждый накатной ролик головки. При этом в момент контакта с материалом радиальные усилия раскладываются на составляющие. Тангенциальные усилия действуют вдоль поверхностей контакта ролика с трубой. На наклонных поверхностях профиля ролика усилия действуют перпендикулярно наклоненным под углом поверхностям, и вследствие воздействия на внутренние слои материала происходит его перемещение в сводные зоны профиля.

Сравнительный расчет перемещаемого материала при профилировании ребер труб маслоохладителей в нашем случае дает результат, указывающий на уменьшение внутреннего диаметра в готовой трубе по сравнению с трубой-заготовкой на 0,5 мм. Дальнейшее уменьшение предотвращается применением вспомогательным

инструментом – дорном, применяемым в процессе накатывания для центрирования накатываемой трубы.

При этом минимальная толщина стенки после профилирования равна 1 мм ( $S_{осн}^{min} = 1 \text{ мм}$ ), что обеспечивает цельность трубы после накатки без разрывов и каверн.

Всю последовательность действий по расчету перемещаемых объемов материала при накатке профиля и расчету размеров элементов накатных роликов можно пояснить приведенным алгоритмом на рис. 5. Исходим из того, что ФОР-процесс предварительно выбран из множества процессов по критериям, изложенным ранее [3, 4, 5].

В качестве исходных данных для разработки процесса накатки накатной головкой профиля оребренных труб из меди для маслоохладителя приняты предварительные расчеты наружного диаметра заготовки трубы и толщины стенки трубы в соответствии с расчетной величиной площади теплообмена [6, 7]. На этой основе предварительно принимаются параметры накатных роликов, включая наружный диаметр роликов, высоту профиля накатки, ширину роликов, форму впадин и др.

Учитывая принятые во внимание размеры профиля накатных роликов проводится проверка расчетной площади теплообмена оребренных труб и делается заключение о соответствии или не соответствии эксплуатационных параметров маслоохладителя. При принятии результатов для дальнейшей проработки проводится конструктивный расчет элементов ролика с учетом всех конструктивных переходных поверхностей.

Проводится конструктивно-технологический расчет по соответствию перемещаемых в процессе накатки объемов материала заготовки в зоны формирования ребер профиля трубы, выступающей над поверхностью заготовки. Расчеты перемещаемых объемов материала могут осуществляться согласно приведенному выше порядку расчетов по кольцевым сечениям.

По величинам перемещаемых объемов материала следует выбрать материал трубы-заготовки так, чтобы не было недостатка материала для формирования профиля ребер, и чтобы не оставалось излишнего материала. В противном случае излишки некуда переместить и существенно пострадает качество поверхности и размеры элементов профиля оребрения.

При необходимости согласования перемещаемых объемов металла для выбранной из номенклатурного перечня трубы-заготовки можно пересчитать некоторые элементы профиля роликов с тем, чтобы исключить несовпадение величин перемещаемых по зонам кольцевых объемов материала. В этом цикле перерасчет можно проводить с корректировкой толщин стенок труб-заготовок и элементов профиля накатных роликов до полного соответствия величин перемещаемых объемов по всем кольцевым зонам.

По окончании процесса расчета профилей накатных роликов можно переходить к процессу расчета режимов накатки, учитывая скорость накатки – число оборотов роликов и величину осевой подачи при соблюдении соответствующих требований к качеству обработанной поверхности.

Следует иметь в виду, что при проектировании безотходной ФОР-технологии формирования геометрического профиля вращающихся тел, для получения качественных поверхностей готовых изделий профили накатных роликов должны иметь различные части. Заборную часть – облегчает первичное внедрение в материал, формирующая часть – обеспечивает создание направлений для перемещения материала в свободное пространство профилирующих роликов. Калибрующая часть обеспечивает получение окончательного профиля детали, а выходная часть – обеспечивает выход из зацепления с профилем. При этом выходная часть выполняется, в случае отсутствия

возможности обеспечить выход, за счет применения скрещивающихся осей вращения самой заготовки и формирующих геометрию инструментов.

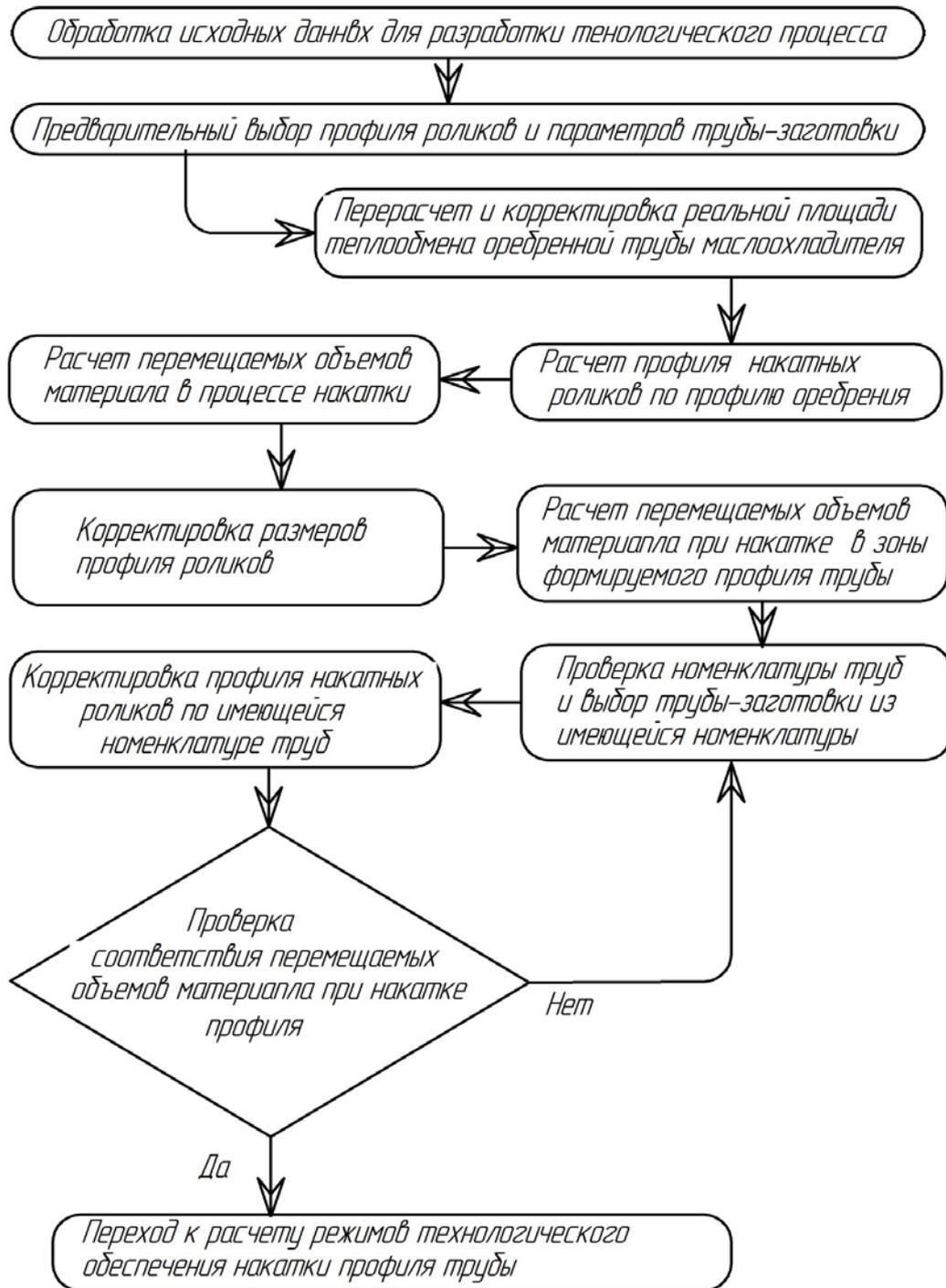


Рис. 5. Алгоритм расчета профиля накатного инструмента – роликов

Результаты проведенных в настоящей работе исследований позволили получить решение ряда поставленных задач и достичь намеченной цели.

Выполнено решение следующих задач:

1. Проведен расчет и получено техническое обоснование возможности изготовления оребренных труб для медных маслоохладителей гидропередач маневровых тепловозов без образования отходов производства.

2. Разработан порядок действий при разработке функционально-ориентированной безотходной технологии изготовления оребренных труб маслоохладителей из цельной медной трубы. Этот порядок проведения разработки технологии может быть применен при создании ФОТ-воздействий методом ХОПД при формировании любых профилей с осуществлением вращательных движений заготовки и инструмента.

3. Разработан порядок расчета и предложен алгоритм расчета инструментальных профилей накатных роликов, формирующих геометрию профиля оребрения труб. При этом проиллюстрирован порядок поэтапного формирования геометрических границ ребер профиля оребрения.

4. Обозначены функционально значимые связи конструктивных признаков детали и элементов инструментального профиля, обеспечивающего профилирование оребрения и создания требуемой площади теплообмена труб маслоохладителя.

5. Установлена укрупненная взаимосвязь между конструктивно значимыми функциональными признаками труб и технологическими признаками ФОТ-воздействий в общей и локальных системах координат трубы с обозначением соответствующих поверхностей. Приведены примеры записи формализованной функционально-значимых поверхностей в общей системе координат трубы.

Таким образом, в настоящей работе проработана методическая часть общей системы разработки ФОТ изготовления деталей машиностроительного комплекса методами ХОПД, в частности, с применением безотходных технологий. При этом приведен порядок проведения расчетов и дан алгоритм расчета инструментального обеспечения – накатных роликов.

**Список литературы:** 1. Михайлов А.Н. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий // Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 3 (70). С. 22-33. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120. 2. Михайлов А.Н. Предпосылки создания новой схемы механической зубчатой КПП с переключением без разрыва потока передаваемой мощности. // Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 2 (69). С. 50-62. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120. 3. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения: монография / А. Н. Михайлов. - Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2009. - 346 с. 4. Михайлов А. Н. Синтез структурных схем функционально-ориентированного технологического воздействия при формообразовании и формировании поверхностных свойств деталей КПП / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 2 (73). С. 53-67. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120. 5. Михайлов А. Н. Анализ деталей по функциональным признакам участков и зон согласно уровню и глубине технологического обеспечения целевой функции / Котляров В. Б., Котляров С. Б., Михайлов А. Н. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – Вып. 1 (76), ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120. 6. Теплообменники энергетических установок: учебное электронное издание / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин и др. под ред. Н.В. Лутова. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 7. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. - Изд. 5-е перераб. и доп. - М.: Атомиздат, 1979, 416 с.

## ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ

Михайлов А.Н., Матвиенко С.А., Лукичев А.В., Стрельник Ю.Н.

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР)

Тел. +7 (949) 3690510; E-mail: [a\\_lukichov@mail.ru](mailto:a_lukichov@mail.ru)

**Abstract:** *the article considers the issue of qualimetric assessment of finishing and strengthening technologies on the quality of processing of working surfaces of critical parts of machine interfaces. A generalized quality indicator is formed, which allows optimizing the set of necessary technological impacts.*

**Key words:** *qualimetry, technology, work surface, optimization, generalized indicator.*

В статье выполнена попытка квалиметрической оценки отделочно-упрочняющих технологических воздействий (ОУТВ), произведенных на поверхностный слой (ПС) основных рабочих поверхностей наиболее ответственных деталей сложных сопряжений в узлах и механизмах машин.

Актуальность поставленной задачи заключается в исследовании взаимосвязи применяемых ОУТВ и полученного качества ПС деталей. Существующие на сегодня и часто используемые современные методы технико-экономического обоснования выбора способов отделочно-упрочняющей обработки деталей на финишных этапах технологических процессов (ТП) изготовления деталей не в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к функционально-ориентированным свойствам (ФОС) поверхностей деталей [1, 2, 3]. Это обусловлено отсутствием общей базы и общих признаков классификации, как поверхностей, так и технологических воздействий (ТВ), что значительно затрудняет выбор наиболее объективного и точного технико-экономического обоснования наиболее оптимального способа обработки (из возможных к осуществлению на конкретном предприятии), возможного набора ТВ.

Цель работы заключается в разработке методики квалиметрической оценки качества функционально-ориентированных отделочно-упрочняющих воздействий на ПС основных рабочих поверхностей наиболее ответственных деталей сложных сопряжений в узлах и механизмах машин.

Для правильного и достоверного выбора комплекса условий, ограничений и критериев, определяющих выбор необходимого набора ТВ необходимо знать заданное конструктором качество изделия, включающее его эксплуатационные свойства и меру полезности [5].

Установлено, что для существенного повышения эксплуатационных свойств изделий, позволяющего выйти на новый уровень качества рабочих поверхностей, необходимы нетрадиционные функционально-ориентированные технологии, обеспечивающие изменяющиеся в пространстве и/или во времени свойства как изделия в целом, так и его элементов, в том числе на макро-, микро- и наноуровнях [4]. Данная задача достаточно эффективно решается на основе применения функционально-ориентированных отделочно-упрочняющих комбинированных технологий, которые позволяют обеспечивать качественно новую совокупность свойств и меру полезности изделий машиностроения.

Для определения качества и структуры ПС ответственной детали необходимо провести анализ ее служебного назначения и выявить структурный набор эксплуатационных функций, действующих на деталь в процессе её эксплуатации в течении всего срока службы (рис. 1).

Структурная схема выбора параметров оптимального состояния рабочих поверхностей деталей машин, обеспечивающих требуемое качество детали и структуро-раковалиметрической оценки изделия машиностроения, представлена на рисунке 2.

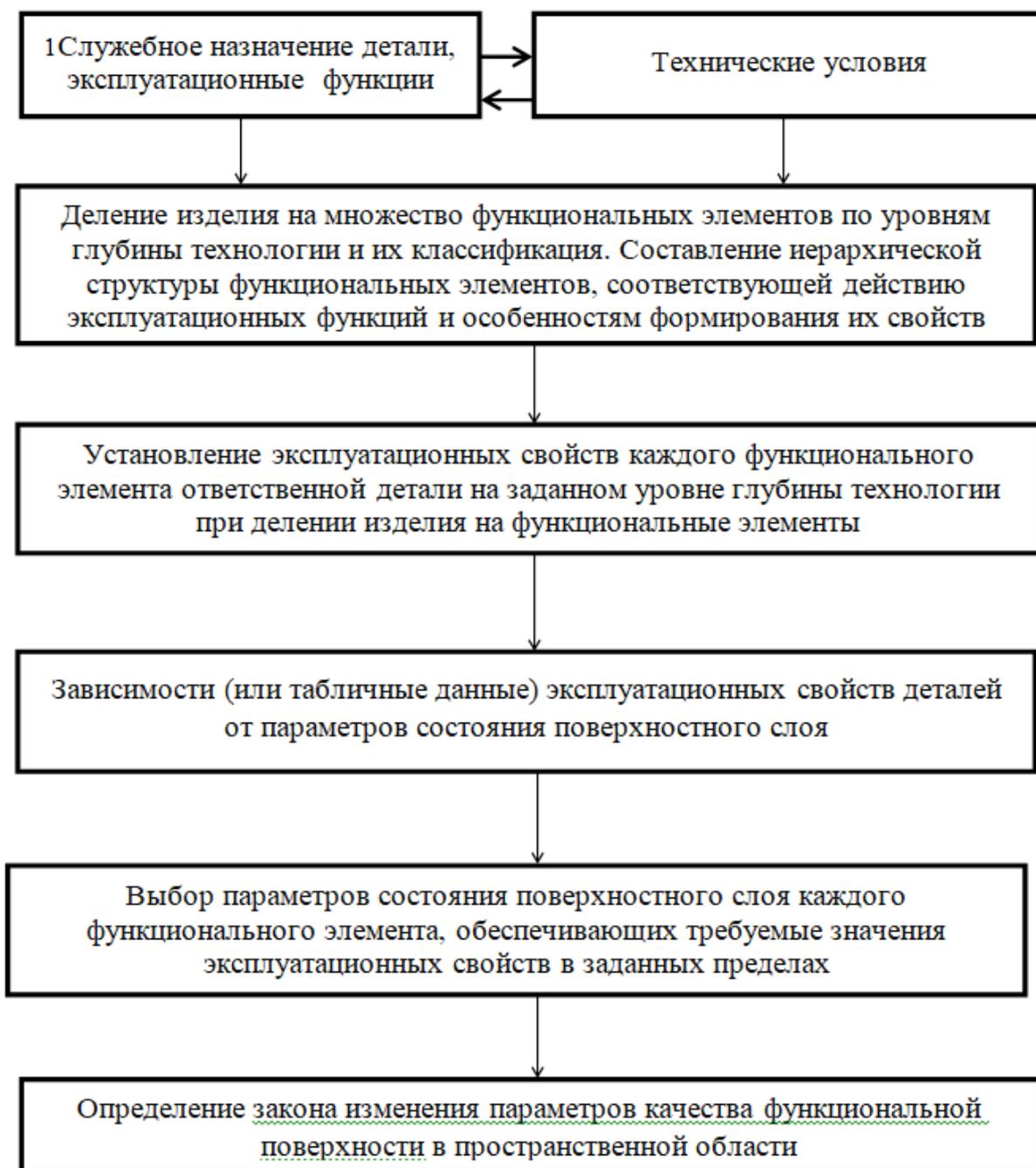


Рис. 1. Структурная схема выбора закона изменения параметров качества функциональной поверхности в пространственной области

Выбор варианта технологического воздействия из составленной на предприятии базы данных выполняется в следующей последовательности:

1) Определение исходных данных: требуемое качество ПС, с учетом закона изменения функциональных параметров ПС в процессе эксплуатации, мера полезности детали (рис. 1);

2) Выбор всех возможных способов обработки из базы данных, обеспечивающих требуемое качество ПС на базе функционально-ориентированного подхода;

3) Выбор востребованных потребителем показателей качества изделия экспертным методом и определение степени значимости выбранных показателей с их ранжированием;

4) Оценка степени влияния параметров качества ПС (зон, элементов) на значимые эксплуатационные показатели изделия:

– классификация выбранных параметров качества каждой функционально-ориентированной зоны ПС по степени влияния на заданные эксплуатационные показатели изделия;

– количественная оценка степени влияния каждого выбранного параметра качества каждой функционально-ориентированной зоны, элемента ПС на определенный показатель качества изделия;

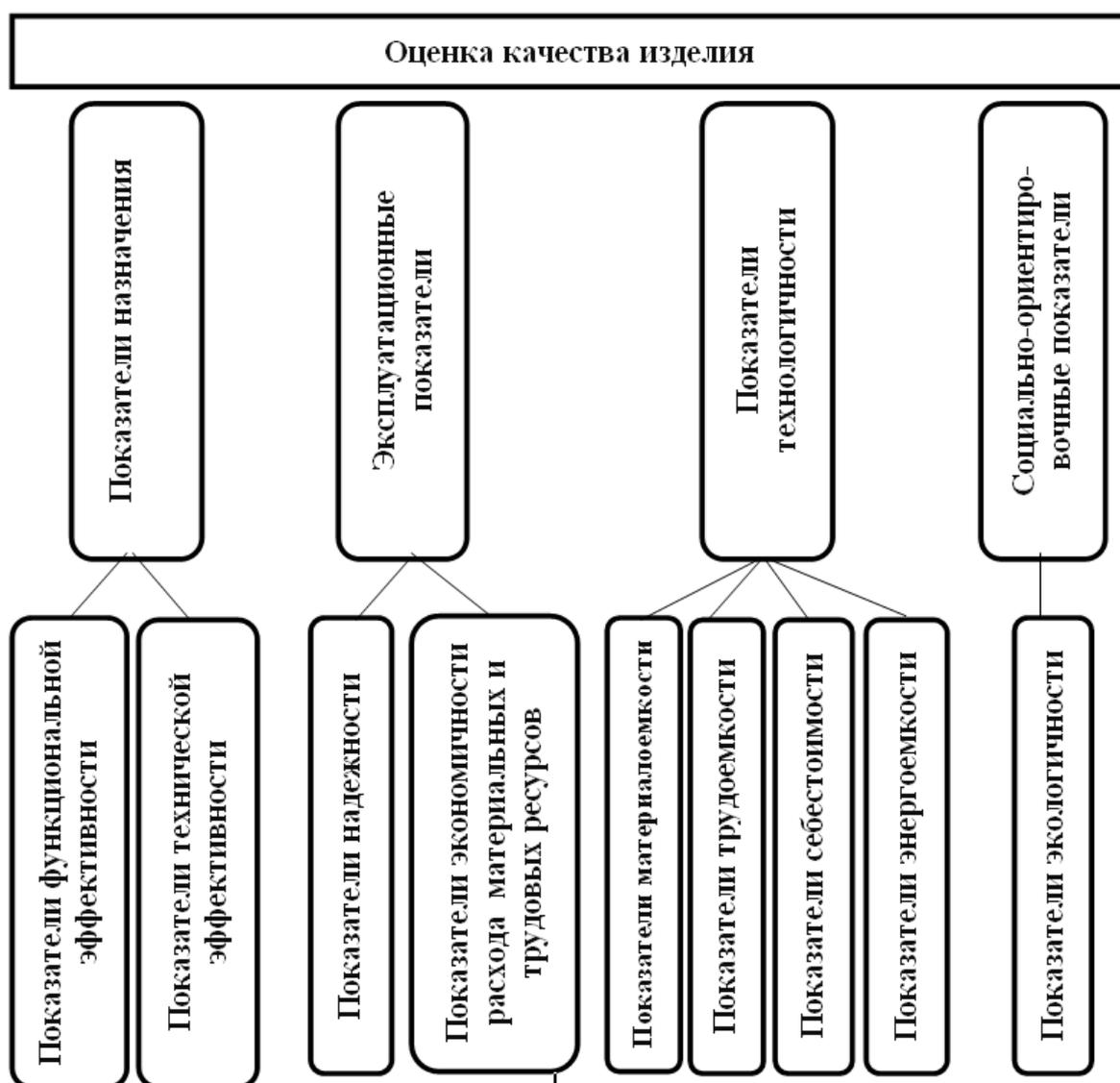


Рис. 2. Структура квалиметрической оценки изделия машиностроения

5) Расчет обобщенного показателя критерия качества для каждого  $i$ -го варианта технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки:

– определение значимости отдельных параметров качества каждой функционально-ориентированной зоны ПС в обеспечении требуемых с точки зрения полезности эксплуатационных свойств изделия;

– выполняется оценка влияния отдельного параметра качества каждой функционально-ориентированной зоны, элемента ПС на комплекс эксплуатационных свойств изделия в целом;

– определяется степень влияния каждого  $k$ -го параметра качества каждой функционально-ориентированной зоны ПС на  $i$ -е эксплуатационное свойство с учетом его значимости с точки зрения полезности и оценки;

– рассчитывается критерий внешнего качества по каждому  $i$ -му варианту технологического процесса;

– производится обобщенная оценка качества ПС детали для каждого из сравниваемых вариантов технологических процессов.

Предложенная методика получения обобщенного квалиметрического показателя по набору выбранных свойств позволяет выбрать наиболее оптимальный вариант технологических воздействий из существующих альтернативных вариантов.

**Список литературы:** 1. Дудников, И. А. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей, определяющих надежность сельскохозяйственных машин / И. А. Дудников. - Текст : непосредственный. // Технологический аудит и резервы про изводства. -2011. - № 1(1). С. 33-36. 2. Леонтьев, Л. Б. Системный анализ технологии формирования износостойких покрытий на поверхностях трения деталей / Л. Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев, В.Н. Макаров. Текст : непосредственный. // Фундаментальные исследования. - 2014. - № 12-4. - С. 729-734. 3. Фролов, В.Я. Квалиметрические методы оценки качества мехатронных систем / В.Я Фролов, С.А Драченко. - Текст : непосредственный. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - 2009. - № 44. - С. 168-173. 4. Михайлов, А. Н. Дискурсивное развитие стратегии функционально-ориентированного метода разработки технологических процессов в машиностроении / А. Н. Михайлов. Текст : непосредственный. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. - № 1(52). - С.126-135. 5. Соколова Е. Ю. Повышение качества технологических процессов в машиностроении на основе его количественной оценки: специальность 05.02.23 Стандартизация и управление качеством продукции. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Соколова Елена Юрьевна ; Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева. - Рыбинск, 2013 г. - 16 с. Текст : непосредственный.

# КОМПЛЕКСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ГТД НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

Михайлов Д.А., Михайлов А.Н., Хавлин Т.В., Пичко А.П., Шейко Е.А.

(АГЗ МЧС ДНР, ДонНТУ, Академия МВД ДНР, УФ УГТУ,

г. Донецк, г. Усинск, ДНР, Россия)

Тел.: +7 949 3821135; E-mail: [dmitry.michailov@mail.ru](mailto:dmitry.michailov@mail.ru)

**Abstract:** *In the presented work, an integrated approach is proposed to ensure and improve the operational properties of the structure of a gas turbine engine. This approach is based on the formation of functionally oriented properties of its elements. The issues of ensuring equal, multiple or functionally dependent operational properties of the structure of a gas turbine engine are considered. And also the features of increasing the operational properties of the structure of an aircraft engine based on the formation of functionally oriented properties of its elements are given.*

**Key words:** *gas turbine engine, structure, non-uniformity, integrated approach, operational properties, function-oriented properties.*

## Введение

Авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) относятся к сложным системам, состоящим из множества различных элементов и подсистем, выполняющих заданные эксплуатационные функции [1, 2]. Важнейшими показателями качества при их изготовлении этих систем является обеспечение заданных эксплуатационных параметров.

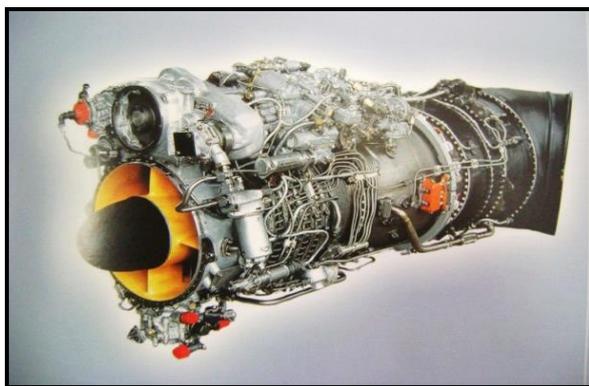


Рис. 1. Общий вид вертолетного ГТД серии ТВ3-117

В настоящее время, при создании и изготовлении ГТД и их элементной базы разработано множество различных методов, направленных на повышение эксплуатационных параметров элементов авиационных двигателей. Вместе с тем, эти методы, в ряде случаев, не позволяют решать вопросы дальнейшего повышения эксплуатационных свойств, особенно сейчас, когда требуется значительное их повышение и обеспечение качественно новой совокупности свойств. Это обусловлено тем, что резко возрастают эксплуатационные нагрузки современных авиационных двигателей, имеющих сложную структуру

элементов и подсистем. При этом на детали и подсистемы двигателя действуют неравномерные эксплуатационные воздействия, которые могут быть  $R$ -родов [3], которые приводят к неравномерным износам и разрушениям отдельных деталей и подсистем ГТД.

Одним из возможных направлений в повышении эксплуатационных свойств ГТД является создание их элементной базы с функционально-ориентированными свойствами (ФОС) [4, 5]. Вместе с тем, следует отметить, что решение вопросов только повышения эксплуатационных свойств ГТД в настоящее время не достаточно. Так как, повышая свойства ГТД, имеющего сложную структуру элементов, решаются вопросы увеличения только эксплуатационных параметров отдельных элементов и подсистем. Прежде всего, сначала нужно решить вопросы обеспечения эксплуатационных свойств всей структуры элементов и подсистем, например, создания равных, кратных, функционально-зависимых или специальных свойств всех элементов структуры ГТД.

Поэтому при формировании ФОС структуры ГТД необходимо комплексно (совместно) решать следующие вопросы: обеспечения равных, кратных, функционально-зависимых или специальных эксплуатационных свойств всей структуры; повышения эксплуатационных свойств всех элементов структуры двигателя.

Целью данной работы является создание комплексного подхода в обеспечении и повышении эксплуатационных параметров структуры ГТД на основе формирования ФОС его элементов, который повышает технико-экономические показатели изготовления и эксплуатации элементов авиационного двигателя.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: разработать комплексный подход в обеспечении и повышении эксплуатационных параметров структуры ГТД на основе формирования ФОС его элементов; представить основные особенности обеспечения равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств структуры ГТД; рассмотреть вопросы повышения эксплуатационных свойств структуры ГТД на основе формирования ФОС его элементов; рассмотреть вопросы определения технико-экономических показателей структурных вариантов ГТД при их изготовлении и эксплуатации, необходимых в процессе синтеза оптимальной структуры.

### **1. Особенности комплексного обеспечения и повышения эксплуатационных параметров структуры ГТД**

Решение вопросов комплексного обеспечения и повышения эксплуатационных свойств структуры ГТД обусловлено целым рядом особенностей. Прежде всего, этот процесс должен выполняться на базе формирования ФОС структуры ГТД. В процессе обеспечения ФОС структуры ГТД необходимо учитывать то, что она имеет сложный состав элементов и подсистем, и на них действуют неравномерные эксплуатационные воздействия. При формировании ФОС, а именно физико-механических свойств материала элементов структуры, следует иметь в виду, что они имеют структуру *R*-классов. При этом между элементами структуры ФОС ГТД должны действовать связи или закономерности параметров физико-механических свойств. Поэтому комплексное обеспечение и повышение эксплуатационных параметров структуры ГТД в данной работе выполняется на базе формирования ФОС элементов. При этом этот процесс имеет определенные особенности, к которым можно отнести следующее:

- обеспечение эксплуатационных параметров структуры ГТД выполняется на базе ряда вариантов их обеспечения, а именно: равных, кратных, функционально-зависимых или специальных свойств; это связывает свойства элементов структуры в единую систему свойств;

- повышение эксплуатационных параметров структуры ГТД реализуется на основе разработанных условий распределения физико-механических свойств по структуре его элементов; в этом случае возможны следующие варианты повышения эксплуатационных свойств: заданные свойства, требуемые свойства, назначенные свойства, гарантированные свойства, предельные свойства, оптимальные свойства.

На рис. 2 представлена структурная схема комплексного обеспечения и повышения эксплуатационных свойств структуры ГТД, которые выполняются на базе формирования ФОС. Можно отметить, что при комплексном обеспечении и повышении эксплуатационных свойств структуры ГТД реализуется следующее:

- выполняется обеспечение эксплуатационных свойств структуры ГТД, а именно за счет реализации равных, кратных, функционально-зависимых свойств или специальных эксплуатационных свойств (например, ресурса) всех элементов структуры; то есть в этом случае, производится связывание структуры свойств в единую систему;

- одновременно производится повышение эксплуатационных свойств структуры ГТД; в этом случае возможны следующие варианты повышения эксплуатационных

свойств, а именно: заданные свойства, требуемые свойства, назначенные свойства, гарантированные свойства, предельные свойства, оптимальные свойства.

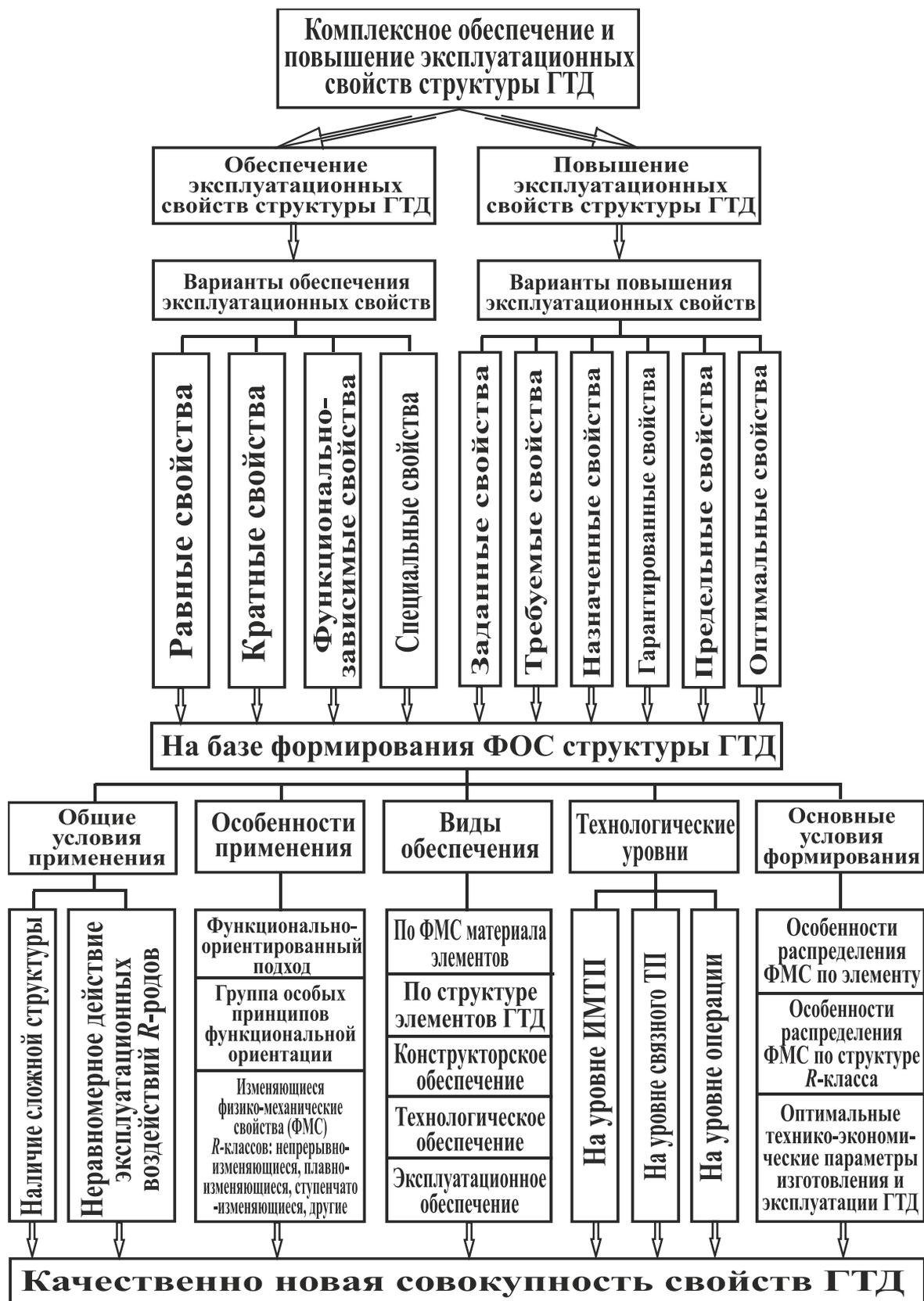


Рис. 2. Структурная схема комплексного обеспечения и повышения эксплуатационных свойств структуры ГТД на базе формирования ФОС

Следует отметить, что комплексное решение вопросов обеспечения и повышения эксплуатационных свойств структуры ГТД выполняется на основе формирования специальных физико-механических свойств элементов структуры ГТД, а именно посредством выполнения ФОС элементов структуры ГТД [4, 5]. В этом случае, структура ФОС может определяться  $R$ -классами. При этом ФОС элементов структуры формируются на базе функционально-ориентированного подхода [4, 5], который реализуется с помощью специальной технологии – интегрированного многосвязного технологического процесса (ИМТП) обеспечения ФОС [6, 7, 8].

Также можно отметить, что предлагаемый комплексный подход в обеспечении и повышении эксплуатационных свойств структуры ГТД на базе реализации ФОС элементов целесообразен для эксплуатационных условий, возникающих в авиационных ГТД, а именно в следующих общих условиях применения:

- наличие сложной структуры ГТД;
- неравномерное действие эксплуатационных воздействий по структуре ГТД  $R$ -родов.

Можно отметить, что в целом, процесс формирования ФОС элементов структуры ГТД (рис. 2) обусловлен следующим:

- общими условиями применения ГТД;
- особенностями применения ФОС элементов структуры ГТД: функционально-ориентированный подход, группа особых принципов функциональной ориентации параметров, изменяющимися ФМС  $R$ -классов (непрерывно-изменяющихся, плавно-изменяющихся, ступенчато-изменяющихся, других параметров свойств);
- видами обеспечения ФОС структуры ГТД: по ФМС материала элементов, по структуре элементов ГТД, конструкторским обеспечением; технологическим обеспечением, эксплуатационным обеспечением;
- технологическими уровнями реализации ФОС структуры ГТД: на уровне ИМТП, на уровне связанных технологических процессов (ТП) изготовления элементов структуры ГТД, на уровне операций;
- основными условиями формирования ФОС структуры ГТД, а именно: особенностями распределения физико-механических свойств (ФМС) по каждому элементу структуры ГТД; особенностями распределения ФМС по структуре элементов  $R$ -класса; оптимальными технико-экономическими параметрами изготовления и эксплуатации ГТД.

Далее, более детально рассмотрим вопросы обеспечения и повышения эксплуатационных свойств структуры ГТД.

## **2. Обеспечение равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств структуры ГТД**

Можно отметить, что обеспечение эксплуатационных параметров структуры ГТД целесообразно выполнять на базе реализации равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств элементов структуры. В этом случае, необходимо установить закономерности (связи) эксплуатационных свойств (например, ресурса) между элементами структуры [8]. Эти вопросы решаются на базе изменяющихся ФМС свойств структуры – посредством специальных ФОС элементов. В связи с этим, параметры ФОС формируются в зависимости от показателей эксплуатационных свойств (надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость). Здесь, ФОС элементов структуры ГТД должны формироваться на базе следующих вариантов эксплуатационных свойств:

- выполнения равных эксплуатационных свойств всех элементов структуры

$$C_1 = C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n ; \quad (1)$$

- выполнения кратных эксплуатационных свойства всех элементов структуры

$$k_1 C_1 = k_2 C_2 = \dots = k_i C_i = \dots = k_n C_n ; \quad (2)$$

- выполнения функционально-зависимых эксплуатационных свойства всех элементов структуры

$$f_1(C_1) = f_2(C_2) = \dots = f_i(C_i) = \dots = f_n(C_n), \quad (3)$$

где  $C_i$  - параметры эксплуатационных показателей свойств (эксплуатационные свойства)  $i$ -го элемента структуры ГТД;  $k_i$  - коэффициент кратности эксплуатационных свойств для  $i$ -го элемента структуры ГТД;  $f_i(C_i)$  - зависимость эксплуатационных свойств для  $i$ -го элемента структуры ГТД;  $n$  – количество элементов структуры ГТД.

Можно отметить, что закономерности (связи) для обеспечения ФМС структуры элементов ГТД определены в работе [8].

### 3. Особенности повышения эксплуатационных свойств структуры ГТД на основе формирования ФОС его элементов

Отметим, что выше установлены связи или закономерности обеспечения эксплуатационных свойств структуры ГТД на основе реализации равных, кратных, функционально-зависимых или специальных эксплуатационных свойств элементов. Однако, при комплексном подходе (рис. 2) необходимо решать также вопросы повышения эксплуатационных свойств структуры ГТД. Как это выполнить? Это можно реализовать на основе разработанного условия распределения эксплуатационных свойств, выполняемого посредством выражений (1), (2) или (3), и формирования заданных эксплуатационных свойств, посредством назначения необходимых ФМС  $j$ -му критическому элементу (наиболее нагруженному (изнашиваемому) элементу) структуры ГТД. При этом ФМС этого элемента должны обеспечивать заданные, требуемые, назначенные, гарантированные, предельные или оптимальные эксплуатационные свойства этому элементу. Можно отметить, что ФМС по другим элементам структуры ГТД назначаются и выполняются автоматически в соответствии с разработанным выражением (4). Таким образом, процесс распределения ФМС на основе обеспечения ФОС элементов структуры ГТД выполняется в следующем порядке:

- сначала, назначаются заданные, требуемые, предельные или другие ФМС  $j$ -му критическому элементу (наиболее нагруженному (изнашиваемому) элементу) структуры ГТД;

- затем, назначаются и выполняются ФМС следующего  $i$ -го элемента структуры ГТД, на который действует меньшая нагрузка (износ), чем на  $j$ -й элемент структуры, но предельная для оставшейся части структуры элементов;

- далее, назначаются и выполняются ФМС следующего элемента структуры ГТД, на который действует меньшая нагрузка (износ), чем на  $i$ -й элемент структуры, но предельная для оставшейся части структуры элементов, и так далее.

В целом, выражение (4) устанавливает закономерности или условия распределения ФОС в зависимости от обеспечения равного, кратного или функционально-зависимого ресурса элементов структуры ГТД:

$$\left. \begin{aligned} C_j &= f_1(P_j, \mu_j) \rightarrow (\max \vee M_n); \mu_j = f_j(F_j, C_j^0, T_j); \\ 1. [C_1 &= C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n]; \\ 2. [k_1 C_1 &= k_2 C_2 = \dots = k_i C_i = \dots = k_n C_n]; \\ 3. [f_1(C_1) &= f_2(C_2) = \dots = f_i(C_i) = \dots = f_n(C_n)]; \\ C_i &= f_1(P_i, \mu_i); \mu_i = f_i(F_i, C_i^0, T_i), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $C_j$  - показатели эксплуатационных свойств  $j$ -го критического элемента (наиболее изнашиваемого элемента) структуры ГТД;  $C_j = f_1(P_j, \mu_j)$  - функциональная зависи-

мость показателей эксплуатационных свойств  $C_j$  от параметров  $P_j$  и  $\mu_j$   $j$ -го критического элемента структуры ГТД;  $P_j$  - совокупность ФМС  $j$ -го критического элемента структуры ГТД, обеспечивающих выполнение заданных эксплуатационных свойств;  $\mu_j$  - интенсивность разрушения  $j$ -го критического элемента структуры ГТД;  $P_i$  - совокупность ФМС  $i$ -го элемента структуры ГТД, обеспечивающих выполнение заданных  $C_i$  показателей эксплуатационных свойств (например, общее количество допустимых циклов нагружения элемента структуры, толщина износостойкого покрытия и тому подобное);  $\mu_i$  - интенсивность разрушения  $i$ -го элемента структуры ГТД;  $M_n$  - заданный эксплуатационный показатель свойств  $j$ -го критического элемента структуры ГТД;  $F_j, C_j^o, T_j$  - параметры эксплуатационных воздействий, физико-механических и технологических свойств, соответственно, для  $j$ -го критического элемента структуры ГТД;  $C_i$  - показатели эксплуатационных свойств любого  $i$ -го элемента структуры ГТД;  $n$  - общее количество элементов структуры ГТД;  $C_i = f_1(P_i, \mu_i)$  - функциональная зависимость показателей эксплуатационных свойств  $C_i$  от параметров  $P_i$  и  $\mu_i$   $i$ -го элемента структуры ГТД;  $F_i, C_i^o, T_i$  - параметры эксплуатационных воздействий, физико-механических и технологических свойств, соответственно, для любого  $i$ -го элемента структуры ГТД.

Таким образом, представленное выражение (4) позволяет решать вопросы распределения ФМС по элементам структуры ГТД на основе формирования ФОС, выполняемых из условия обеспечения равных, кратных, функционально-зависимых эксплуатационных свойств всех элементов структуры. При этом назначая заданные, требуемые, предельные или другие эксплуатационные свойства  $j$ -го критического элемента структуры (наиболее нагруженного элемента) производится автоматическое формирование ФОС всей структуры элементов ГТД, а также комплексное обеспечение и необходимое повышение эксплуатационных свойств для всей структуры ГТД.

#### 4. Обеспечение технико-экономических показателей при формировании ФОС структуры ГТД

В соответствии с рис. 2 основное условие формирования ФОС структуры элементов ГТД является обеспечение оптимальных технико-экономических параметров изготовления и эксплуатации ГТД. В этом случае, обеспечение ФОС элементов структуры должно выполняться из условия оптимальности затрат на эксплуатацию и изготовление всех элементов ГТД, которые определяются на основании следующей зависимости:

$$Z_{\Sigma} = \left| \sum_{i=1}^n S_i + E_n \sum_{i=1}^n K_i \right| \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $Z_{\Sigma}$  - приведенные затраты на изготовление и эксплуатацию всех элементов структуры ГТД с ФОС;

$S_i$  - себестоимость эксплуатации  $i$ -го структурного элемента ГТД с ФОС;

$E_n$  - нормативный коэффициент экономической эффективности капиталовложений;

$K_i$  - необходимые капиталовложения для создания  $i$ -го структурного элемента ГТД с ФОС;

$i$  - номер любого элемента структуры ГТД;

$n$  - общее количество структурных элементов ГТД,

Таким образом, на основании выражения (5) определяются оптимальные технико-экономические параметры изготовления и эксплуатации ГТД. Этот процесс может выполняться на базе методов направленного поиска оптимальных структурных вариантов ГТД.

### **Заключение**

Представленные результаты направлены на создание комплексного подхода в обеспечении и повышении эксплуатационных параметров структуры ГТД на основе формирования ФОС его элементов. Этот подход позволяет одновременно решать вопросы обеспечения равных, кратных или других эксплуатационных свойств всех элементов структуры ГТД, а также вести повышение их параметров до предельных значений. Все это позволяет создавать качественно новую совокупность свойств ГТД, а именно:

- обеспечивается предельный эксплуатационный потенциал всех элементов структуры авиационного двигателя;
- обеспечивается возможность повышения эксплуатационных свойств ГТД;
- обеспечивается возможность управлять эксплуатационными свойствами элементов структуры при их изготовлении;
- повышаются технико-экономические показатели ГТД.

**Список литературы:** 1. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М. : Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2021. - Вып. № 6 (207). – 88 с. 2. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев, В. А. Зрелов, Ю. М. Игнаткин и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с. 3. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. - Вып. 4 (50). - С. 126 - 131. 4. Патент № 2718877. Российская Федерация. С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов [и др.]. Заявка № 2018107164 от 26.02.2018. – Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с. 5. Михайлов, Д. А. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств структуре газотурбинного двигателя на базе комплексной многосвязной технологии / Д. А. Михайлов и [др.] // Передовые технологические разработки: перспективы внедрения в производство и эффективность передовые технологические разработки: перспективы внедрения в производство и эффективность: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Армавир: КГТУ, АМТИ, 2021. – С. 13-18. 6. Михайлов, Д. А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя структуре / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. - Вып. 1 (72). - С. 40 - 57. 7. Михайлов, Д. А. Интегрированный технологический инжиниринг параметров в процессе синтеза функционально-ориентированных свойств структуры лопаток компрессора газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2022. - Вып. 1 (76). - С. 53 - 65. 8. Михайлов, Д. А. Основные особенности и условия обеспечения эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя по его структуре / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2022. - Вып. 2 (77). - С. 35 - 49.

## ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПО ДАННЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Михайлов Д.Л., Ермишкин В.А., Минина Н.А.

ИМЕТ РАН, Москва, Россия Тел./факс: +7(499)1359668/+7(499) 1358680

[eva@imet.ac.ru](mailto:eva@imet.ac.ru); [minina1951@rambler.ru](mailto:minina1951@rambler.ru)

**Abstract:** The aim of the work was to compare the thermal stability of the studied alloys and to choose the most thermally stable alloy. The experimental part of this study was carried out on chromium-nickel corrosion-resistant alloys Solution-N (IMET RAS) and KhN62M. The results obtained gave grounds for the choice in favor of the Solvent-N alloy.

Вопрос об оценке термической стабильности жаропрочных коррозионно-стойких сплавов на основе хромоникелевых композиций обычно решается по результатам экспериментальных исследований их механических свойств и соответствующих им структурных состояний в заданном температурном интервале. Для получения надежных данных требуются длительные испытания при повышенных температурах большого количества образцов. Ввиду комплексного характера требований, определяющих работоспособность материала в эксплуатационных условиях, и отсутствия физически обоснованного критерия для оценки термической стабильности структуры материала в условиях воздействия на него различных по природе факторов следует обсудить эту проблему с общих позиций теплофизики. Энергетическое воздействие на материал ( $dQ$ ) в дифференциальной форме в изобарических условиях описывается формулой [1, 2]:

$$dQ = dU + pdV \quad (1)$$

где:  $dU$  – внутренняя энергия материала образца,  $pd$  – работа над материалом при энергетическом воздействии,  $dp = 0$  в силу изобарических условий процесса. Зависимость линейных размеров материала образца от температуры записывается на dilatометре в виде:

$$d(T) = d_o(1 + \alpha T) \quad (2)$$

где:  $d_o$  – длина ребра кубика элементарного объема материала при 20°C,  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала образца,  $T = 293^\circ\text{C}$ . С учетом формулы (2) объем  $V$  образца можно выразить формулой:

$$V = \frac{m}{\rho_o d_o^3 (1 + \alpha T)^3} \quad (3)$$

где:  $m$  – масса образца,  $dm$  – изменение массы образца в процессе эксперимента.

Дифференцирование выражения (2) дает:

$$dV = \frac{dm}{\rho_o d_o^3 (1 + \alpha T)^3} - \frac{3m}{\rho_o d_o^3 (1 + \alpha T)^4} \quad (4)$$

Дериватограф зафиксировал увеличение массы исследуемого образца в процессе нагрева при проведении эксперимента. Это не может быть следствием структурных перестроек, так как количество атомов в образце остается постоянным, а эффект от их испарения и от влияния закона Архимеда приводил бы к снижению веса образца, а не к увеличению его массы. Таким образом, источник увеличения, по-видимому, может быть следствием поглощения газов из атмосферы в приборе. Приращение массы можно описать линейной зависимостью:

$$dm = \rho_g dT \quad (5)$$

где:  $\rho_g$  – плотность поглощаемых газов. При изобарических условиях нагрев образца приводит к увеличению удельной внутренней энергии материала образца и выразится формулой:

$$U = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (6)$$

где:  $C_p$  – теплоемкость материала при постоянном давлении. В качестве критерия термической стабильности мы предлагаем использовать энтропию материала, подвергаемого внешнему энергетическому воздействию. Действительно, для материала, который подвергается энергетическому воздействию в полностью обратимом процессе, энтропия остается без изменений. Изменение объема материала образца при нагреве происходит в результате его термического расширения, изменений удельного объема фазовых составляющих сплава при стимулированных нагревом фазовых переходах и увеличением концентрации вакансий с ростом температуры. Развитие этих структурных изменений сопровождается возрастанием энтропии материала образца. Рост энтропии характеризует степень необратимых изменений в его структуре. Элементарное изменение энтропии при физических воздействиях на материал в теплофизике описывается формулой [1]:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (7)$$

где:  $dQ$  - мера энергетического воздействия,  $T$  - температура, при которой происходит внешнее воздействие на образец. Подставив в формулу (7) выражение (1) после подстановки в нее слагаемых, смысл которых раскрыт через параметры образца и свойства материала. В результате формула (7) приобретает вид:

$$dS = \frac{C_v}{T} dT + \frac{p\rho_g dT}{\rho_0 d_0^3 T(1+\alpha T)^3} - \frac{3pm dT}{\rho_0 d_0^3 T(1+\alpha T)^4} \quad (8)$$

Формула (7) описывает энтропию элементарного кубика при воздействии на нее энергетического воздействия величиной  $dQ$ . После ее интегрирования в пределах температурного интервала  $[T_1, T_2]$  и умножения на величину объема образца  $V$  получаем выражение для расчета температурной зависимости энтропии образца. После введения обозначений:  $B = \frac{p\rho_g}{\rho_0 d_0^3}$  и  $C = \frac{3pm}{\rho_0 d_0^3}$  и интегрирования выражения (8) получаем формулу для определения изменения энтропии в процессе нагрева в заданном температурном интервале  $T_1 - T_2$  (9):

$$S = C_v + \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + B \cdot \left\{ \frac{\ln T}{(1+\alpha T)^3} + \frac{\ln T}{\alpha(1+\alpha T)^2} \right\} + C \left\{ \frac{\ln T}{(1+\alpha T)^4} + \frac{\ln T}{\alpha(1+\alpha T)^3} \right\} \quad (9)$$

Интегралы в выражении (9) нужно вычислять в температурном интервале  $[T_1, T_2]$ .

Экспериментальная часть настоящего исследования выполнена на хромоникелевых коррозионностойких сплавах Раствор-Н (ИМЕТ РАН) и ХН62М, химический состав которых приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сплавов в масс. %

Сплав	Ni	Cr	Mo	Al	Fe	Mn	C	La
Раствор-Н	60,2	29,6	8,75	0,21	0,011	0,0033	0,0025	0,0012
ХН62М	63,54	23,21	12,78	0,11	0,47	0,03	0,005	Nb-0,03

Испытания были проведены на дериватографе TGA/SDTA фирмы Mettler Toledo, который позволяет осуществлять дифференциальный термический анализ с автоматизированной записью результатов измерений при нагреве с программным изменением температуры в инертной атмосфере. Оба сплава были термообработаны на однофазный твердый раствор.

Цель работы состояла в сравнении термической стабильности исследуемых сплавов и в выборе наиболее термически стабильного сплава. Результаты расчетов по формуле (9) дали необходимые данные для такого выбора. Они же подтвердили предположение о возможности использовать значения энтропии в качестве критерия

Проведенные расчеты дали основания для выбора в пользу сплава Раствор-Н. По своему физическому смыслу формула (9) является уравнением температурной зависимости энтропии сплава, подвергнутой заданному режиму термообработки. Поскольку при расчетах широко использовались данные дилатометрии, они позволяют учесть практически все вклады в энтропию от эффектов, которые дают вклады как в тепловые эффекты, сопровождающие нагрев образцов, и прежде всего, тепловые и размерные. Большим недостатком настоящей работы являются использованные методы оценки параметров уравнения (9). В литературе имеется очень ограниченная информация по ограниченному числу никель хромовых сплавов. На рис. показана температурная зависимость энтропии никель хромовой сплава ХН62М [2]. Из рисунка видно, что энтропия исследуемого сплава изменяется в две стадии, которые определяются кинетикой изменения хода кривой. Начало второй стадии соответствует началу интенсификации рекристаллизации.

Выводы:

1. Разработана математическая модель для оценки температурной зависимости энтропии, основанная на анализе процесса нагрева исследуемых образцов по данным дифференциального температурного анализа.
2. На основе предложенной модели была описана температурная зависимость двух никель хромовых сплавов.
3. Проведенные исследования подтвердили возможность применения значений энтропии для обоснования выбора технологии термообработки сплавов.

Работа выполнялась по государственному заданию № 075-00715-22-00.

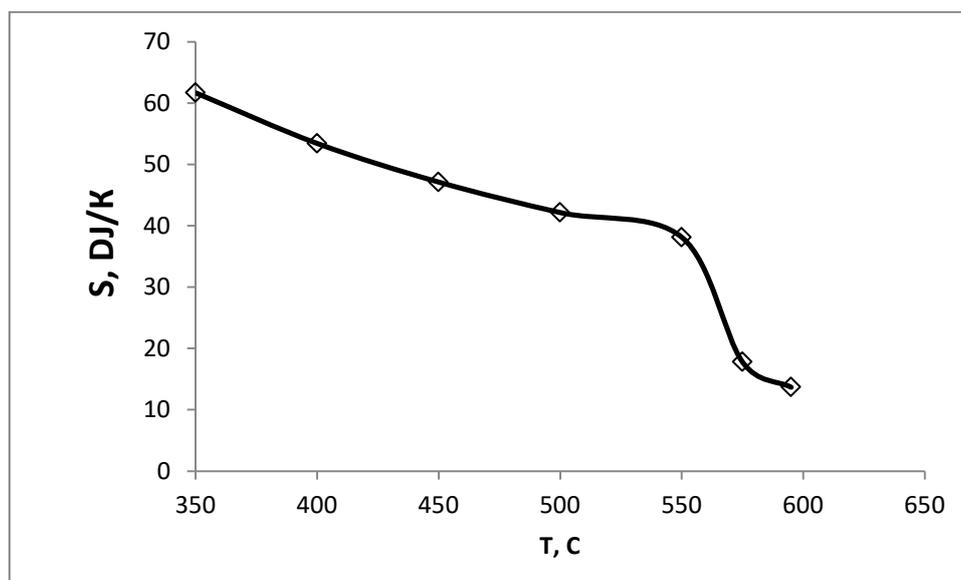


Рис. 1. Температурная зависимость энтропии сплава Х62НМ

**Список литературы:** 1. Мейер К. Физико-химическая кристаллография, М.: Металлургия 1972. 480 с. 2. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. М.:Металлургия. 1981, 502 с. 3. Смитлз К.А. Металлы, справочник, М.: Металлургия.1981, 416 с.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СБОРКИ И МОНТАЖА ГАЗОТУРБИННЫХ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

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

**Abstract:** The article discusses the issues of improving the manufacturability of the assembly of gas turbine units based on the use of compensating influences.

**Key words:** technology, quality, fastening, pipelines, compensation.

Энергетические или газоперекачивающие агрегаты (ГТА и ГПА) любой мощности представляет собой сложные технологические комплексы, состоящие из различного оборудования, механизмов и других конструктивных образований, работы которых обеспечивается системами базирования модулей и трубопроводными системами [1].

Процесс монтажа любого объекта ГТА и ГПА заключается в его установке на фундаменте и соответствующей центровки при помощи направляющих и регулирующих элементов. Для установки турбогенератора на раму в нужное положение выставляются необходимые расстояния между опорными поверхностями рамы и турбогенератора с помощью отжимных болтов. Затем замеряются зазоры между ними для определения толщин прокладок. По полученным результатам выполняется разметка прокладок 1 и их механическая обработка, после чего турбогенератор закрепляется с помощью болтов 2, шайб 3 и гаек 4 (рис. 1).

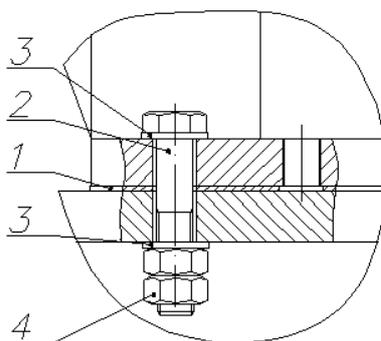


Рис. 1. Узел крепления турбогенератора с использованием прокладок

Такой технологический процесс монтажа турбогенератора на раму является очень трудоемким и требует высокой точности механической обработке прокладок. Для повышения технологичности изготовления, технического обслуживания и ремонта ГТА и ГПА можно предложить изменить способ сборки при монтаже турбогенератора на раму: сборку с пригонкой заменить на сборку с компенсирующим материалом [2]. При такой сборке требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается применением компенсирующего материала, вводимого в зазор между сопрягаемыми поверхностями деталей после их установки в требуемом положении.

Компенсирующий материал на основе эпоксидной смолы является двухкомпонентным химически затвердевающим составом, который выполняет в конструктивном контуре изделия двойную функцию – является компенсирующим звеном размерной цепи и конструктивным элементом, обеспечивающим жесткую связь соединяемых элементов конструкции изделия. Этот способ позволяет получить

высокую точность без пригоночных работ и при сравнительно невысоких требованиях к точности деталей, поступающих на сборку (рис. 2).

По данной технологии необходимо установить турбогенератор на раму в необходимое положение при помощи регулировочных болтов. Затем в зазоры между основанием и фланцем агрегата производится закачка компенсирующего материала, который после затвердевания обеспечивает необходимую несущую способность и демпфирование вибраций. Предложенный способ монтажа турбогенератора на раму является менее трудоемким и не требует изготовления прокладок с очень точными размерами.

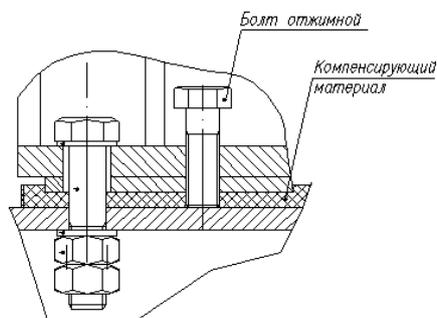


Рис. 2. Монтаж турбогенератора компенсирующего материала

Трубопроводные системы обеспечивают функционирование всех узлов и агрегатов, по которым транспортируются рабочие среды, обеспечивающие эксплуатацию оборудования [3]. Трудоёмкость изготовления всех трубопроводных систем ГТА и ГПА в среднем составляет до 10% от общей трудоёмкости изготовления агрегата, среди которых, в зависимости от рабочей среды, различают:

- трубопроводы масляных и маслосуфлирующих систем;
- трубопроводы газовых систем;
- трубопроводы топливных систем;
- трубопроводы воздушных систем;
- дренажные трубопроводы.

Для обеспечения собираемости трубопроводных систем ГПА и ГТА проводится значительный объем работ по макетированию трубопроводов на местах их установки, а также подгонка узлов их крепления. Кронштейны для поддержки трубопроводов часто не имеют возможности регулировки ни в одном направлении, поэтому существующие конструкция и технология изготовления и сборки трубопроводных систем предусматривают их 100% макетирование по месту установки. При этом собираемость изделия достигается значительным объёмом пригоночных работ, связанных с изменением размеров отдельных элементов труб, сборкой систем из трубопроводов на прихватках, а также с применением специальных технологических шаблонов. В результате анализа производственной технологичности сборки трубопроводных систем ГПА и ГТА выявлены следующие проблемы:

- большой объем работ по макетированию трубопроводов по месту их установки;
- использование для поддержки трубопроводов нерегулируемых кронштейнов.

На рис. 3 представлен блок маслообеспечения ГПА, на раме которого закрепляются не имеющие регулировок кронштейны.

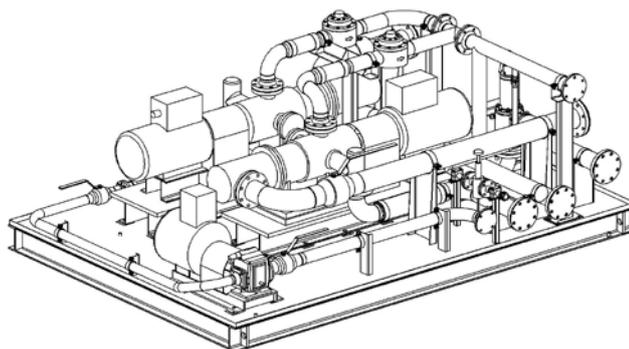


Рис. 3. Блок маслообеспечения ГПА

Для повышения технологичности изготовления, технического обслуживания трубопроводных систем ГТА и ГПА предлагается взамен существующих нерегулируемых кронштейнов применять монтажные системы, аналогичные продукции фирмы Hilti, обеспечивающие максимальную простоту компенсации положения без доработки элементов и установки по месту. На рис. 4 представлен эскиз регулируемой системы Hilti [4].

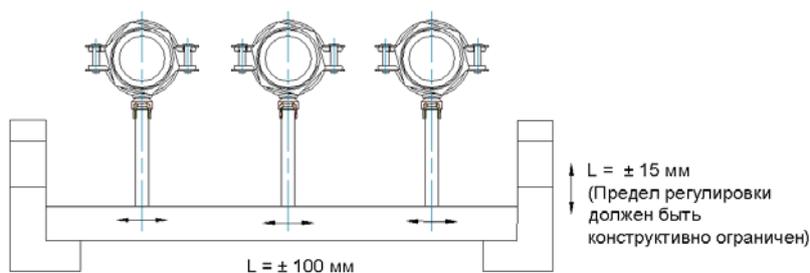


Рис. 4. Система регулируемых опор трубопроводов Hilti

Таким образом, предлагаемый подход позволяет компенсировать большинство погрешностей изготовления труб и конструкций корпусных изделий. Его применение может быть ограничено только экономической целесообразностью, связанной с достаточно высокой стоимостью данных систем.

В целом любое использование компенсирующих способов сборки изделий сложной и пространственной конфигурации в условиях опытного и мелкосерийного производства позволяет получить большой экономический эффект за счет снижения затрат на проектирование и изготовление оснастки, снижения объема доводочных работ.

**Список литературы:** 1. Производство, монтаж, пусконаладочные работы и обслуживание газотурбинных установок и газоперекачивающих агрегатов / А.Н. Семенов, В.А. Камакин; Под ред. В.Ф. Безъязычного и Р.Х. Набиуллина. – Рыбинск, 2007. – 424 с. 2. Технологичность конструкции изделия: Справочник/ Ю.Д. Амиров и др. Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с. 3. Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов», Серия 03. Выпуск 67. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. -194 с. 4. <https://www.hilti.ru/>.

## ОПЫТ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НЕВЗРЫВЧАТЫМИ РАЗРУШАЮЩИМИ СОСТАВАМИ

Мороз О.К. (ДОННТУ, г. Донецк, ДНР)

*Abstract: The results of model researches of process destruction of rock breeds the hole charges of inexplusive destroying matters are resulted in the conditions of the quarry and underground mountain making at destruction of rock blocks cuts and breeds of soil are presented by durable sandstones.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями**

В практике открытой и подземной разработки полезных ископаемых и подземного строительства, в основном применяют буровзрывной способ разрушения горных пород. Достоинствами его являются высокая разрушающая способность, мобильность и универсальность. Однако при этом способ имеет ряд недостатков: большое выделение газообразных продуктов взрыва, шум, особые меры безопасности при хранении, перевозке и использовании, относительно высокая стоимость. Для уменьшения этих недостатков разработаны специальные способы мягкого взрывания и различные конструкции шпуровых зарядов. Например способ мягкого взрывания с помощью пластиковых зарядов [1] (зарядные трубки К и КК фирмы «Форсит» и российские типа «Гранилен») позволяет обеспечить безопасность и минимальный уровень затрат на разрушение пород благодаря низкой чувствительности к механическим воздействиям, технологичности заряжания шпуров, низкой теплоте взрыва (1500кДж/кг) при скорости детонации 1800м/с. При выполнении реконструкции сооружений в стесненных условиях городского строительства, ведении аварийно-спасательных работ при ликвидации последствий аварий и ряде других специфических случаев в последнее время все большее применение находят статические способы разрушения – механическими клиньями, гидроклиньями [2], при помощи гидроксплиттеров [3], ориентированного флюидоразрыва [4], электрогидравлических установок [5] и др. Способ разрушения пород с помощью механических клиньев имеет низкую производительность при высокой трудоемкости работ, остальные перечисленные способы невзрывного разрушения требуют использования дорогостоящих материалов, оборудования, энергии, высоких затрат. Поэтому одним из их главных конкурентов, лишенным многих перечисленных недостатков, является способ разрушения при помощи невзрывчатых разрушающих составов (НРС) типа НРС-1(Россия), НРВ-80 (Украина), Bristar (Япония) и др.

В последние годы авторами статьи ведутся теоретические, лабораторные и натурные исследования, направленные на расширение области применения НРС, в частности использование их для разрушения пород в условиях подземных горных выработок. Актуальность вопроса определяется необходимостью разрушения горных пород в условиях выработок с исходящей струей воздуха, в стесненных условиях рабочего пространства вблизи работающего оборудования, а также при разрушении пород вмещающих выбросоопасные пласты угля и песчаников. В этих случаях невзрывной способ разрушения при помощи НРС не требует применения специального режима безопасности ведения работ, не оказывает динамического воздействия на горные породы, не требует остановки работ основного цикла. Разрабатываемая технология невзрывного разрушения должна обеспечивать минимальное время разрушения горных пород и учитывать особенности работы НРС в условиях подземных горных выработок при относительно высокой температуре пород, вмещающих шпур.

**Задачей исследований** являлось установление возможности применения невзрывного способа разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок с учетом особенностей теплового режима.

При реализации предлагаемого способа невзрывного разрушения работы начинают с бурения шпуров для размещения невзрывчатого разрушающего состава, которое производят со стороны открытой поверхности объекта, как правило, вертикально вниз. Шпуры бурят рядами в плоскости предполагаемого раскола. Возможный диаметр шпуров - от 20 до 50 мм, рекомендуемый 40мм. При отсутствии свободного пространства для бурения вертикальных шпуров шпуры бурят под углом максимально близким к вертикали. Пробуренные шпуры очищаются от пыли и буровой мелочи продувкой.

После этого в пробуренные шпуры заливают приготовленный раствор невзрывчатого разрушающего состава на глубину равную 0,7-0,9 длины шпура. В качестве герметизатора шпура и средства предварительного распора невзрывчатого разрушающего состава могут применяться например деревянные клинья.

### Основные результаты

Исследования проводились в два этапа. В качестве рабочего агента применялся модифицированный НРС содержащий безводный карбонат натрия 4 мас. %, сульфитно-дрожжевую барду 1 мас. %, натриевую соль продукта конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида 1 мас. %, хлорид натрия 2 мас. %, полиоксихлорид алюминия 2 мас. %, оксид кальция 90 мас. %.

Расчет расстояния между шпурами производили по формуле, определяющей длину трещин, которая получена с использованием энергетического критерия Гриффитса и обусловлена медленно возрастающей нагрузкой растягивающих напряжений внутри шпура под действием НРС. Протяженность трещины зависит от диаметра шпура, модуля упругости НРС и параметров горной породы  $E_m$ ,  $k_{lc}$ ,  $P(t^*)$ :

$$L_{mp} = \frac{P^2(t^*)r_0^2 E_m}{2(k_{lc})^2 E_{НРС}} \quad (1)$$

где:  $P(t^*)$  - напряжение, развиваемое НРС внутри шпура, принимается равной давлению расширения через заданное время  $t^*$  разрушения объекта [6], МПа; 2 – численный коэффициент преобразований энергетического критерия Гриффитса;  $r_0^2$  - радиус шпура, м;  $E_m$  - модуль упругости разрушаемого материала, МПа;  $E_{НРС}$  - модуль упругости НРС, МПа;  $k_{lc}$  - коэффициент интенсивности напряжений разрушаемого материала, МПа, ( $\sqrt{м}$ ).

На первом этапе для проверки параметров способа и отработки технологии его реализации было проведено разрушение негабаритных блоков в условиях карьера ведущего добычу гранита. Полезными ископаемыми месторождения являются интрузивные кристаллические породы, представленные гранитоидами (гранит порфировидный, гранит щелочной, аплит розовый) среди которых встречаются дайки лампрофира.

Предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии по 8 пробам составляет 528-984 среднее – 797 кг/см<sup>2</sup>. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

На первом этапе экспериментальных работ проверялись такие параметры как количество шпуров и расстояние между ними, а так же время разрушения негабарита.

Для определения этих параметров было взято несколько негабаритов.

Для первого опыта был взят блок (рис. 1) размерами 950x650x900мм. В котором были пробурены шпуры с расстоянием между ними 0,3м. Температура окружающей среды составляла 23- 27°С.

Разрушение негабарита произошло через 6 часов. Гранитный блок был разрушен симметрично на две больших части по линии шпуров и две маленьких части поперёк линии шпуров.

Во втором опыте был взят негабарит размерами 1300x1000x550мм. Расстояние между шпурами было равно 0,5м.

Таблица 1 - Результаты испытаний гранитоидов

Показатель	Номер пробы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Объёмный вес	2,9	2,6	2,85	2,69	43	2,6	3	2,72
Удельный вес	2,9	2,66	2,89	2,74	29	2,64	2,04	2,78
Пористость	2,9	0,4	4,6	1,5	29	0,69	6,6	2,2
Водопоглощение	0,51	0,1	0,5	0,2	0,50	0,08	1,18	0,21
Сопротивляемость удару на копре	51	50	168	58				
Износ в барабане Деваля					45	2	6,1	4,18
Сохранность NO <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (потеря в весе в %%)					42	0,08	3,6	0,71
Предел прочности при сжатии, кг/см <sup>2</sup>								
-в воздушносухом состоянии	8	580	1098	881	43	580,8	1634,2	907,89
-в водонасыщенном состоянии	8	528	984	797	43	508	1196,8	818,59
‘-послеиспытания на сохранность					43	500,6	1278,4	818,59
‘-после 100 циклов замораживания	4	526	862	704				
‘-после 50 циклов замораживания	8	443	952	781				
Коэффициент размягчения	8	0,88	0,98	0,94	43	0,7	1,13	0,91
Морозостойкость - количество циклов замораживания	12	50	100	Выдерж				
Коэффициент морозостойкости	12	0,82	0,98	0,89				



Рис. 1. Общий вид гранитного блока с расстоянием между шпурами 0,3м до разрушения (а) и после разрушения (б).

Через 8 часов от блока начала откалываться часть, при этом трещина прошла по линии шпуров.



а)



б)

Рис. 2. Общий вид гранитного блока с расстоянием между шпурами 0,5м до разрушения (а) и после разрушения (б)

Таким образом, проведенные на первом этапе эксперименты подтвердили техническую возможность невзрывного разрушения пород и правильность подхода к расчету параметров предлагаемого способа.

Дальнейшие исследования проводились в условиях подземных горных выработок.

Так для шахты «Щегловская-Глубокая» одним из актуальных вопросов является необходимость ведения подрывки пород почвы, представленной прочным песчаником в выработках с исходящей струей воздуха. В этом случае разрушение песчаника при помощи отбойных молотков требует больших трудозатрат и не всегда физически возможно, а проведение взрывного разрушения ограничивается пылегазовым режимом. Для этих условий авторами статьи были разработаны рекомендации по проведению подрывки прочных пород почвы способом ее невзрывного разрушения при помощи НРС.

Шахтные исследования и приемочные испытания предлагаемых рекомендаций осуществлялись в 3 западном конвейерном штреке пл. к<sub>8</sub> шахты «Щегловская-Глубокая». Экспериментальные участки были расположены на пикетах ПК38 и ПК42 указанной выработки. Горно-геологические условия участка эксперимента следующие. Угольный пласт к<sub>8</sub> на участках экспериментальных работ имеет сложное строение. Уголь черный, блестящий, хрупкий, с включениями линз пирита и колчедана. Прослой представлен глинистым сланцем перемятым слабым. Непосредственно на контакте с пластом залегает известняк мощностью 2,1-4,10м темно-серый, с коричневым оттенком, массивный, плотный, кристаллический, с обломками фауны и флоры, от слаботрещиноватого до полного отсутствия трещин, трещины выполнены кальцитом, крепкий. Для известняка характерно то удаление от пласта на 1,5м, то внедрение в пласт в виде «отеков», которые утоняют пласт до 0,2м. Контакт с известняком ровный, волнистый, мелкобугристый. Ложная кровля – сланец глинистый темно-серый, слабослюдистый мощностью 0,1-1,5м, плотный однородный, с послонными зеркалами скольжения, сцепление с известняком отсутствует, весьма неустойчивый, обрушается вслед за выемкой угля. Почва пласта представлена песчаником серого цвета, кварцево-полевошпатовым, мелкозернистым, слюдистым трещиноватым комковатого строения с крепостью 6-10 по шкале проф. М.М. Протоdjяконова.

На втором этапе предлагаемый способ разрушения был испытан для разделки габаритов рельсового пути, и при подрывке пород почвы, при этом породы имели только две свободные плоскости. Температура пород составляла 26 °С.

На ПК42 была проведена разделка габаритов рельсового пути, представленных трещиноватым мелкослоистым песчаником. В забое подрывки нормально напластованию пород было пробурено четыре шпура с расстоянием между ними 0,27м длиной 0,6м, и углом наклона к горизонтали 80 градусов, расстояние от устьев шпуров до свободной

поверхности 0,65м. В шпуры на глубину 0,55м заливали приготовленный раствор НРС, после чего шпур герметизировали глиной и клиновым устройством. Через 3 часа после размещения НРС в шпуры началось отслаивание и коржение песчаника с отжимом разрушенных пластин, толщиной 0,7-3 см в сторону забоя подрывки, при этом между шпурами с НРС проросла магистральная трещина (рис. 3). После прекращения разрушения пород, через 6 часов после начала эксперимента, массив был расслоен пластинками песчаника разрушенными параллельно слоистости и отжат в сторону забоя подрывки (рис. 4), после чего возможна была уборка разрушенной породы вручную.

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать **вывод** о работоспособности предложенного способа невзрывного разрушения горных пород в случаях когда они представлены объектами с двумя и тремя свободными поверхностями в



Рис. 3. Магистральная трещина между шпурами с НРС



Рис. 4. Общий вид разрушенной породы в забое подрывки при разделке габаритов рельсового пути

условиях подземных горных выработок. Разрушение пород при помощи невзрывчатых разрушающих составов обеспечивается при параметрах способа рассчитанных согласно методике предложенной авторами. При этом время разрушения монолитных блоков составляет 4-8 часов, и разрушение происходит в виде раскола пород по магистральной трещине соединяющей шпуры. Разрушение трещиноватых мелкослоистых пород происходит за счет их отжима в направлении перпендикулярном напластованию, и поочередном разрушении отжатых слоев и пластинок. Поэтому способ подрывки прочных пород почвы, основанный на ее невзрывном разрушении может быть рекомендован для внедрения в выработках с породами почвы имеющими прочность на одноосное сжатие более 60 МПа.

**Список литературы:** 1. Блюменфельд В.М. Рациональный способ добычи гранитовых блоков // Горный журнал. 2006. №6. – С. 33-35. 2. Чеченков М.С. Разработка прочных грунтов. – Л.: Ст-т. 1987. – 231с. 3.

Применение гидравлического эффекта в строительстве. – Тула.: ЦБНТИ Минпромстроя СССР, 1981. – 55-58с. 4. Клишин В.И., Леконцев Ю.М., Новик А.В. Способы и технические средства невзрывного разрушения горных пород растягивающими усилиями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГТУ, 2010. №10. – С. 70-72. 5. Лебедев Ю.А., Горьков А.К., Макаров А.Б. Добыча гранитных блоков в ЮАР // Горный журнал. 2008. №6. – С. 43-44. 6. Сахно И.Г. Лабораторные исследования особенностей работы невзрывчатых разрушающих веществ при фиксированном сопротивлении их объемному расширению / Проблемы гірського тиску . 2013. - №18. С. 135-149.

## АЛГОРИТМ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ БЕСПРОВОДНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА С ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕОРГАНИЗАЦИЕЙ РОЛЕЙ

Неструев Д.С., Борзов Д.Б., Дюбрюкс С.А. (ЮЗГУ, г.Курск, Россия)  
Тел. +7(920)7031326; E-mail: [nestruev98@mail.ru](mailto:nestruev98@mail.ru)

**Abstract:** This article is devoted to the description of the algorithmic model for initializing the elements of a wireless computing cluster with a dynamic distribution of roles. The model describes the actions that occur when power is applied to a cluster element.

**Key words:** wireless computing cluster, algorithm, configuration, host, storage, work item.

Беспроводные вычислительные кластеры включают в себя основные элементы – это сервер (хост) и память (хранилище). Для повышения надежности дополнительно используются резервирование в отдельных узлах системы, что приводит к ролевому разделению на несколько субъектов:

- хост-элемент с серверными функциями;
- резервный хост-элемент;
- накопитель информации;
- резервный накопитель;
- множество рабочих элементов.

По включению питания каждый из процессоров каждого из  $N$  элементов кластера выполняет следующие процедуры:

1. Выполнение общей программы загрузчика из внутренней флэш-памяти со стартового адреса. Поскольку, исходя из условия пункта 2, аппаратура однотипна, это позволяет реализовать общую процедуру загрузки стартовой программы инициализации.

Помимо программы базового загрузчика во флэш-памяти хранится функциональное программное обеспечение всех возможных ролевых субъектов кластера;

2. Определение первичной роли элемента в кластере. На данном этапе считывается константа из конфигурационного файла и выполняется функция  $R(M) = F(\text{Num})$ ;

3. Загрузка из флэш-памяти в ОЗУ программы, соответствующей роли элемента  $M$  кластера.

4. Считывание контрольной суммы из хвоста программы и сравнение с рассчитанной в процессе загрузки в ОЗУ, что позволяет контролировать целостность информации. Если контрольные суммы не совпадают, то на сервер выдаётся сообщение о неисправности элемента;

5. Рестарт ролевой программы из оперативной памяти на выполнение;

6. Анализ возможного изменения роли элемента в кластере путём периодического считывания переменной  $\text{TempNum}$ , реализуемый на основе командного протокола, за реализацию управления в котором отвечает сервер;

7. В случае изменения роли в системе субъект перезагружает на исполнение соответствующую ролевую программу и переходит на неё через soft-reset.

Общий стартовый алгоритм в графическом виде представлен на рисунке 1.

Процедурный алгоритм работы хост-элемента (сервера) содержит следующие основные стадии:

1. Загрузка программой-загрузчиком рабочей программы сервера.

В отличие от других узлов в случае сбоев при загрузке осуществляются повторные попытки перезагрузить ПО, в случае критической аппаратной неисправности вся система неработоспособна.

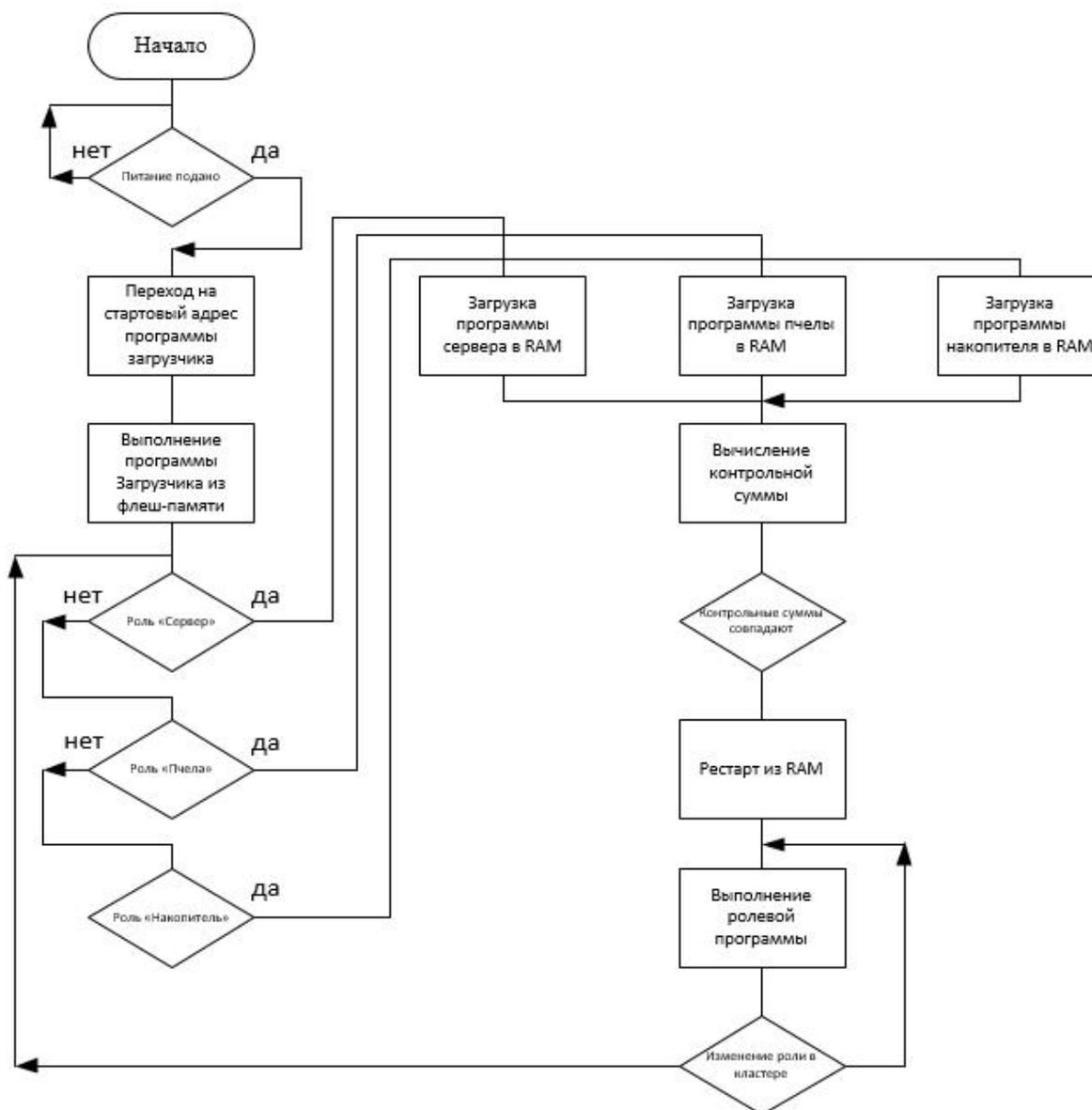


Рис. 1. Общий стартовый алгоритм элементов кластера

2. По старту рабочей программы после определения собственных координат осуществляется пингование доступного подмножества адресов системы, которое позволяет определить, сколько узлов находится в строю и готовы выполнять свои задачи.

3. После выполнения пингов сервер отправляет на все доступные адреса по числу элементов  $N$  системы командные слова (зная при этом изначальные роли элементов), с целью выяснения их местоположения и технических характеристик.

4. По результатам статусной информации на первом этапе сервер создаёт двумерную карту с местоположением  $P$  ответивших ему исправных элементов. Критерии исправности:

- результаты теста встроенного самоконтроля (отрицательный бит исправности);
- координат в радиусе не более 300 метров (при использовании Wi-Fi IEEE.802.11 ac) и не более 150 м при использовании IEEE.802.11 n);
- состояние заряда (более 20 %).

Формируется начальный граф  $C(M, K)$  с  $N$  вершинами (количество элементов БВК),  $M = \{1..N\}$ ,  $K$  – расстояния между вершинами. Далее анализируется полученный из слов статуса массив расстояний  $R(N, N)$ . По результатам анализа:

- объекту с минимальным набором расстояний между собой и остальными точками назначается роль «Основной хост-процессор» с отправкой соответствующего командного слова;
- объекту с минимальным расстоянием от хост-процессора назначается роль «Накопитель»;
- объекту с минимальным расстоянием от хост-процессора и накопителя назначается роль «Резервный хост-процессор»;
- объекту с минимальным расстоянием от хост-процессора и накопителей назначается роль «Резервный накопитель».

Остальные точки беспроводного вычислительного кластера приобретают роль «Рабочая машина» или «пчела».

В конце этапа «Назначение ролей» Хост отдает команду всем объектам кластера на запуск ролевых функций, после чего происходит переход ко второму этапу работы программы сервера, где роли переназначаются с использованием орбитального метода.

Второй этап представляет из себя циклическое выполнения ряда функций.

Пингование сетевых адресов предназначено для обнаружения в составе сети новых подключенных узлов. Каждый новый узел, ответивший на пинг, добавляется в систему как «пчела».

Далее в следующем цикле происходит отправка командных слов всем узлам для оценки их технического состояния. Узел удаляется с карты отправкой командного слова с битом выключения работы в случае если:

- он не отправил ответное слово статуса (максимум 3 повтора командного слова) или слово статуса пришло с ошибкой по контрольной сумме;
- его уровень заряда не превышает 20%;
- бит внутренней ошибки в полученном слове статуса равен 1.

Пункт алгоритма «Анализ слова статуса» подразумевает извлечения из вложенного в слово статуса кадра NMEA географических координат ( $Lng, Lat$ ), вычисления расстояния до точки и, в случае накопителя, анализ оставшегося объёма.

Определение уровня сигнала (связи) происходит косвенным путём, а именно вычислением с накоплением времени TimeSv прихода нескольких (число поле управляющего слова KvCount) квитанций. Далее полученное суммарное время ранжируется для определения орбит элементов. Суммарное TimeSv далее участвует в процедуре арбитража.

Самоконтроль подразумевает прохождение сервером внутренних тестов исправности и определение собственного уровня заряда, его результаты также используются на этапе арбитража.

«Арбитраж» подразумевает сравнение собственных характеристик хост-процессора с характеристиками резервного хост-процессора для определения возможности делегирования управляющих функций.

Основной хост-процессор выигрывает арбитраж, если:

- его уровень заряда превышает уровень заряда резервного хост-процессора;
- резервный хост-процессор не расположен ближе к центральной точке системы на расстояние больше двух «орбит».

При проигрыше арбитража сервер передаёт управление резервному, который в свою очередь строит новую орбитальную карту и переназначает роли.

При инициализации предлагаемого беспроводного кластера должны выполняться следующие действия:

1. Элемент  $M_x$  из множества  $M$ ,  $M \leq N$ , с  $Num = 1$  (хост) запрашивает со спутника координаты и получает их в слове GNS (рисунок 2), далее инкапсулирует его в кадр TCP/IP. То же самое делают и все элементы системы, получая свои координаты. Образуется начальный граф  $G$  с  $N$  вершинами, каждая из которых не знает о месторасположении остальных вершин;



Рис. 2. Формат слова GNS протокола NMEA

2. Хост по очереди выполняет пинги всех элементов сети, и если они проходят, то запрашивает их координаты, сразу вычисляя расстояния до каждого элемента и находя их сумму. То же самое выполняют параллельно все узлы. По результатам пункта 2 хост формирует начальный граф (псевдограф)  $PG(M, K)$ , где  $M$  – множество вершин (элементов системы),  $K$  – множество связей с элементами, с которых получен ответ на пинг;

3. Хост запрашивает по Wi-Fi и собирает в множество пар  $Kd = \{(Kdx1, Kdy1), (Kdx2, Kdy2), \dots, (KdxM, KdyM)\}$  координаты расстояния до всех доступных элементов системы, и составляет географическую карту, проецируя её на местность;

4. По составленной карте хост выделяет элемент  $Ld$ , находящийся ближе всего к центру карты, и передаёт ему управление вместе с параметрами остальных объектов и составленной картой, предполагая, что его центральное положение обеспечивает наилучший уровень сигнала до всех остальных объектов;

5. Принявший управление новый сервер повторяет пункты 2 и 3 данного алгоритма, после чего назначает накопитель, резервный хост и резервный накопитель по критерию минимизации расстояния между собой и данными объектами, вычисляя их исходя из географических координат в карте;

6. Новый хост выполняет пункт приступает к построению карты, исходя из орбитального принципа, руководствуясь уровнем сигнала связи между ключевыми абонентами;

7. Постоянно отслеживая информацию о техническом состоянии всех абонентов, их местоположении и уровнях связи, хост принимает решение о необходимости перемещения.

**Список литературы:** 1. Ермолаев С.Ю. Оптимальное размещение базовых станций. *Telecommunication Sciences*. 2010. № 1. 349–355с. 2. Скаков Е.С. Пчелиный алгоритм оптимизации для решения задач планирования беспроводной сети. Программные продукты и системы. 2016. – Т.3., 67 – 73с.

## АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Овчинников Е.В., Музыка И.И., Эйсымон Е.И., Овчинников А.Е.

(ГрГУ им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь)

Тел: +375 152 68 4108; e-mail: ovchin@grsu.by

**Abstract.** *In the course of the research, it was shown that the development of compositions and technologies for obtaining nanocomposites containing solid particles of nanometer dispersion as modifiers, or particles having nanophase inclusions, is one of the main directions in the development of modern polymer materials science. To create nanocomposite materials on a polymer matrix, cryogenic grinding, detonation synthesis, synthesis from the active phase, and mechanical activation are used. These modern methods provide high values of tribotechnical, physico-mechanical, adhesive parameters. The use of mechanically activated nanosized particles makes it possible to achieve a significant effect of increasing performance at relatively low degrees of modification of 0.05 wt. – 3% wt. The use of modifiers at such concentrations in polymer matrices makes it possible to preserve the basic technology for processing polymeric materials and equipment in the manufacture of composite materials on a polymer matrix.*

**Keywords:** *polymers, nanoparticles, silicates, activity, temperature*

Композиционные частицы на основе полимеров и природных силикатов могут представлять интерес для решения задач, связанных с созданием специфических сенсоров высокой чувствительности [1, 2]. Данные материалы также могут обеспечивать растущее развитие микросистем, поскольку их можно применять в микротехнологиях, для получения кремниевых пластин, применяемых в электронике.

Полимеры широко используются в различных областях деятельности человека, в частности, в оптике их применяют в качестве защиты оптических волноводов, при изготовлении диодов и транзисторов [3] – [4]. Описание механизмов структурной релаксации происходит вблизи температуры стеклования полимерных материалов – одна из основных проблем для понимания аморфного состояния полимера и дальнейшего описания и прогнозирования их свойств. Область стеклования часто определяется как диапазон температур, в котором материал переходит из жидкого состояния в стеклообразное. Температура перехода в стеклообразное состояние  $T_g$  и по сей день остается очень трудно прогнозируемым параметром.

Важность данного параметра заключается во взаимосвязи с термодинамическими свойствами полимеров, например, с теплоемкостью. Фактически величина  $T_g$  зависит от тепловой предыстории образца: скорости охлаждения ( $q_c$ ) в процессе стеклования [5], скорости нагрева ( $q_n$ ) [6, 7], возраста стеклующегося материала [8] и структурных характеристик стеклообразующей жидкости [9]. Ниже значения  $T_g$  достигается образование стеклообразного состояния полимерного материала. Это неравновесная термодинамическая система, в которой свободный объем системы уменьшается меньше, чем ожидалось при равновесных условиях. Таким образом, эта система будет стремиться перейти к состоянию равновесия посредством структурной релаксации, которая не влияет на химические характеристики материала и это явление известно как физическое старение [10].

Изучение молекулярной релаксации основывается на таком важном параметре как характерное время релаксации. Изучение релаксационных явлений имеет большое значение в области исследования полимеров. Для этого применяют несколько различных методов анализа, одним из которых является спектроскопия термостимулированного деполяризационного тока (TSDC). Данный метод был разработан в 1966 г. Букки с соавторами [11]. Метод TSDC [12] – [13] представляет собой метод исследования молекулярные движения, связанного с явлениями релаксации в полимерных материалах

[14], твердых телах [15], оксидах металлов [16], кристаллах [17], диэлектриках [18] и так далее. Это очень чувствительный метод позволяет определить изменения ориентации диполей в исследуемом материале [19]. Данный экспериментальный метод успешно применяется для анализа основных и вторичных релаксационных процессов.

При температуре стеклования  $T_g$  основной релаксационный (а-релаксационный) процесс соответствует глобальным общим движениям полимерных цепей. Вторичные переходы, соответствующие подвижности боковых групп (b-релаксация) или вращению концевых групп (g-релаксация) возникают при более низких температурах [20], чем  $T_g$ . В ходе исследований получают спектры, которые сравнивают с известными данными; в ряде случаев используют разложение сложных спектров на элементарные спектры и сравнение их с существующими данными. Этот метод позволяет получить характерное время релаксации в стеклообразном состоянии [21, 22]. Для анализа спектров ТСТД в полимерах необходимо введение распределения времен релаксации. Релаксационный процесс, наблюдаемый экспериментально, описывается функцией релаксации  $j(t)$ , зависящей от времени, и функцией  $j^*(\omega)$ , зависящей от частоты. Эти функции связаны преобразованием Фурье как:

$$\varphi^*(\omega) = FT \left( \frac{-d}{dt} \varphi(t) \right)$$

$$\varphi^*(t) = - \int FT^{-1} [\varphi^*(\omega)] dt$$

где  $FT$  и  $FT^{-1}$  – обозначения преобразования Фурье и его обратного преобразования, соответственно.

Для простого процесса с большими временами релаксации, которое часто называется релаксацией Максвелла – Дебая, запишем формулу:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \exp[-(t / \tau)],$$

где  $\varphi(t) = \int_t^{\infty} I dt$ ,  $\varphi_0$  – величина первоначально накопленного заряда,  $t$  – характерное время релаксации,  $I$  – деполяризация.

Однако во многих системах динамическое поведение данной функции показывает выраженные отклонения от идеальной экспоненциальной картины. В функции релаксации во временной области часто используются уравнение Кольрауша-Вильямса-Уоттса (KWW) или растянутая экспоненциальная функция [93, 94], определяемая по формуле:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \exp \left[ - \left( \frac{t}{\tau} \right)^{\beta_{kww}} \right]$$

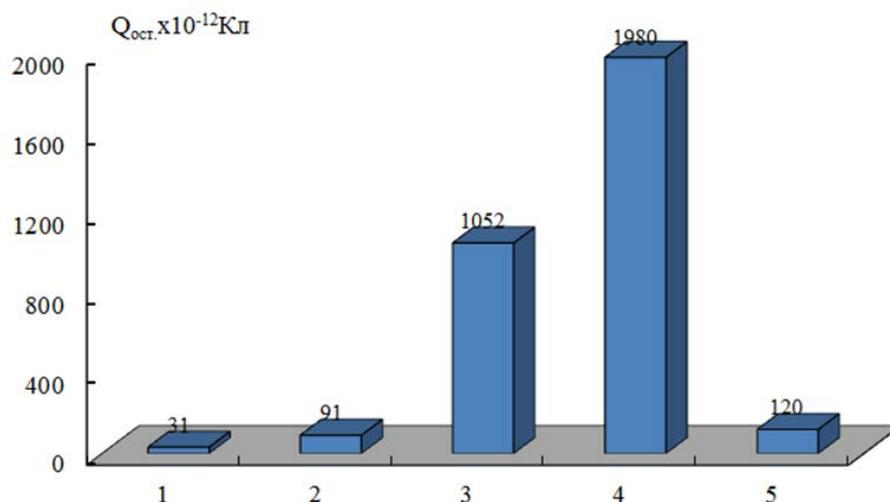
где  $\beta_{kww}$  – параметр Кольрауша, величина которого может изменяться от 0 до 1 (значение  $\beta_{kww}=1$  соответствует для модели Дебая).

Зависимость Кольрауша-Вильямса-Уоттса в ряде случаев не выполняется, что было показано в ряде работ, чтобы учесть несоответствия в данной формуле, в частности, нефизические аспекты, а также неэкспоненциальную зависимость параметров было предложено уравнение для модифицированной функции  $\varphi(t)$ . В данной функции предложено время релаксации Дебая умножить на коэффициент, который всегда содержит параметр  $\beta_{kww}$ .

С другой стороны, предыдущие работы, которые исследовали связь между механизмами релаксации и физическим процессом старения, выявили существование двух больших пиков релаксации, ясно показывающие наличие как минимум двух различных кинетических механизмов старения. Наличие двух процессов старения, описываемых различными кинетическими механизмами: один быстро происходящий с течением времени и другой медленный, также подтверждены моделью случайного блужда-

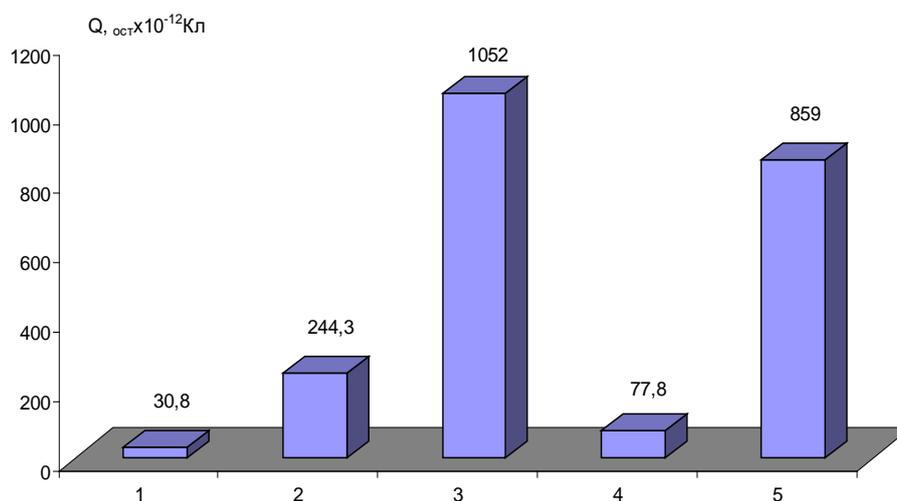
ния, предложенной Архиповым, и используется в других работах для описания стеклообразования в полимерах в температурной области, близкой к значению  $T_g$ .

Рассмотрены вопросы, связанные с изменением спектров термостимулированных токов, возникающих в диэлектрических неорганических и органических частицах, а также в композициях на их основе. На рисунках 1 – 4 представлены основные параметры, характеризующие электреты, исходя из данных термостимулированной токовой спектроскопии.



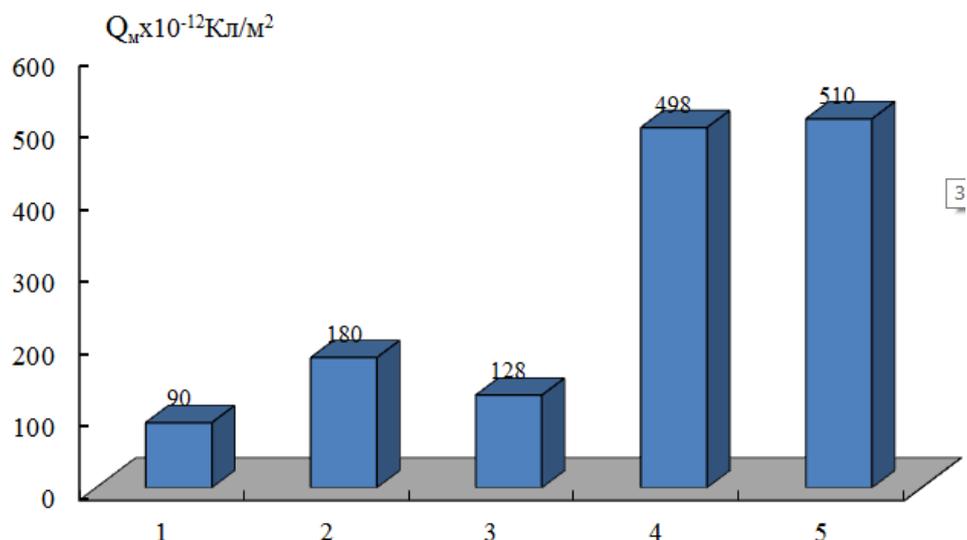
1 – аэросил, 2 – аэросил, механоактивированный в течение 4 мин при 60 g, 3 – кремь, 4 – кремь, механоактивированный в течение 4 мин при 60 g, 5 – электретная композиционная система «поливинилпирролидон-каолинит», механоактивированная в течение 4 мин при 60 g. Соотношение компонентов: каолинит – 20 % мас., поливинилпирролидон – 20 % мас.

Рис. 1. Значения остаточного заряда электретных механоактивированных композиционных частиц



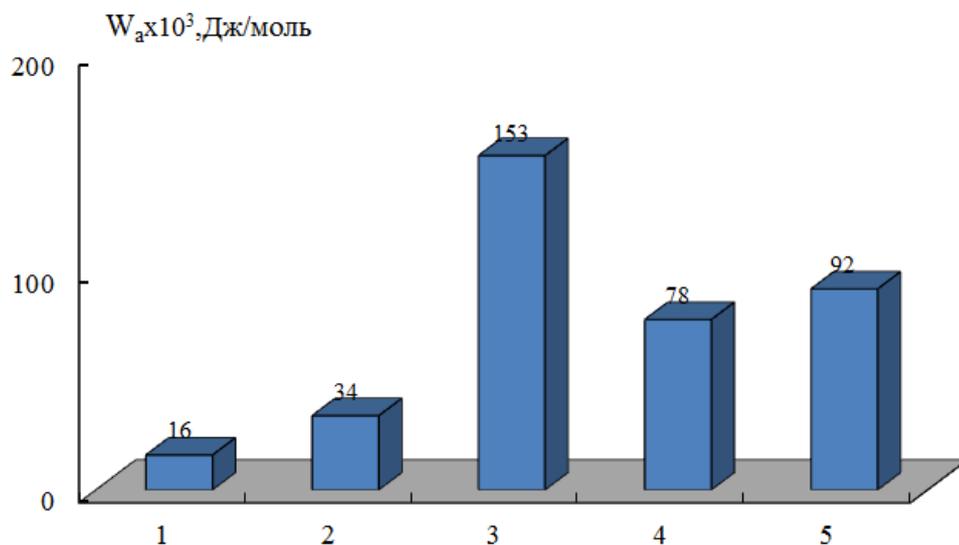
1 – аэросил, 2 – кремь, 3 – кремь механоактивированный в течение (30 сек, 60 g), 4 – механоактивированная (30 сек, 20 g) композиция кремь +  $\text{SiO}_2$  (аэросил), соотношение компонентов: кремь – 67%,  $\text{SiO}_2$  – 33%, 5 – оксиды металлов (отходы металлургического производства)

Рис. 2. Значения остаточного заряда электретных неорганических частиц



1 – аэросил, 2 – аэросил, механоактивированный в течение 4 мин при 60 g, 3 – кремний, 4 – кремний, механоактивированный в течение 4 мин при 60 g, 5 – электретная композиционная система «поливинилпирролидон-каолинит», механоактивированная в течение 4 мин при 60 g. Соотношение компонентов: каолинит – 20 % мас., поливинилпирролидон – 20 % мас.

Рис. 3. Заряд, оставшийся в момент достижения максимума тока плотности остаточного заряда электретных механоактивированных композиционных частиц



1 – аэросил, 2 – аэросил, механоактивированный в течение 4 мин при 60 g, 3 – кремний, 4 – кремний, механоактивированный в течение 4 мин при 60 g, 5 – электретная композиционная система «поливинилпирролидон-каолинит», механоактивированная в течение 4 мин при 60 g. Соотношение компонентов: каолинит – 20 % мас., поливинилпирролидон – 20 % мас.

Рис. 4. Значения энергии активации релаксации электретных механоактивированных композиционных частиц

Полученные результаты, представленные выше показывают, что частицы различных материалов подвергнутых, механоактивационному воздействию приводят к возрастанию остаточного заряда, увеличению значений энергии активации релаксации

электретных механоактивированных композиционных частиц и других параметров, что является фактором обуславливающим их высокую активность при модифицировании других конденсированных сред, в том числе и полимеров.

**Список литературы.** 1. Sohn B.K. [et al.] ISFET glucose and sucrose sensors by using platinum electrode and photo-crosslinkable polymers // *Sens. Actuators B: Chem.* – 1997. – Vol. 41. – P. 7 – 11. 2. Cajlakovic M., Lobnik A., Werner T. Stability of new optical pH sensing material based on cross-linked poly(vinyl alcohol) copolymer // *Anal. Chim. Acta* – 2002. – Vol. 455. – P. 207 – 213. 3. Kharitonov A.B. [et al.] Enzyme monolayer-functionalized field-effect transistors for biosensor applications // *Sens. Actuators B.* – 2000. – Vol. 70. – P. 222 – 231. 4. Torbicz W., Pijanowska D.G., Dawgul M. Urea biosensors and their application in hemodialysis – perspective of EnFET application // *Med. Biol. Eng.* – 2000. – Vol. 10. – P. 139 – 145. 5. Park K.Y. [et al.] ISFET glucose sensor system with fast recovery characteristics by employing electrolysis // *Sens. Actuators B.* – 2002. – Vol. 83. – P. 90 – 97. 6. Moynihan C.T. [et al.] Dependence of the Fictive Temperature of Glass on Cooling Rate // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1976. – Vol. 59. – P. 12 – 16. 7. Delbot M.A. [et al.] Analysis of Structural Relaxation in Glass Using Rate Heating Data // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1976. – Vol. 59. – P. 16 – 21. 8. Mathot V.B.F. *Calorimetry and Thermal Analysis of Polymers* – Munich, Vienna, New York: Hanser Publishers, 1994. – 369 p. 9. Hodge I.M., Huvard G.S. Effects of Annealing and Prior History on Enthalpy Relaxation in Glassy Polymers III: Predictions for Polystyrene from Analysis of a Single Thermal History // *Macromolecules.* – 1983. – Vol. 16. – P. 371 – 375. 10. Wunderlich B., Jones L.D. Heat capacities of solid polymers // *J. Macromol. Sci. Phys. B.* – 1969. – Vol. 3. – P. 67. 11. Angell C.A. *Strong and Fragile Liquids // Relaxation in Complex Systems* – Washington D.C.: Naval Research Laboratory, 1984. – P. 3. 12. Bucci C., Fieschi R., Guidi G. Ionic Thermocurrents in Dielectrics // *Phys. Rev.* – 1966. – Vol. 148. – P. 816 – 823. 13. Kattan M., Dargent E., Grenet J. Three phase model in drawn thermoplastic polyesters: comparison of differential scanning calorimetry and thermally stimulated depolarisation current experiments // *Polymer.* – 2002. – Vol. 43. – P. 1399 – 1405. 14. Smaoui H. [et al.] Study of relaxations in epoxy polymer by thermally stimulated depolarization current (TSDC) and dielectric relaxation spectroscopy (DRS) // *J. Alloys Compd.* – 2010. – Vol. 489. – P. 429 – 436. 15. Kanapitsas A. [et al.] Thermally activated conduction mechanisms in Silicon Nitride MIS structures // *Thin Solid Films.* – 2010. – Vol. 518. – P. 2357 – 2360. 16. Haq S.U. [et al.] Space charge analysis in enamelled wires by using thermally stimulated depolarization current (TDSC) // *J. Electrostat.* – 2009. – Vol. 67. – P. 12 – 17. 17. Arnoult M., Dargent E., Mano J.F. Mobile amorphous phase fragility in semi-crystalline polymers: Comparison of PET and PLLA // *Polymer.* – 2007. – Vol. 48. – P. 1012 – 1019. 18. Braunlich P. *Thermally Stimulated Relaxation in Solids.* – Berlin: Springer-Verlag, 1979. – 331 p. 19. Gun'ko V.M. Morphological and structural features of individual and composite nanooxides with alumina, silica, and titania in powders and aqueous suspensions // *Powder Technol.* – 2009. – Vol. 195. – P. 245 – 258. 20. Andriyevsky B. TSDC and dielectric properties of Nd-doped KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystals // *Mater. Sci. Eng. B, Solid-State Mater. Adv. Technol.* 2004. – Vol. 106. – P. 246 – 250. 21. Cajkovski T. Dielectric investigation of electrical conductivity in the copper salt of the 12-tungstophosphoric acid hydrate // *Solid State Ionics.* – 2003. – Vol. 162-163. – P. 203 – 208. 22. Menegotto J. [et al.] Combined dielectric spectroscopy and thermally stimulated currents studies of the secondary relaxation process in amorphous poly(ethylene terephthalate) // *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics.* – 1999. – Vol. 24. – P. 3494 – 3503.

## ДИСПЕРСИОННЫЙ СОСТАВ НАНОДИСПЕРСНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СВС

Овчинников Е.В., Семенов А.В., Музыка И.И., Эйсымонт Е.И.

(ГрГУ им. Янки Купалы, ООО «Флагман», г.Гродно, Беларусь)

Тел: +375 152 68 4108; e-mail:ovchin@grsu.by

**Abstract.** *The use of the technology of self-propagating high-temperature synthesis will make it possible to obtain carbon nanoparticles of various nomenclature in large quantities. The use of the SHS method will make it possible to obtain nanosized cluster structures not only of carbon, but also of materials consisting of other chemical elements of the periodic system of D.I. Mendeleev. The main advantage of the SHS method is its sufficient simplicity and environmental safety. In the course of the conducted studies, it was found that as a result of the use of self-propagating high-temperature synthesis for the processing of organic raw materials, particles of the nanometer range with different dispersion distributions are formed. The dispersity of the studied samples depends on the organic raw materials used.*

**Keywords:** *carbon, structure, properties, composites, self-propagating high-temperature synthesis.*

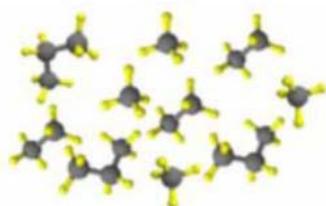
Углеродные нанодисперсные частицы получали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1] – [7]. Данная технология получения наноуглеродных частиц является экзотермической за счет протекания химических процессов типа горения. Процесс горения является автоволновым, протекающим по смеси реагентов с образованием твердых углеродных конечных продуктов, различной дисперсности. В процессе осуществления сверхтемпературного самораспространяющегося синтеза происходит экзотермическая реакция, причем данный процесс локализован в узком диапазоне. Температура нагрева исходного материала для осуществления структурных преобразований в исходной шихте может достигать 2000 – 3000 °С, в зависимости от исходного сырья и горючих материалов, составляющих шихту для проведения СВС-синтеза. В результате высокотемпературный фронт СВС-синтеза переходит от слоя к слою исходной шихты. Это является достоинством технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, заключающегося в использовании тепла химических реакций, выделяющихся в зоне нагрева вещества, вместо объемного разогрева всего материала от внешнего источника. Данная технологическая особенность метода СВС позволяет успешно конкурировать с широко распространёнными энергозатратными технологиями получения наноразмерных углеродных частиц [6-7].

Изучаемые нанодисперсные углеродные частицы были получены на основе принципа формирования наночастиц известного под названием «снизу-вверх» (рисунок 1). В результате применения данного подхода происходит изменение структуры органического материала с образованием различных углеродных структур: графит, алмаз, фуллерен, графен, графан, нанотрубки и т.п. Существующей альтернативной технологией создания углеродных наночастиц является технология «сверху-вниз», преимуществом которой является низкая стоимость проведения процесса, относительная технологическая простота, возможность получать большие объемы синтезируемого материала.

Показано, что в зависимости от методологии формирования углеродных частиц образуются различные структуры с присущими только им характерными свойствами [2-4]. Так возможно образование алмазоподобных структур, фуллеренов, фуллеритов, углеродных нанотрубок, стержней, дисков, графенов и т.п [ 7-8 ]. Данные материалы существенно отличаются по свойствам друг от друга. Недостатком рассмотренных технологий является в большинстве случаев высокая стоимость получаемых частиц, а также малый выход углеродных нанокластерных структур. В ряде случаев применяются экологически вредные технологии. В связи, с чем применение технологии саморас-

постраивающегося высокотемпературного синтеза позволит получать в большом количестве углеродные наночастицы различной номенклатуры. Применение СВС-метода даст возможность получать наноразмерные кластерные структуры не только углерода, но также из материалов, состоящих из других химических элементов периодической системы Д.И.Менделеева.

**Снизу-вверх**  
**Источник углерода: углеродсодержащие газы ( $CH_4$ ,  $C_3H_8$ )/SiC**



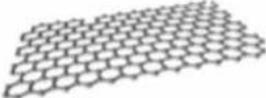
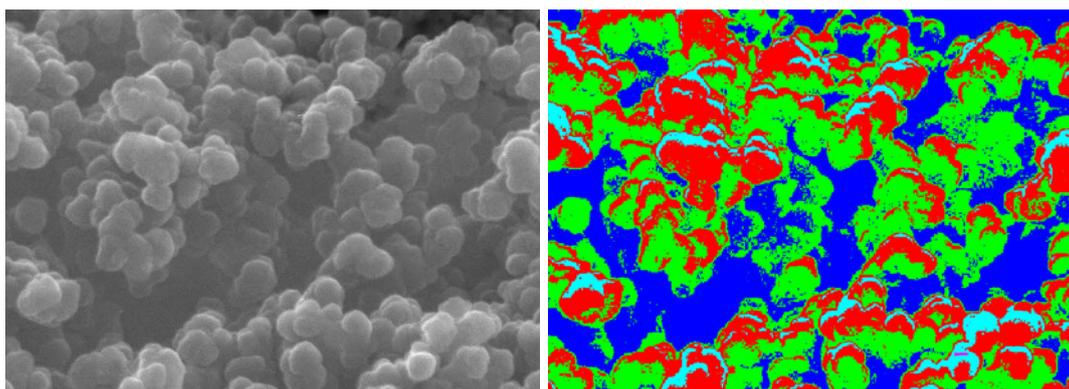
Эпитаксиальный рост	Химическое осаждение из газовой фазы
 <p style="text-align: center;">графеновые плоскости (линейные размеры <math>1 \cdot 10^2</math> нм-30 мкм)</p>	
<p>высокое качество материала  низкая производительность  дороговизна оборудования  Невозможность получения материала в виде порошка</p>	

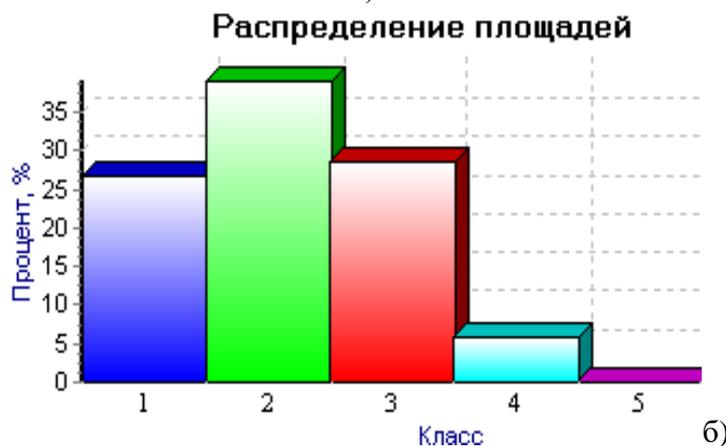
Рис. 1. Схема синтеза углеродных наноструктур по технология «снизу-вверх» [8]

Применение принципов формирования углеродных нанодисперсных структур «снизу-вверх» позволяет получить углеродные структуры различной дисперсности. Обычно под дисперсностью понимают величину, обратную средним геометрическим размерам изучаемого объекта. Согласно одной из классификаций геометрических размеров объектов их можно разделить на молекулярные, высокодисперсные и грубодисперсные. Исходя из данной классификации видно, что данные системы будут существенно различаться своими физико-механическими, химическими характеристиками. Таким образом, изучение распределения по дисперсности формируемых нанодисперсных углеродных частиц методом СВС-синтеза позволит прогнозировать свойства как самих получаемых наноуглеродных частиц, так и композиционных материалов, использующих данный вид веществ в качестве модификатора.

В качестве объектов исследований изучали дисперсионный состав следующих углеродных частиц: углеродные агломераты, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из целлюлозы с процентным содержанием исходного материала к горючему веществу 30:70 % мас.; углеродные агломераты, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из крахмала с процентным содержанием исходного материала к горючему веществу 30:70 % мас. Результаты исследований представлены на рисунках 2 – 3.



а)

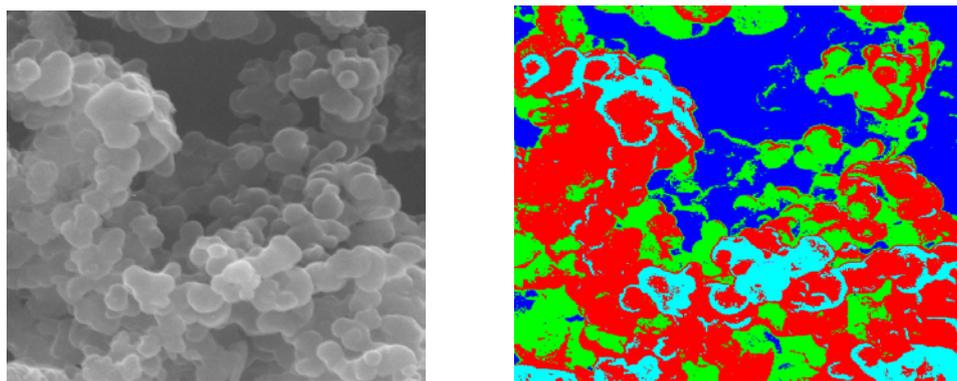


а – РЭМ-изображение исследуемого вещества, в том числе после проведения анализа; б – процентное распределение углеродных частиц по размерам в исследуемом образце

Рис. 2. Результаты дисперсионного анализа углеродных частиц, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из целлюлозы с процентным содержанием исходного материала к горючему веществу 30:70 % мас

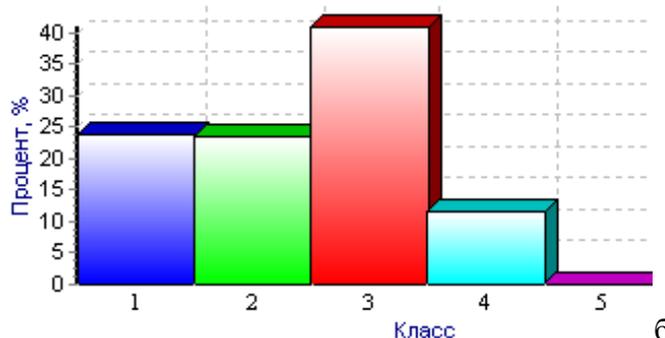
Для проведения дисперсионного анализа нанодисперсных углеродных частиц, полученных методом СВС-синтеза использовали метод растровой электронной микроскопии, позволяющей получить снимки частиц с разрешением, находящимся в нанометровой области. Для обработки изображений использовалась специализированная программа «AutoScan», производства ЗАО «Спектроскопические системы». По размерам наночастицы углерода были разбиты на 5 классов: 1 класс – от 300 нм до 400 нм, 2 класс – от 200 нм до 300 нм, 3 класс – от 100 нм до 200 нм, 4 класс – от 50 нм до 100 нм, 5 класс – менее 50 нм.

Основным достоинством СВС-метода заключается в его достаточной простоте проведения и экологическая безопасность. Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза возможно получить низкоразмерные частицы со свойствами отличными от свойств объемных углеродных материалов. Получаемые наноразмерные частицы обладают высокой адсорбционной активностью, большими значениями удельной поверхности. Проведенные исследования показали, что в зависимости от технологии формирования данных частиц в реакторе возможно регулирование морфологии и латеральных размеров частиц, что в дальнейшем позволит целенаправленно изменять активность данных частиц. Активность наноразмерных частиц, получаемых самораспространяющимся высокотемпературным синтезом обусловлено дефектностью формируемых нанокристаллов.



а)

**Распределение площадей**



б)

а – РЭМ-изображение исследуемого вещества, в том числе после проведения анализа; б – процентное распределение углеродных частиц по размерам в исследуемом образце

Рис. 3. Результаты дисперсионного анализа углеродных частиц, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из крахмала с процентным содержанием исходного материала к горючему веществу 30:70 % мас

В ходе проведенных исследований установлено, что в результате использования самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для обработки органического сырья, образуются частицы нанометрового диапазона с различным распределением по дисперсности. Дисперсность исследуемых образцов зависит от используемого органического сырья.

**Список литературы:** 1. Скороход В.В. [и др.] Дисперсные порошки тугоплавких металлов – К.: Наук. думка, 1979. – 172 с. 2. Малевич А.М. [и др.] Триботехнические характеристики ПТФЭ, модифицированного кластерами синтетического углерода /, Е.В. Овчинников, Ю.С. Бойко, В.А. Струк // Трение и износ. – 1998. – Т.19, № 3. – С. 336 – 369. 3. Овчинников Е.В., Кукла С.Ю., Федоров Д.И. Свойства минеральных масел, модифицированных ультрадисперсными кластерами синтетического углерода // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы, Серыя 2. – 1999. – №2. – С. 56 – 60. 4. Petit C., Taleb A., Pileni M.P. Cobalt Nanosized Particles Organized in a 2D Superlattice: Synthesis, Characterization, and Magnetic Properties // J. Phys. Chem. B. – 1999. – Vol. 103. – P. 1805 – 1810. 5. Сумм Б.Д., Иванова Н.И. Объекты и методы коллоидной химии в нанотехнологии. // Успехи химии. – 2000. – Т. 69, № 11. – С. 995 – 1007. 6. Куницкий Ю.А., Коржик В.Н., Борисов Ю.С. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике. – К.: Техника, 1988. – 198 с. 7. Сыркин В.Г. CVD-метод. Химическое и парафазное окисление. – М.: Наука, 2000. – 316 с. 8. Surovikin Yu.V. [et al.] The effect of thermal-oxidative and thermal treatment on the structure and electrical conductivity properties of the carbon black particles // Dynamics of Systems. Mechanisms and Machines (Dynamics): Proceedings of IEEE conference. – 2014. – P. 1 – 4.

## НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ В ВАКУУМНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЯХ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЯХ

Овчинников Е.В., Чекан Н.М., Акула А.П., Семенович И.А.

(ГрГУ им. Янки Купалы, ФТИ НАН Беларуси, г.Гродно, г.Минск, Беларусь)

**Abstract.** *The most common coatings for metalworking tools include titanium nitride, titanium carbide, titanium carbonitride, zirconium nitride, zirconium carbide, zirconium carbonitride, compounds based on chromium, titanium, aluminum, diamond-like coatings that are formed in vacuum using PVD, CVD, PCVD methods or a combination of the above methods. The current trend in the deposition of vacuum coatings is the production of multifunctional coatings, which can significantly increase operational characteristics compared to the starting materials. To form multifunctional coatings, the creation of "sandwich" structures is used, since each layer performs various functions - forming, antiwear, anticorrosion. When using a cutting tool with multi-layer and composite coatings, the stability of the cutting tool and its performance characteristics change radically, wear is reduced, cutting accuracy is increased, it becomes possible to increase the feed, the quality of surface treatment increases and tool durability increases. Thus, the use of a composite multilayer coating containing layers of titanium nitride, titanium, diamond-containing compounds with a thickness of one layer from 0.1 to 2 microns makes it possible to increase the wear resistance of a metalworking tool by 1.5-5 times.*

**Keywords:** *morphology, diamond-like coatings, properties, structure.*

Покрyтия алмазоподобного углерода (DLC) обладает целым комплексом необходимых триботехнических характеристик основными из которых являются высокая твердость, низкие значения коэффициента трения, химическая инертность. Однако хорошо известно, что трибологические свойства покрытий DLC - гидрогенизированных (a-C: H) или негидрированных (a-C) - сильно зависят от условий эксплуатации средой. Механизм объясняющий данный эффект возможно связан с взаимодействием углерода с некомпенсированными связями в частицах газовой фазы, например, водой. Следовательно, использование обычные покрытия DLC могут быть неприменимы, когда ожидаются экстремальные или лабильных условия эксплуатации, как в двигателях внутреннего сгорания, турбинах, которые должны работать как при высоких и низких температурах, влажности. В связи с чем было нанокompозитное покрытие, состоящее из наночастиц твердого WC и твердой смазки WS<sub>2</sub>, встроенных в негидрогенизированную матрицу DLC принципы были описаны в ряде работ. Согласно имеющихся в литературе данным покрытия на основе карбидов вольфрама в сочетании с титаном и кобальтом значительно менее чувствителен к воздействию окружающей среды. Сочетание покрытий DLC и покрытий на основе карбида вольфрама позволят существенно изменить триботехнические и коррозионные характеристики формируемых многофункциональных покрытий. Однако, в большинстве работ не рассматриваются вопросы формирования нанокompозиционных структур в многослойных покрытиях на основе систем модифицированный карбид вольфрама – АПП. Нанокompозитные покрытия с микроструктурой, состоящей из нанокристаллических зерен в аморфной матрице алмазоподобного покрытия должны обладать уникальными механическими и триботехническими параметрами. Так возможно создавать сверхтвердые покрытия со значениями микротвердости ~ 50–55 ГПа, т.е. создавались нанокompозиционные покрытия, в которых пластическая деформация снижалась с целью увеличения твердости. Данный механизм снижения деформационной прочности может осуществляться за счет зернограничного и дисперсионного упрочения. Материалы с низкой пластичностью являются достаточно хрупкими. Поэтому они не идеальны для применения в изделиях, в которых возникают высокие контактные напряжения, таких как, подшипники скольжения, где необхо-

димо иметь высокую износостойкость и пластичность, а так же и низкий коэффициент трения. Существуют публикации, в которых показано создание хороших пластичных свойств в хрупкой керамике при комнатной температуре за счет уменьшения размера зерен до нанометрового уровня. Данный подход позволят получить хорошие триботехнические характеристики нанокристаллических оксидов различных материалов. Дальнейшие работы в этом направлении показали перспективность включение нанокристаллических керамических зерен в смазывающую матрицу ( если рассматривать данную систему как трибологическую), такую как покрытия на основе аморфного углерода (а-С). Как правило, технологии, применяемые для производства нанокристаллических / аморфных композиционных покрытий приводят к нагреву подложки до температуры от 500– 600 ° С, чтобы обусловлено происходящими процессами по в образованию кристаллической фазы в покрытии. С другой стороны данный температурный диапазон может значительно ограничить выбор материала подложки и снизить преимущества от создания защитных покрытий. Более того, при данных температурах  $sp^3$ -гибридизация связей в атомах углерода в АПП покрытиях, обуславливающая высокую твердость, может переходить графитоподобную фазу со связью  $sp^2$ -гибридизаций. Таким образом, необходимо развивать другие методы осуществления процессов кристаллообразования в композиционных АПП покрытиях с твердой матрицей а-С. Возможно осуществлять формирование кристаллов карбида и карбонитрида путем совместного использования низкоэнергетической металлической плазмы, образованной магнетронным распылением, с высокоэнергетическими факелами, создаваемыми импульсной лазерной абляцией графита. Данный технологический метод импульсное лазерное осаждение с помощью магнетрона (MSPLD), он также может быть использован для осаждения кристаллических покрытий TiC, TiCN, безводородного алмазоподобного покрытия а-С. Полученные покрытия TiC и АПП (а-С) обладают очень высокой с твердостью 27 и 60 ГПа соответственно. Кроме того, у покрытия АПП (а-С) были низкие значения коэффициента трения менее 0,1 в большинстве условий проведения триботехнических испытаний. В ходе формирования данного композиционного покрытия наблюдался переход покрытий Ti → АПП, с образованием промежуточного слоя по схеме Ti → TiC → АПП (а-С). Данный процесс происходил при увеличении содержания углерода. Исследования показали, что даже при проведении процесса осаждения при температуре 100 ° С формируется двухфазная область TiC → АПП. Данный подход используется при получении производства нанокристаллических композиционных покрытий TiC / АПП (а-С). Таким образом подход формирования многослойных покрытий является достаточно перспективным для получения многофункциональных покрытий, за счет формирования в структуре тонкослойных систем нанокристаллических частиц и фаз. На рисунке 1-8 приведены результаты атомно-силовой микроскопии покрытий АПП, сформированных на стальных субстратах типах Р6М5 и 4Х5МФС.

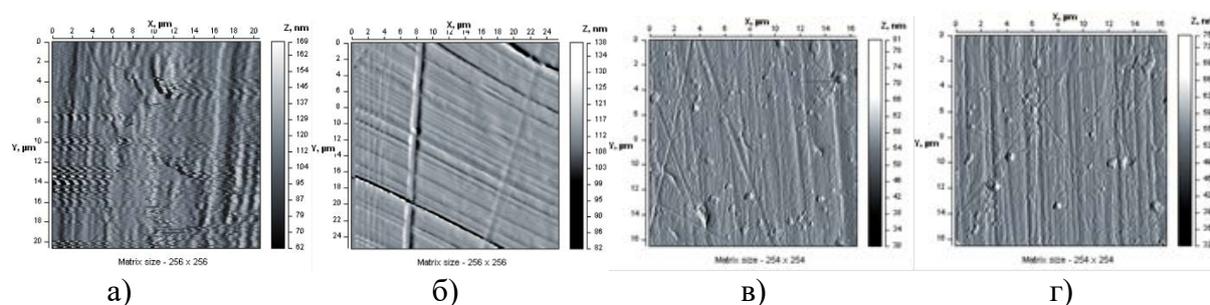


Рис. 1. Морфология поверхностных слоев вакуумных покрытий, сформированных на углеродистых и быстрорежущих сталях (2D-изображение): а - исходная сталь 4Х5МФС, б- исходная сталь Р6М5; в-сталь 4Х5МФС с алмазоподобным покрытием; г-сталь Р6М5 с алмазоподобным покрытием

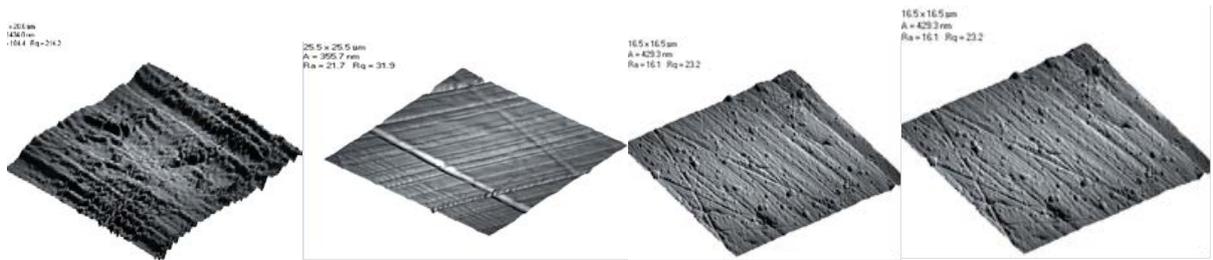


Рис. 2. Морфология поверхностных слоев вакуумных покрытий, сформированных на углеродистых и быстрорежущих сталях (3D-изображение): а - исходная сталь 4X5МФС, б- исходная сталь Р6М5; в-сталь 4X5МФС с алмазоподобным покрытием; г- сталь Р6М5 с алмазоподобным покрытием

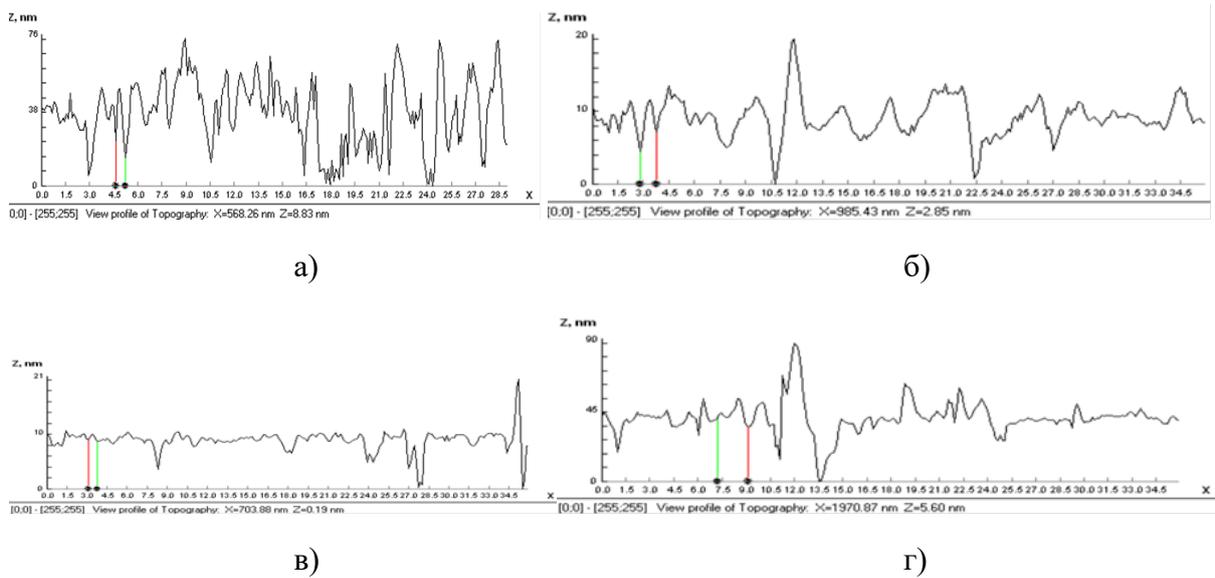


Рис. 3. Топография поверхностных слоев вакуумных покрытий, сформированных на углеродистых и быстрорежущих сталях): а - исходная сталь 4X5МФС, б- исходная сталь Р6М5; в-сталь 4X5МФС с алмазоподобным покрытием; г- сталь Р6М5 с алмазоподобным покрытием

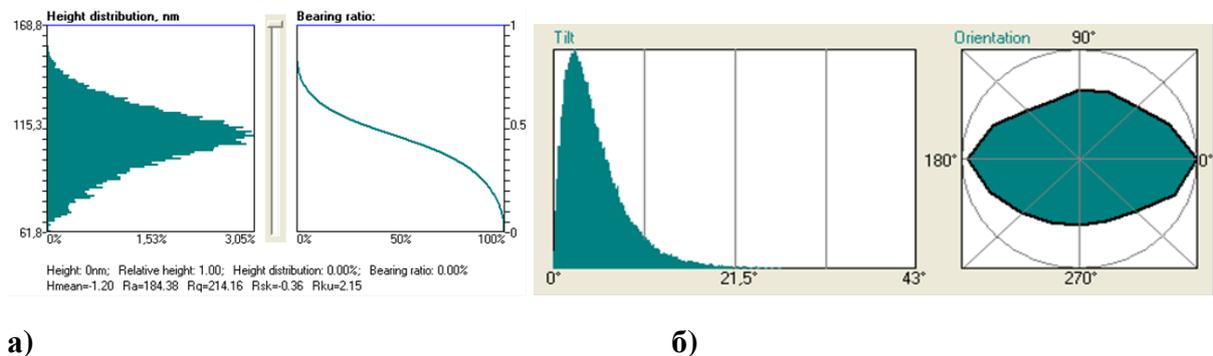
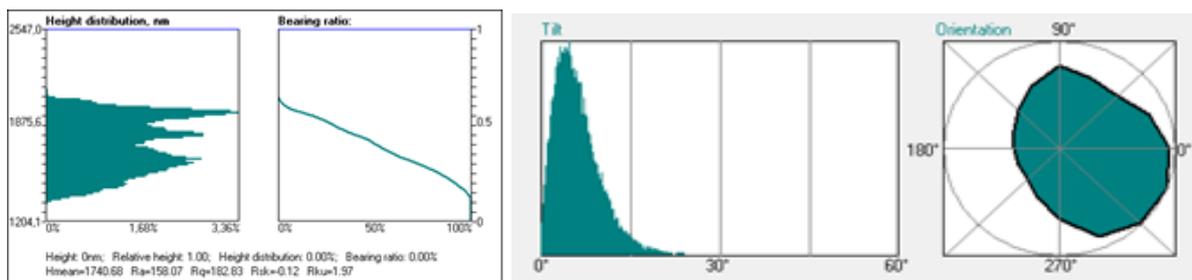
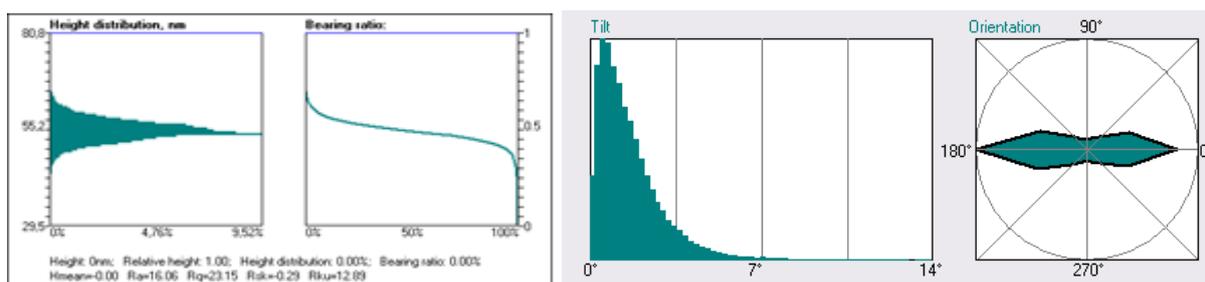


Рис. 4. Основные характеристики морфологии поверхностных слоев стали 4X5МФС. а-распределение по высотам; б-угловое распределение



а) б)

Рис. 5. Основные поверхностные характеристики стали Р6М5: а-высотная характеристика, б- угловое распределение



а) б)

Рис. 6. Основные поверхностные характеристики стали 4X5MFC с алмазоподобным покрытием: а-высотная характеристика, б- угловое распределение

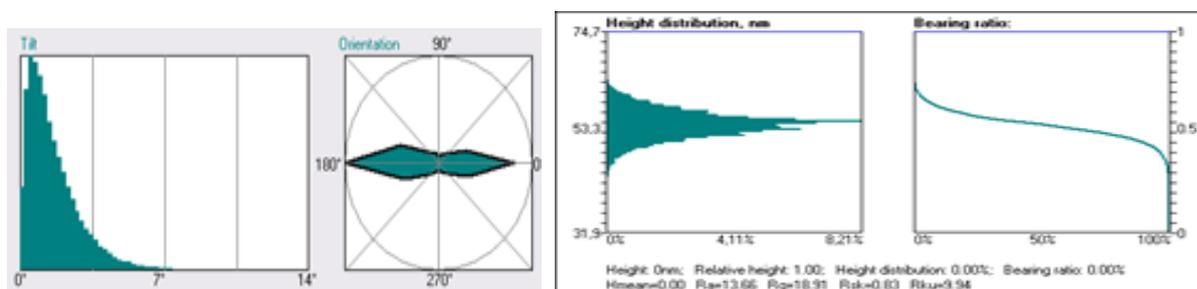
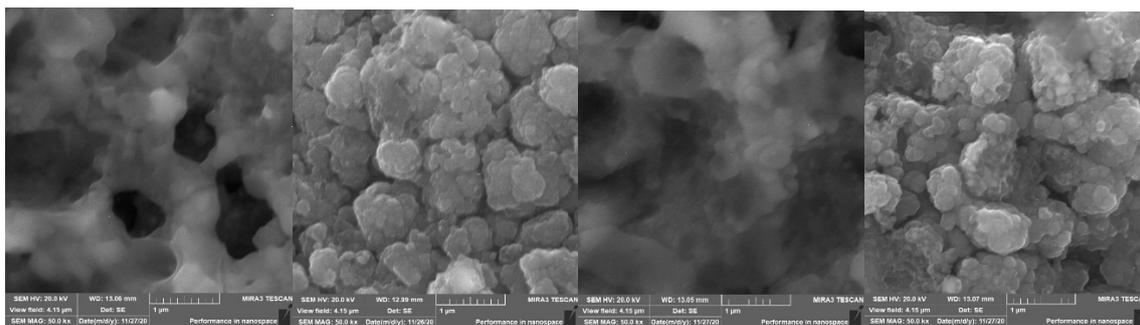


Рис. 7. Основные поверхностные характеристики стали Р6М5 с алмазоподобным покрытием: а-высотная характеристика, б- угловое распределение

Исходя из представленных данных видно, что нанодисперсные структуры начинают формироваться в алмазоподобных покрытиях при осаждении их поверхности стальных субстратов. Данный процесс интенсифицируется при формировании АПП на сверхтвердых слоях, осаждаемых на стальные субстраты (рисунок 8).

К числу наиболее распространенных покрытий для металлообрабатывающего инструмента относят нитрид титана, карбида титана, карбонитрида титана, нитрида циркония, карбида циркония, карбонитрида циркония, соединений на основе хрома, титана, алюминия, алмазоподобных покрытий которые формируют в вакууме с помощью методов PVD, CVD, PCVD или сочетанием выше приведенных методик. Современной тенденцией при осаждении вакуумных покрытий является получение многофункциональных покрытий, что позволяет существенно увеличить эксплуатационные характеристики по сравнению с исходными материалами.



а) б) в) г)

Рис. 8. Морфология покрытий АПП, сформированных на сверхтвердых подслоях стальных подложек Р6М5 и 4Х5МФС. а- субстрат 4Х5МФС, подслой ВК6, режим формирования подслоя Norma 1, б- субстрат 4Х5МФС, подслой ВК6, режим формирования подслоя Norma 2, в- субстрат Р6М5, подслой ВК6, режим формирования подслоя Norma 1, б- субстрат Р6М5, подслой ВК6, режим формирования подслоя Norma 2

Для формирования многофункциональных покрытий применяют создание «sandwich»-структур, так как каждый слой выполняет различные функции – формирующую, противоизносную, антикоррозионную. При использовании режущего инструмента с многослойными и композиционными покрытиями радикально меняется устойчивость режущего инструмента и его рабочие характеристики, отмечается уменьшение износа, повышение точности резания, появляется возможность увеличения подачи, возрастает качество обработки поверхности и увеличивается долговечность инструмента. Так применение композиционного многослойного покрытия, содержащего слои нитрида титана, титана, алмазосодержащих соединений при толщине одного слоя от 0,1 до 2 мкм позволяет увеличить износостойкость металлообрабатывающего инструмента 1,5- 5раз. Создание многослойных вакуумных покрытий, в том числе содержащих в своей структуре нанофазы и наночастицы, с применением многокомпонентных магнитоуправляемых потоков металлической и углеродной плазмы, следующего состава: (Al-Ti-Cr-Si)-(C, N), CN, CF, CB, позволяет существенно увеличить физические и механические свойства модифицируемых изделий. Установлено, что формирование вакуумных покрытий на модифицированной стальной поверхности, методом электроискрового легирования, приводит также к снижению значений шероховатости поверхности модифицированного стального субстрата.

Таким образом, формирование наноконпозиционных структур в многофункциональных покрытиях зависит от типа материала подслоя, а также режимов формирования покрытий.

**Список литературы:** 1.Твердые покрытия Ti-Al-N, осажденные из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы / В.В. Белоус [и др.] // Физическая инженерия поверхности. –2009. – т. 7, № 3. –С. 216-220. 2.Овчинников, Е.В. Триботехнические характеристики плазмохимических покрытий AlTiN / Е.В. Овчинников, Н.М. Чекан, И.П. Акула // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2014. -№ 1 (303). - С. 55-63. 3.Adhesive activity AlTiN layers based on forming polymer coatings / Y. Auchynnikau [et al.] // The proceedings of the Austrian-Slovenian Polymer Meeting 2013 [Elektronski vir] / Austrian-Slovenian Polymer Meeting-ASPM 2013, 3-5 April 2013, Bled, Slovenia; editors Majda Žigon, Teja Rajšp.- El. zbornik. - Ljubljana: Centre of Excellence PoliMaT, 2013. – P. 256- 257. 4. Получение и термообработка покрытий системы Ti-Al-Si-N / Н.М. Чекан [и др.] // Веснік ГрДУ, сер. 6. – 2013. – № 2 (154). – С. 31-37.

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЗРИТЕЛЕЙ, ПРИСУТСТВУЮЩИХ В КИНОКОНЦЕРТНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Павлыш В.Н., Дегонский А.И., Чупахин А.С.  
(ДОННТУ, г. Донецк, ДНР, ДОНМУ, г. Донецк, ДНР)  
Тел. +38 (062) 301 03 91; E-mail: [pavlyshvn@mail.ru](mailto:pavlyshvn@mail.ru)

**Abstract:** *The problem of optimizing the arrangement of equipment in cinema and concert complexes is considered. To reduce the influence of electromagnetic fields on the audience. to study the configuration of the electromagnetic field, the method of mathematical modeling is used.*

**Key words:** *electromagnetic field, mathematical model, equipment, parameter, project.*

**Актуальность работы.** Современный киноконцертный комплекс – это сложный радиоэлектронный, информационный объект, содержащий большое количество источников и расположенных рядом, чувствительных к воздействию электромагнитных помех, рецепторов. Актуальность проблемы обусловлена тем, что в результате помехоэмиссии и восприимчивости могут возникать нарушения в работе приборов, оборудования и сетей в составе киноконцертного комплекса, содержащих чувствительные информационные системы.

Любое техническое устройство - это источник электромагнитных помех для одних устройств и одновременно рецептор ЭМП относительно электромагнитных воздействий других устройств. Технические устройства киноконцертного комплекса работают совместно. Каждый рецептор находится под общим электромагнитным воздействием ряда других устройств. Совокупность одновременно существующих электромагнитных воздействий на рецептор определяет ЭМО, в которой он должен функционировать.

В этой связи исследование конфигурации электромагнитных полей и их влияния на зрителей является актуальной задачей.

**Цель работы** – формирование пакета характеристик электромагнитных полей, создаваемых элементами аппаратуры киноконцертных залов, для исследования их влияния на здоровье зрителей.

**Основное содержание.** Информация по проблеме обеспечения ЭМС в профессиональном аудиовизуальном оборудовании, используемом в кинотеатрах, концертных залах, театрах, открытых концертных площадках в индустрии медиа развлечений (запись музыки, фильмов, видео) приведены в работах [1,2].

Проблема обеспечения ЭМС технических средств киноконцертного комплекса охватывает широкий комплект аппаратуры. Современный киноконцертный комплекс имеет в своем составе различное функциональное оборудование: информационное (видеосерверы, роутеры и др.), радиоэлектронное (устройства для приема и передачи сигналов, радио и телевизионные тюнеры / передатчики и др.), мультимедийное (цифровые проекторы, видео мониторы и др.), звукотехническое (усилители звуковой частоты, микрофоны и др.), силовое (выпрямители ксеноновых ламп, темнители света). Применение указанного и другого оборудования, которое можно трактовать как источник, так и рецептор электромагнитных помех, может вызвать сбои в работе чувствительной аппаратуры, а также ухудшить сложную электромагнитную обстановку.

На рис. 1. обобщенно показаны тенденции изменения основных показателей технических средств в результате модернизации элементной базы и технологий производства электронной аппаратуры, развития информационных технологий и т.д.:

- уменьшение потерь в устройствах и аппаратуре в целом, то есть увеличение коэффициента полезного действия (КПД) - 1;

- уменьшение уровня сигнала - 2;
- снижение уровня собственных шумов - 3;
- увеличение уровня помех - 4.

Вследствие роста уровня электромагнитных помех, снижения уровня сигналов (а это означает увеличение чувствительности для сигналов и, соответственно восприимчивости для помех (снижение помехоустойчивости)), необходимость решения проблемы обеспечения ЭМС неуклонно растет

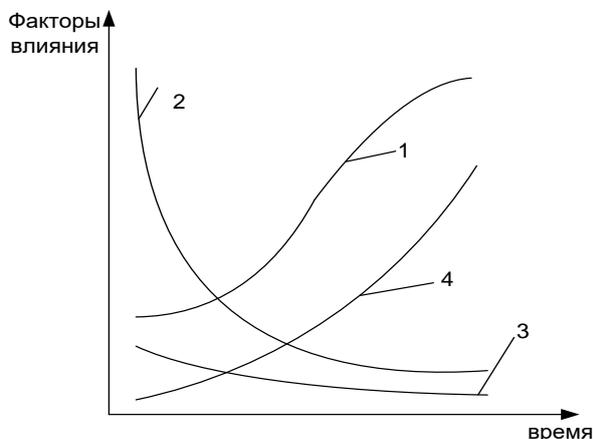


Рис. 1. Тенденции изменения параметров радиоэлектронных средств  
нография [4].

На международной конференции Общества инженеров акустиков (AES 51st Conference, Helsinki, Finland - August 21-24, 2013) в докладе подтверждена актуальность обеспечения ЭМС в профессиональном звуковом оборудовании.

Первой книгой в странах бывшего СССР, в которой описаны процессы, влияющие на обеспечение ЭМС, по цепям электропитания звуко-технического оборудования стала монография [4].

Впервые комплексный анализ киноконцертного комплекса, который служит примером сложной системы аудио-, видео-, кинотехнического оборудования, электрического, информационного, радиоэлектронного оборудования, которое совместно влияет на электромагнитную обстановку и определяет условия обеспечения взаимной ЭМС.

Результаты прямых измерений, выполненные в работе подтверждают сложную электромагнитную обстановку в помещениях аппаратных киноконцертного комплекса, сформированную оборудованием в составе киноконцертного комплекса.

В обобщенном виде пути распространения и последствия воздействия ЭМП на технологическое оборудование представлены на рис. 2.

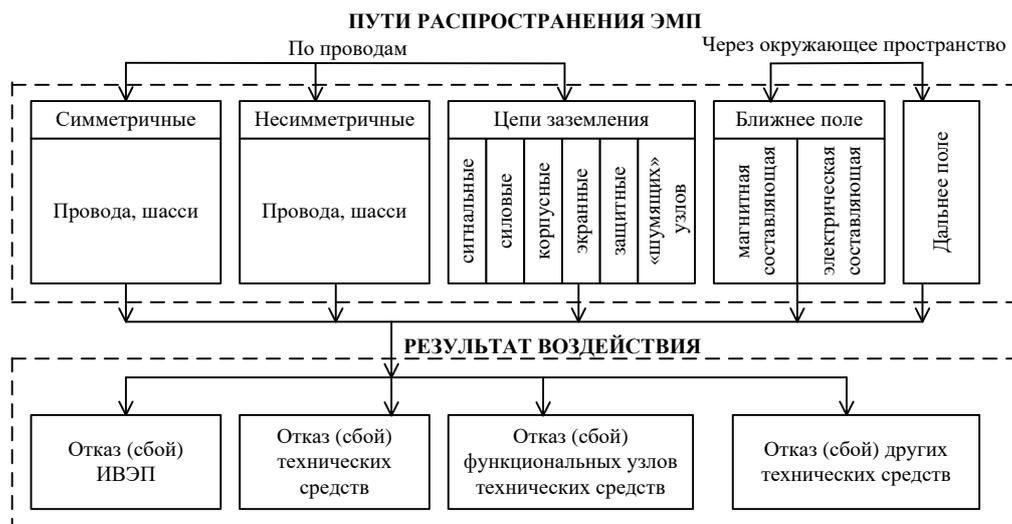


Рис. 2. Пути распространения и последствия влияния ЭМП на технологическое оборудование

Киноконцертный комплекс представляет собой сложную систему взаимодействующего в аспекте обеспечения электромагнитной совместимости оборудования. Обобщенная функциональная схема оборудования мультимедиа представлена на рис. 3. Актуальность исследования электромагнитной обстановки обусловлена увеличением и плотным расположением радиоэлектронных средств различного назначения, а также, что очень важно, ростом чувствительности аппаратуры. Первый фактор обуславливает сложность ЭМО вследствие большого количества источников непреднамеренных помех, а второй обуславливает незащищенность рецепторов.

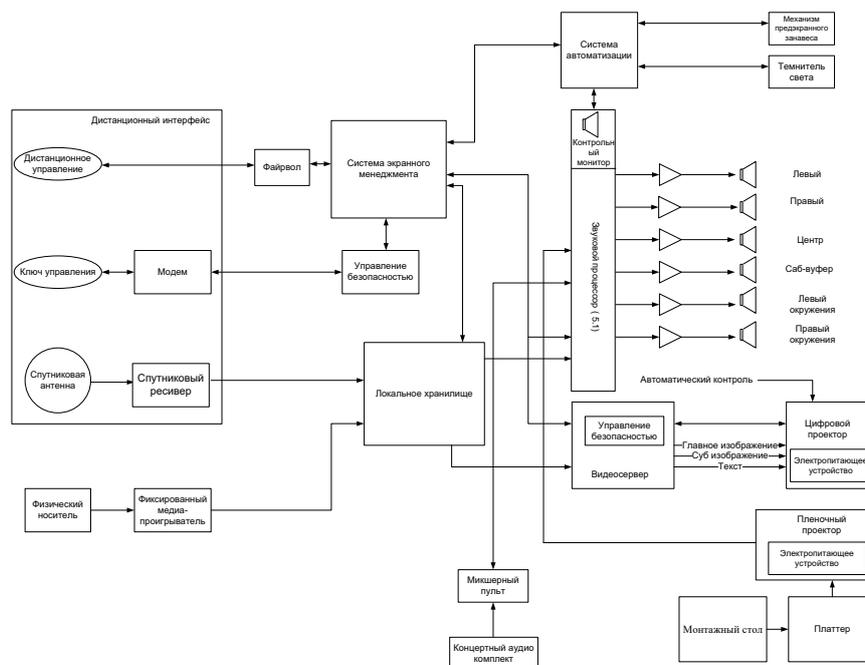


Рис. 3. Схема оборудования киноконцертного комплекса

Для питания электроакустического и кинотехнического оборудования в настоящее время применяют полупроводниковые выпрямители и ИВЭП импульсного типа (ИТ), оперирующие крутыми фронтами рабочих импульсов напряжения и тока в силовых цепях. Помехи, генерируемые ИВЭП ИТ, характеризуются высоким уровнем 70...120 дБ (в отдельных случаях до 140 дБ) относительно 1 мкВ, 1 мкВ/м, а также широким частотным диапазоном: до десятков, сотен мегагерц в кондуктивной среде, до единиц гигагерц - в окружающей среде. Высокочастотные помехи, генерируют также дискретные устройства системной платы видеосервера, цифрового проектора с частотами, кратными тактовым частотам таких узлов, как: центральный процессор, видеопроцессор, модули памяти и их составных частей: ядро, кэш и др. Источником электромагнитных помех выступают также звуковые усилители класса D, работающие в ключевом режиме [4].

Причины возникновения помех в узлах и устройствах киноконцертного комплекса различные: периодическая импульсная или переменная нагрузка; нестационарные коммутационные режимы (включение, выключение, короткое замыкание и т.д.); коммутационные переходные процессы, возникающие при переключении транзисторов преобразователей, диодов высокочастотного выпрямителя и др. элементов; гармонические составляющие выпрямленного напряжения (тока), приводящие к искажению формы напряжения питающей сети и возникновению гармонических составляющих; наводки от внешних электромагнитных полей и др. факторы и явления.

Среди узлов и устройств киноконцертного комплекса, являющихся источниками электромагнитных помех, необходимо выделить в первую очередь источники вторичного электропитания (ИВЭП), а также электрооборудование и электромеханические устройства, имеющие в своем составе трансформаторы, электромеханические пускатели и реле, преобразовательные агрегаты с регуляторами и корректорами напряжения, выпрямительные и преобразующие узлы с емкостной, индуктивной и смешанной нагрузкой.

Широкое распространение в свое время получили электромагнитные выпрямители для питания ксеноновых ламп, выполненные на ферромагнитных элементах – дросселях насыщения или магнитных усилителях.

В настоящее время в киносети активно используют выпрямители для питания ксеноновых ламп мощностью от 250 до 10000 Вт и токами до 300 А. Электропитающее устройство для питания ксеноновых ламп характеризуется помехами в широкой полосе с разными уровнями и спектральным составом.

В блоке питания ксеноновой лампы для поджига используется высокочастотный источник импульсного высокого напряжения, для подпитки – маломощный источник постоянного тока – выпрямитель и для работы в нормальном режиме мощный стабилизированный выпрямитель. Блок поджига ксеноновой лампы – это высокочастотный, высоковольтный источник, который создает пакеты импульсов частотой 1 МГц и напряжением 30 кВ. Ксеноновая лампа, используемая в качестве источника света, также является интенсивным источником помех с широкополосным спектром.

Электромагнитные помехи распространяются от источника помех к приемнику двумя способами – кондуктивным (провода, шасси и корпуса устройств, шины заземления, экраны, оплётку и проч.) и через окружающее пространство.

Помехи могут проникать через ИВЭП и общий заземляющий контур кондуктивным способом по цепям электропитания. Например, высокочастотные помехи первичной сети проникают на выход ИВЭП через паразитные межобмоточные емкости разделительных трансформаторов, межвитковые емкости дросселей фильтров, соединительные провода. По этим цепям и заземляющему контуру также циркулируют токи от ключевых каскадов, которые создают импульсные помехи на входе и выходе ИВЭП [1].

**Выводы.** В результате выполненной работы сформирован пакет характеристик, учёт которых позволяет исследовать состояние электромагнитных полей и ставить задачу математического моделирования их конфигурации.

**Список литературы:** 1. Chupakhin A., Shield Current Induced Noise in Audio Cables // Специальный выпуск «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.», Т. 2 № 8(114). – 2013. – с. 211-213. 2. Пилинский В.В., Титков Д.В., Швайченко В.Б., Чупахин А.С., Осман Шарагда «Аппаратно-программный комплекс проектирования гибридных помехоподавляющих фильтров // Специальный выпуск «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.», Т. 2 № 8(114). – 2013. – с. 195-200. 3. Petrishev O. The method of determining the level of low-frequency interference induced by ferromagnetic component on the circuit board / O. Petrishev, V. Pilinsky, A. Chupakhin 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo), St.Petersburg, Russia, 4-8 July 2017 DOI: [10.1109/EMCCompo.2017.7998107](https://doi.org/10.1109/EMCCompo.2017.7998107) 4. Петрищев О. Н. Особенности расчета переменного магнитного поля, создаваемого вибрирующим ферромагнитным диском / О.Н. Петрищев, В.В. Пилинский, А.С. Чупахин // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 14 (1186). – С.78–81.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПАКЕТА МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИНОСТРАННЫХ ЯЗЫКОВ 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](mailto:pavlyshvn@mail.ru)

**Abstract:** *The ways and methods of modernization of preparation and composing of studying material during introduction of credit-modulo system is considered.*

**Key word:** *studying process, modulo, material, information, system.*

**Актуальность работы:** 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 задача тема статьи является актуальной и важной при обучении студентов университетов.

**Цель работы** – обоснование способов построения системы упражнений при изучении иностранного языка в техническом вузе.

**Основное содержание работы.** Для успешного становления навыков и умений основных видов иноязычной речевой деятельности, в частности чтения и говорения, необходима модель, адекватная целям и условиям процесса обучения иностранным языкам в техническом вузе. Эта модель может быть достаточно эффективной, если осуществлять обучение названным видам речевой деятельности во взаимосвязи на основе проблемного подхода как средства, позволяющего наиболее полно реализовать общность чтения и говорения на психолингвистическом, психологическом, лингвистическом и методическом у

Система упражнений, построенная в соответствии с названными требованиями, включает два комплекса - устно-речевые проблемные упражнения и текстовые проблемные упражнения.

Поскольку коммуникативные ситуации в говорении, служащие основой для устно-речевых проблемных упражнений, создаются за счет варьирования неизвестного компонента в структуре речевого действия- предмета, средств и способов или условий реализации высказывания,- можно выделить следующие типы устно-речевых проблемных упражнений:

- на усвоение средств и способов восприятия и осуществления речевого высказывания (устно-речевые проблемные упражнения 1);
- на употребление усвоенных языковых и речевых средств, адекватных определённым ситуациям общения (устно-речевые проблемные упражнения 2);
- на расширение и детализацию предмета высказывания (устно-речевые проблемные упражнения 3).

В процессе анализа специальных текстов мы обнаружили в них познавательные ситуации трёх типов в зависимости от выраженности текстового субъекта (предиката) и, соответственно, выделили такие типы проблемных упражнений, которые позволяют разрешать каждую из них:

- на выявление смыслового содержания текста (текстовые проблемные упражнения 1);
- на информационное насыщение предмета (текстовые проблемные содержания 2);

- на расширение и детализацию смыслового содержания темы (текстовые проблемные упражнения 3).

Конкретные виды устно-речевых проблемных упражнений и текстовых проблемных упражнений всех типов используются в зависимости от содержания каждого из этапов цикла занятий по определённой теме и его задач с точки зрения формирования и совершенствования общих, соотносимых и специфических навыков и умений чтения и говорения.

На первом этапе, целью которого является вхождение в изучаемую тему, преподаватель вводит в устную речь основной текст посредством постановки общей проблемы и фиксации её ключевых положений. Для того чтобы студенты могли принять участие в решении этой проблемы, они должны владеть соответствующими средствами и способами восприятия и порождения иноязычного высказывания. Эта потребность удовлетворяется в процессе выполнения конкретных видов устно-речевых проблемных упражнений 1. Студентам могут быть предложены неполный чертёж, денотатная карта, схема, функционально-смысловая таблица, фрагмент с информационными пробелами и т.д. При этом совершенствуются соотносимые лексико-грамматические навыки говорения и чтения и специфические для говорения речевые навыки выбора.

На втором этапе в процессе чтения текста студенты раскрывают его смысловое содержание с помощью усвоенных в говорении языковых и речевых средств, выполняя текстовые проблемные упражнения 1 на выявление субъекта (предиката), раскрываемого в тексте последовательно, на достраивание субъекта (предиката), изложенного в тексте неполно, односторонне, на домысливание субъекта (предиката), отсутствующего в тексте. При этом совершенствуются соотносимые навыки реализации содержательно-смысловой и логико-структурной программ высказывания в чтении и говорении и специфические произносительно-интонационные навыки чтения.

Предметное содержание текста задаёт определённые ситуации общения, позволяющие обсудить его на третьем этапе в устной форме в виде сообщения, доклада, дискуссии и т.д. с помощью вариативного употребления усвоенных языковых и речевых средств (устно-речевые проблемные упражнения 2). При этом совершенствуются соотносимые навыки реализации коммуникативно-функциональной программы высказывания в говорении и чтении и специфические для говорения навыки комбинирования. В ходе обсуждения формулируются новые познавательные задачи, решение которых требует привлечения дополнительной информации.

На четвёртом этапе происходит информативное насыщение предмета в процессе просмотрового, поискового и ознакомительного чтения текстов и выполнения текстовых проблемных упражнений 2 целевыми установками на расширение и обобщение текстового субъекта (предиката). При этом совершенствуются специфические навыки перечисленных видов чтения.

Последний, пятый этап, предусматривает итоговое обсуждение поставленной проблемы и интенсивное самостоятельное чтение по теме с целью комплексного развития умений чтения и говорения. Эти задачи решаются в процессе выполнения устно-речевых проблемных упражнений 3 на расширение и детализацию предмета высказывания с помощью переноса языкового и речевого материала и предметного содержания темы в ситуации профессионального общения и текстовых проблемных упражнений 3 на дальнейшее углубление смыслового содержания темы с помощью информационного поиска в процессе подготовки и проведения деловых игр.

Упражнения в предлагаемой системе функционально направлены, т.е. каждое упражнение реализует личностные функции чтения, функции текстов: номинативные, обобщающие, познавательные, коммуникативные, целостно-ориентационные, регулятивные. В этом случае следует говорить о коммуникативной установке, которая должна задаваться в любом упражнении и задании. Только в этом случае студент будет обращаться к текстовому материалу, ожидая, что именно он должен выполнить ту функцию, которая отвечает коммуникативной установке определённого плана: проинформироваться; убедиться в чём-то; проинструктироваться, чтобы действовать именно таким образом; собрать материал для выступления, обобщить информацию и т.д.

Функциональная направленность каждого упражнения в системе, выражающаяся в указании обязательной цели - индивидуального речевого результата действия или деятельности чтения субъекта, тесно связана с его интеллектуальной активностью.

Заключительное занятие предполагает обсуждение нескольких изученных тем с использованием информации, извлечённой из самостоятельно прочитанных студентами текстов, с целью отсроченного контроля прочности сформированных умений профессионально-ориентированного чтения и говорения.

Умозаключение как продукт речевой деятельности чтения осуществляется по всем правилам логики на стадии реализации смыслового решения после того, как студентом на стадии поиска выделены условия, вопрос, найдены в тексте соответствующие данные, выбрана из прошлых знаний или предложенных схем, таблиц необходимая информация, которая могла бы служить посылками вместо пропущенных логических звеньев. Смысловое решение завершается в том случае, когда делается заключение в умозаключении. Учитывая необходимость в упражнениях, тренирующих интеллект, мы хотели бы полностью присоединиться к словам А.А.Леонтьева о том, что «интеллектуальная мыслительная деятельность – необходимый компонент обучения, в том числе иностранному языку».

Одним из инструментов реализации индивидуализации обучения посредством модульного построения содержания образования является система образовательных кредитов.

На практике система образовательных кредитов реализуется в том, что один кредит (примерно 30—40 учебных часов) соответствует освоению некоторого модуля содержания образования (аудиторные занятия, самостоятельная работа студентов, зачет, экзамен и т.д.). Использование образовательных кредитов позволяет перейти к накопительной системе формирования усвоенного содержания образования и рейтинговой системе оценки его результатов. Потенциал рейтинговой системы в организации учебного процесса достаточно велик, и это позволяет называть ее рейтинговой системой управления обучением.

Вместе с тем, имеют место и негативные аспекты, которые, тем не менее, не являются фактором, препятствующим внедрению кредитно-модульной системы как современной технологии обучения в университете.

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.**

**Выводы.** В результате выполненных исследований обоснованы принципы, структура и этапы модернизации учебного материала при переходе от традиционной организации учебного процесса к зачетно-модульной системе организации обучения в университете.

В процессе применения рассмотренной организации занятий выявляется не только содержание изучаемой темы, но и её связи с другими темами. Таким образом, система профессионально-ориентированных устно-речевых и текстовых упражнений приводит студентов к осознанию целостности изучаемого курса в соответствии с логикой познавательного процесса.

**Список литературы:** 1. Булавкин И.И. Tagebau (Einführungslehrgang).- Донецк, 2002. 2. Басова Н.В., Ватлина Л.И. Немецкий язык для технических вузов.- Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. 3. Ляховицкий М.В. Методика преподавания иностранных языков. - М.: Высшая школа, 1981. 4. Пассов Е.И. Основы коммуникативной методики обучения иноязычному общению. - М.: Русский язык, 1989. 5. Фоломкина С.К. Обучение чтению на иностранном языке в неязыковом вузе.- М.: Высшая школа, 1987. 6. Леонтьев А.А. Мыслительные процессы в усвоении иностранного языка. – М.: ИЯШ, 1975. 7. К. Таунсенд, Д. Фохт. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ.- М.: Финансы и статистика, 1990. 8. В. Н. Убейко. Экспертные системы.- М.: МАИ, 1992. 3. Д. Уотермен. Руководство по экспертным системам.- М.: Мир, 1980. 9. Д. Элти, М. Кумбс. Экспертные системы: концепции и примеры.- М.: Финансы и статистика, 1987.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К ПОИСКУ ВИРУСНЫХ ПРОГРАММ

Павлыш В.Н., Кодеругин Т.А. (ДОННТУ, г. Донецк, ДНР)

Тел. +38 (062) 301 03 91; E-mail: [snipperi@mail.ru](mailto:snipperi@mail.ru)

**Abstract.** *The task of damage programs diagnostics in working program complex is considered. The method of computer learning for this task solution is proposed.*

**Key words:** *computer, algorithm, method, learning, complex.*

**Актуальность работы.** В настоящее время компьютерные программы и приложения разрабатываются с большой скоростью. С развитием компьютерной техники и интернета, все больше людей начинают беспокоиться об их безопасности, безопасности их данных. Развитие вредоносного программного обеспечения (ПО) приводит к развитию более современных механизмов защиты. В этой связи тема работы является актуальной.

**Цель работы** – совершенствование средств борьбы с программными вирусами на основе применения метода машинного обучения.

**Основное содержание работы.** Данная работа посвящена исследованию возможности применения методов машинного обучения для решения задачи обнаружения вредоносных программ PE (Portable Executable) формата для ОС Windows и построению движка машинного обучения, способного с высокой точностью детектировать вредоносный код до его исполнения, для чего выполнены следующие исследования.

1. Исследование существующих подходов к статическому анализу PE файлов
2. Отбор значимых для анализа атрибутов PE файлов
3. Сравнение алгоритмов машинного обучения для решения данной задачи
4. Создание движка машинного обучения, способного детектировать вредоносные программы.

Данные для обучения в размере 55432 файлов с вердиктами от 109 антивирусов получены с помощью сервиса VirusTotal, выделены наиболее важные для анализа признаки, выбран оптимальный с точки зрения качества работы и скорости алгоритм машинного обучения, создан движок машинного обучения. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. Как правило, для лучшего детектирования вредоносных программ они используются одновременно. В каждом из этих методов существует вероятность ошибочно определить наличие в файле вируса, когда на самом деле файл чист. В таких случаях предполагаемое лечение может испортить файл, что повлечет к потере информации.

Динамический анализ позволяет обойти обфускацию бинарного файла.

Так, например, вирусописатели широко используют системы упаковки, шифрование кода и данных, обфускацию функций и потока управления. Но те же методы используются и для создания приложений разработчиками, чтобы защитить интеллектуальную собственность, усложнить реверс инжиниринг. Метод выделяет несколько основных действий, таких, как удаление файла, запись в файл, общение с сетью, открытие порта на прослушивание, рассылка писем и другие. Этот профиль файла, его деятельности изучается экспертом или методами машинного обучения для вынесения вердикта о вредоносности образца.

Тем не менее, динамический анализ возможен лишь при исполнении исследуемого кода, что делает операционную систему более уязвимой, а также, некоторые вирусы могут определять запускаемое окружение, маскируя себя, и, тем самым, ведут себя по-разному в тестовом и рабочем окружении. Таким образом, требуется создавать максимально схожие окружения, что представляется еще одной проблемой, требующей решения.

Статический анализ способен дополнять динамический, предоставляя информацию об атрибутах бинарного файла. Статический метод анализирует программу до исполнения, извлекает атрибуты из бинарного файла, подсчитывает статистики и на основе этой информации выносит вердикт об угрозе исследуемого файла. Такой подход безопасен — вердикт выносится еще до исполнения файла, но плохо работает на файлах с обфускациями, запакованными секциями. Также, с увеличением размера файла, время, требуемое для анализа, увеличивается. Помимо этого, для разработки качественного статического анализатора, требуется понимать работу загрузчика бинарного файла. Разницу между документацией и действительным поведением загрузчика. Вирусы могут использовать часть полей бинарного файла для своих нужд. Например в виде хранения данных или адреса исполнения вредоносного кода.

Далее, мы остановимся на статическом анализе PE (Portable Executable) файлов для операционной системы Windows. Выбор связан с огромной популярностью этой системы. PE формат же является стандартом исполняемых файлов и библиотек. Нужно понимать, что шаблон, алгоритм проектирования движка статического анализа вредоносного ПО применим и к другим платформам.

Рассмотрим задачу создания движка машинного обучения для статического анализа PE файлов для операционной системы Windows с последующей интеграцией в программный продукт. Важно отметить, что движок машинного обучения должен обладать высокой скоростью работы. Для слабых персональных компьютеров время сканирования системного диска должно укладываться в несколько минут. Для решения данной задачи требуется:

- исследовать существующие подходы;
- выявить наиболее важные признаки для определения вредоносности файла в условиях ограниченных ресурсов и времени;
- сравнить современные алгоритмы машинного обучения применительно к данной задаче;
- реализовать движок в рамках программного продукта.

Данная работа отвечает на вопрос о возможности использования современных методов машинного обучения для эффективного детектирования вредоносного ПО в реальных условиях. Реализуется движок статического анализа, имеющий практическое применение и являющийся модулем системы защиты машин конечного пользователя.

Задача состоит в создании статического движка машинного обучения для анализа PE (Portable Executable) файлов, позволяющего с высокой точностью выносить вердикт о вредоносности файла. Перед тем как решать задачу, сформулируем её более формально. А именно, обсудим требования и ограничения предъявляемые к решению, входные и выходные данные и метрики качества, по которым будет определяться наилучшее решение.

В работе ограничиваемся рассмотрением файлов для операционной системы Windows, а именно, файлов PE формата. Алгоритм действий для поиска лучшей модели для других файлов, файлов других систем будет тем же самым. Выбор сделан на основе популярности операционной системы Windows среди других систем. А все исполняемые файлы Windows имеют PE формат.

Статический анализ файла основан только на изучении структуры его файла, в нашем случае, на изучении PE структуры и извлечении полезных для детекции признаков. Исполнение кода с какой-либо целью недопустимо. При запуске исследуемой программы надежность системы понижается. Доля ложно положительных срабатываний должна быть как можно меньше. Движок как можно реже должен ошибаться на определении чистых файлов как вредоносных. Это может привести к потере или повреждению данных пользователя.

Будем считать количество ошибок в 3% приемлемым. Наиболее сложной характеристикой требований для определения является точность (accuracy). Точность алгоритма должна быть как можно выше, с другой стороны нам также важна скорость алгоритма. Пользователь не должен испытывать неудобств при использовании антивирусной защиты. А значит нам нужно найти приемлимые параметры для качества и скорости. Также, довольно сложно сопоставить хотя бы примерно результаты большинства исследований. Нет общедоступной большой базы файлов, которую можно было бы считать эталоном. Каждое исследование проводится со своими данными.

Также нужно понимать, что не имеет смысла сравнивать алгоритмы машинного обучения и сигнатурный метод на одних и тех же данных. С большой вероятностью файлы устарели и их сигнатуры уже есть в базах. Выберем порог качества в 95% как минимально допустимый, при котором алгоритм даже не будет рассматриваться. Скорость движка подберем из расчета полного сканирования системного жесткого диска HDD. На новой системе насчитывается около 20-30 тысяч PE-файлов. Поэтому выберем приемлемую среднюю скорость работы алгоритма равной 30 файлам в секунду. Теперь мы можем сформулировать общие требования.

1. Источником данных для модели служит PE файл.
2. Возможна лишь работа с исходным бинарным файлом без его исполнения.
3. Точность (accuracy) предсказания выше 95% .
4. Доля ложно положительных срабатываний менее 3%.
5. Средняя скорость работы алгоритма — 30 файлов в секунду.

Движок на вход принимает PE-файл и возвращает вердикт о вредоносности файла: Вход: PE-файл

Выход: вердикт (0 - файл чистый, 1 - вредоносный)

Движок представляет из себя pipeline. Входящие данные проходят несколько этапов обработки и на выходе получаем вердикт о файле. Выделим компоненты из которых состоит движок: 1. PE-парсер, позволяющий получить значимые для анализа атрибуты 2. Классификатор, принимающий на вход атрибуты исследуемого PE-файла и относящего его к одному из классов (0 — для чистых файлов и 1 — для вредоносных) Хотя в данной работе и не рассматривается вопрос создания PE-парсера, он неразрывно связан с классификатором и также является компонентой движка. Классификатор диктует набор значимых для анализа атрибутов. Схема движка представлена на рис. 1.

Вообще говоря, не все поступающие на вход PE-парсера файлы могут являться PE-файлами. Файлы могут быть битыми или не являться файлами формата Portable Executable. В реальных условиях PE-парсер сообщает об ошибке и признаки таких файлов не передаются в классификатор. Поэтому для простоты будем считать, что все передаваемые на вход PE-парсера файлы имеют исполняемый Portable Executable формат и их атрибуты передаются в Attribute Selector.

Как было упомянуто, качество модели оцениваем метрикой accuracy — отношение количества верно классифицированных файлов ко всем файлам. Это будет нашей основной метрикой. Также, при оценке и сравнении качества моделей стоит обращать внимание и на false positive rate. Метрика accuracy при неравномерной выборке может не отражать действительную способность классификации алгоритма, тогда как вместе с false positive rate дает более полную картину. Метрика accuracy основная в том смысле, что она является определяющей при выборе среди алгоритмов у которых false positive rate меньше порогового значения.

Требование на скорость движка сформулировано таким образом, что можно говорить лишь о средней его скорости работы и среднем времени обработки файла. Это связано с зависимостью времени работы модуля от размера файла. Требование высокой скорости работы движка и, одновременно с этим, хорошей точности предсказания вы-

нуждает разумно подходить к выбору атрибутов и их количества для извлечения из PE файла, а также, к выбору алгоритма машинного обучения, поэтому принципиально не будут рассматриваться нейронные сети и методы глубинного обучения. Это требует, с одной стороны, считывания большого количества байт файла, а с другой, использования более сложных методов, перемножения матриц, вычисления нелинейностей, что будет на порядок медленнее подходов, представленных в данной работе.

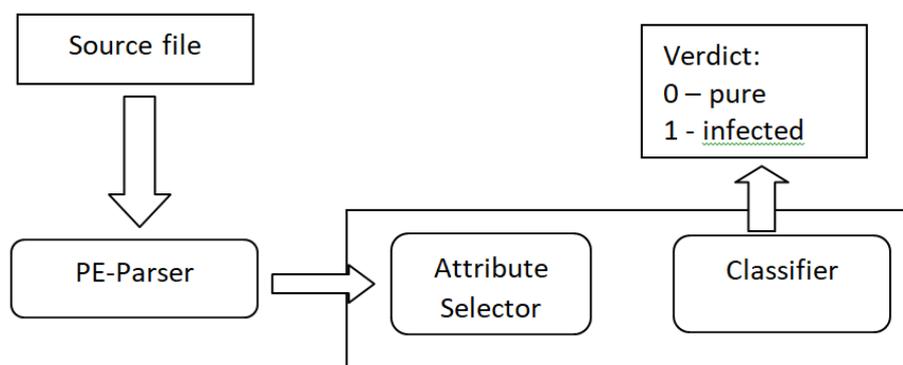


Рис. 1. Общая архитектура движка по анализу PE файлов. Серая область - фокус исследований в данной работе

Большинство статических анализаторов основываются на извлечении структур PE (Portable Executable) файла, как в древовидном виде, так и в виде совокупности полей. Используются как признаки, получаемые из машинного кода, вызовов функций, так и признаки, получаемые из рассмотрения файла в виде последовательности байт, определения статистик, энтропий, подсчет n-грам.

Алгоритм «решающее дерево» (decision tree) здесь упомянем лишь потому, что на нем основываются более сложные, представленные здесь алгоритмы, и, следует понимать принцип построения базовых алгоритмов для использования их в системе.

**Выводы.** Полученные результаты демонстрируют, что поставленная задача успешно решается методами машинного обучения, за счёт чего достигается высокий уровень точности (96.5%), открываются возможности по детектированию ранее неизвестных вредоносных программ, защите от уязвимости нулевого дня. При реализации движка в программный продукт важна скорость его работы на машинах конечных пользователей, что также исследовано в рамках данной работы. Созданный движок интегрирован в выпускаемый программный продукт и позволяет с высокой скоростью и хорошим качеством выносить вердикт об угрозе исследуемого файла.

**Список литературы:** 1. McAfee labs threats report. — 2015. — URL: <http://www.mcafee.com/us/resources/reports/rp-quarterly-threat-q4-2014.pdf> 2. Symantec intelligent report. — 2015. — URL: [https://www.symantec.com/content/en/us/enterprise/other\\_resources/intelligence\\_report\\_05-2015.en-us.pdf](https://www.symantec.com/content/en/us/enterprise/other_resources/intelligence_report_05-2015.en-us.pdf) 3. Tabish S. M., Shafiq M. Z., Farooq M. Malware detection using statistical analysis of byte-level file content // In Proceedings of the ACM SIGKDD Workshop on CyberSecurity and Intelligence Informatics / ACM. — 2009. — Pp. 23-31. 4. Malware detection based on mining api calls / Sami A. [et al.] // In Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing / ACM. — 2010. — Pp. 1020-1025. 5. Chen T., C. Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — 2016. — Pp. 785-794.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

Павлыш В.Н., Лазебная Л.А. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)  
Тел. +38 (062) 3010391; E-mail:

**Abstract:** The problem of modifying the element base of the automated control system for the process of hydrodynamic processing of coal seams is considered. The system is based on the principle of microprogram control.

**Key words:** system, parameter, microprocessor, machine, algorithm.

**Актуальность работы.** Характеристики устройства управления процессом определяются параметрами управляющего автомата, поэтому важное значение имеют быстродействие автомата и аппаратные затраты. В этой связи задача модификации элементной базы аппаратного комплекса системы управления является актуальной.

**Цель работы** – обоснование выбора элементной базы системы управления с заданными характеристиками.

**Основное содержание.** Обобщённая структура замкнутой системы автоматического управления представлена на рис. 1, где ОА – операционный автомат, являющийся объектом управления, АР – аналоговый регулятор, реализующий алгоритм управления, ИМ – исполнительный механизм, воздействующий на ОА. Регулируемая аналоговая величина  $f_a$  поступает на АР, характеризуя состояние ОА, здесь происходит сравнение с некоторым значением  $x_a$ . В соответствии с результатом сравнения АР вырабатывает сигнал  $y_a$ , управляющий ИМ таким образом, чтобы

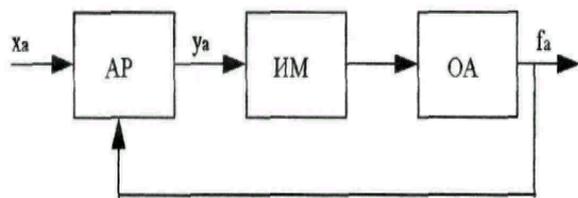


Рис. 1. Обобщённая структура замкнутой системы автоматического управления

регулируемая величина  $f_a$  была равна заданной  $x_a$ . Большими возможностями обладают цифровые регуляторы (ЦР), позволяющие реализовать закон управления в цифровой форме с помощью цифровых вычислительных средств. В этом случае в систему вводятся аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи (рис. 2). В цепь обратной связи включён цифровой датчик ЦД, выполняющий функции АЦП для регулируемой величины. На рис. 4.2 индексы "а" и "ц" означают, что величина является аналоговой или цифровой соответственно.

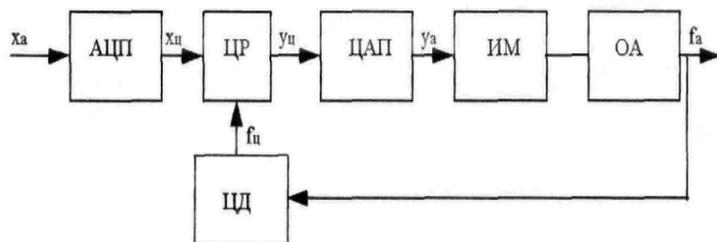


Рис. 2. Структура цифровой системы автоматического управления

Упрощённая типовая схема цифровой системы управления приведена на рис. 3. На вход управляющего автомата (УА) поступают осведомительные сигналы (логические условия)

$$x_l \in X = \{x_1, \dots, x_L\},$$

индицирующие состояния ОА. Логические условия  $x$

формируются специальными цифровыми датчиками ЦД1,...,ЦДL. Управляющий автомат на основе анализа сигналов  $x_1, \dots, x_L$  и закона управления, определяемого функцией F, формирует управляющие сигналы (микрооперации)  $y_n \in Y = \{y_1, \dots, y_N\}$ , преобразуемые дискретными исполнительными механизмами ДИМ1,..., ДИМN в сигналы управления ОА.

Возможны две принципиально различные структурные реализации УА: аппаратная и программная. В первом случае алгоритм управления задаётся электрическими связями между функциональными элементами устройства, во втором - с помощью программы, хранимой в памяти системы.

Аппаратная реализация алгоритма управления возможна двумя путями – в виде автомата с "жёсткой" логикой (АНЛ – automaton with hardwired logic) или в виде автомата с "программируемой" логикой (APL - automaton with programmable logic).

Для задания алгоритма управления используется большое количество различных языков - логические схемы алгоритма, матрицы переходов, система секвенций, граф-схемы алгоритма. Язык граф-схем алгоритма (ГСА) получил наиболее широкое

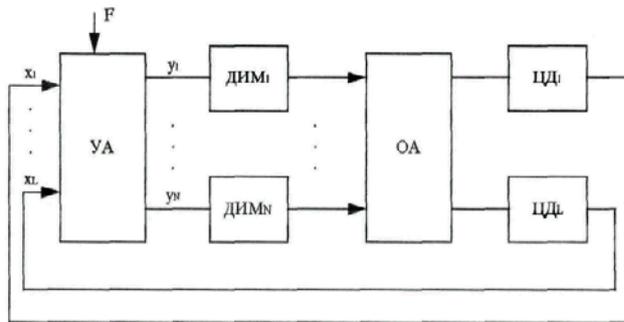


Рис. 3. Типовая структура цифровой системы программного управления

структурного синтеза. Структурная схема АНЛ включает (рис. 4), комбинационную схему КС, формирующую по сигналам  $x_i \in X$  и переменным обратной связи  $T_r \in T = \{T_1, \dots, T_R\}$  управляющие сигналы  $y_n \in Y$  и функции  $\varphi_r \in \Phi\{\varphi_1, \dots, \varphi_R\}$  возбуждения памяти автомата, представляющей собой регистр RG. Переменные  $T_r \in T$  используются для кодирования состояний автомата  $a_m \in A\{a_1, \dots, a_M\}$ .

Существует два типа АНЛ - автомат Мили и автомат Мура, отличающиеся видом функции выходов  $\lambda$ . В автомате Мили функции  $y_n \in Y$  определяется как  $Y = \lambda(X, T)$ , а в автомате Мура

$$Y = \lambda(T) \quad (4.1)$$

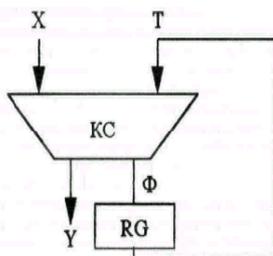


Рис. 4. Структурная схема АНЛ

Закон перехода из состояния в состояние задаётся функцией перехода  $\delta$ , которая одинакова для обоих автоматов.

Для улучшения характеристик автоматов рассматриваются модификации структур и алгоритмов синтеза автоматов с программируемой логикой (APL) на программируемых БИС:

- структура и алгоритм синтеза АPL с введением дополнительной схемы адресации микрокоманд, позволяющие повышать быстродействие автомата.
- структура и алгоритм синтеза с введением схемы преобразователя адреса микрокоманд, позволяющие сократить количество команд безусловного перехода.

- структура и алгоритм синтеза с совмещением функций полей микрокоманд, позволяющие сократить длину микрокоманд.
- структура и алгоритм синтеза с многотактной выборкой микрокоманд, позволяющие сократить количество микросхем.

Автоматы с "программируемой" логикой используют операционно-адресное представление микрокоманд, хранящихся в виде микропрограммы в специальной управляющей памяти.

Структурная схема APL включает:

- схему адресации (СА – circuit of addressing);
- регистр адреса микрокоманд (RAMI – register of microinstruction address);
  - микропрограммную память (ММП – microprogram memory);
  - схему формирования управляющих сигналов (ССС - circuit of control signals).

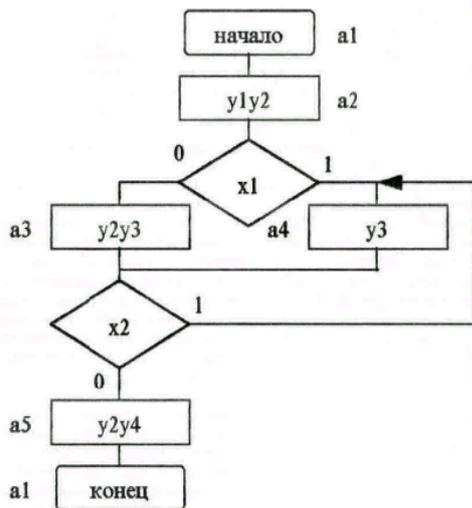


Рис. 5. Граф - схема алгоритма GO

признака (FA – attribute field) позволяет определить тип микрокоманды и способ формирования адреса перехода. Если ССС формирует признак окончания микропрограммы Z, то считывание микрокоманд из ММП прекращается.

**Выводы:** Последовательная многотактная выборка микрокоманды позволяет уменьшить число БИС ПЗУ в схеме микропрограммной памяти в S раз, где S - число частей, на которые разбита микрокоманда.

Введение дополнительной схемы адресации позволяет уменьшить время выполнения алгоритма и число микрокоманд в микропрограммной памяти. Выигрыш увеличивается по мере роста параметров микросхем, используемых для реализации дополнительной схемы адресации. В качестве элементного базиса целесообразно использовать ПЛИС.

**Список литературы:** 1.Павлыш В.Н. Развитие теории и совершенствование технологии процессов воздействия на угольные пласты: Монография. - Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. - 347с. 2. Павлыш В.Н., Гребенкин С.С. Физико-технические основы процессов гидравлического воздействия на угольные пласты / Монография. – Донецк: «ВИК», 2006. – 269 с 3. Павлыш В.Н. Научные основы технологии комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты / Монография. – Донецк: «ВИК», 2008. – 400 с 4. Математические модели и методы расчета параметров процессов подземных горных работ и добычного оборудования / Монография / Под общ. ред. Гребенкина С.С., Павлыша В.Н. // Гребенкин С.С., Рябичев В.Д., Павлыш В.Н., Должиков П.Н., Зензеров В.И. – Донецк: «ВИК», 2007. – 385 с. 5. Павлыш В.Н. Технология каскадной гидрообработки пласта как способ преодоления его анизотропии //Известия Донецкого горного института. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – Вып.2. - С.58-60.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АППАРАТОВ КОНВЕКТИВНОГО ТИПА

**Павлыш В.Н., Перинская Е.В.** ( ДОННТУ,г. Донецк, ДНР)  
Тел. +38 (062) 301 03 91; E-mail: [elenaperinskaya@mail.ru](mailto:elenaperinskaya@mail.ru)

**Abstract:** *The problem of developing methods for increasing the efficiency of the process of dynamic mixing of an inhomogeneous mass in convective-type apparatuses is considered. As one of the options for solving the problem, it is proposed to develop a system for automated design of process equipment.*

**Key words:** *design, process, parameter, system, algorithm.*

**Актуальность работы:** Технология производства многих материалов промышленного назначения включает как базовый этап процесс конвективной обработки многокомпонентных смесей. Вместе с тем, традиционные технологии пока не обеспечивают планируемой эффективности.

В этой связи актуальной является задача модернизации технологических схем и оптимизации параметров процессов на основе внедрения системы автоматизированного проектирования.

**Цель работы** - обоснование структуры и параметров системы автоматизированного проектирования технологического оборудования, осуществляющего процесс конвективного перемешивания неоднородных смесей.

**Основное содержание работы.** Исследованиями установлено, что основное влияние на процесс конвективного перемешивания многокомпонентных материалов оказывают геометрические параметры (координаты установки элемента вращения, координаты расположения входных трубопроводов для поступающих компонентов) и технологические (скорость вращения конвективного элемента и его позиционирование).

Выбор критериев оценки повышения эффективности при модификации параметров производится в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объёме аппарата. Выбор критериев оценки повышения эффективности при модификации параметров производится в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объёме аппарата.

Модернизация геометрических параметров проводится на основании результатов математического моделирования процесса, и являются стационарными характеристиками.

Динамической характеристикой являются технологические параметры – скорость вращения лопасти и её положение, следовательно, управляя этими параметрами, можно влиять на качество процесса согласно разработанным критериям. Для реализации методов повышения эффективности процесса и качества продукции предлагается разработать систему автоматизированного проектирования аппаратов конвективного типа.

Процесс проектирования включает ряд этапов, в том числе рассмотрение и оценка вариантов проектов, обоснование и верификация принимаемых проектных решений. По мере усложнения технологий, расширения числа возможных вариантов проектов возникает необходимость автоматизации процесса проектирования с применением методов математического моделирования и ЭВМ.

На рис. 1 приведена функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования (САПр) технологии процесса.

На основании построенной математической модели могут быть разработаны рекомендации, предназначенные для работников служб и подразделений предприятий, выполняющих работы по проектированию и эксплуатации технологических схем и оборудования.

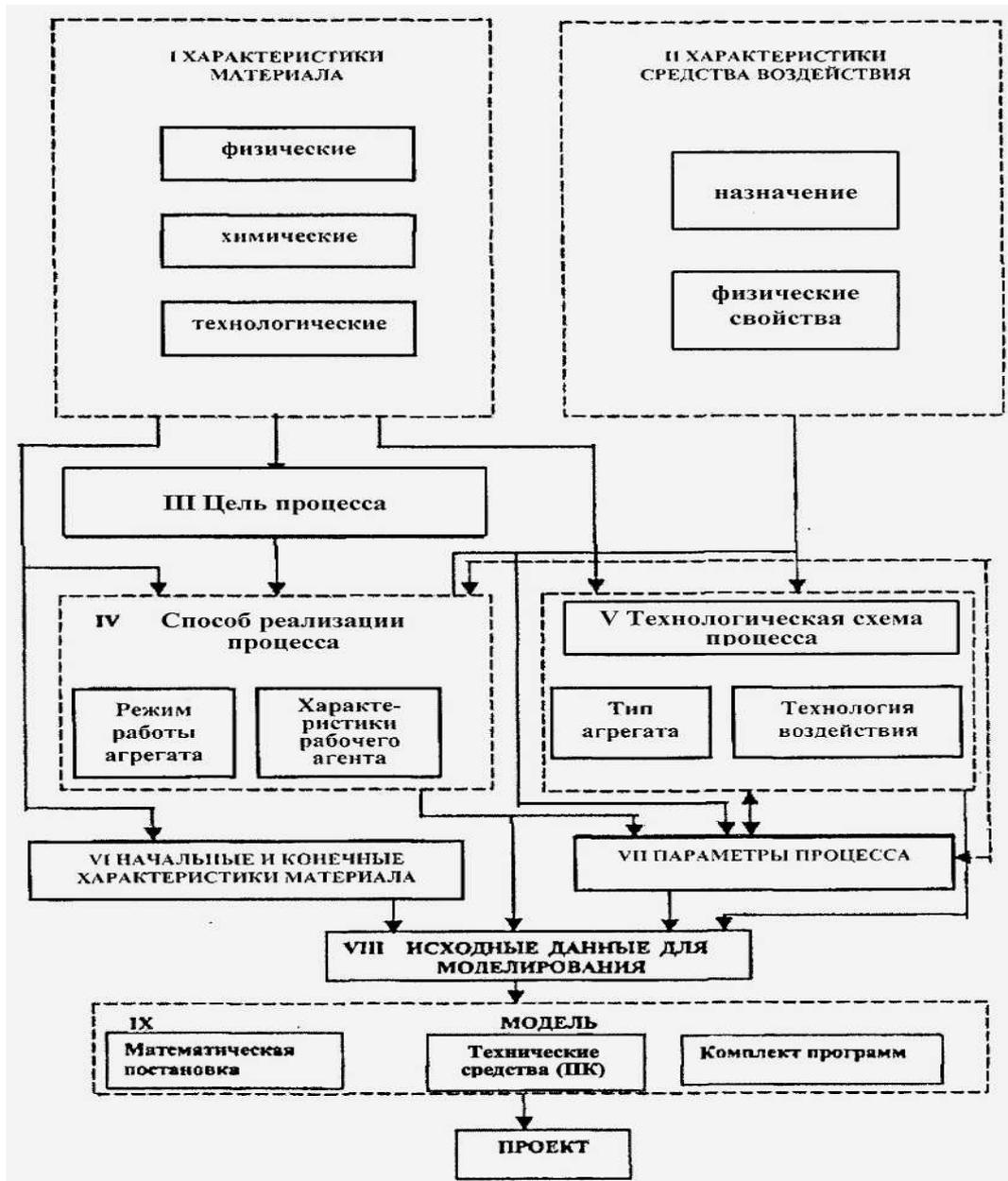


Рис. 1. Функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования технологических схем

Аппроксимация расчетных соотношений основывается на линеаризации и максимальном упрощении уравнений, описывающих процесс.

На рис. 2 приведена обобщенная блок-схема алгоритма функционирования головной программы.

Блок 1 содержит информацию о составе и свойствах материала, поступающего на обработку. Информация представляется в виде массива или файла с как можно более полным набором характеристик.

В блоке 2 помещается информация о тех характеристиках конечного продукта,

которые должны быть обеспечены в результате переработки.

Основные из них – это влажность и концентрация на выходе и производительность аппарата, однако в процессе исследований могут быть рассмотрены и другие показатели.

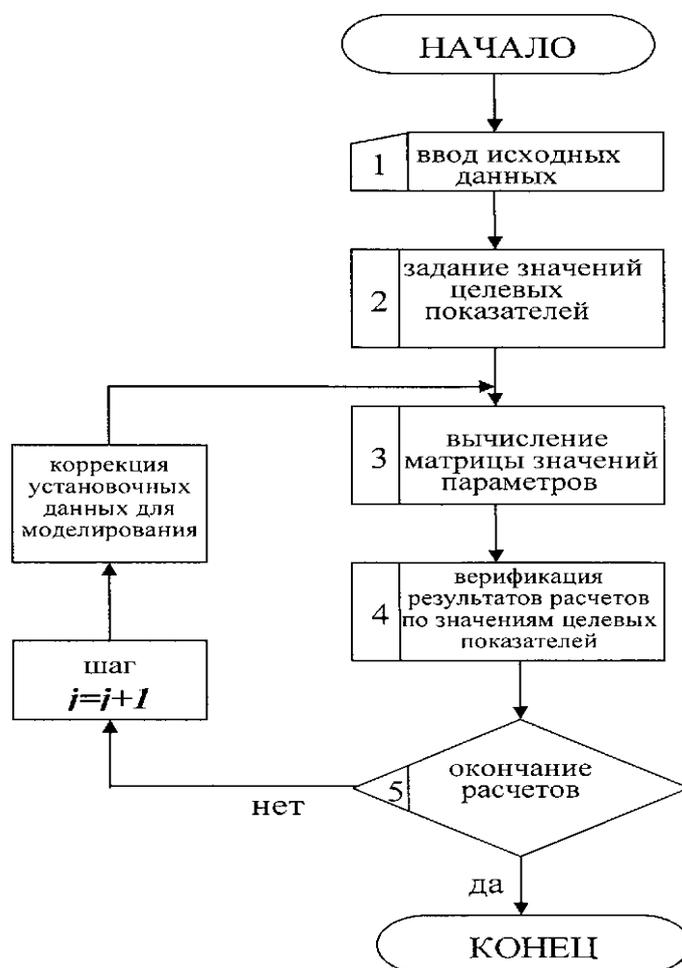


Рис. 2. Блок-схема алгоритма головной программы

Блок 3 – основной расчетный блок. Здесь выполняется численная реализация всех математических моделей, включаемых в предметную область САПр. На данном этапе это математические модели распределения температуры материала в рабочем объеме аппарата, скорости частиц и концентрации обрабатываемого материала. Предложены детерминированные математические модели трех уровней для компьютерного моделирования процесса получения материалов в аппарате конвективного типа. Модели основаны на уравнениях в частных производных, краевые условия сформированы согласно технологическим условиям. Выполнена численная реализация моделей методом конечно-разностной аппроксимации.

Предложенные модели и методы их реализации позволяют проводить численное моделирование процессов и решать задачи совершенствования как конструктивных, так и технологических параметров.

К достоинствам данного метода следует отнести возможность широкой вариации параметров без проведения физических и натуральных экспериментов, что удешевляет и ускоряет процесс проектирования новой аппаратуры.

Как результат работы блока получаются значения указанных параметров и вычисляются все другие величины, характеризующие показатели работы установки.

В блоке 4 выполняется верификация расчетных значений параметров по заданным значениям показателей, определяющих требования к конечному продукту. Верификация может быть построена как по принципу «консенсуса», когда отклонение хотя бы одного параметра вызывает необходимость коррекции исходных данных и повторения моделирования, так и по интегральному принципу с использованием, например, метода наименьших квадратов.

Технически поставленную задачу можно решить на основе использования универсальных компьютеров, которыми в настоящее время оснащается каждое предприятие. Преимуществом этого пути является то, что для реализации задачи достаточно разработать специализированный пакет прикладных программ и обеспечить связь периферийной аппаратуры с центральным компьютером.

**Выводы.** Таким образом, разработана структура системы автоматизированного проектирования специализированного оборудования для вспомогательного процесса получения сопутствующего материала при обогащении полезных ископаемых, разработан алгоритм функционирования головной программы математического обеспечения системы.

Основным преимуществом системы автоматизированного проектирования является то, что с ее помощью удастся получить достаточно полную информацию о различных вариантах проекта, при этом избежать массы рутинных операций и необходимости проведения значительного количества дорогостоящих экспериментов.

**Список литературы:** 1. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Математическое моделирование машин, включающих узлы конвективного типа. / «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Международный сборник научных трудов, вып. 21. ДонГТУ, Донецк, 2002, с 178-184. 2. Математическое моделирование процессов обогащения полезных ископаемых. Монография/ Павлыш В.Н., Назимко Е.И., Корчевский А.Н., Перинская Е.В., Серафимова Л.И., Голиков А.С. // под общ. ред. проф. Павлыша В.Н. и проф. Назимко Е.И. – Донецк: «ВИК», 2014. – 466 с.. 3. Назимко Е.И., Науменко В.Г. Имитационное моделирование изменения поровой структуры осадков при механическом воздействии. /Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин. (Доклады XV междунар. науч.-практ. конф. «Обогащение полезных ископаемых» г. Бердянск, 24-26 мая 2012г) – Дніпропетровськ. – 2012. – вип. 50(91) – С. 158-163..4. Гарковенко Е.Е. Математическая модель процесса изменения концентрации фаз при движении многофазной среды / Е.Е. Гарковенко // Материалы III Научной школы “Импульсные процессы в механике сплошных сред“. - Николаев, сентябрь 1999. - С. 18-21.5. Nazimko L.I. Kinetics of Phases Interaction during Mineral Processing Simulation / L.I. Nazimko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky & al // *Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. - China. - 2006.- p. 785-798.*6. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Расчет параметров машин, содержащих конвективные узлы, с применением компьютеров. Международный сборник трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения», вып. 26, с. 10-15. Донецк, 2003.

## ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ КОРРОЗИОННОМ ИЗНОСЕ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ТОЛЩИНЫ ЛКП ОТ ПРОПИТЫВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛКМ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Папулова Г.Н. (Московский государственный технологический университет,  
«Станкин», Россия)  
E-mail: [papulova\\_galina@mail.ru](mailto:papulova_galina@mail.ru)

**Abstract:** *Ways to improve operational properties of steel products in corrosive wear based on the study of the dependence of the thickness of the coatings on the impregnating ability of paint on the ceramic surface. Were studied the microstructures of the surface of steel without an oxide film and with an oxide film (beta-FeOOH predominates in the composition) in comparison with the surface of aluminosilicate ceramics; to establish the comparative characteristics of these materials.*

**Key words:** *surface layer, pores, thickness, corrosion products, adsorption, paint.*

**Актуальность темы.** Применительно к улучшению качества поверхностного слоя изделий одной из важнейших проблем технологии машиностроения является направленное изменение физико-химических свойств поверхности стали и сплавов. Поверхностный слой детали – это слой, у которого структура, фазовый и химический состав отличаются от основного материала, из которого сделана деталь. Его можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, способную обмениваться энергией и веществом с окружающей средой и характеризующую комплексом интенсивных характеристик. Поверхностный слой может иметь структуру: – исходную, которая возникает при затвердевании металла или сплава; – производную, которая получается из исходной структуры после рекристаллизации сплава в твердом состоянии вследствие фазовых преобразований или пластической обработки. Локально структура может иметь дефекты (несовершенства) материала: микротрещины, щели, поры, включения разного вида, вырывы, шаржированные (вдавленные) твердые частицы и т.д. Поверхностный слой имеет значительную неоднородность физико-химического состояния. Его свойства в момент образования можно описать рядом взаимосвязанных параметров: геометрических, геометрически-физико-химических и физико-химических. Для поверхностного слоя характерны физико-химические и эксплуатационные свойства. От металлографической структуры зависят, в частности, твердость, пластичность, износостойкость, коррозионно-химическая стойкость, адсорбция, адгезия. Важнейшим эксплуатационным свойством поверхностного слоя является коррозионный износ, цвет, блеск, стойкость против старения. Повышение твердости поверхностного слоя изделий осуществляется за счет ХТО и достижения коррозионной стойкости. ХТО представляет собой процесс, сочетающий химическое и тепловое воздействие с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя стальных изделий. Изменение химического состава достигается за счет диффузии в поверхностный слой различных компонентов. Лакокрасочные материалы, являются системами с полимерной дисперсионной средой. Они используются для удовлетворения нужд современной техники, например, антикоррозионные; спроса современного дизайна, например, декорирование различных видов керамических изделий и т.д. с учетом их экологической безопасности и экономической эффективности. Присутствие в стали различных металлов с неодинаковыми потенциалами говорит о структурной неоднородности поверхности, наличии множества гальванических пар. Необходимо было рассмотреть специфические особенности поверхности стали, обусловленные ее микроструктурой и физико-химическими свойствами, а также с учетом современных физико-химических и

коллоидно-химических аспектов адгезионного металлополимерного контакта при адсорбции пленкообразователей данного ЛКМ [1].

**Целью работы** является изучение микроструктур поверхности стали без оксидной пленки и с оксидной пленкой (в составе преобладает бета-  $\text{FeOOH}$ ) в сравнении с поверхностью алюмосиликатной керамики; установить при этом сравнительные характеристики данных материалов.

. Углеродистые низколегированные стали (сп) различных марок, содержат *C, Si, Mn, S и P*, примерного химсостава [1]:

• *C* (0,14–0,20%);

• *Si* (0,12–0,35%);

• *Mn* (0,3–0,6%);

• *S и P* (0,02–0,03%);

• *ост.* – *Fe*. Конструкционные материалы, в основном представленные железоуглеродистыми сплавами, имеют в своей микроструктуре цементит  $\text{Fe}_3\text{C}$ , твердые растворы феррита (раствор углерода в  $\alpha$ -железо) и аустенита (раствор углерода в  $\gamma$ -железо). Добавки металлов типа *Si, Mn, Co, Cr, Ni, Al, Mo, Ti* в углеродистые легированные нержавеющие стали повышают ее качество. Термически обработанная сталь с отсутствием цементитной сетки имеет в своей микроструктуре перлит, основными компонентами которого являются диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  (65–75%), оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10–16%), оксид калия  $\text{K}_2\text{O}$  (до 5%), оксид натрия  $\text{Na}_2\text{O}$  (до 4%) и др.

На рис. 1 представлена микроструктура стали (микрошлиф  $\times 80$ )

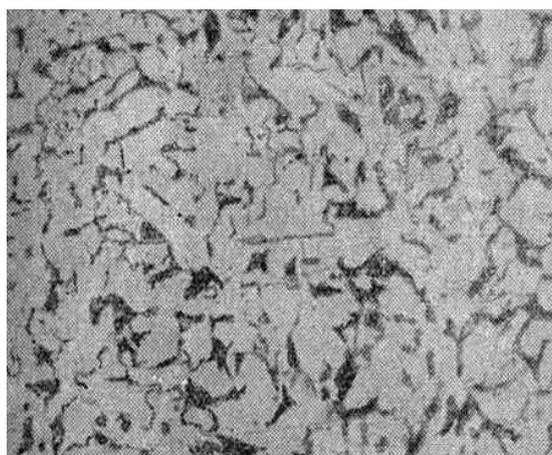


Рис.1. Микроструктура стали (микрошлиф  $\times 80$ )

Свидетельствует о наличии неоднородности ее структуры и величины степени неоднородности.

Рис. 2 свидетельствует, так например, о неоднородности, а также и пористости гидратированного оксида железа.

Известно также о взаимодействии силанольных групп некоторых полимерных добавок с поверхностью стали с образованием связи железо-кислород и органического радикала с полимером. За счет применения модифицированных добавок в лаковые композиции толщина ЛКП значительно снижается [2]. В результате полифункционального действия добавки снижаются размеры и скорость *коррозионных повреждений*. Между адсорбционными свойствами связующих и их пропитывающей способностью существует определенная корреляция (обратная зависимость). Это происходит потому, что при высоком адсорбционном взаимодействии пленкообразующих с продуктами коррозии в них могут перекрываться поры, что значительно снижает скорость пропитки и медленнее протекают процессы фазовых превращений продуктов коррозии [2].

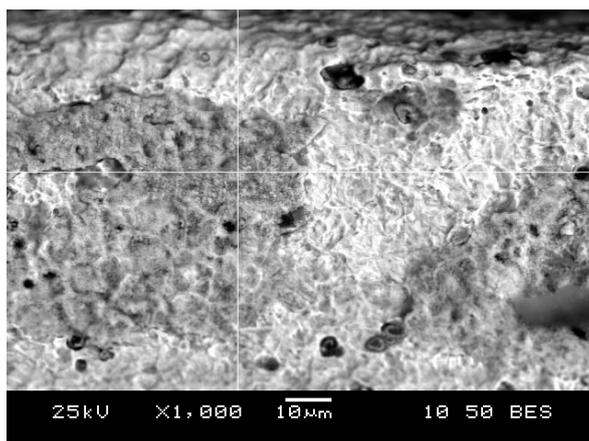


Рис. 2. Микроструктура оксидной пленки на поверхности стали 35×ГСА

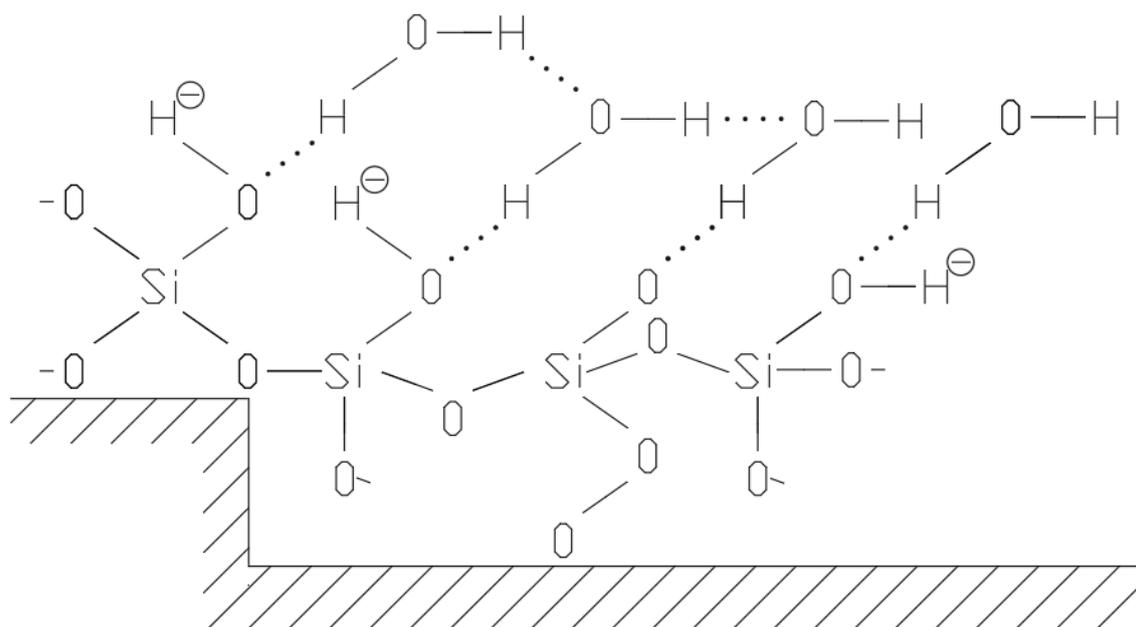


Рис. 3. Строение поверхности фаянса

Рассмотрена модификация карбамидоформальдегидных олигомеров поликонденсационного типа поливиниловым спиртом в красочной композиции для декорирования керамики. По технологическим соображениям, ранее экспериментально было обосновано влияние добавки ПВС на вязкость краски, кратность нанесения рисунка, пропитывающие свойства. Можно положить влияние поливинилового спирта на межмолекулярное взаимодействие в системе КФ-смола – пористый фаянс, т.к. его макромолекулы «цепляются» в порах, создавая скольжение, за счет чего улучшается пропитывающая способность смол. Однако, экспериментальное исследование показало, что добавление глицеринового раствора поливинилового спирта в краску для улучшения технологических свойств краски в большом количестве – 80 % мас. (к смоле) ухудшает физико-химические свойства покрытий из-за значительного повышения пропитывающей способности краски и замедления процесса пленкообразования (рис. 4).

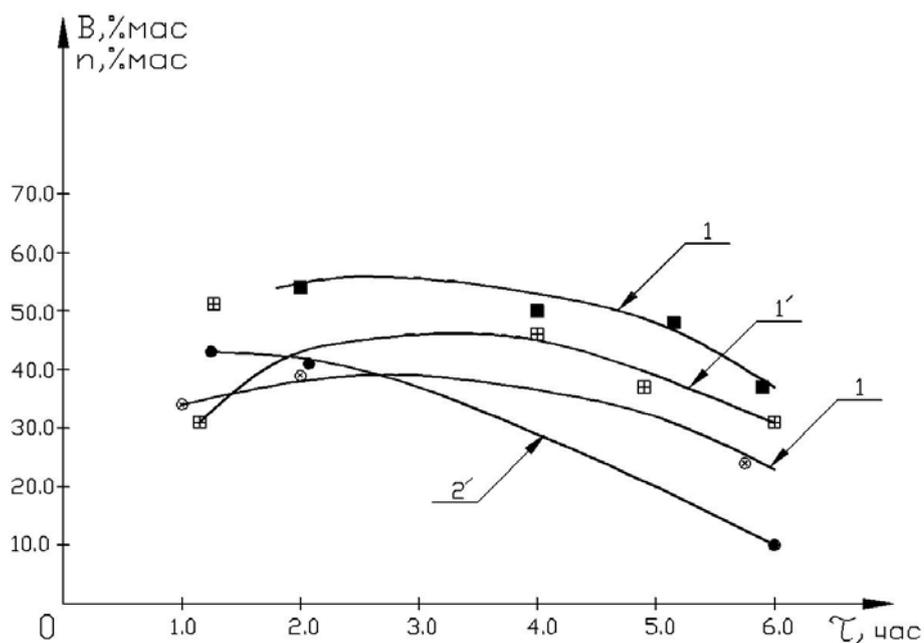


Рис. 4. Зависимость величин влагопоглощения ( $V$ , % мас.) и смываемости ( $n$ , % мас.) в воде красочных покрытий на основе олигомеров КФ-Ж (1) (кривые  $1^1, 2^1$ ) и КФ-МТ (кривые 1,2) для красочной композиции МЧ-578 (с добавлением ПВС) от времени отверждения покрытий на фаянсах различного модуля ( $M$ ) ( $M=1,35$  - кривые  $1, 1^1$   $M=1,94$  - кривые  $2, 2^1$ )

Установлено, что количество ПВС в виде глицеринового раствора не должно превышать 80 % мас.

**Выводы.** В будущем: Выявить зависимости микроструктуры и кислотно-основных свойств поверхностного слоя стали и ее сплавов от содержания в ней различных металлов (особенно Al, Si, Mn) существующими методами и составить представление о наличии на нем определенного типа активных функциональных групп; влияние химсостава стали, макро- и микроструктуры, степени шероховатости и пористости поверхностного слоя, его кислотно-основных свойств на физико-химические и физико-механические свойства ЛКП; определить критерии и выявить химические характеристики для создания новых сталей с учетом современных требований антикоррозионной защиты; определить величины адсорбционного взаимодействия и адгезии для определенного типа пленкообразователя на образцах Fe-C стали с неодинаковой тщательностью обработки поверхности перед покраской; с различной структурной неоднородностью поверхностного слоя (наличие шероховатости, пористости); имеющих различное количество металлов в своем составе (Al, Si, Mn); с поверхностью, не обработанной перед окраской;

По итогам исследований необходимо проанализировать и пересмотреть систему защиты поверхности стали антикоррозионными ЛКМ и выработать научно-обоснованный подход к созданию новых материалов в области машиностроения.

**Список литературы:** 1. Лакокрасочные покрытия» по ред. Е.И. Владычиной. - Москва. Изд-во Химия, 1972. – 303 с. 2. Федякова Н.В. Повышение защитных свойств химстойких ЛКП в воде и электролитах. Автореферат дисс. ... к.т.н. - Москва, 1991. 3. Зуев А. А. Технология машиностроения. 2-е изд. – СПб, 2003. – 496с.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ

Петряева И.А., Ивченко Т.Г., Шарипов В.А., Грешникова В.В.

(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [irina\\_petryaeva@mail.ru](mailto:irina_petryaeva@mail.ru)

**Abstract:** *The analysis of conformities to law of forming of thermal streams and cutting temperatures in the area of treatment at face milling by cutting tools with wear proof coverage is executed. The improvement calculation method of cutting temperature at face milling taking into account irregularity of process in the conditions of the unset heat exchange is developed. Character and degree of influence of cutting speed, feed and cutting depth on the cutting temperature at face milling is set.*

**Key words:** *milling, unset heat, thermal stream, cutting temperatures, wear proof coverage.*

Твердосплавные режущие инструменты с износостойкими покрытиями, в том числе и торцовые фрезы, широко распространенные в современном производстве, существенно повышают эффективность механообработки [1, 2]. В связи с этим, представленные исследования теплового состояния торцовых фрез актуальны.

Известные исследования работоспособности торцовых фрез с износостойкими покрытиями, включая и их тепловое состояние, выполнены преимущественно экспериментальным путем [1]. Существующая методика аналитического исследования тепловых потоков и температур резания при обработке инструментами с износостойкими покрытиями предназначена для условий непрерывного резания – точения [2].

В настоящее время известна методика расчета тепловых потоков и температур, позволяющая аналитически исследовать тепловые явления в зоне резания [3, 4]. Достоинством указанной методики является возможность расчета температур при фрезеровании с учетом прерывистого характера процесса резания по результатам их расчетов в тех же условиях непрерывного резания, что существенно упрощает исследования влияния параметров механической обработки на температуру резания при фрезеровании [5]. Однако разработанная методика не учитывает особенностей процесса фрезерования инструментами с износостойкими покрытиями. Представляет интерес ее дальнейшее развитие применительно к торцовым фрезам с покрытиями.

Цель работы – совершенствование методики расчета тепловых потоков и температур резания при фрезеровании торцовыми фрезами с различными износостойкими покрытиями.

При анализе теплового состояния торцовых фрез необходимо учитывать прерывистый характер процесса резания в условиях неустановившегося теплообмена. Известны зависимости, описывающие температурное поле, возникающее в лезвии режущего инструмента под воздействием прямоугольного источника теплоты ( $bxl$ ) при неустановившемся теплообмене и закономерности изменения температурного поля в безразмерном виде независимо от конкретных условий обработки [6].

Прерывистый процесс резания при торцевом фрезеровании характеризуется наличием рабочих ходов длительностью  $t_p$ , которые чередуются с холостыми ходами длительностью  $t_x$  и в сумме определяют длительность цикла  $t_0 = t_p + t_x$ . В период рабочего хода происходит нагрев инструмента, описываемый следующей зависимостью  $T_H(F_0) = T(F_0)$ , где  $T(F_0)$  безразмерная температура вершины лезвия в зависимости от безразмерного времени  $F_0$ . В период холостого хода в отсутствии нагрева происходит охлаждение режущих кромок за счет отвода тепла из зоны резания вглубь лезвия. Аналитическое описание циклического процесса изменения во времени

безразмерной температуры вершины лезвия инструмента при прерывистом резании представлено в исследовании [6].

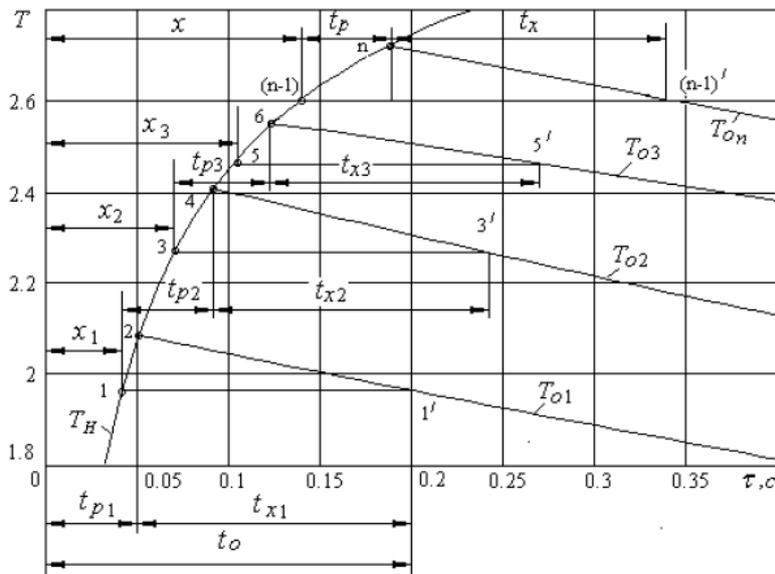


Рис. 1. Схема для расчета основных параметров процесса теплообмена при фрезеровании

Схема для расчета основных параметров неустановившегося процесса теплообмена при фрезеровании представлена на рис. 1. На протяжении первого рабочего хода  $t_{p1}$  наблюдается рост температуры до точки 2 на кривой нагрева  $T_H$ , а затем на протяжении холостого хода  $t_{x1}$  происходит охлаждение до точки 1' на кривой охлаждения  $T_{O1}$ . В следующем цикле нагрев в период рабочего хода

$t_{p2}$  происходит от точки 1 до точки 4 на кривой нагрева  $T_H$ , в период холостого хода  $t_{x2}$  происходит охлаждение до точки 3' на кривой охлаждения  $T_{O2}$ . Следующий цикл начинается в точке 3, нагрев на протяжении рабочего хода  $t_{p3}$  происходит до точки 6 на кривой нагрева  $T_H$ , охлаждение после холостого хода  $t_{x3}$  заканчивается в точке 5' на кривой охлаждения  $T_{O3}$ .

В последующих циклах нагрев и охлаждение многократно повторяются, в некоторый момент времени они уравниваются, процесс может считаться установившимся для такого значения  $x$ , которое обеспечивает одинаковое повышение температуры в течение рабочего хода и ее уменьшения при охлаждении в течение холостого хода. Значение  $x$  рассчитывается численным методом как корень уравнения:

$$T(x) = T(\tau_p + x) \exp[-0,04(\tau_x)].$$

Безразмерные максимальная  $T_{max}$ , минимальная  $T_{min}$ , а также средняя  $T_{cp}$  температуры цикла прерывистого процесса фрезерования в условиях установившегося резания могут быть определены:

$$T_{max} = T(x + \tau_p), T_{min} = T(x), T_{cp} = T(x + \tau_p/2).$$

Температура резания при фрезеровании  $T_{cp}$  в условиях установившегося теплообмена ниже, чем температура  $T$  при непрерывном резании за счет охлаждения в периоды холостого хода. Коэффициент снижения температур резания  $K_T$  при прерывистом резании (фрезеровании) в сравнении с непрерывным резанием (рис. 2):

$$K_T = (x + \tau_p/2)/T(500).$$

Установленный коэффициент позволяет выполнять расчеты температур резания при фрезеровании по методике расчета температур для непрерывного резания, с последующей корректировкой полученного результата с помощью коэффициента  $K_T$ .

$$\Theta = \frac{K_T [q_1 l (M_1 l + N_1 h) + q_2 h (M_2 h + N_1 l)]}{(l + h) \lambda},$$

где  $q_1$  и  $q_2$  - плотности тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия инструмента;  $h$  - износ по задней поверхности;  $M_1, M_2, N_1, N_2$  - безразмерные функции,

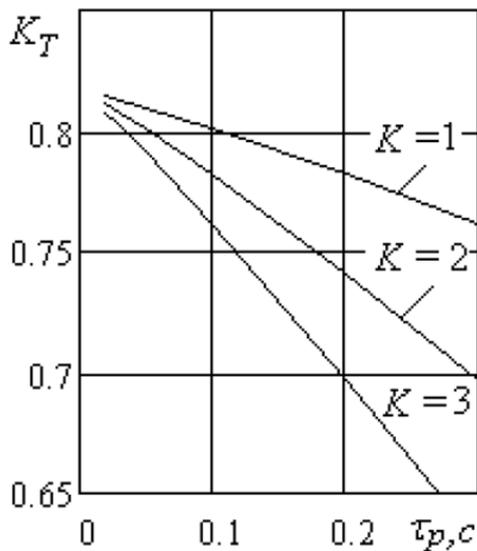


Рис. 3. Графики зависимости коэффициентов снижения температур резания при фрезеровании от длительности рабочего хода  $\tau_p$

Таким образом, усовершенствована методика расчета тепловых потоков и температур резания при фрезеровании торцовыми фрезами с износостойкими покрытиями.

**Список литературы:** 1. Табаков, В. П. Работоспособность торцовых фрез с многослойными износостойкими покрытиями / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин. - Ульяновск : УлГТУ, 2005. - 152 с. 2. Ивченко, Т. Г. Исследование тепловых потоков и температур резания при обработке инструментами с износостойкими покрытиями / Т. Г. Ивченко, И. А. Петряева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ. - 2015. - №1 (51). – С. 84-89. 3. Ивченко, Т. Г. Исследование тепловых потоков и температур в зоне резания при неустановившемся теплообмене / Т. Г. Ивченко, И. А. Петряева, Е. В. Полякова // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ : ДДМА, 2011. - № 28. - С. 280-283. 4. Ивченко, Т. Г. Дослідження впливу параметрів механічної обробки на температуру різання під час фрезерування / Т. Г. Ивченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. - Донецк : ДонНТУ. - 2012. - № 9(205). – С. 23-29. 5. Ивченко, Т. Г. Удосконалення методики аналітичного розрахунку температури різання під час торцевого фрезерування / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ. - 2015. № 3(49). – С. 78-84. 6. Ивченко Т.Г., Петряева И.А. Анализ теплового состояния твердосплавных торцовых фрез с износостойкими покрытиями / 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. 161-168.

определяющие нагрев площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента.

Установленные закономерности изменения температуры непрерывного резания [5] для инструментов с износостойкими покрытиями могут быть применены к исследованию температур при фрезеровании. При наличии износостойкого покрытия температуры уменьшаются. Коэффициенты снижения температуры в зоне непрерывного резания  $K_{TC}$  составляют для инструментов с покрытиями из карбида титана  $TiC - K_{TC} = 0,95$ ; с покрытиями из нитрида титана  $TiN - K_{TC} = 0,85$ . Тогда температура резания при фрезеровании инструментами с покрытиями определится с учетом этих коэффициентов:

$$\Theta_c = \frac{K_T K_{TC} [q_1 l (M_1 l + N_1 h) + q_2 h (M_2 h + N_1 l)]}{(l + h) \lambda}$$

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОЛЬЗЯЩЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Плохов И.В., Козырева О.И., Савраев И.Е. (Псковский государственный  
университет, г. Псков, Россия)  
Тел.: +7(8112) 201699; E-mail: igor\_plohov@list.ru

**Abstract:** *The article presents the conclusion of a mathematical analytical model for the numerical determination of the current transfer area and electrical parameters of the sliding contact of the sliding current collector unit of the turbogenerator taking into account the microgeometry of contact surfaces under static and dynamic load.*

**Key words:** *sliding contact, current transfer area, surface roughness, contact rings, unstable contact.*

### 1. Введение.

Значительное количество выпускаемых и находящихся в эксплуатации крупных электрических машин оснащено щеточно-контактными аппаратами (ЩКА) с узлами скользящего токосъёма (УСТ). Более 25% от общего числа отказов крупных электрических машин (турбо-, гидрогенераторы) происходит по причине неисправности УСТ [1].

Требования к повышению надежности работы скользящих контактов (СК) вынуждают искать новые подходы к изучению механических и электромагнитных причин, влияющих на качество токопередачи. Ухудшение токопередачи в результате плохого контактирования СК приводит к повышенному искрообразованию на токоведущих щетках, вызывает электроэрозионный износ, и может являться причиной кругового огня в ЩКА. Необходимость в изучении физики токопередачи через СК с учетом влияния параметрических воздействий на электромагнитные процессы в цепи контактной пары (КП), с учетом микрогеометрии контактных поверхностей, нагрева контакта и т.д. обусловлена недостаточной проработанностью этого вопроса. Поиск и проверку эффективности новых технических решений в данной области, возможно, осуществлять, используя аналитическое или имитационное моделирование [2], [3].

В статье приведен вывод математической аналитической модели для численного определения площади токопередачи и электрических параметров СК с учетом микрогеометрии контактных поверхностей при статической и динамической нагрузке [4], [5].

### 2. Переходный слой и площадь токопередачи СК

Переходный слой (ПС) – абстрактный объект, позволяющий проводить математическое моделирование ЭМ процессов в цепи КП. Так как ПС образован различными видами токопроводящих контактных элементов (непосредственное соприкосновение материалов КП, контакт через окисную пленку, через продукты износа, через низкотемпературную плазму), то он имеет свойства входящих в его состав элементов [4], [6].

В ПС КП выделим три площадки контактирования:  $A_a$  – номинальная (геометрическая) площадь контактирования, является площадью зеркала щетки;  $A_c$  – контурная или воспринимающая усилие нажатия, образована смятием отдельных волн и шероховатостей;  $A_r$  – фактическая площадь контактирования (ФПК).

ФПК касания двух материалов имеет сложную зависимость от геометрии отдельных неровностей, физико-механических свойств материалов, нагрузки, температуры. При наличии скольжения между деталями значительное влияние на нее оказывают трение скольжения, изменения температуры за счет трения, изменения

напряженного состояния, усталостные и др. явления. ФПК определяется, как сумма

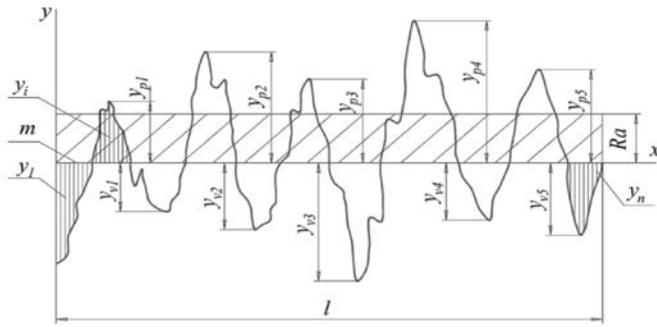


Рис. 1. Профилограмма и параметры для нормирования и обозначения шероховатости поверхности по ГОСТ 2789

элементарных фактических площадок касания  $A_r = \sum A_{ri}$ .

Площадь токопередачи через СК примем равной ФПК  $A_r$ , средняя величина которой незначительно изменяется в интервале температур до температуры рекристаллизации одного из материалов КП при разности потенциалов, превышающей напряжение фриттинга оксидных пленок.

### 3. Шероховатость

#### контактных поверхностей

Рассмотрим шероховатость щетки и контактного кольца. Шероховатость поверхности – совокупность неровностей поверхности с относительно малым шагом при отношении шага  $S$  к максимальной высоте с микронеровностями  $S/R_{max} < 40$  [7].

Справочные обозначения шероховатости материалов:

$R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам,  $R_z = \frac{1}{5} (\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|)$ , где  $y_{pi}$  – высота  $i$ -ого наибольшего выступа профиля, отклонение от средней линии  $m$ ;  $y_{vi}$  – глубина  $i$ -ой наибольшей впадины профиля, отклонение от средней линии  $m$ .

$R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой длины,  $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$ , где  $l$  – базовая длина;  $n$  – число выбранных точек профиля по базовой длине;  $y$  – отклонение профиля от средней линии.

$R_{max}$  – наибольшая высота профиля в пределах базовой длины,  $R_{max} = y_{pi} + y_{vi}$ .

В случае, когда радиусы закругления вершин неровностей в продольном  $r_{прод}$  и поперечном  $r_{попер}$  направлениях для поверхностей СК различаются, неровность будем считать сферической с приведенным радиусом, равным  $r = \sqrt{r_{прод} \cdot r_{попер}}$ .

#### 4. Математическая модель СК при статической и динамической нагрузке

Математическую модель для определения площади контактирования двух шероховатых поверхностей СК – графита и стали – зададим при условии, что контакт осуществляется, как упругий между шероховатой и гладкой поверхностью. Контакт при скольжении рассматривается только для приработанных поверхностей, без учета этапа приработки.

Процесс контактирования при статической нагрузке протекает следующим образом. Поверхность воспринимает нагрузку вершинами выступов микронеровностей с формированием контактирующих площадок. Первыми в контакт вступают выступы, противостоящие друг другу, имеющие наибольшие высоты  $R_{max}$ . При увеличении нагрузки в контакт вступают выступы, имеющие меньшие высоты.

Приведем расчетные формулы для определения зависимости ФПК касания  $A_r$  от механических свойств материалов, геометрических характеристик поверхностей и усилия нажатия при статической нагрузке [7], [8], [9]. Контурная площадь контакта:

$$A_c = A_a \cdot k_w \cdot k_v \cdot \left[ \left( \frac{2R_w}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \theta \cdot p_a \right]^{\frac{v_w}{v_w + \delta}} \quad 1)$$

и контурное давление

$$p_c = \frac{1}{v_w \cdot k_v} \left( \frac{W}{2R_w \theta^2} \right)^{\frac{v_w}{2(v_w + \delta)}} \cdot p_a^{\frac{\delta}{v_w + \delta}}, \quad 2)$$

где  $W$ ,  $R_w$  – параметры волнистости поверхностного слоя более твердого материала пары.  $W = R_{max}$  – высота волнистости;  $R_{max} = 1,5 \cdot R_z$  – максимальная высота шероховатости;  $R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам;  $R_w = \frac{S_w^2}{8W}$  – приведенный радиус волнистости;  $S_w$  – средний шаг местных выступов профиля в продольном направлении;  $v_w, k_w$  – коэффициенты, зависящие от распределения волн по высоте;  $k_v, \delta$  – коэффициенты, учитывающие влияние шероховатости на деформацию волн.

Значения коэффициентов определяются в зависимости от шероховатости и условий контактирования. При сопряжении двух тел из различных материалов ФПК определяется физико-механическими свойствами более мягкого материала и микрогеометрией поверхности более твердого тела. Коэффициенты микрогеометрии берем для более твердого материала КП – для стали.

Упругая постоянная материалов контактного слоя определяется как  $\theta = \sum \theta_i$ , где  $\theta_i = \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}$  – упругие постоянные для каждого материала из КП, при модулях упругости материалов  $E_i$  и коэффициентах Пуассона  $\mu_i$ . Номинальное контактное давление, возникающее в зоне контакта, при номинальном усилии  $N$ :

$$p_a = \frac{N}{A_a}. \quad 3)$$

Определив контурную площадь и давление, можем рассчитать среднюю фактическую площадь одного пятна касания для статического контакта.

$$\Delta A_r = 0,5 k_r r R_a \left( \frac{p_c}{p_r} \right)^{1/2}, \quad 4)$$

и количество пятен касания на номинальной площади  $A_a$

$$n_r = \frac{2A_c}{k_r r R_a} \left( \frac{p_c}{p_r} \right)^{1/2}, \quad 5)$$

где  $p_r$  – фактическое давление,  $k_r$  – коэффициент деформации,  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля;  $r = \sqrt{r_{\text{прод}} r_{\text{попер}}}$  – приведенный радиус неровностей шероховатости, где  $r_{\text{прод}}$  и  $r_{\text{попер}}$  – радиусы кривизны вершин неровностей шероховатости в продольном и поперечном направлениях.

Фактическое давление в зоне контакта при упругой деформации шероховатой и гладкой поверхности определяется по формуле Герца.

$$p_r = 0,8 \cdot \left( \frac{R_a}{r \cdot \theta^2} \right)^{0,4} \cdot p_c^{0,2}. \quad 6)$$

Таким образом, ФПК и площадь, не участвующую в токопередаче определим, как

$$A_r = \Delta A_r \cdot n_r, \quad 7)$$

$$A' = A_a - A_r. \quad 8)$$

В зависимости от материала, класса шероховатости, условий эксплуатации, стадии приработки и т.д. ФПК составляет 0,01 ÷ 0,5% от номинальной площади:

$$A_{\%} = \frac{A_r \cdot 100\%}{A_a} \in [0,01 \div 0,5]\%, \quad 9)$$

где  $A_{\%}$  – процентная доля ФПК.

Приведенные формулы получены для неподвижного контакта. Они могут быть

справедливы для СК, если напряжение при переходе от покоя к скольжению изменяется незначительно. В этом случае имеет значение изменение площади касания только при сдвиге на расстояние, равное диаметру пятна касания, так как после этого единичный контакт разрушается и процесс повторяется. ФПК при сдвиге приблизительно на диаметр пятна касания не превышает площадь контакта в неподвижном состоянии более чем на 7% [8].

Учитывая, что при скольжении, на единичных пятнах ФПК могут возникать температурные вспышки, достигающие температур плавления контактирующих тел, а также тот факт, что упругая деформация, при скольжении, переходит в пластическую, считаем, что диаметр отдельных пятен ФПК увеличивается [8]. Примем, что увеличение ФПК за счет скольжения, нагрева, изменения напряженного состояния, отеснения неровностей, усталостных и др. явлений составляет 10% от площади неподвижного контактирования, т.е.  $A_{rS} = A_r + 0,1 \cdot \Delta A_r \cdot n_r$ .

Экспериментально подтверждено, что в результате кинематических возмущений, обусловленных изменением давления на щетку, изменение количества контактирующих пятен происходит значительно интенсивнее, чем изменение площади одного пятна [8]. В расчетных формулах скольжения щетки будем учитывать, что изменение ФПК деталей происходит за счет изменения количества контактных площадок  $n_r$  в ПС, при сохранении их размеров  $\Delta A_r$  неизменными.

Для расчетов площади токопередачи при изменении нагрузки на щетку введем коэффициент корректировки давления  $k_{red}$ . Тогда, при номинальном контактном давлении

$$p_{a\_red} = p_a / k_{red} \quad (10)$$

параметры контактирования изменятся следующим образом:

- высота контактного слоя  $R_z$ , а также параметр шероховатости  $R_a$  увеличатся в  $k_{red}$  раз:  $R_{z\_red} = R_z \cdot k_{red}$ ,  $R_{a\_red} = R_a \cdot k_{red}$ ;
- высота волнистости, приведенный радиус волнистости и максимальная высота шероховатости будут определены, как  $W_{red} = R_{max} \cdot k_{red} = W \cdot k_{red}$ ,  $R_{w\_red} = \frac{S_w^2}{8W_{red}} = \frac{S_w^2}{8W \cdot k_{red}} = R_w / k_{red}$  и  $R_{max\_red} = 1,5 \cdot R_z \cdot k_{red} = R_{max} \cdot k_{red}$ .

Формулы математической модели СК (1)-(8), (10) при статическом контакте и формулы при динамическом контакте, полученные из формул (1)-(8) с учетом снижения контактного давления в  $k_{red}$  раз (10) и соответствующих параметров шероховатости, сведены в таблицу 1.

## 5. Математическое описание электрического сопротивления и емкости переходного слоя СК

Электрическое сопротивление ФПК двух проводящих поверхностей – сопротивление ПС контакт-деталей – определяется, как электрическое сопротивление стягивания пятна токопередачи по формуле Хольма [10].

$$R = \frac{\rho}{2r},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала контактов;  $r$  – совокупный характеристический радиус пятна токопередачи.

Приняв допущение, что совокупная площадь токопередачи  $A_r$  в плоскости ПС является единым круглым пятном с радиусом  $r$  [10], совокупный радиус токопередачи определим, как  $r = \sqrt{\frac{A_r}{\pi}}$ . Электрическое активное сопротивление ПС щетка-кольцо  $R_{\Pi}$  складывается из сопротивлений стягивания для отдельных полупространств (щетка, кольцо)

$$R_{\text{пщ}} = \frac{\rho_{\text{щ}}}{2 \cdot \sqrt{\frac{A_r}{\pi}}}, \quad R_{\text{пк}} = \frac{\rho_{\text{к}}}{2 \cdot \sqrt{\frac{A_r}{\pi}}},$$

где  $\rho_{\text{к}}, \rho_{\text{щ}}$  – удельные сопротивления материалов области ПС

$$R_{\text{п}} = R_{\text{пк}} + R_{\text{пщ}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{A_r}} \cdot (\rho_{\text{к}} + \rho_{\text{щ}}). \quad (10)$$

Переходная емкость создается близлежащими контактными поверхностями, не участвующими в процессе токопередачи [11],

$$C_{\text{п}} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A'}{R_z}, \quad (11)$$

где  $A' = A_a - A_r$  площадь обкладки образующегося конденсатора в ПС СК (8);  $R_z$  – высота ПС, высота неровностей профиля по десяти точкам для более твердого материала контактной пары  $R_z = R_{zk}$ ;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $\varepsilon \approx 50$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды в контактном переходе.

Таблица 1. Математическая аналитическая модель для расчета площади токопередачи в скользящем контакте

Наименование	Расчетные формулы	
	При статическом контакте	При скольжении с учетом снижения контактного давления в $k_{red}$
Номинальное контактное давление	$p_a = \frac{N}{A_a}$	$p_{a\_red} = p_a / k_{red}$
Контурная площадь	$A_c = A_a \cdot k_w \cdot k_v \cdot \left[ \left( \frac{2R_w}{W} \right)^{1/2} \cdot \theta \cdot p_a \right]^{\frac{v_w}{v_w + \delta}}$	$A_{c\_red} = A_c \cdot k_{Ac\_red}$ , где $k_{Ac\_red} = k_{red}^{\frac{v_w - \delta}{v_w + \delta}}$
Контурное давление	$p_c = \frac{1}{v_w \cdot k_v} \left( \frac{W}{2R_w \theta^2} \right)^{\frac{v_w}{2(v_w + \delta)}} \cdot p_a^{\frac{\delta}{v_w + \delta}}$	$p_{c\_red} = p_c \cdot k_{p\_red}$ , где $k_{p\_red} = k_{red}^{\frac{v_w}{2(v_w + \delta)}}$
Средняя фактическая площадь одного пятна касания	$\Delta A_r = 0,5 k_r r R_a \left( \frac{p_c}{p_r} \right)^{1/2}$	$\Delta A_{r\_red} = \Delta A_r \cdot k_{\Delta\_red}$ , где $k_{\Delta\_red} = k_{red}^{0,4 \frac{v_w - \delta}{v_w + \delta} - 0,2}$
Количество пятен касания на номинальной площади	$n_r = \frac{2A_c}{k_r r R_a} \left( \frac{p_c}{p_r} \right)^{1/2}$	$n_{r\_red} = n_r \cdot k_{n\_red}$ , где $k_{n\_red} = k_{red}^{\frac{0,4(v_w - \delta) - 2v_w}{v_w + \delta} - 0,2}$
Фактическое давление в зоне контакта	$p_r = 0,8 \cdot \left( \frac{R_a}{r \cdot \theta^2} \right)^{0,4} \cdot p_c^{0,2}$	$p_{r\_red} = p_r \cdot k_{red}^{0,2 \frac{v_w - \delta}{v_w + \delta} + 0,4}$
Площадь токопередачи (ФПК)	$A_r = \Delta A_r \cdot n_r$	$A_{r\_red} = A_{rs} \cdot k_{Ar\_red}$ , где $k_{Ar\_red} = k_{red}^{\frac{0,8(v_w - \delta) - 2v_w}{v_w + \delta} - 0,4}$ , $A_{rs} = A_r + 0,1 \cdot \Delta A_r \cdot n_r$
Площадь, не участвующая в токопередаче	$A' = A_a - A_r$	$A'_{red} = A_a - A_{r\_red}$

## 6. Численный расчет площади токопередачи, электрического сопротивления и емкости ПС СК.

Используя формулы полученной математической модели (таблица 1), определим с некоторым приближением характеристики ПС заданного СК (таблица 2).

Таблица 2. Задание СК

Тип контактной пары	
Щетка 20×32×64	Графит ЭГ-2АФ
Контактные кольца	Сталь

Так как при сопряжении двух тел из различных материалов ФПК определяется микрогеометрией поверхности более твердого тела, определяем параметры шероховатости и проводим расчет микрогеометрии поверхностного слоя материала при нормальном давлении для стали. Также, определяем значения физико-механических параметров контактной пары, проводим расчет для статического контакта.

Для расчета параметров для процесса скольжения при нарушении контактирования, зададим коэффициент корректировки давления  $k_{red} = 10$  и проводим расчет для контактной пары при уменьшенном давлении. При расчете скольжения, в случае максимального нарушения контактирования введем следующее допущение. Расстояние между контакт-детальями, будет увеличено таким образом, что количество единичных контактных пятен в ПС  $n_r = 1$ . Тогда, площадь токопередачи будет определена площадью единичного пятна. По формулам (10), (11) проводим расчет сопротивления и емкости ПС СК для устойчивого и максимально неустойчивого контактирования. Полученные значения сведем в таблицу 3.

Таблица 3. Значения емкости ПС, сопротивления ПС, ФПК и доли ФПК от номинальной площади СК при устойчивом и неустойчивом контактировании

Устойчивое контактирование в СК				Максимально неустойчивое контактирование в СК			
$A_{rs}, \text{ м}^2$	$A_{\%max}$	$R_{п}, \text{ Ом}$	$C_{п}, \text{ Ф}$	$A_{r\_min}$	$A_{\%min}$	$R_{п\_min}, \text{ Ом}$	$C_{п\_min}, \text{ Ф}$
$1,52 \cdot 10^{-6}$	0,297	$9,454 \cdot 10^{-3}$	$4,708 \cdot 10^{-8}$	$58,27 \cdot 10^{-9}$	0,011	1,655	$4,722 \cdot 10^{-10}$

Необходимое условие попадания найденных значений  $A_{\%max}$  и  $A_{\%min}$  в заданный диапазон  $0,01 \div 0,5\%$  (9) выполняется.

При необходимости, зная предельные значения переходной емкости, сопротивления и ФПК, возможно определить посредством линейной интерполяции промежуточные значения переходного сопротивления и переходной емкости.

## 7. Заключение

Выведена математическая модель для определения площади токопередачи контактной пары «щетка-контактные стальные кольца» при взаимном скольжении, учитывая особенности работы ЩКА с нарушениями контактирования (на примере щёток ЭГ-2АФ). Математическая модель представляем собой совокупность расчетных формул для определения зависимостей площади токопередачи контактной

пары от механических свойств материалов, физико-механических параметров контактирования, геометрических характеристик, учитывающих микрогеометрию контактирующих поверхностей, с учетом усилия нажатия и кинематических возмущений, основанных на формулах Г. Герца, Р. Хольма, теоретических выкладках А.Н. Литвинова, И.В. Крагельского. Особенность модели состоит в том, что она позволяет определять зависимость емкости и электрического сопротивления ПС от динамически меняющегося значения площади токопередачи для определенной контактной пары.

**Список литературы:** 1. Лабунец, И.А., Федоров И.В. О контроле и диагностике ЩКА турбогенераторов // Электрические станции. – 2009. – № 1. – С. 50-55. 2. Плохов, И.В. Диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъема турбогенератора. Диссертация д.т.н. С.-Петербург. СПбГТУ. Депонировано ВИНТИ. 2002. – 361 с. 3. Плохов, И.В., Савраев, И.Е., Андрусич, А.В. Основы теории электромагнитных процессов в узлах токосъема турбогенераторов. Труды Псковского политехнического института. Псков. ППИ СПбГПУ. №6. Электротехника. Машиностроение. 2002. – С. 245–249. 4. Kozyreva, O., Plokhov, I., Savraev, I. etc. The model of the constriction resistance of a sliding electrical contact // Environment. T Resources. Rezekne, Latvia. Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference. Volume III, pp. 201–207. 5. Oksana Kozyreva, Igor Plokhov, Nikita Kotkov etc. Reducing Sparking in the Transient Layer of the Sliding Electrical Contact Unit. 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, 2018, pp. 223–227. 6. Ilyin A., Plokhov I., Savraev I., Kozyreva O., Kotkov N. Forming and overlapping microreliefs in sliding contact simulation model // Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. Volume 3. Rezekne, 2017.//– pp. 102-106. 7. Forming and overlapping microreliefs in sliding contact simulation model Ilyin A., Plokhov I., Savraev I., Kozyreva O., Kotkov N. В сборнике: Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources. 11. Сеп. "Environment. Technology. Resources - Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference" 2017. pp.102 – 106. 8. Литвинов, А. Н. Прикладные вопросы механики контактирования деформируемых тел: учебное пособие./ А.Н. Литвинов; М-во образования и науки РФ, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования "Пенз. гос. ун-т" (ПГУ). - Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. - 163 с. 9. Крагельский, И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1978. – 480 с. 10. Кончиц, В.В., Мешков, В.В., Мышкин, В.В. Триботехника электрических контактов. – Минск: Наука и техника, 1986. – 255 с. 11. Хольм, Р. Электрические контакты. – М.: Иностранная литература, 1961. – 464 с. 12. Вибрации в технике, т.1: Справочник: В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред., гл. ред.) [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1978-1981. – 352 с.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ, И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Бурьков Д.В. (ЮФУ, г. Таганрог, Россия)  
Тел: 89508609983, E-mail: nik1-58@mail.ru

**Abstract.** The processes of insulation aging in an electrostatic field with high intensity are considered, it is shown that the nonlinear growth of the CR and with their periodic repetition, microcracks appear and the process of insulation destruction begins. And when the maximum permissible value of electrical strength is reached, a breakdown occurs. During the breakdown, the bonds of the carbon atom with neighboring carbon atoms are destroyed and free hydrogen atoms are formed, which can cause the destruction of the molecular structure of polyethylene.

**Keywords:** Synthesis and research, modeling, applications of advanced engineering materials.

**Введение и постановка задачи.** В процессе эксплуатации изоляция кабельной линии (КЛ) подвергаются тепловым, электрическим, химическим, механическим, атмосферным и другим видам воздействий, в результате чего происходит изменение её электрических свойств и, как следствие, изменения претерпевают и технические характеристики изоляционных материалов [1, 2]. Причины старения в полиэтиленовой изоляции неизбежны, как технологические, так и эксплуатационные. К таким дефектам относятся микроразмерные воздушные полости, посторонние включения, трещины и др. Они появляются в изоляции в процессе ее изготовления или прокладки и функционирования кабелей вследствие, например, периодических сжатий и расширений материала в режимах нагрузки. Эти микропустоты заполнены газом из-за возникновения водяного пара и наличия летучих продуктов в производственных процессах сшивки и экструзии изоляции.

В течение последних лет ведется замена кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией на термостойкие экструдированные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Термин «сшивка» или «вулканизация» подразумевает обработку полиэтилена на молекулярном уровне, рис.1.

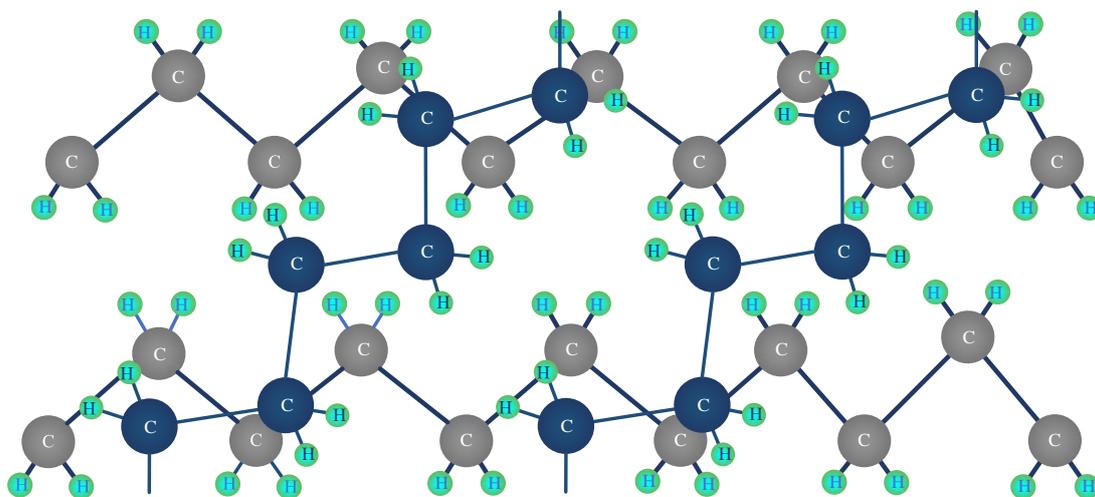


Рис 1. Структурная модель СПЭ изоляции в виде среза молекул

Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между макромолекулами полиэтилена, создают трехмерную структуру, которая и определяет высокие

электрические и механические характеристики материала, меньшую гигроскопичность, больший диапазон рабочих температур. Процесс «сшивки» дает дополнительные боковые связи, создающие межмолекулярную сетку – особенно прочную структуру, напоминающую кристаллическую решетку твердых веществ. При различных технологиях сшивания получается вещество с большим или меньшим количеством этих связей, а значит и более или менее прочное.

**Физика процесса старения изоляции материала.** Частичные разряды представляют собой электрический разряд малой мощности, который шунтирует часть изоляции [6]. ЧР возникают в изоляции в местах нахождения внутренних дефектов (пузырьков газов, различных микрочастиц твердых примесей – включений. В этих местах возникает неоднородность электрического поля, напряженность которого внутри дефекта может быть намного выше, чем в изоляционном материале. Электрическая прочность примесей существенно меньше электрической прочности изоляции, поэтому в месте дефекта возникает локальный электрический пробой.

Источниками ЧР высокой интенсивности являются дендриты – древовидные каналы неполного пробоя, развивающиеся из неоднородностей, образующихся в изоляции при изготовлении и в процессе эксплуатации как следствие деструкции и/или деполимеризации материала по причинам естественного старения изоляции. Для заполненных газами дефектов существенным является тот факт, что для возникновения ЧР в газовых включениях требуется меньшая напряженность электрического поля, так как диэлектрическая проницаемость газов меньше, чем проницаемость твердых примесей.

При работе кабеля в номинальном режиме происходит постепенное ухудшение изоляционных свойств. Этот процесс вызван вследствие нелинейного изменения динамических характеристик, таких как воздействие внешнего магнитного и электрического поля, перепад температур, воздействие факторов окружающей среды, влажность.

На уровне химических реакций, процесс влияния внешних воздействий на скорость распада молекулы можно описать с помощью закона Аррениуса:

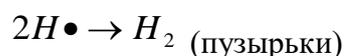
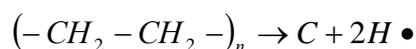
$$K_i = K \cdot e^{\frac{-W_a}{kT}} \quad (1)$$

где  $KT$  – средняя вероятность распада одной молекулы в единицу времени, переменная отвечает за скорость химических реакций;  $K$  – коэффициент, зависящий от материала веществ, участвующих в реакции;  $W_a$  – энергия активации;  $k$  – постоянная Больцмана.

#### **Старения изоляции в электростатическом поле с высокой напряженностью.**

При воздействии на участок изоляции электрического поля (ЭП), на этом участке возникают ЧР [5, 7, 8]. Происходит нелинейный рост ЧР и при их периодическом повторении они начинают процесс разрушения изоляции, т.к. в ней появляются микротрещины. При достижении максимально допустимого значения электрической прочности происходит пробой.

При пробое разрушаются связи атома углерода с соседними атомами углерода и образуются свободные атомы водорода, которые могут стать причиной возникновения пузырьков.



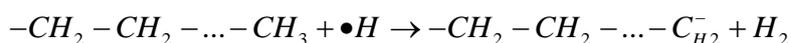
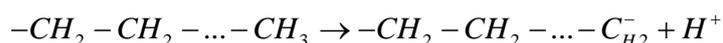
Образующийся несвязанный водород выбивается в качестве положительно заряженного иона  $H^+$ , который, в свою очередь, способствует ионизации и дальнейшему разрушению молекулярной структуры полиэтилена в целом и

впоследствии, захватывая свободный электрон, становится нейтральным, а углерод становится проводящей микрочастицей. При этом соседние атомы углерода образуют связи между собой.

Возможен вариант превращения ионизированных радикалов ( $H \bullet$  и  $H^+$ ), тогда свободный водород образует связи с соседними атомами углерода в неразрушенных молекулах и образует концевые группы. При разрушении такой связи под воздействием электрического поля образуется свободный водород и концевая группа с соседним атомом углерода.



или



Упрощенная модель изоляции из СПЭ как срез молекул  $CH_2$ , в которых может произойти пробой под воздействием электрического поля, приведена на рис.1. Рассматривается частный случай старения изоляции в электрическом поле (ЭП) высокой напряженности. Под действием ЭП старение происходит за счет развития в изоляции ЧР. Периодически повторяющиеся ЧР разрушают изоляцию путем появления в ней микротрещин, что приводит в итоге к ее пробую.

Согласно [4] основная часть пробоев изоляции приходится в промежутке от 300 до 500 пробитых молекул. Таким образом, для пробоя изоляции достаточно пробить 4 % молекул. При каждом ЧР может пробиться большее количество молекул.

#### **Прогнозирования термофлуктуационных процессов.**

В работе исследуются одножильные кабели АПвПг 1x240/35-10 рис.2. – кабель с алюминиевой жилой (А), СПЭ-изоляцией (Пв), полиэтиленовой оболочкой (П), герметизацией экрана (г), одножильный (1), сечение жилы 240 мм, сечение экрана 35 мм, номинальное напряжение 10 кВ [5, 9]. Применение одножильных СПЭ-кабелей позволяет обеспечить прежде всего повышенную надежность электроснабжения за счет резкого снижения вероятности междуфазных коротких замыканий. Вероятность одновременного разрушения в одном месте изоляции двух конструктивно не связанных между собой одножильных кабелей (соединительных или концевых муфт) соответствует вероятности междуфазных повреждений ошиновки с изолированными шинами, т.е. очень мала. Вероятность однофазных замыканий на землю при применении одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена намного меньше, чем при использовании трехжильных БПИ-кабелей. Это достигается как самой конструкцией одножильных СПЭ-кабелей, так и лучшими диэлектрическими свойствами изоляции. Экранирование элементов кабеля необходимо для электромагнитной совместимости кабеля с различными внешними цепями и для обеспечения симметрии электрического поля вокруг жилы кабеля и, следовательно, для создания более благоприятных условий работы изоляции. Внутренние экраны выполняются из полупроводящей пластмассы, внешний экран – из медных проволок и лент. Основной задачей, которую решает экран из медных проволок, является выравнивание электрического поля, воздействующего на главную изоляцию кабеля (изоляцию жилы), т.е. для выполнения своих функция экран должен быть заземлен. Помимо металлического экрана в конструкции есть полупроводящие экраны: один наносится на внешнюю поверхность жилы, а другой – поверх слоя главной изоляции кабеля на внутреннюю поверхность металлического экрана. Полупроводящие экраны обеспечивают локальное выравнивание напряженности электрического поля на негладкой поверхности проволочной жилы и проволочного металлического экрана.

Объектом исследования является электроизоляционный материал силового кабеля, рис.2. Предметом исследования является прогнозирование срока службы изоляционных материалов и влияние на них температуры.

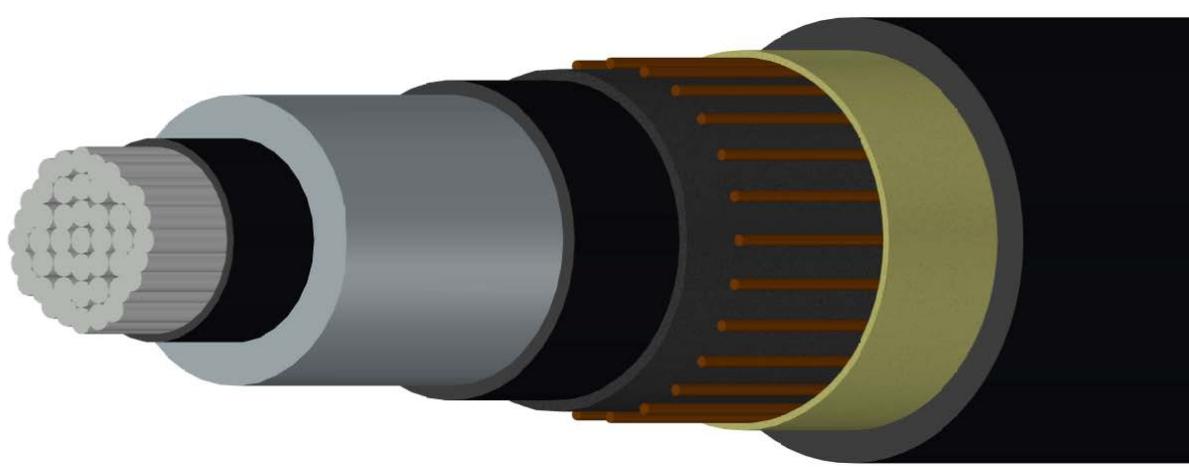


Рис. 2. Сечение исследуемого кабеля

Физические свойства материалов и геометрические размеры элементов кабеля АПвПу г-1х240/25-10 [4, 5], сведены в табл.1.

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 <sup>3</sup> )	2700	2200	8700	1.2
Удельная теплоемкость (Дж/(кг·К))	920	1900	385	1005

Низкая теплопроводность изоляции кабеля рис.1, приводит к высокому температурному градиенту, поэтому температура наиболее нагретого участка в сечении кабеля (вблизи жилы) значительно отличается от измеренной температуры, а в переходных режимах эта разница может увеличиваться в несколько раз. Зависимость времени до пробоя может быть объяснена на основе термофлуктуационной теории разрушения. Поэтому актуальна задача создания нейросетей для оценки пропускной способности, расчёта и прогнозирования температуры жил СКЛ в режиме реального времени на основе данных системы температурного мониторинга, с учетом изменения токовой нагрузки линии и внешних условий теплоотвода.

#### **Разработка нейрокомпьютерной системы.**

Рассматривается нейрокомпьютер как аппаратно-программная компьютерная система в основе функционирования которой лежит ИНС. В нейрокомпьютере арифметико-логическое устройство (АЛУ) реализовано на базе ИНС, с которой связан блок обучения (рис.3) и в нейронной сети производятся вычисления. На рис. 3 приведен принцип использования нейросетевой модели в режиме идентификации. В этой схеме с помощью алгоритма обратного распространения должна минимизироваться ошибка между выходом объекта  $y(t)$  и выходом модели  $\theta_j(t+1)$ . Полученная нейросетевая модель может быть эффективно использована для анализа термофлуктуационных процессов, протекающих в объекте управления (СКЛ) и прогноза поведения объекта.

Представление динамического объекта на базе ИНС в корне отличается от описания динамического объекта с помощью дифференциальных уравнений.

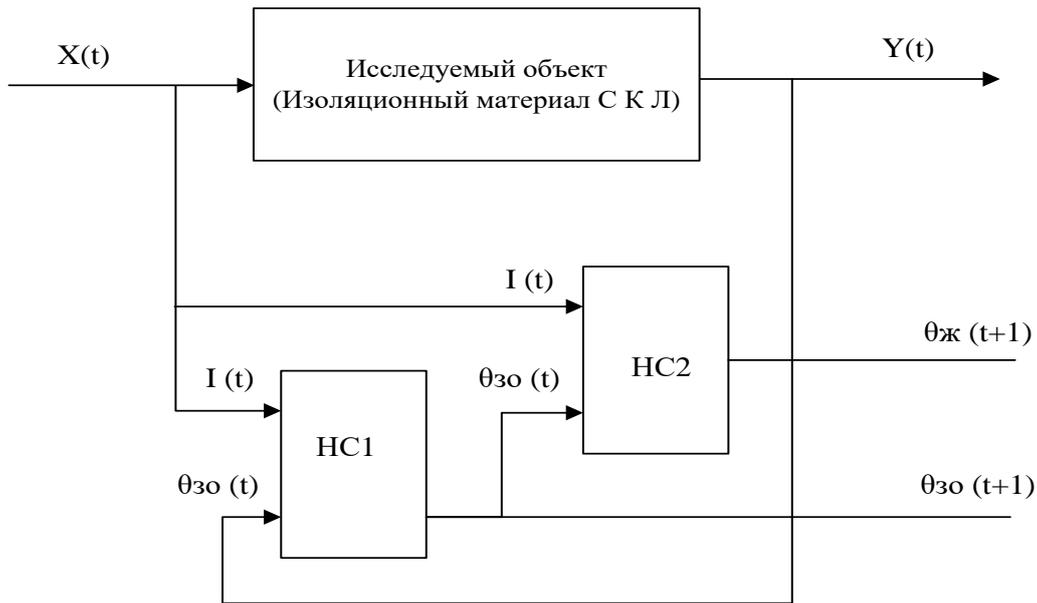


Рис. 3. Обобщенная структура нейрокомпьютера

Нейросетевой эмулятор вместо выхода объекта использует выход нейронной сети. Это позволяет делать прогноз динамики объекта на много шагов вперед, однако ошибка здесь накапливается с увеличением длительности прогноза.

**Разработка ИНС.** Построение нейронной сети решается в два этапа: выбор типа (архитектуры) нейронной сети и подбор весов (обучение) нейронной сети. Выходным параметром является температура токоведущей жилы ( $H_1$ ). Имеется база данных (задачник), содержащая примеры (величины тока жилы СКЛ ( $I_{ж}$ ), температуры внешней изоляции  $\theta_{з.о}$  и температуры окружающей среды  $\theta_{о.с}$ , рис.2). Предъявляя их на вход нейронной сети, получаем от нее некоторый ответ, не обязательно верный. После многократного предъявления примеров веса нейронной сети стабилизируются. Когда величина ошибки достигает нуля или приемлемого малого уровня, тренировку останавливают, а полученную нейронную сеть считают натренированной и готовой к применению с использованием новых данных. Использовалась система MatLab Simulink с расширением Neural Network toolbox.

Проведены исследования состаренных образцов кабеля, которые приравниваются к различным срокам службы. Сравнение экспериментальных и прогнозных данных по новым (обучающая выборка) и искусственно состаренным (контрольная выборка) образцам кабеля приведено в табл.2.

Таблица 2. Сравнение параметров

Параметр		№ образца кабеля		
		1 кабель	3 кабель	4 кабель
Разность температур $\Delta t$	Не состаренного	1.73	2.8	2.3
	Состаренный	1.2	1.46	1.6
Ошибка, %	Не состаренного	4.2%	5.2%	3.8%
	Состаренный	3.8%	2.3%	3.1%

Анализ результатов показал, что чем больше время состаривания, тем больше разность температур между исходным и состаренным образцом. С увеличением времени старения растет разница температур. Ошибка прогноза нейросети при этом уменьшается, то есть точность прогнозирования температуры жилы кабеля возрастает. Мы полагаем, что это объясняется потерей электроизоляционных свойств материала за счет накопления фрагментов разрушенной структуры, содержащей, все в большем количестве, включения чистого углерода и других токопроводящих включений. Реакция неполного окисления полиэтилена с образованием углерода:



**Заключение.** Рассмотрены процессы старения электроизоляционного материала в электростатическом поле с высокой напряженностью. Результаты расчета показали, что под действием электростатического поля старение электроизоляционного материала происходит за счет развития в ней ЧР.

**Список литературы:**

1. Разработка алгоритма релейной защиты распределительной сети на основе математической модели. Полуянович Н.К. Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 1 (90). С. 240-245.
2. Dubyago M.N. Mathematical description of interaction of the elements in the power network system. 2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013) Applied Mechanics and Materials Vols. 448-453 Trans Tech Publications, Switzerland. (2014) pp 2455-2460.
3. Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго. Прогнозирование ресурса изоляционных материалов кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей. Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 1 / под общ. ред. А. А. Большакова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. - 132 с. С.118-122.
4. Гринюк М.С. Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, Томск. – 2019 г.
5. М.Н. Дубяго. Разработка модели старения и определение остаточного ресурса изоляции силовых кабелей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). С. 107-114.
6. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Пшихопов В.Х. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. №7 (168) июль. 2015 г. С–230-237.
7. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Метод селекции сигнала ЧР с помощью Вейвлет-преобразования. Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 2 (139). С. 99-104.
8. Poluyanovich N.K. Dubyago M.N. Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system. 2013 4th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (ICAMME 2013), October 11-12, 2013, Singapore, Applied Mechanics and Materials Vols. 459 Trans Tech Publications, Switzerland (2014) pp 70-75.
9. Marina N. Dubyago, Nikolay K. Poluyanovich. Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges. Advances in Materials Science and Applications, Mar. 2015, Vol. 4 Iss. 1, PP. 23-32.
10. Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE 2015), September 26-27, 2015 in Changsha, China. Published by Atlantis Press, ISSN:2352-5401pp.49-54.
11. M.N. Dubyago & N.K. Poluyanovich. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 229 (2017).

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ КОНСОЛЬНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ СЛЕДЯЩЕЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ СИЛ

**Радин В.П., Щугорев А.В., Щугорев В.Н., Буланова М.А., Чирков В.П.**  
(НИУ МЭИ, г.Москва, Россия)

Тел./Факс: +7 (916) 6043425; E-mail: [Shchugorev.VN@gmail.com](mailto:Shchugorev.VN@gmail.com)

**Abstract:** *The work is devoted to the study the stability of a cantilever rod under time-varying tracing and potential forces. In contrast to traditional studies of parametric fluctuations, which focus on the construction of boundaries of parametric resonances on the amplitude-frequency plane of the parametric influence, this work focuses on the changes in the boundary of the stability region on the plane of the average values of parameters  $\alpha_0, \beta_0$  at some harmonic deviations from these average values. The character of motion in the vicinity of the stability region boundaries is also investigated.*

**Keywords:** *cantilever rod, stability, tracking force, potential force*

Рассмотрим стержень, жестко зашпечленнй на одном конце и нагруженный на свободном конце следящей силой  $P(t)$  и потенциальной силой  $Q(t)$ , величина которых с некоторой амплитудой изменяется во времени по гармоническому закону (рис. 1).

Запишем уравнение малых колебаний (уравнение динамического метода) для рассматриваемой системы в следующем виде:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + b_i EI \frac{\partial^5 w}{\partial x^4 \partial t} + m b_e \frac{\partial w}{\partial t} + [P(t) + Q(t)] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

здесь  $EI$  – жесткость стержня на изгиб,  $l$  – его длина,  $m$  – погонная масса стержня,  $b_i$  – коэффициент внутреннего трения, описываемое моделью Фойхта,  $b_e$  – коэффициент внешнего трения,  $P(t)$  – следящая сила,  $Q(t)$  – «мертвая» потенциальная сила, не меняющая своего направления при любых отклонения стержня от положения равновесия.

Уравнение (1) дополним граничными условиями, которые для рассматриваемой системы имеют вид:

$$\begin{aligned} w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad (x = 0), \\ I \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + Q(t) \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad (x = l). \end{aligned} \quad (2)$$

И с помощью параметров

$$\begin{aligned} \xi = \frac{x}{l}, \quad \tau = \omega_0 t, \quad \omega_0 = \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad \varepsilon_i = b_i \omega_0, \quad \varepsilon_e = \frac{b_e}{\omega_0}, \\ \alpha(t) = \frac{Q(t)l^2}{EI}, \quad \beta(t) = \frac{P(t)l^2}{EI} \end{aligned}$$

уравнение (1) и граничные условия (2) перепишем в безразмерном виде. Далее, для применения метода главных координат (метода разложения по формам собственных колебаний) уберем из полученных граничных условий параметр потенциальной силы  $\alpha(\tau)$  и с помощью  $\delta$  – функции введем ее проекцию в безразмерное дифференциальное уравнение.

Применим к уравнению возмущенного движения процедуру метода Бубнова-Галеркина. Для этого представим решение  $w(\xi, \tau)$  уравнения движения в виде ряда, а формы собственных колебаний выразим через функции Крылова. Затем поочередно умножим полученное уравнение на каждую собственную форму  $\phi_k(\chi_k \xi)$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) и проинтегрируем полученные выражения по  $\xi$  от 0 до 1. В результате придем к системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно обобщенных координат  $q_k(\tau)$ , записав все в матричном виде:

$$A\ddot{q} + (\varepsilon_e A + \varepsilon_i C)\dot{q} + \{C + [\alpha(\tau) + \beta(\tau)]D - \alpha(\tau)B\}q = 0. \quad (3)$$

Таким образом, приходим к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с коэффициентами, зависящими от времени. Для применения стандартных процедур вычислительного пакета Matlab приведем уравнение (3) к нормальной форме Коши, т.е.

$$\frac{dx}{d\tau} = G(\tau)x. \quad (4)$$

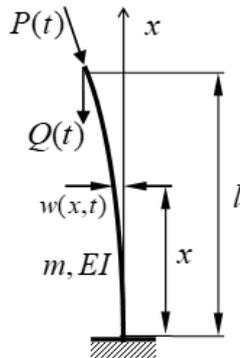


Рис. 1. Консольный стержень под действием следящей  $P(t)$  и потенциальной  $Q(t)$  изменяющихся во времени сил

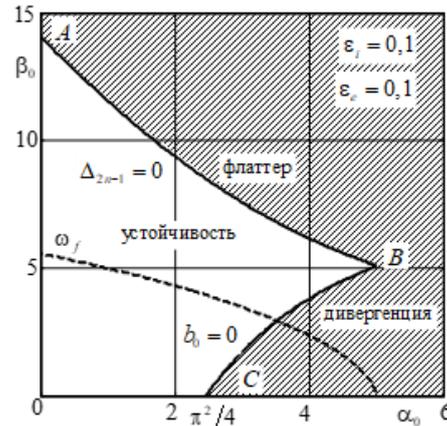


Рис. 2. Граница области устойчивости и частота флаттера  $\omega_f$  при постоянных во времени параметрах нагружения

Рассмотрим границу области устойчивости при постоянных параметрах нагрузки, т.е. пусть потенциальная и следящая силы будут постоянны по величине. Подразумевая в дальнейшем под  $\alpha$  и  $\beta$  их средние значения переобозначим их следующим образом  $\alpha_0$  и  $\beta_0$ . Представляя вектор обобщенных координат в виде  $q(\tau) = q_0 \exp(\lambda\tau)$  и, подставляя это выражение в уравнение (3), относительно характеристических показателей  $\lambda$  получаем алгебраическую проблему собственных значений в виде матричного полинома. На основе полинома формируем матрицу Гурвица  $H(\alpha_0, \beta_0)$ , и приравнивая ее главный минор порядка  $2n - 1$  к нулю, т.е.  $\Delta_{2n-1}(\alpha_0, \beta_0) = 0$  определяем границу области флаттера (потеря устойчивости колебательным образом) на плоскости параметров нагружения  $\alpha_0, \beta_0$ . На рис. 2 (сплошная линия) для случая коэффициентов демпфирования  $\varepsilon_i = 0,1$  и  $\varepsilon_e = 0,1$  построена граница области устойчивости  $ABC$  прямолинейной формы консольного стержня на плоскости  $\alpha_0, \beta_0$  при удержании восьми членов ряда в разложении решения возмущенного движения в ряд по формам собственных колебаний.

Пересечение границы  $AB$  соответствует динамической потере устойчивости тривиального положения равновесия по типу флаттер. При  $\alpha_0 = 0$  критическое значение параметра следящей нагрузки  $\beta_* \approx 14$ , в то время как в системе без демпфирования это значение составляет 20,05. Здесь реализуется парадокс Циглера вследствие наличия внутреннего трения в системе. Пересечение границы  $BC$  соответствует квазистатической потере устойчивости тривиального положения равновесия по типу дивергенция. При  $\beta_0 = 0$  критическое значение параметра мертвой силы равно  $\pi^2/4$ , которое вытекает и из формулы Эйлера. Штриховой линией на рис. 2 показана зависимость частоты флаттера  $\omega_f$  от параметра  $\alpha_0$ , как мнимая часть характеристического показателя, который первым переходит в правую полуплоскость комплексной плоскости  $\lambda$ .

Рассмотрим теперь различные варианты непостоянных величин параметров нагружения стержня. Пусть сначала следящая сила постоянная  $\beta_0$ , а потенциальная сила подчиняется закону  $\alpha(\tau) = \alpha_0(1 + \mu \cos \theta \tau)$ . Здесь  $\mu$  и  $\theta$  соответственно амплитуда и частота отклонений величины следящей силы от своего среднего значения  $\alpha_0$ . При некоторых фиксированных значениях  $\mu$  и  $\theta$  построим границы области устойчивости на плоскости  $\alpha, \beta$  методами теории Флоке. Решение уравнения (4)  $q \equiv 0$  будет устойчивым по Ляпунову, если все мультипликаторы  $\rho_k, k = 1, 2, \dots, 2n$  лежат внутри или на границе единичного круга  $|\rho| \leq 1$ . Если все мультипликаторы лежат внутри единичного круга  $|\rho| < 1$ , то имеет место асимптотическая устойчивость. Неустойчивость решения будет в случае, если среди мультипликаторов найдется хотя бы один, по модулю больший единицы  $|\rho| > 1$ . Таким образом, граница области устойчивости тривиального решения уравнения (4) на плоскости параметров определяется выходом хотя бы одного мультипликатора за единичную окружность.

По алгоритму, изложенному выше [3], на рис. 3 и рис. 4 построены границы области устойчивости на плоскости: параметр  $\alpha_0, \beta_0$ . На рис. 3 принято значение амплитуды отклонений

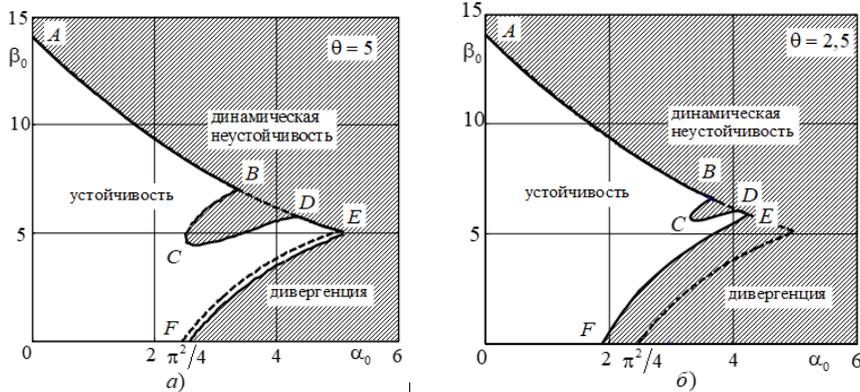


Рис. 3. Границы области устойчивости при  $\beta = \beta_0 = \text{const}$  и  $\alpha = \alpha_0(1 + 0,25 \cos \theta t)$ : а)  $\theta = 5$  б)  $\theta = 2,5$

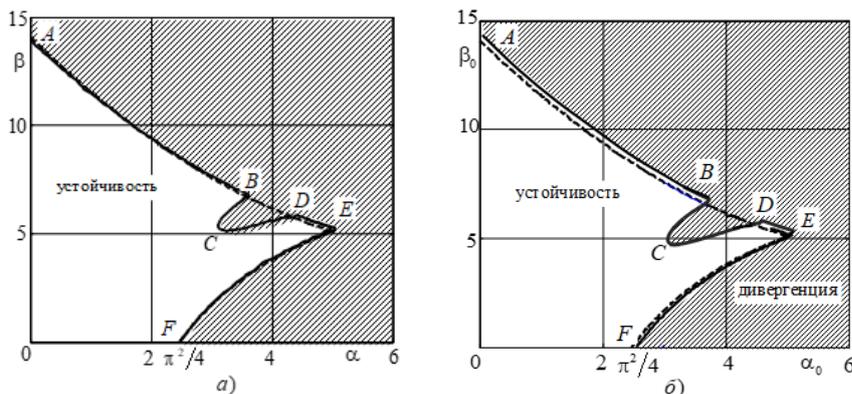


Рис. 4. Границы области устойчивости при значении параметров: а)  $\alpha = \text{const}$  и  $\beta = \beta_0(1 + 0,25 \cos 5 t)$ ; б)  $\alpha = \alpha_0(1 + 0,25 \cos 5 t)$   $\beta = \beta_0(1 + 0,25 \sin 5 t)$

что характерно для главного параметрического резонанса. Уменьшение частоты параметрического воздействия уменьшает дополнительную область неустойчивости, не изменяет ее ориентации, а границу дивергенции  $EF$  равномерно сдвигает влево и существенно уменьшает область устойчивости.

Рис. 4 демонстрирует границы области устойчивости при других вариантах изменения нагрузок. Изменение нагрузок происходит в противофазе. Аналогичное по-

туды отклонений потенциальной силы  $\mu = 0,25$  и круговой частоты изменения сжимающих сил  $\theta = 5$  (рис. 3,а) и  $\theta = 2,5$  (рис. 3,б). Пунктирными линиями на рисунках показаны границы флаттера и дивергенции при постоянных по величине потенциальной и следящей сил. Первое, что можно отметить, это то, что параметрическое воздействие уменьшает область устойчивости за счет области неустойчивости  $B CD$ . Эта область прилегает к границе флаттера с координатами по  $\alpha_0$  в окрестности частот флаттера, очевидно удовлетворяющих условию  $\theta \approx 2\omega_f$ ,

строение при совпадении фаз и тех же параметров  $\mu$  и  $\theta$  практически не изменяет форму границы, построенной на рис. 2 для постоянных  $\alpha, \beta$ . В целом границы на рис. 4 мало отличаются от границ, построенных на рис. 3. При выбранных параметрах системы и нагружения на большей части границы совпадают с границами флаттера и дивергенции рис. 2 и дополнительной областью неустойчивости, как и на рис. 3.

Проведем исследование законов движения системы в окрестности границы

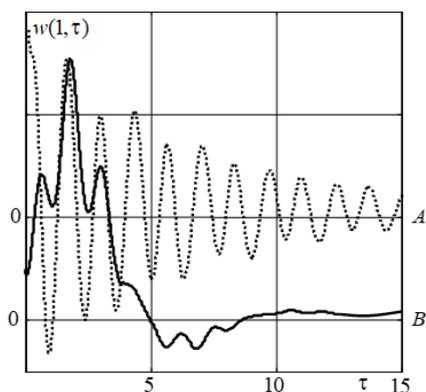


Рис. 5. Законы движения крайнего сечения стержня в окрестности границы области устойчивости

устойчивости. Для примера примем параметры системы и нагружения, для которых построена граница области устойчивости, представленная на рис. 3,а. Характерная кривая, иллюстрирующая закон движения свободного конца стержня, для точек в окрестности части границы  $ABCDE$  со стороны области устойчивости представлена на рис. 5 пунктирной линией. Для «устойчивых» точек в окрестности части границы  $EF$  сплошной линией показано поведение крайнего сечения стержня при сообщении ему некоторого начального отклонения.

Характерное поведение при потере устойчивости по типу флаттера и дивергенции проиллюстрировано на рис. 6. Однако, следует заметить, что если реализация флаттера в области неустойчивости при пересечении границы  $ABCDE$  не отличается от

такого типа потери устойчивости при постоянных нагрузках (рис. 6,а), то монотонность отклонения от положения равновесия при дивергенции в случае параметрического воздействия теряется. Что и демонстрирует кривая на рис. 6,б.

Одной из основных задач теории упругой устойчивости является определение

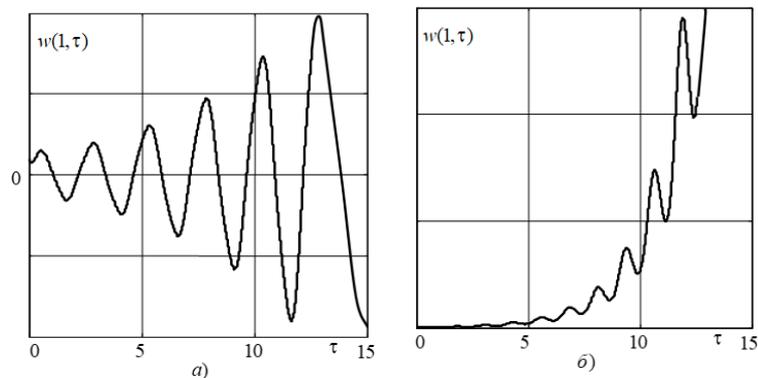


Рис. 6. Поведение системы в областях неустойчивости

границ области устойчивости в пространстве параметров внешних нагрузок. Преобразование неконсервативной механической системы в параметрически возбуждаемую может даже при малых изменениях величин нагрузок существенно изменить границы области устойчивости как в сторону стабилизации системы, так и существенного снижения критических значе-

ний параметров нагрузок. В работе проведены лишь предварительные исследования в этом направлении. Для окончательных выводов требуется значительно более полный анализ влияния различных параметров системы, включая демпфирование, и внешнего воздействия как по амплитудам, так и по частотам.

**Список литературы:** 1. Ziegler H. Die Stabilitatskriterien der Elastomechanik // Ingenieria: Mexico, 20, 1952. – pp. 49–56. 2. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. – М.: Физматгиз, 1961. – С. 340. 3. Beck M. Die Knicklast des EinseitigEingespannten Tangential GedrucktenStabes. Z. Angew. Math. Phys., 3, 1952. – pp. 225–228. 4. Реут В.И. О теории упругой устойчивости: Тр. Одесского ин-та инж. гражд. и комм. стр-ва, 1939. – Вып. 1. – С. 115-190.

# НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЗОВОЙ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. (НИУ Московский государственный строительный университет, Россия)

Телефон: +7 (916) 8107126; E-mail: [Rakunov1991@mail.ru](mailto:Rakunov1991@mail.ru);

**Abstract:** *The article discusses the scientific foundations and methodology of the system of multi-level basic technology, using top-down and bottom-up design of group technological processes (GTP) by the method of "analysis-synthesis" of design and technological information. The structure of documents of the basic technology in the form of matrix tables has been developed, which allows formalizing the process of synthesis of various levels of GTP: automated selection of positional tool adjustments, conditions for the implementation of passes, transitions, positions and setups (detail operations). The synthesis method can be effectively used both for individual optimization of the processing of large-scale parts, and for group processing of parts in the conditions of modern small-scale multi-product production.*

**Keywords:** *technological preparation of production, multilevel basic technology, automation of design of technological processes, "analysis-synthesis" method, primary subsystem, standardized cutting tool type, optimization criteria.*

## 1. Введение.

Система автоматизации проектирования единичных и групповых технологических процессов (САПР ГТП) включает методику выбора схем базирования и установочных приспособлений, типоразмеров инструмента и синтеза инструментальных наладок, в том числе, групповых, назначения, выбора или расчёта режимов оптимального резания при разработке надёжных ресурсосберегающих процессов, обеспечивающих требуемое качество деталей машин и приборов. В специальной литературе излагаются методические основы автоматизированного проектирования ТП в машиностроении, где основное внимание уделено процессам механической обработки заготовок на станках с ЧПУ и гибких производственных систем [1-6]. Представлены типовая структура САПР ТП и фрагменты автоматизации проектирования технологических операций и переходов на отдельных этапах ТП [1-3,5,6].

Однако существующим САПР присущи **принципиальные недостатки:**

- смешение уровней информации на различных уровнях технологии;
- принятие решений при недостатке информации или её избытке, взятой с других уровней технологии;
- отсутствие типажей инструментов для осуществления, как индивидуальной так и, что особенно важно, групповой обработки;
- отсутствие конкретных технологических рекомендаций по назначению или выбору режимов оптимального резания (РОР), а также данных по стойкости инструментов и минимально необходимому количеству проходов (рабочих ходов по каждой поверхности).

Эти недостатки не дают возможности разрабатывать рациональные инструментальные наладки для конкретных установов (детале-операций) и оптимизировать ТП, например, токарной или фрезерной обработки конкретных деталей или групп деталей (заготовок) [7 - 11].

## 2. Основное содержание и результаты работы

**Целью создания системы многоуровневой базовой групповой технологии (МБГТ)** является развитие технологии как точной науки путём выявления закономерностей и установления количественных взаимосвязей по различным направлениям и предметам исследования качества и производительности ГТП [7,8,11].

Единая система технологических признаков, учитывающих номенклатуру, диапазон и точность этих свойств, позволяет обеспечить сопоставление, подбор типоразмеров индивидуальных и групповых инструментальных наладок (ГИН), режимов оптимального резания и эффективность ГТП с применением компьютерной техники (рис. 1) [7].

Объектом исследования является технологическая (физическая) модель изделия на основе единой системы признаков, описывающих типоразмеры заготовок и деталей, технологические методы и средства производства, обеспечивающие номенклатуру, диапазоны и точность формируемых свойств обрабатываемых поверхностей (ОП) [9-11].

Согласно предложенному информационному методу «анализа-синтеза», или объектно-структурному подходу, проектирование ТП следует начинать с наименее информативноёмких задач [2,4-8,11-17]. При решении задач следующего (верхнего) уровня используют строго дозированную информацию (принадлежащую только к этому уровню) и информацию более высокого уровня, необходимую и достаточную для решения задачи на этом уровне, например, типоразмера, т.е. перехода в структуре ТП. В этом процессе (итерации) смешение уровней информации недопустимо (см. рис. 1) [7].

Разработку вариантов ТП ведут в двух противоположных направлениях (нисходящем – восходящем): маршруты дифференцируют до уровня базовых установов (типоразмеров детали-операций), а затем техническое содержание конкретного исполнения (моделей) установов синтезируют из технологических элементов нижних уровней: позиций, переходов и рабочих ходов (проходов) [7,8,16]. Создание систем автоматизированного проектирования единичных и групповых технологических процессов (ГТП) на основе конструктивно-технологических параметров предмета производства (в частности — детали) является одной из наиболее актуальных и нерешенных пока проблем автоматизации проектирования. *Главной причиной этого является отсутствие общего решения проблемы синтеза структур объектов проектирования, инвариантного их классу* [5-7].

В исследованиях ([1-6,12-15] и др.) убедительно показано, что сложность автоматизации проектирования (синтеза) структуру ТП объясняется большой совокупностью правил проектирования, слабой их формализацией, динамичностью схем их применения, определяемых конкретными производственными условиями. Современные системы проектирования характеризуются применением эвристических алгоритмов формирования структур, строго ориентированных на ограниченное число производственных ситуаций, поэтому системы плохо тиражируемы и не адаптивны. Решения, формируемые системой, часто требуют глубокой корректировки. Оперативно изменить или дополнить алгоритмическое и программное обеспечение не представляется возможным [3-6].

Процесс варьирования параметров (параметрической настройки) значительно более формализован и менее зависим от производственной ситуации, поэтому в последнее время появилось много систем, в которых автоматически (или автоматизировано) выполняется параметрическая настройка, а структура ТП формируется вручную, и информация о ней вводится в систему как исходные данные. Такие системы легче адаптируются к производственным условиям, требуют введения относительно небольшого объема исходных данных и легко воспринимаются специалистами при их внедрении. Однако, эффективность решений в таких системах определяется квалификацией технолога, – отсутствует возможность оптимизировать структуру объекта проектирования [1-6,12-15].

За последние 20–25 лет состояние автоматизации синтеза структур ТП механической обработки на универсальных и специализированных станках, в т.ч. с ЧПУ, изменилось мало.

В наиболее часто встречающихся оценках состояния автоматизированного синтеза ТП указывается, что при его реализации маршрутная и операционная технологии должны создаваться на основе общих закономерностей проектирования или эвристик, справедливых для ограниченного класса деталей, определённых видов и типов производств.



*Утверждается, что сформировать закономерности проектирования и критерии ТП, с помощью которых можно было бы разрабатывать весь процесс изготовления деталей, на сегодняшний день не представляется возможным* [1-6,14,15]. Теория синтеза структур технологических объектов, несмотря на усилия исследователей, разработана недостаточно.

Структура САПР ГТП и состав её подсистем (прежде всего проектирующих) определяются реализуемой в ней *методологией проектирования* [1 - 7, 12 - 15]. Существуют две основные методологии проектирования ТП изготовления изделий машиностроения:

- проектирование на базе использования ТП-аналогов;
- синтез единичных и групповых ТП на основе конструктивно-технологических характеристик изготавливаемых изделий.

Процессами-аналогами называют типовые и групповые ТП. Единичный ТП также можно проектировать на основе процессов-аналогов. В этом случае его структура и содержание технологических детали-операций в значительной мере определяются структурой процесса-аналога [1 - 6, 12 - 15].

При использовании метода синтеза ключевым вопросом построения САПР ГТП является вопрос о том, как в данной системе осуществляется синтез структуры объектов проектирования: (проходов), переходов, позиций, установов и технологических этапов [7, 12 - 17]. Существуют *принципиально различные подходы к построению САПР ТП*. Известны несколько классификаций методов проектирования ТП, положенных в основу создания соответствующих систем [1 - 6, 15].

В настоящее время САПР детали-операционной технологии механической обработки действует на основе типовых технологических процессов-аналогов, что вполне оправдано только при наличии достаточно представительных групп деталей, объединённых конструктивной и технологической общностью [5, 14 - 17]. При проектировании структуры ТП требуется ввести большой объём необходимых исходных данных об изделии и производственной среде. Для корректировки решений, облегчения процесса кодирования и ввода исходных данных об изделии применяют диалог пользователя с системой. Однако, даже диалог не позволяет повысить эффективность проектирования структуры ТП, если алгоритмы не были рассчитаны на конкретную производственную ситуацию. Сейчас, однако, такой подход уже представляется рутинным, поскольку не позволяет разрабатывать оптимальные ТП [12 - 17], адаптированные к характеру конкретного производства с учётом его серийности и оснащённости новыми типоразмерами инструмента, оснастки и оборудования. При разработке технологии производства новых видов изделий при отсутствии типовых ТП, эффективным методом оптимального решения задачи является *метод синтеза*, т. е. интегрирования по определённым правилам более высоких уровней ТП из их составляющих: переходов из проходов (рабочих ходов), установов и позиций из переходов, этапов из установов, маршрутов из этапов [7, 16, 17].

Для реализации этого подхода разработана структура документов МГБТ в виде таблиц-матриц (Т-М), что позволяет *формализовать процесс синтеза* различных уровней ТП: автоматизированного выбора позиционных инструментальных наладок (ПЗИН), условий осуществления проходов, переходов, позиций и установов (детале-операций) [7-11].

Рабочие Т-М первичной подсистемы по горизонтали начинаются с характеристик технологических видов поверхностей: их геометрической формы, взаимного положения и сопряжения. Путём добавления соотношений параметров поверхностей и технологических признаков метода обработки получаем характеристику типов, определяющих номенклатуру поверхностей, формирование которых возможно данным методом. Дальнейшее дополнение Т-М информацией о диапазонах всех геометрических параметров и физических свойств, а также точности их выполнения на уровне отдельных проходов и их совокупности, т.е. *переходов*, даёт полную характеристику типоразмеров поверхностей детали [7-11,16,17].

**Первичная подсистема МБГТ**, представленная на примере прецизионного точения, предусматривает по входным данным о виде и типе поверхностей вращения, их взаимном положении и сопряжении, размерах и требуемых качественных свойствах получение следующей выходной информации:

- типоразмер (ТР) унифицированного режущего инструмента (УРИ) [7 - 11];
- материал и геометрия активной части УРИ [8 - 11];
- модель УРИ и параметры ПЗИН для выбранного ТР станка (*рис.2*);
- режимы проходов: глубина, подача, скорость резания, СОЖ [8 - 11, 16 - 21];
- необходимое исходное состояние поверхности по каждому проходу [8, 16 - 19];
- номенклатура и последовательность проходов, т. е. состав перехода [8 - 11, 16];
- прогнозируемый ресурс ПЗИН, инструментоёмкость, станкоёмкость, трудоёмкость и другие технико-экономические показатели каждого перехода [8, 16, 17, 19].

**Синтезирования переходов** по таблицам-матрицам состоит из следующих действий:

1. Определение номенклатуры проходов по каждой поверхности в их обратной последовательности, т. е. от конечного (финишного) прохода до начального. Таким образом устанавливается полная номенклатура проходов при выполнении перехода в ТР установка, на детали-операционном эскизе которого указаны обрабатываемые при этом поверхности [8].

2. Установление хронологически неразрывной последовательности проходов по ОП контуров обработки, которые обходит каждая модель РИ конкретного исполнения; при этом состав (номенклатура и последовательность) проходов образует переход [16].

**Проход** - "одноразовое неразрывное (технологически и хронологически) взаимодействие зоны формирования свойств ( $n \geq 1$  точек или линий) с определенными условиями формирования сочетаний элементарных свойств (физических и геометрических) единичной поверхности" – является первичным уровнем в структуре ТП.

**Переход** – номенклатура и последовательность (состав) проходов, выполняемых одной моделью позиционной инструментальной наладки при неизменной позиции (степенях свободы) заготовки относительно векторов инструмента в координатах оборудования.

Оптимизация синтеза групповых инструментальных наладок для токарных станков с ЧПУ позволяет минимизировать количество ТР инструментов в групповом производстве, добиваясь увеличения общего количества высокоточных деталей, обрабатываемых до смены инструментов после достижения максимально допустимого износа каждого из них [8, 11, 16].

Работа по синтезу (интегрированию) модели установка начинается с первичной подсистемы МБГТ, разработанной в таблично-матричной форме и определяющей комплекс условий технологической наследственности на каждом проходе для обеспечения параметров формируемых свойств обрабатываемых поверхностей. Это позволяет сопоставлять технологическую модель детали с моделью технологических методов, формирующих свойства на всех этапах производства, подбирать оптимальный метод и минимизировать количество типоразмеров РИ, станкоёмкость и технологическую себестоимость [8, 16, 19]. Известен ряд концептуальных подходов к решению проблемы синтеза структур ТП. Однако каждый из них обладает рядом недостатков, в том числе и принципиальных, которые делают невозможным создание эффективно работающих САПР ГТП на их основе [2, 5, 6, 12, 13].

Подсистема синтеза конкретизирует содержание и дополняет номенклатуру детали-операций последовательным синтезированием номенклатуры и последовательности (состава) входящих технологических событий уровней установов и переходов из первичных элементов ГТП, с учетом конкретных моделей оборудования и возможностей групповых и индивидуальных (специальных), позиционных и детали-операционных (установочных) инструментальных наладок, а также управляющих программных наладок [7, 8, 16 - 22].

Типаж унифицированных универсальных резцов, спроектированных для групповой и индивидуальной оптимизации обработки на станках с ЧПУ показан на рис. 2.

Метод синтеза хотя бы один раз требует формирования внешних связей между элементами для создания из них элементов более высокого уровня: определение состава элементов, построение новых связей, проверку их достоверности и параметрическую настройку с использованием логических правил и аналитических зависимостей [16,19-22].

Заполнение таблицы-матрицы интегрирования установов по уровням для конкретной модели (налаженного) оборудования производится в соответствии с алгоритмом:

1. Разбивка всей номенклатуры переходов (по таблице-матрице [16, 17]) с учётом точности взаиморасположения обрабатываемых поверхностей (ОП) (несоосность, непараллельность, перпендикулярность) на уровне подсовкупности (типоразмеров) переходов, осуществляемых при обработке заготовки с одной стороны, т. е. на совокупность переходов составляющих номенклатуру позиций токарных установов. При наличии контршпинделя обе позиции выполняются в одном установе.

2. Выбор установочной базы – схемы базирования и типоразмера установочной оснастки, базовой поверхности на заготовке, исходя из взаиморасположения совокупностей типоразмеров поверхностей – контуров обработки. Формирование установочной наладки.

3. Выбор типоразмера базовой модели (или нескольких рабочих моделей) оборудования из технически удовлетворяющих требованиям по диапазону и точности, количеству и схеме рабочей зоны инструмента, организационным соображениям (наличие выбранных станков на участке, в цехе, с учётом загрузки станков) по типуажу с технологическими параметрами и возможностями оборудования [16 - 19].

4. Выбор номенклатуры УРИ в ГИН для каждого установа. Учитывается необходимое количество ПИН, исходя из напряженности переходов и ресурса каждой ПИН с учетом возможности их дублирования для повышения стойкости наиболее напряженной, т. е. менее ресурсостойкой. Как правило, это инструмент для обработки наружных цилиндрических поверхностей (могут быть внутренние или торцевые – у деталей с преобладающими площадями обрабатываемых торцов) (*блок-схема 1*) [16].

5. Выбор конкретной (рабочей) модели оборудования из возможных (см. п. 3) по номенклатуре установочных групповых инструментальных наладок. Отбор оптимальной модели производится по количеству устанавливаемых инструментов, обеспечиваемой точности обработки и экономическим показателям [16, 17, 19 - 22].

6. Определение последовательности переходов (типовая схема последовательности обработки деталей типа «валов» и «втулок»).

7. Уточнение (синтезирование) рабочей модели оборудования, с установлением конкретных инструментальных наладок (*блок-схема 2* [11, 16, 17]).

8. Оформление операционной карты установа, установочной инструментальной оснастки, с оснащением необходимой контрольно-измерительной аппаратурой.

9. Уточнение количества установов в технологическом этапе.

Оптимизация модели (конкретного исполнения) установа проводится по критерию максимальной производительности при обеспечении необходимых показателей качества деталей. Характер оптимизации зависит от вида производства и, как следствие этого, организационно-технологических условий обработки:

- групповая оптимизация осуществляется для случая разработки технологических процессов в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства, когда обработка конкретной детали не загружает станок в течение рабочей смены (определяется критической партией запуска методом «прямого счёта») [8, 16, 19];
- индивидуальная оптимизация осуществляется в случае разработки ТП на деталь, обеспечивающую загрузку оборудования в течение одной или более рабочих смен. Инструмент оптимизируется под изготовление этой массовой детали, включая, при необходимости, проектирование, изготовление специальных резцов повышенной стойкости;



**БЛОК - СХЕМА 1. ВЫБОР ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАЛАДОК ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТОКАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Исходная информация: ТИПОРАЗМЕР (ТР) УСТАНОВА (Ус), ДЕТАЛЬ (вход) → операционный эскиз; Номенклатура (Нм), моделей (Мд), обрабатываемых поверхностей

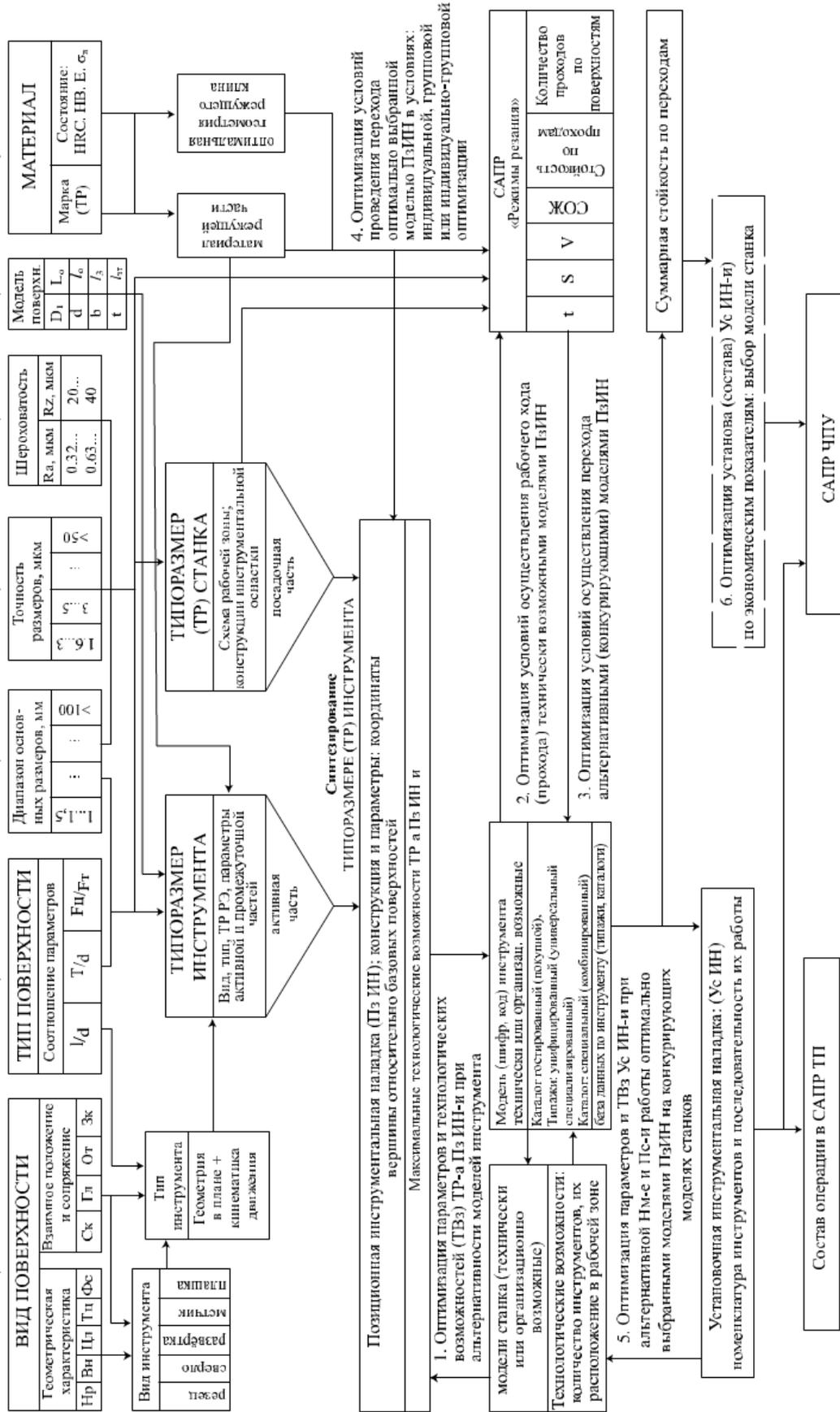


Рис. 3. Блок-схема 1

- индивидуально-групповая оптимизация является компромиссной между индивидуальной и групповой. В этом случае используются ГИН, с возможностью смены отдельных ПЗИН для обработки деталей, подзагружающих ГИН до полной загрузки [16, 17].

Основными *критериями оптимальности* состава и параметров установочных (детале-операционных) ГИН являются:

- для УРИ, осуществляющих финишные проходы – минимальная интенсивность износа, т. е. максимальная площадь обработанной поверхности при минимальном или регламентированном размерном износе;
- для УРИ, осуществляющих предварительные проходы – максимально возможная производительность (съём определённого объёма материала в единицу времени), оцениваемая минимальными машинным временем или себестоимостью обработки [16 - 19].

Все предпринимаемые до настоящего времени попытки оптимизировать технологию механической обработки и условия резания в индивидуальном и групповом производстве теоретически обречены на провал, если они не основаны на положениях и принципах МБГТ, так как пытаются оптимизировать заведомо провальный вариант ТП [1, 12 - 15, 18]. Априори назначаемые периоды стойкости РИ под предлогом того, что так удобно технологам или нормировщикам, без определения оптимальных: скорости резания и интенсивности относительного поверхностного износа (или удельной поверхности определённого качества, приходящейся на 1 мкм размерного износа) для типоразмера РИ, является попыткой завуалировать степень недоисследованности области применения конкретной модели РИ, модели обрабатываемой поверхности и материала заготовки (в конкретном его состоянии: отожженном, нормализованном, улучшенном, закаленном или состаренном) [16 - 18].

### **1. Заключение**

Метод синтеза может быть эффективно использован, как при индивидуальной оптимизации обработки крупносерийных деталей, так и при групповой обработке деталей в условиях современного мелкосерийного многономенклатурного производства [16 - 22].

Применение метода синтеза для решения задачи перебора технически возможных вариантов интегрируемых переходов, позиций и установов на профессиональных персональных компьютерах при правильном заполнении таблиц-матриц технологом средней квалификации даёт возможность получения оптимального для существующего производства ТП механической обработки высокоточных токарных деталей простой и сложной форм.

Единая система технологических признаков, учитывающих номенклатуру, диапазон и точность свойств деталей позволяет обеспечить сопоставление, подбор и необходимую эффективность при использовании компьютерной техники [16, 19 - 21].

Практическое использование системы МБГТ даёт возможность создания базы знаний и баз данных системы автоматизированного сквозного проектирования изделий точного машиностроения (двигателестроения), т. е. интегрированных САПР: САЕ/CAD/CAM/CAPP. Это особенно важно для разработки полноценной системы САМ/CAPP (автоматизированная технологическая подготовка производства и проектирование детали-операций ГТП).

Преимуществами предлагаемого подхода по сравнению с традиционными являются существенное повышение качества разработанной технологии и резкое сокращение сроков технологической подготовки любого типа производства [7, 8, 12, 14].

Внедрение унифицированного режущего инструмента и режимов оптимального резания вместе с использованием методики синтеза индивидуальных и групповых инструментальных наладок приведёт к повышению эффективности машиностроительного производства и производительности труда в 2 и более раз [16, 19, 20].

Система МБГТ является основой, позволяющей предсказывать перспективные направления развития технологии и совершенствования производства, а также исключить

неоптимальные, неэффективные технологии. Она создаёт основы для пересмотра физической сущности технологии, её информационного, программно-математического и материального обеспечения. Использование системы МБГТ, типажей УРИ и РОР обеспечивает не только импортозамещение, но и импортнезависимость от закупок и поставок из-за рубежа инструмента с СМП и «эффективных рекомендаций» от его производителей. В условиях санкций со стороны Запада могут быть остановлены поставки импортного инструмента, что затормозит производство изделий двигателе- и самолётостроения в РФ.

**Список литературы:** 1. Акулович Л. М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие / Л. М. Акулович, В. М. Шелег. – Минск: Новое знание. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 488 с. – (Высшее образование). 2. Старостин В.Г., Лелюхин В.Е. Формализация проектирования технологических процессов механической обработки резанием. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с. 3. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов // Под ред. С.Н. Корчака. – М.: Машиностроение, 1988. – 349 с. 4. Базы знаний интеллектуальных систем // Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с. 5. Кондаков А. И. «САПР технологических процессов: учебник для студентов высших учебных заведений». – М.: «Академия»; 2007. – 272с. 6. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования // И. П. Норенков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 7. Ракунов Ю. П. Разработка системы многоуровневой базовой технологии // Научноёмкие технологии в машиностроении. – № 1, 2012. – С.40-46. 8. Ракунов Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии // Научноёмкие технологии в машиностроении. – № 3, 2012. – С. 23-31. 9. Резец: Патент РФ № 2170160 / Калмыков В. И., Ракунов Ю. П., Хрульков В.А., Петровская Т. М., Золотова Н. А., Борисенко Н. Н. – Бюл. № 19, 2001. 10. Многократно перетачиваемый резец: Патент РФ № 2226453 / Ракунов Ю. П., Хрульков В. А., Золотова Н. А., Тихонов Н. А. – Бюл. № 10, 2004. 11. Ракунов Ю. П. Оптимизация синтеза инструментальных наладок для станков с ЧПУ // Конструктор-машиностроитель. – 2010. – № 3, 5. 12. Торпачев А.В. Алгоритмический подход к формированию технологических баз знаний // Ракетно-космические комплексы. М.: МАТИ-КБТМ, 2007. Вып. 1. С. 25-31. 13. Торпачев А.В. Применение восходящего метода проектирования технологических процессов механической обработки деталей аэрокосмической техники // Технология машиностроения. 2011, №1. - С. 12-16. 14. Ершов В.И., Чумадин А.С. и др. Основы технологии авиа- и ракетостроения. // Учебное пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2005. – 912 с. 15. Информационные технологии в научноёмком машиностроении // Под ред. А.Г. Братухина. – Киев: Техника, 2001. – 620 с. 16. Ракунов Ю. П. Подсистема синтеза многоуровневой базовой технологии // Научноёмкие технологии в машиностроении. – № 10, 2012. – С. 36-46. 17. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ // Справочник, Инженерный журнал, приложение. № 7, 2015. – С. 1-29. 18. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М., Машиностроение, 1976, - 278 с. 19. Ракунов Ю.П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин // Научноёмкие технологии в машиностроении. – № 2, 2013. – С.36-48. 20. Ракунов Ю.П., Абрамов В.В. Сравнение методов оптимизации режимов резания при механической обработке деталей машин//Механизация строительства.- №11, 2015.-С.22-26. 21. Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю. Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов // Журнал «Станкоинструмент». № 1,2, 2020.– С. 66-72. 22. Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю. Развитие подсистем: первичной и синтезирования многоуровневой базовой групповой технологии // Сб. трудов XXVIII Междунар. науч.-технич. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь, 13-19.09.21.- С. 478.

## РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗУБОРЕЗНЫХ ФРЕЗ В ПРОСТРАНСТВЕННОМ СТАНОЧНОМ ЗАЦЕПЛЕНИИ

Рябичев В.Д., Витренко В.А., Ефимов А.В., Михайлова А.Д.

(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)

Тел./Факс: + 38 (0642) 341826; E-mail: vitrenko.vl@gmail.com

**Abstract:** Creation of new instrument for cutting cylindrical teeth of gear wheels due to development of principally new scheme of its shape formation using commercial teeth working equipment has been investigated.

**Key words:** gear wheel, hyperbola cutter, specific points, tooth surface, work-piece, contact.

В представленной работе рассматриваются различные методы формообразования зуборезных фрез в пространственном станочном зацеплении на специализированном станочном оборудовании, а также на универсальных станках в различных типах производства. В зависимости от формообразующих движений при помощи одного и того же инструмента получаются зубья разной геометрии. На практике для такого изготовления зубьев нужны современные зубообрабатывающие станки имеющие возможность придавать подачу инструменту и заготовке вдоль оси протяжного суппорта, а также вдоль оси вращения стола станка. Такие зуборезные станки не нашли широкого распространения в промышленности, так как нет большой потребности в изготовлении высокоточных винтовых зубчатых колес и инструментов. Совокупность осевой подачи и подачи вдоль протяжного суппорта дают возможность режущей кромке инструмента двигаться вдоль прямолинейной образующей винтового зубчатого колеса, расположенной в горизонтальной плоскости [4, 5].

В последнее время появилась возможность нарезать зубья на винтовой поверхности проектируемой фрезы на многокоординатных фрезерных станках при помощи дисковых и концевых фрез. В этом случае появилась возможность двигать режущую кромку фрезы вдоль прямолинейной образующей винтового зубчатого колеса. В этом случае происходит имитация зацепления винтового зубчатого колеса с зуборезной рейкой или с зубчатым колесом бесконечно большого диаметра.

Разработанные в данном исследовании основные инструментальные поверхности полностью совпадают с производящими поверхностями, так как они располагаются на огибающей искомой инструментальной поверхности. Следовательно, такие инструменты не затылуются. Погрешности окружного шага между стружечными канавками проектируемого зуборезного инструмента не сказываются на погрешности профиля нарезаемого разработанными винтовыми зуборезными фрезами колеса, что резко снижает стоимость

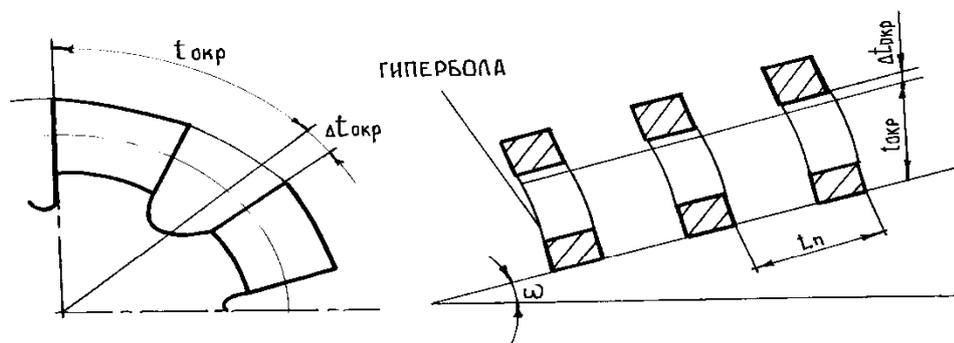


Рис. 1. Погрешность окружного шага на проектируемом инструменте

изготовления разработанного обратного инструмента. Схему образования погрешностей окружного шага на проектируемом инструменте можно видеть из рисунка 1.

Необходимо отметить, что это позволяет варьировать количеством стружечных канавок на разрабатываемом обратном инструменте в широком диапазоне. Кроме того, геометрия инструмента позволяет затачивать такой инструмент под любым углом, при этом основная инстру-

ментальная поверхность полностью совпадает с производящей поверхностью. Необходимо отметить, что стружечная канавка на разработанных фрезах должна быть перпендикулярна витку инструмента. В противном случае углы с правой и левой стороны витка будут не одинаковы, что приводит к различным усилиям резания, особенно на торцах инструмента [6]. Такое положение приводит к неравномерному износу разработанного инструмента и требует преждевременных его переточек.

Погрешность угла наклона винтовой канавки вносит погрешность на перемещение боковых режущих кромок затылованных обкатных инструментов, что в свою очередь вносит погрешность на профиль обрабатываемого колеса. Это объясняется тем, что винтовые канавки выполняются в виде винтовых поверхностей, проходящих на делительных цилиндрах обкаточных инструментов, нормально к винтовым поверхностям зубьев (витков). Эти погрешности  $\Delta t_n$  легко увидеть из схемы влияния погрешности угла винтовых канавок в затылованных обкатных инструментах на погрешность профиля нарезаемого колеса. Схема образования погрешностей представлена на рисунке 2.

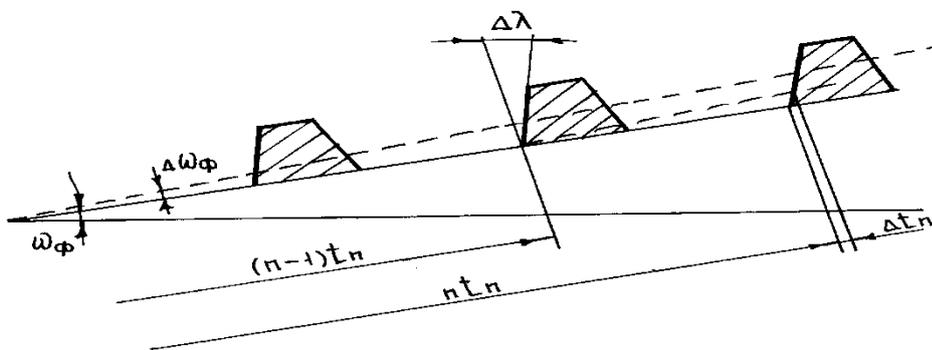


Рис. 2. Схема образования погрешности профиля нарезаемого колеса

зубчатого колеса. Такое положение объясняется тем, что все известные обкатные инструменты затачиваются по вершине и задним поверхностям. Причем угол заточки этих поверхностей зависит от материала инструмента и материала обрабатываемого цилиндрического зубчатого колеса, а также их геометрии. На практике эти углы могут меняться в широких пределах.

При изготовлении предложенных обкатных инструментов заточка задней поверхности не производится. В результате погрешность угла винтовых канавок созданного обкатного инструмента не влияет на точность профиля зуба нарезаемого зубчатого колеса.

Из изложенного следует, что точность нарезаемых зубьев цилиндрических зубчатых колес не зависит от погрешностей окружного шага и погрешностей угла винтовых канавок разработанных обкатных инструментов.

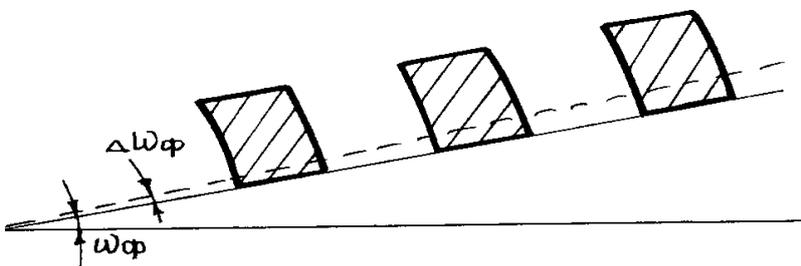


Рис. 3. Погрешность угла винтовых канавок в разработанной фрезе

Инструменты, представляющие собой стандартный режущий инструмент, изготовленный из быстрорежущих сталей марок P18, P6M5 и др. Для повышения производительности при обработке цилиндрических колес из углеродистых и легированных конструкционных сталей, а также нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов целесообразно инструменты изготовить из стали P6M5K5. Кроме того, рассматриваемые инструменты можно из-

Из схемы, представленной на рисунке 2 видно, что чем больше погрешность угла наклона  $\Delta \omega_\phi$ , тем больше погрешность  $\Delta t_n$  профиля зуба нарезаемого

окружного шага и погрешностей угла винтовых канавок разработанных обкатных инструментов.

Концевые и дисковые фрезы, применяемые для изготовления предложенного обкатного инструмента,

готовить из твердых сплавов. Сплавы группы ТК можно использовать для обработки колес из углеродистых и легированных конструкционных сталей, сплавы группы ТТК - для обработки труднообрабатываемых материалов, при резании с ударами.

При помощи разработанных технологий были изготовлены однозаходная и семизаходная зуборезные фрезы. Общий вид этих фрез представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Однозаходная и семизаходная зуборезные фрезы

Необходимо отметить, что стружечные канавки в таком инструменте изготавливались различных геометрических размеров. Ширина канавок выбиралась в зависимости от геометрических размеров дисковых фрез при помощи которых изготавливались такие канавки. Передний угол в разработанных фрезах менялся в диапазоне от  $0^\circ$  до  $15^\circ$ . В результате экспериментального нарезания зубьев цилиндрических зубчатых колес удалось повысить производительность нарезания зубьев в 7 раз по сравнению с нарезанием зубьев серийным инструментом. Степень точности нарезаемых зубьев зависит от точности зубофрезерного станка, в данном исследовании степень точности нарезаемых зубьев соответствовала седьмой степени.

Необходимо отметить, что в результате проведенных экспериментов, впервые удалось изготовить многозаходную зуборезную фрезу при помощи концевых и дисковых фрез на вертикально фрезерных и горизонтально фрезерных станках с ЧПУ. Производительность нарезания такого зуборезного инструмента естественно ниже, чем изготовление таких фрез на зубофрезерных станках. Это объясняется тем, что в процессе изготовления фрезы участвует только одна режущая кромка профилирующего инструмента. Кроме того, выбранные режимы резания зависят от материала концевой или дисковой фрез. Концевые и дисковые фрезы затачиваются по прямолинейной образующей, что в значительной степени снижает трудоемкость их изготовления с одновременным повышением их точности. Также, в этом случае легко решается вопрос шлифования поверхности концевой и дисковой фрезы. При нарезании витков фрез значительно сокращается время на настройку станка. С целью повышения производительности нарезания витков винтовых фрез, необходимо использовать пакет дисковых фрез на одной оправке. Это позволит увеличить производительность нарезания инструмента в зависимости от количества дисковых фрез на инструментальной оправке.

**Список литературы:** 1. Гавриленко В.А. зубчатые передачи в машиностроении. М.: Машгиз, 1962.-531 с. 2. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машиностроение, 1984. – 272 с. 3. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений /Ф. Л. Литвин. – М.: Наука, 1968, 584 с. 4. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов / П. Р. Родин. – К.: Вища школа, 1990. – 424 с. 5. Сахаров Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л., Киселев А.С. Металлорежущие инструменты. - М.: Машиностроение, 1989. - 328 с. 6. Цвис Ю.В. Профилирование режущего обкатного инструмента / Ю. В. Цвис – М.: Машгиз, 1961. – 155 с.

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ СВОБОДНОМ ДОРНОВАНИИ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК

Рябичева Л.А., Королько В.В. (ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)  
Тел. +7959-128-13-13; E-mail: ryabic@gmail.com

**Abstract:** The method of final elements made the analysis of the stress-strain state the steel sleeve with various width of a cylindrical ribbon of a mand. Pictures of distribution of intensity of stress, intensity of strain, the speed of strain and residual stress are received. It is shown that with two width of a cylindrical ribbon of the characteristic of the stress-strain state are almost identical. The size of force of a mandrelling differs considerably, presence of friction forces is the reason of it.

**Key words:** intensity of stress, intensity of strain, speed of strain, residual stress, mandrel force.

Феноменологическая теория деформируемости базируется на связи между динамическим и кинематическим состоянием сплошной среды, а также на экспериментальных данных о механических характеристиках материала и информации о напряженно-деформированном состоянии при операциях обработки материалов давлением [1].

При компьютерном моделировании операций холодной обработки металлов давлением наиболее часто используют упругопластическую модель материала с нелинейным упрочнением, которая учитывает упругую и пластическую составляющие деформации, закон упрочнения при этом представляется степенной зависимостью или функционалом [2, 3].

Операция дорнования используется для калибровки внутренней поверхности втулок, полученных различными путями обработкой давлением или операциями обработки резанием. При этом происходит калибровка внутреннего отверстия, увеличение его точности и упрочнение поверхностного слоя металла [4].

Самая простая схема дорнования – это свободное дорнование невысоких деталей, в результате которого происходит обработка внутренней поверхности отверстия. Рабочая часть дорна выполнена в виде усеченных конусов, соединенных цилиндрической ленточкой. Углы конусов выбираются в зависимости от механических свойств материала изделия. Цилиндрическая ленточка формирует диаметр цилиндрических отверстий [1].

Согласно работе [4] рекомендуется ширину цилиндрической ленточки дорна для глубоких отверстий принимать равным  $(1-1,5)d_u$  ( $d_u$  – диаметр цилиндрической ленточки дорна). По Проскурякову Ю.Г. ширину цилиндрической ленточки дорна следует рассчитывать по формуле  $l = 0,35d_u^{0,6}$  [5].

Целью работы является анализ напряженно-деформированного состояния при дорновании втулки из стали 40ХФА для обоснования выбора ширины цилиндрической ленточки дорна.

Для решения задачи использована упругопластическая модель материала с нелинейным упрочнением. В упругопластической модели части объекта, которые достигают предела текучести материала, моделируются пластичными, остальные части объекта – упругими [6].

Предполагается, что материал однороден и начально изотропен. В процессе упругопластического деформирования в нем может возникать только деформационная анизотропия. Относительное изменение объема  $\varepsilon_{ij}$  мало и является упругой деформацией, пропорциональной гидростатическому давлению  $\sigma_{cp}$

$$\varepsilon_{ij} = 3K\sigma_{cp}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}),$$

$$K = \frac{E}{1-\nu},$$

где  $K$  – коэффициент объемного сжатия;

$E$  – модуль Юнга;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Тензор приращений деформаций  $d\varepsilon_{ij}$  является суммой тензоров приращений упругих  $d\varepsilon_{ij}^e$  и пластических  $d\varepsilon_{ij}^p$  деформаций:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p.$$

Рассматривали свободное дорнование по схеме сжатия. Втулка имела размеры: исходный внутренний диаметр  $d_0 = 9,8$  мм, наружный диаметр  $D_0 = 28$  мм, высота  $H = 20$  мм.

Размеры дорна: диаметр по ленточке  $d = 10$  мм; ленточка шириной  $b = 10$  мм и  $b = 1$  мм; угол заборного конуса  $\alpha = 4^\circ$ ; угол обратного конуса  $\alpha_1 = 4^\circ$ ; в месте перехода конической части дорна в цилиндрическую кромка скруглена до  $R = 0,2$  мм. Натяг дорнования принимали равным  $i = 0,2$  мм. Скорость дорнования  $v = 2$  мм/с.

При дорновании напряжения на контактной поверхности заборного конуса дорна и втулки обычно превышают величину напряжения текучести материала втулки  $\sigma_s$  или соизмеримы с ним. Поэтому для описания трения в таких процессах применяли формулу Зибеля.

Моделирование выполняли в пакете инженерного анализа Deform, в котором используется метод конечных элементов. Механические свойства и реологические характеристики стали 40ХФА, необходимые для расчетов, имеются в базе материалов пакета.

При моделировании деформирования дорн и опора считались абсолютно жесткими объектами. Условие текучести – по Мизесу.

На рис. 1 показано изменение силы дорнования втулки из стали 40ХФА при ширине ленточки дорна 10 мм и 1 мм. При ширине ленточки 10 мм сила возрастает до 22 кН, при ширине ленточки 1 мм сила намного меньше и составляет 11,5 кН. Малая величина углов конуса приводит к увеличению его контактной поверхности и, соответственно, возрастанию работы по противодействию силам трения. К аналогичному результату приводит увеличение ширины ленточки дорна.

При дорновании цилиндрических отверстий в наиболее деформированном сечении втулки по цилиндрической ленточке действуют только силы трения, которые не могут передать осевых напряжений на все сечения втулки. Жесткий дорн находится в непрерывном контакте с втулкой по заборному конусу и цилиндрической ленточке.

Характер распределения интенсивности напряжений в обоих случаях одинаков (рис. 2), что свидетельствует о роли контактного трения в процессе дорнования дорнами с разной шириной ленточки.

На начальных этапах деформирования интенсивность напряжений в обоих случаях практически одинакова. С увеличением хода дорна она отличается значительно, что, очевидно, объясняется увеличением контактного трения площади дорна и деформированной втулки.

На рис. 3 показано распределение интенсивности деформаций после дорнования. Следует отметить, что при ширине ленточки 1 мм очаг деформации больше. В начальной и конечной стадии деформирования интенсивность деформации отличается.

По мере движения дорна по поверхности втулки скорость деформации увеличивается, что является результатом более интенсивного смещения металла при ширине ленточки 1 мм (рис. 4).

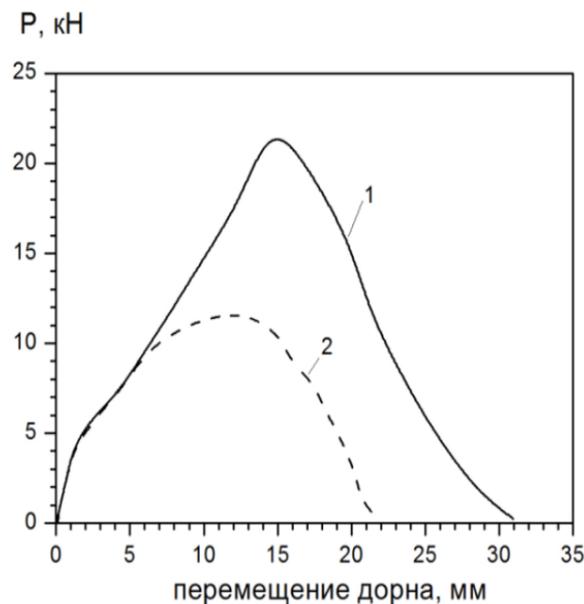


Рис. 1. Изменение силы при дорновании втулки при ширине ленточки дорна: 1 – 10 мм, 2 – 1 мм

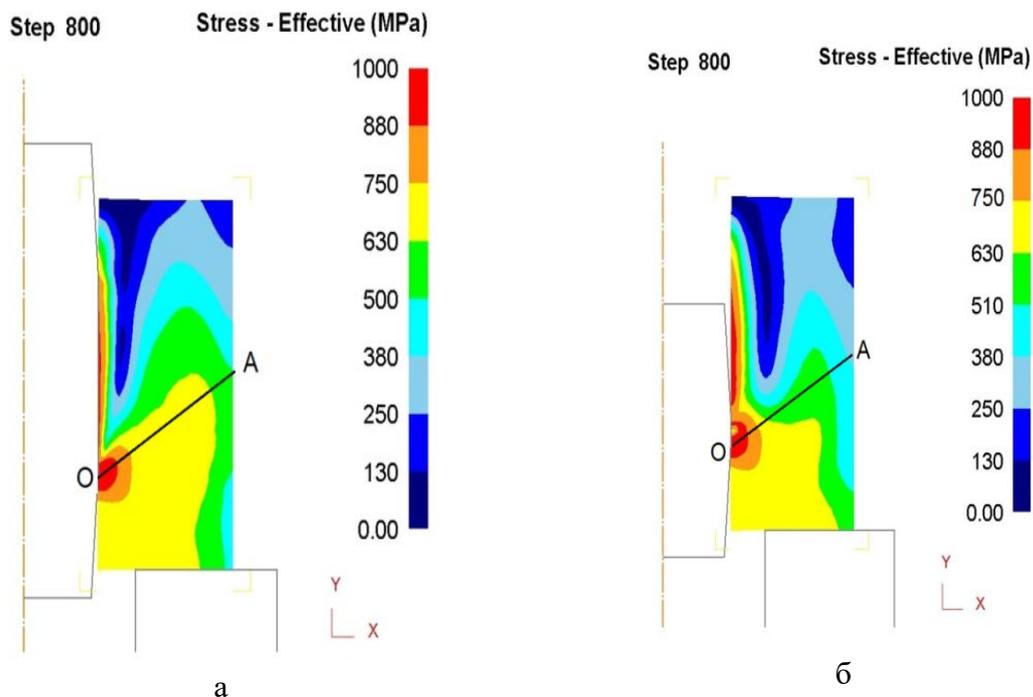


Рис. 2. Интенсивность напряжений в очаге деформации при ширине ленточки: а – 10 мм, б – 1 мм

На рис. 3 показано изменение интенсивности деформаций по толщине стенки втулки в сечении ОА.

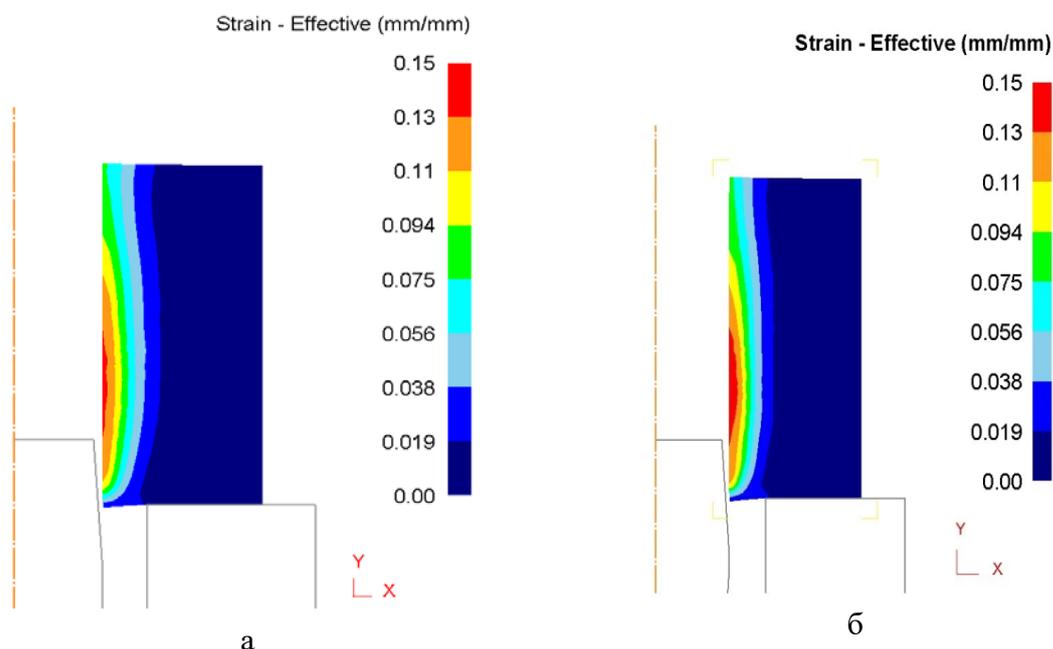


Рис. 3. Интенсивность деформаций после прохода дорна при ширине ленточки: а – 10 мм, б – 1 мм

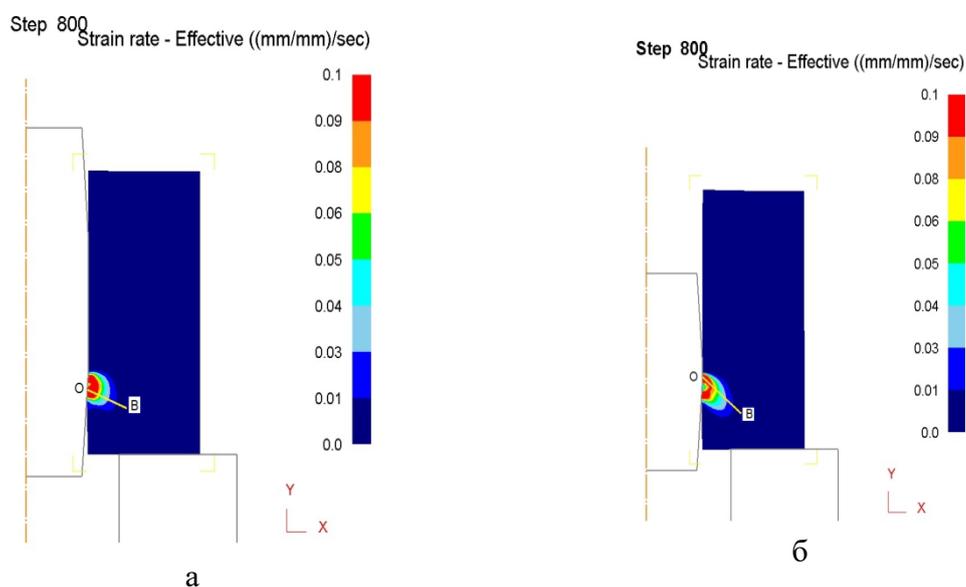


Рис. 4. Скорость деформации в очаге деформации при ширине ленточки а – 10 мм, б - 1 мм

В процессе дорнования в стенках детали образуются окружные и радиальные напряжения, которые после прохода дорна переходят в остаточные, что способствует упрочнению внутренней поверхности втулки (рис. 5). Практически при обоих размерах цилиндрической ленточки дорна величина остаточных напряжений и зона их распределения одинакова.

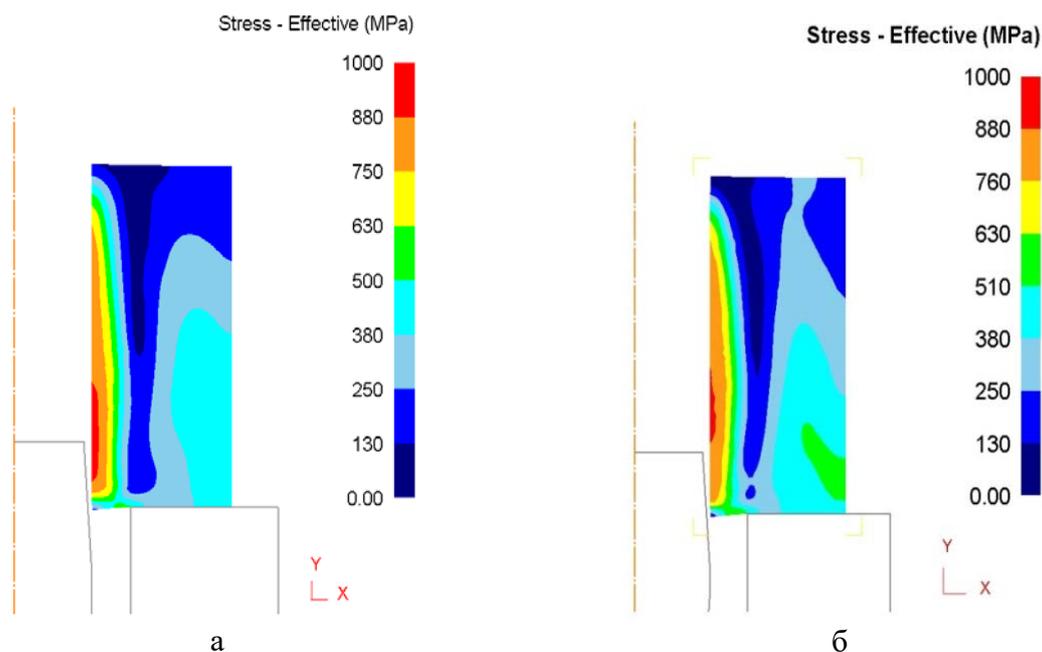


Рис. 5. Интенсивность остаточных напряжений после прохода дорна при ширине ленточки: а – 10 мм, б – 1 мм

Компьютерные исследования показали, что рост силы дорнования при увеличении ширины ленточки до 10 мм объясняется ростом площади контакта дорна и внутренней поверхности втулки и, следовательно, ростом силы трения. Показатели напряженно-деформированного состояния при обоих размерах цилиндрической ленточки практически одинаковы. Выполненный анализ показал, что для уменьшения энергозатрат на процесс дорнования и снижения силы трения рекомендуется использовать дорн с меньшей шириной цилиндрической ленточки, в данном случае 1 мм.

**Выводы.** Исследования показали, что параметры напряженно-деформированного состояния не зависят от ширины цилиндрической ленточки дорна. Ширина ленточки оказывает влияние на силу дорнования, которая увеличивается с ростом площади контакта дорна и детали. Причиной этому является наличие сил трения.

**Список литературы:** Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов // М. : Наука, 1969. – 420 с. 2. Ильющин А. А. Механика сплошной среды / А. А. Ильющин // М. : Изд-во МГУ, 1990. – 310 с. 3. Хажинский Г.М. Деформирование и длительная прочность металлов / Г.М. Хажинский // М.: Научный мир. 2008. – 136 с. 4. Скворцов, В. Ф. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра / В.Ф. Скворцов, А. Ю. Арляпов. – Томск : ТПУ, 2005. – 92 с. 5. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с. 6. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий / Ю.Ш. Проскуряков // М. : Машигиз, 1961. – 190 с. 7. Паршин В.С. Практическое руководство к программному комплексу Deform-3D / В.С. Паршин // Екатеринбург: УрФУ, 2010. - 266 с.

## СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОПОР РОТОРОВ С АВТОМАТИЧЕСКИМ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ

Савин Л.А., Шутин Д.В., Поляков Р.Н., Корнаев А.В.

(ОГУ имени И.С.Тургенева, г. Орел, Россия)

Тел.: +7 (960) 5484661; E-mail: savin3257@mail.ru

***Abstract:** The prospects for the use of elastic damping supports (EDS) of rotors with integrated functions of automatic control and active control in units of new generations are considered. The basic principles of structural and parametric synthesis of active rotor bearings are stated. The results of theoretical studies of EDS with discrete control of operating modes based on structural adaptation are presented.*

***Key words:** rotor dynamics, critical frequencies, forced and polyharmonic oscillations, motion trajectories, elastic damper supports (EDS), automated diagnostics, active control parameters control, sensor elements, actuators.*

Динамические, термомеханические и энергетические характеристики опорных узлов во многом определяют работоспособность и эффективность роторных машин. Следует отметить взаимосвязь энергетических потерь в подшипниковых узлах с колебаниями роторов, источниками которых являются различные факторы, включая нелинейность, пониженную жесткость, гидродинамические эффекты в смазочных слоях. Для снижения уровня вибраций используют динамические гасители колебаний и демпфирующие устройства. В качестве успокоителей колебаний роторов получили электромагнитные устройства, представляющие собой мехатронные системы с процессорным управлением, а также комбинированные устройства с жидкостным и сухим видом трения. Помимо различия физических процессов демпферы роторов могут быть постоянного действия или дискретного, радиальные или осевые, управляемые или неуправляемые. Демпфирующие опоры обеспечивают изменение жесткости, что приводит к снижению или росту частоты собственных колебаний системы и устранению резонансов на рабочих режимах, не позволяют развиваться большим амплитудам колебаний, динамическим нагрузкам и напряжениям в элементах агрегатов [1-3].

Одним из недостатков процесса демпфирования является высокий уровень энергетических потерь, что обуславливает целесообразность создания регулируемых демпферов, которые способны обеспечить рациональные режимы работы роторных систем путем уменьшения амплитуд колебаний и энергетических потерь во всем диапазоне скоростей вращения [5-7]. Эта возможность может быть реализована путем активного регулирования одного из параметров системы, например, давления смазочного материала, величины радиальных зазоров, использованием самонастраивающихся устройств (рис.1). В отдельную группу относят УДО с переменной структурой, в которых изменяются не только параметры, но и порядок включения элементов. Затраты энергии в системах с переменными параметрами и структурой не связаны непосредственно с колебательным процессом и осуществляются от внешнего источника.

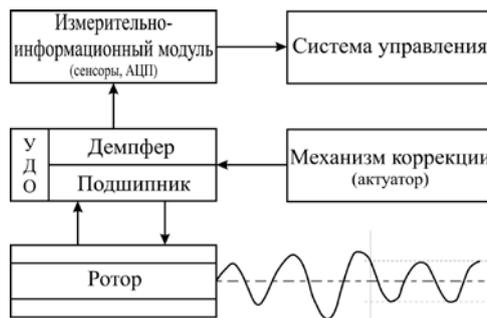


Рис. 1. Схема структуры регулируемой УДО

Авторами было предложено техническое решение [4] (рис. 2), которое позволит радикально улучшить динамику системы «ротор – опоры» путем реализации высокого уровня демпфирования в до- и зарезонансных зонах. Упругодемпферная опора ротора содержит корпус 1 с размещенным в нем подшипником 3. Движение кольца 6 обеспечивает закрепленный на корпусе исполнительный пьезомеханизм 7 поступательного движения. При запуске ротора, опора функционирует с выключенным демпфером. Вал опирается на подшипник, фиксируемый стопорным кольцом в корпусе. При достижении определенного значения частоты вращения вала возникают колебания, фиксируемые датчиком виброперемещений, в результате чего сигнал через аналогово-цифровой преобразователь передается на микроконтроллер, задающий через цифро-аналоговый преобразователь направление поступательного движения в исполнительном механизме и перемещение поджимного кольца. После этого включается в работу демпфер, позволяющий валу пройти критическую частоту вращения, снизить динамические перегрузки, добиться сужения зоны неустойчивости и переход через нее. При уменьшении скорости вращения все процессы происходят в обратном порядке.

В основу управления УДО закладывается программа изменения регулируемого параметра, в качестве которого в данном случае выбирается амплитуда вибраций ротора. Возможен вариант использования в качестве измеряемого параметра величины силового воздействия ротора на корпус. Следует также заметить, что режимы включения демпфера могут происходить не только в резонансной зоне, но и при появлении нелинейных полигармонических колебаний, в частности, параметрических, связанных с изменением поперечной жесткости вала. Правильно выбранный закон управления работой УДО позволяет минимизировать передаваемые на корпус усилия и амплитуды радиальных перемещений ротора.

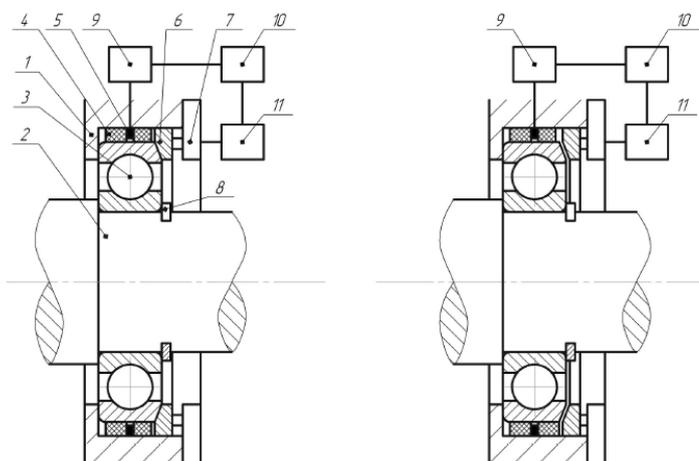


Рис. 2. Схема активной упругодемпферной опоры

Динамическая модель УДО представляет собой двухмассовый двухстепенной осциллятор, уравнения движения элементов, которого могут быть записаны

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -C_{x1} x_1 + C_{x2} (x_2 - x_1) - B_{x1} \dot{x}_1 + B_{x2} (\dot{x}_2 - \dot{x}_1); \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -C_{x2} (x_2 - x_1) - B_{x2} (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \Delta \omega^2 m_2 \cos(\omega t); \\ m_1 \ddot{y}_1 &= -C_{y1} y_1 + C_{y2} (y_2 - y_1) - B_{y1} \dot{y}_1 + B_{y2} (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - g m_1; \\ m_2 \ddot{y}_2 &= -C_{y2} (y_2 - y_1) - B_{y2} (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + \Delta \omega^2 m_2 \sin(\omega t) - g m_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_1, y_1$  – перемещение втулки демпфера в корпусе опоры ротора;  
 $x_2, y_2$  – перемещение ротора относительно корпуса упругодемпферной опоры;  
 $C_1, C_2$  – коэффициенты жесткости демпфера и подшипника;  
 $B_1, B_2$  – коэффициенты демпфирования ГДД и смазочного слоя подшипника;  
 $m_1, m_2$  – масса втулки демпфера и масса ротора;  $\omega$  – угловая скорость;  $t$  – время.  
Введем следующие безразмерные параметры и переменные:

$$\begin{aligned} \bar{X}_{1\{2\}} &= \frac{X_{1\{2\}}}{h_0}; \quad \bar{X}'_{1\{2\}} = X'_{1\{2\}} \frac{t_0}{h_0}; \quad \bar{X}''_{1\{2\}} = X''_{1\{2\}} \frac{t_0^2}{h_0}; \quad \bar{t} = \frac{t}{t_0}; \quad t_0 = \frac{2\pi}{\omega}; \\ Q &= \frac{m_2 \Delta \omega^2}{2 p_0 DL}; \quad G_{1\{2\}} = \frac{m_{1\{2\}} g}{2 p_0 DL}; \quad \bar{C}_{x1\{2\}} = C_{x1\{2\}} \frac{h_0}{2 p_0 DL}; \quad \bar{B}_{x1\{2\}} = B_{x1\{2\}} \frac{h_0}{2 p_0 DL t_0}; \\ \text{где } \Lambda_{1\{2\}} &= \frac{m_{1\{2\}} h_0}{2 p_0 DL t_0^2}; \quad \bar{X} = \frac{X_i - X_0}{h_0}; \quad \bar{Y} = \frac{Y_i - Y_0}{h_0}. \end{aligned}$$

Безразмерные параметры проекций на ось  $Y$  записываются аналогично. Система уравнений движения ротора и втулки в результате соответствующих преобразований и приведения к безразмерным параметрам будет иметь вид:

$$\begin{cases} \Lambda_1 \Delta \bar{X}_1'' = -\bar{C}_{x1} \Delta \bar{X}_1 + \bar{C}_{x2} (\Delta \bar{X}_2 - \Delta \bar{X}_1) - \bar{B}_{x1} \Delta \bar{X}_1' + \bar{B}_{x2} (\Delta \bar{X}_2' - \Delta \bar{X}_1'), \\ \Lambda_2 \Delta \bar{X}_2'' = -\bar{C}_{x2} (\Delta \bar{X}_2 - \Delta \bar{X}_1) - \bar{B}_{x2} (\Delta \bar{X}_2' - \Delta \bar{X}_1'), \\ \Lambda_1 \Delta \bar{Y}_1'' = -\bar{C}_{y1} \Delta \bar{Y}_1 + \bar{C}_{y2} (\Delta \bar{Y}_2 - \Delta \bar{Y}_1) - \bar{B}_{y1} \Delta \bar{Y}_1' + \bar{B}_{y2} (\Delta \bar{Y}_2' - \Delta \bar{Y}_1'), \\ \Lambda_2 \Delta \bar{Y}_2'' = -\bar{C}_{y2} (\Delta \bar{Y}_2 - \Delta \bar{Y}_1) - \bar{B}_{y2} (\Delta \bar{Y}_2' - \Delta \bar{Y}_1'), \end{cases} \quad (2)$$

Численное решение системы (2) позволяет определить изменение во времени положения опорной части ротора и траектории движения. Коэффициенты жесткости и демпфирования рассчитываем на основе метода возмущения как отношение сил по соответствующим координатам к изменению положения и скоростей центра ротора.

Разработанное на основе математической модели программное обеспечение построено по модульному принципу, обеспечивает надежное функционирование, быструю модификацию программного кода и имеет возможность экспортирования данных в другие программные среды. Программное обеспечение позволяет строить траектории движения центра опорной части ротора (рис. 3), на основании которых определяем амплитудно-частотные характеристики и вид колебаний ротора. Эти данные позволяют проследить изменение координат, скоростей, ускорений, действующих сил, реакций демпфера и подшипника, потерь мощности от одной точки траектории к другой.

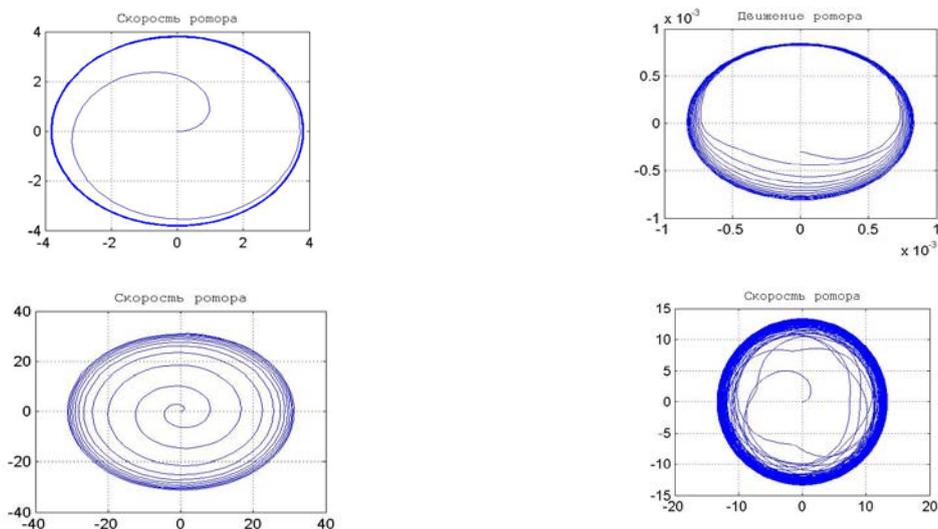


Рис. 3. Траекторий движения ротора при различных начальных условиях

Траектории движения ротора с включенным демпфером свидетельствуют о стабилизации амплитуд колебаний при старте из произвольных точек смазочного слоя. Изложенные математическая, алгоритмическая и программная модели прошли верификацию путем сравнения результатов расчета с данными физического эксперимента. Проведенный комплекс вычислительных экспериментов подтвердил возможность снижения амплитуд колебаний и энергетических потерь во всем спектре частот вращения.

Материалы доклада подготовлены в рамках выполнения проекта РНФ №16-19-00186.

**Список литературы:** 1. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с. 2. Кельзон А.С., Циманский Ю.П., Яковлев В.И. Динамика роторов в упругих опорах. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. - 280с. 3. Белоусов А.И. Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2002. – 335 с. 4. Савин Л.А., Бычков М.В., Корнаев А.В., Майоров С.В., Попиков А.А. Упругодемпферная опора ротора с активным управлением. Патент РФ № 2569208 от 30.04.2014 г. (опубл. 20.11.2015 г. (9.101.2014/К)). 5. Li, S.B., Yan, H., Jiang, H. Y., Chen, L. Analysis of dynamic performance of metal rubber damping ring applied in high-speed rotor system. Acta Physica Sinica, (2012) 61(1). 6. Santos, I. Controllable Sliding Bearings and Controllable Lubrication Principles – An Overview. Lubricants, 6(1), (2018) 16. 7. Shutin, D., Savin, L., Polyakov, R. Influence of a Control System in an Active Journal Hybrid Bearing on the Energy Parameters of its Operation. International Journal of Energy and Environment, 11, (2017) 38-41.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕТОРТ

Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Ланкин К.А., Мифтахов Р.А.

(КНИТУ, г. Казань, Россия)

Тел: +79270370333; E-mail: [vcvvc12345678@gmail.com](mailto:vcvvc12345678@gmail.com)

**Abstract:** The description of the method of production of activated carbon from wood processing waste is given. An energy- and resource-saving continuously operating unit for the production of activated carbon has been considered, which has several technological zones, which makes it possible to obtain high-quality activated carbon, ensure technological safety and achieve high-energy efficiency.

**Key words:** organic waste, processing, activated carbon, temperature deformation, calculation, strength.

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета разработана энерго- и ресурсосберегающая непрерывно действующая установка, предназначенная для производства активированного угля [1÷10]. В основу был заложен разработанный и запатентованный способ переработки древесных отходов в активированный уголь [11÷12]. Схема установки представлена на рисунке 1.

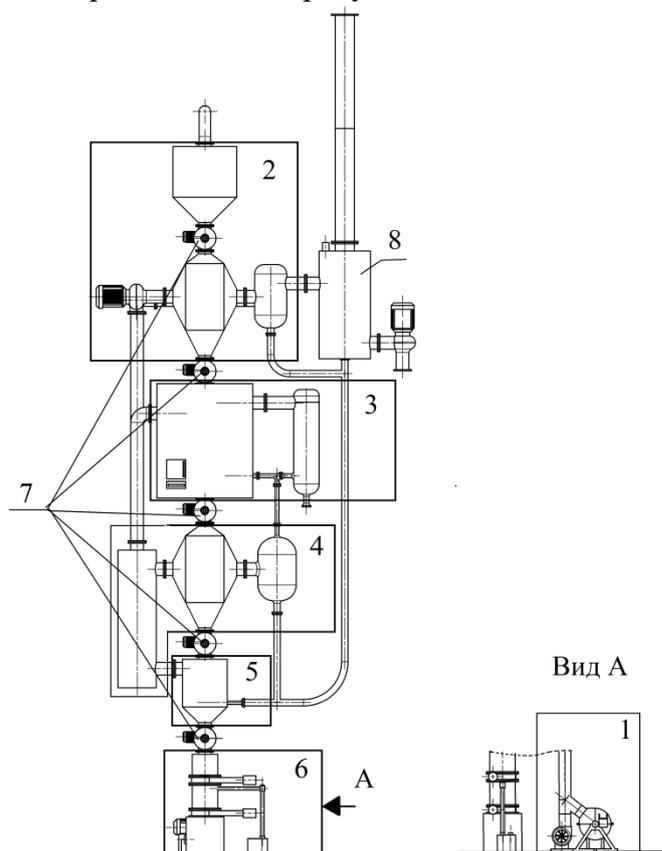


Рис. 1. Установка для производства активированного угля

требуется жесткого крепления ее узлов. Для этого реторту можно заварить в жесткий каркас. Однако анализ рабочих температур узлов установки (рис. 2) показал, что такое решение ошибочное, так как при повышении температуры будет происходить расширение металла, которое при температурах 500÷900 °С будет столь значительным, что приведет к значительным деформациям конструкции и выведет из строя установку.

Установка представляет собой вертикальную реторту. Принцип работы установки состоит в измельчении и сушки древесных отходов с их последующем термическим разложением в древесный уголь и парогазовую смесь. Уголь затем активируется и охлаждается, а неконденсируемая часть парогазовой смеси служит топливом для работы самой установки, отработанные топочные газы идут на создание перегретого пара, на процесс сушки, а затем проходят через адсорбер 8 и уходят в атмосферу.

Конструктивно установка состоит из зон: измельчения 1, сушки 2, пиролиза 3, активации 4, испарительного охлаждения 5 и вакуумного охлаждения 6. Стыковка между зонами реализована установкой шлюзовых питателей 7.

Конструкция установки

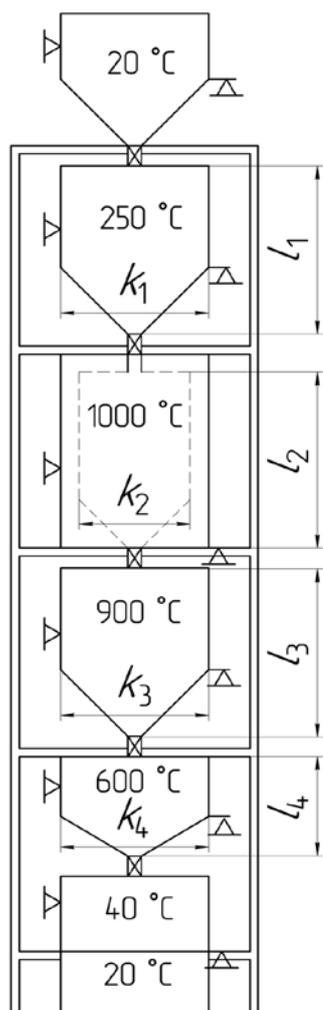


Рис. 2. Распределение температур, приводящих к деформации установки

На рис. 2 представлена схема распределения рабочих температур в установке и размеры ее элементов с учетом температурных деформаций  $\Delta l$ . Параметры камер с термическими деформациями рассчитываем по формулам:

$$l_i = L_i + \Delta l_i;$$

$$k_i = K_i + \Delta l_i,$$

где  $l_i$  и  $k_i$  – длина и ширина деформированной  $i$ -й камеры с подводящими патрубками;  $L_i$  и  $K_i$  – номинальные высота и ширина  $i$ -й камеры;  $\Delta l_i$  – температурная деформация  $i$ -й камеры.

Для определения параметров стыкующих труб и компенсаторов необходимо учитывать температурное воздействие на все элементы устройства.

Температурные деформации  $\Delta l_i$  определяем по формуле

$$\Delta l_i = \alpha(t_i - t_0)l_i,$$

где  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $t_i$  – рабочая температура камеры;  $t_0$  – начальная температура камеры.

Ввиду температурного расширения элементов конструкцию, жесткое крепление камер, использовать нельзя. Поэтому предлагается устанавливать камеры в специальные рамы, а патрубки состыковки камер с питающими и патрубки подводов и отводов газа пара сделать гофрированными.

Схема крепления камер в установке показана на рис. 3.

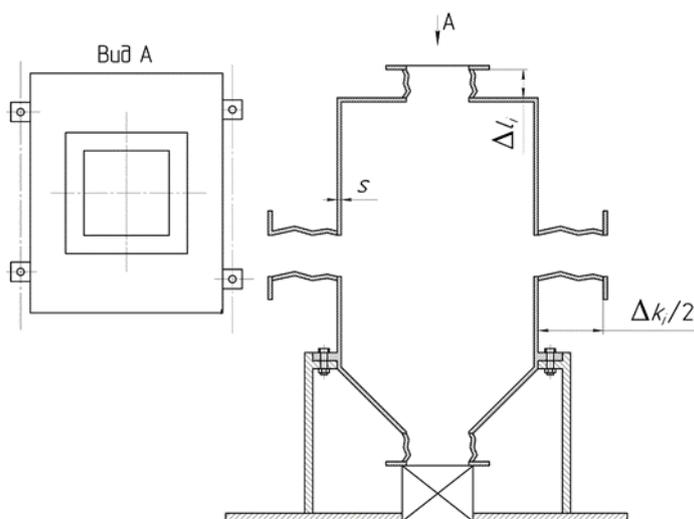


Рис. 3. Чертеж крепления камер в установке

Параметры гофрированных патрубков соответствуют удлинению элементов камеры при температурном расширении.

Для прочностных расчетов необходимо знать массу камеры, которую находим по формуле

$$m_i = S_i s_i \rho.$$

Здесь  $S_i$  – площадь поверхности камеры;  $\rho$  – плотность материала;  $s_i$  – толщина стенок:

$$s = a \sqrt{\frac{kbc}{2[\sigma]}} + k_k,$$

где  $a$  и  $b$  – длины стенок;  $c$  – высота камеры;  $\sigma$  – допустимое напряжение, Н/м<sup>2</sup>;  $k_k$  (исправить в формуле) – допуск на коррозию;  $k = 0,1 \div 0,2$  – коэффициент на форму резервуара.

Корпус камер предлагается изготавливать из стали 15Х25Т, которую можно использовать при агрессивных средах и высоких температурах (до 1000 °С). Гофрированные патрубки (У 22.21.29-001-67524681–2017) выполнены из стеклоткани и усилены металлической спиралью, их можно эксплуатировать при температурах от минус 40 до плюс 1100 °С.

**Список литературы:** 1. Ю.Л. Юрьев, В.П. Орлов, С.А. Панюта, Т.В. Штеба// Проблемы аппаратного оформления процессов переработки, измельченной древесины в активные угли//Лесной журнал. -2000. -№5-6.- С. 52-57. 2. Богданович Н.И. Адсорбенты из отходов лесопромышленных предприятий для решения экологических проблем (статья) / Изв. высш. уч. завед.. Лесной журнал, 1997, № 4, с.92-96. 3. Место активных углей в экологии и экономике, новые технологии их производства/ Мухин В.М., Курилкин А.А., Воропаева Н.Л., Лексюкова К.В., Учанов П.В. Сорбционные и хроматографические процессы 2016, том 16, №3, 346-353. 4. Р.Р.Зиатдинов, Т.О. Степанова, Д.Ф. Зиатдинова, Р.Г. Сафин, Д.А. Ахметова/ Конвективная сушка измельченной древесины перед термохимическим процессом переработки древесных материалов// Деревообрабатывающая промышленность 2019.-№1.- с.66-73. 5. Р.Р. Зиатдинов, Р.Г. Сафин, Т.О. Степанова, Д.Ф. Зиатдинова, Д.А. Ахметова, Н.М. Терехин/ Непрерывно действующая установка переработки древесных отходов в активированный уголь//Деревообрабатывающая промышленность.- 2019 г.- №4.- С. 90-98. 6. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, Д.Ф. Зиатдинова, Т.О. Степанова/ Конвективная сушка дисперсных материалов Перед термохимическим процессом переработки// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2019. Т. 21. С. 29-37. 7. Р.Г. Сафин, Т.О. Степанова, Р.Р. Зиатдинов, Д.Г. Рябушкин, В. И. Петров, В.Г. Сотников/ Конструктивный расчет пиролизной зоны установки производства активированного угля// Деревообрабатывающая промышленность. - 2020 г. -№3.- С.45-55. 8. N.F. Timerbaev, R.G. Safin, I.Yu.Mazarov, T.O. Stepanova/ Thermochemical processing of organic waste IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 643.-2019. 9. Safin, R.G., Prosvirnikov D.V., Stepanova T.O./ Processing of Renewable Wood Biomass into Thermally Modified Pellets with Increased Combustion Value//2020 Proceedings of the 5 th international Conference on Industrial Engineering: Lecture Notes in Mechanical Engineering 387. 10. Патент РФ № 2694347, 11.07.2019 МПК С 10 В 53/00. Способ получения активированного угля / Р.Г. Сафин [и др.] 11. Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиатдинов, В.Г. Сотников, Д.Г. Рябушкин, Д.Р. Гумеров/ Моделирование процесса измельчения и транспортирования органических отходов в установке производства активированного угля/Системы. Методы. Технологии. -2021.- №2. 12. Р.Г. Сафин Технологические процессы и оборудование деревообрабатывающих производств: Учебник. - 4-е изд., испр. и перераб. – Санкт-Петербург: Лань,-2020. - 752 с.

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НЕСТАЦИОНАРНЫХ РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

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

**Abstract:** *The regularities of the formation of the reliability of internal combustion engines, taking into account the temperature and power conditions of operation, are investigated. The necessity of clarifying the provisions of the theory of dimensional circuits for an adequate prediction of engine performance is shown.*

**Key words:** *Accuracy, size, technology, machine quality, assembly, interchangeability.*

Современное машиностроение характеризуется непрерывным ростом требований к повышению точности изделий. Отклонение выходных параметров механизмов от заданного закона движения, характеризующие его точность, обусловлены, в частности, погрешностями изготовления, следствием которых являются первичные ошибки. К ним относятся неправильности расположения элементов кинематических пар в звеньях, отклонения форм этих элементов, погрешности размеров звеньев и т.д.

Особый интерес представляют исследования точности механизмов в условиях серийного изготовления по единому конструкторскому и технологическому проектам. При этом одноименные первичные ошибки в партии механизмов становятся случайными величинами или функциями. Линейная теория точности, основоположником которой является Н. Г. Бруевич [1], не позволяет считать окончательно решенной задачу исследования точности.

Двигатели внутреннего сгорания являются основным типом двигателей, применяемых в большинстве отраслей. Их характерной особенностью является то, что рабочий процесс, осуществляемый в цилиндрах двигателя, и особенности кинематики механизма, преобразующего возвратно-поступательное движение во вращательное, являются мощными возбудителями динамических воздействий на большинство деталей: крутильных колебаний, деформаций сжатия и изгиба и термического влияния. Возникновение газовых и инерционных возмущающих сил по углу поворота коленчатого вала определяет появление нескольких резонансных зон в эксплуатационном диапазоне, приводящих к существенному колебанию рабочих нагрузок в пределах одного цикла.

Усугубляет эти факторы естественный разброс геометрических характеристик основных функциональных узлов, определяемый как конструктивными недоработками, так и особенностями взаимодействия составных частей этапе сборки, что приводит к значительным колебаниям внутренних сил в однотипных деталях и, соответственно, к их неравнопрочности и недостаточной надежности, а также снижению надежности.

В процессе эксплуатации происходит упругое деформирование силовых элементов, изменение их размеров вследствие износа, податливости подшипников скольжения, что уменьшает вероятность достижения расчетных показателей надежности и эффективности работы.

Таким образом, достижение высокой экономичности и надежности работы ДВС требует тщательного учета этих факторов, что возможно на основе анализа размерных взаимосвязей в основных кинематических цепях с учетом реальных динамических процессов в стыках деталей, изучения закономерностей этих физических процессов, технологического обеспечения требуемого качества деталей и узлов.

Работа большинства двигателей внутреннего сгорания в условиях эксплуатации характеризуется резкими и частыми сменами режимов. В наибольшей степени это относится к двигателям тракторных, строительно-дорожных, автомобильных и других машин. В эксплуатационных условиях крутящий момент и частота вращения коленчатого вала непрерывно изменяются в весьма широких пределах [2].

Резкие и частые изменения режимов работы двигателей оказывают отрицательное влияние на характер протекания процессов в цилиндрах, функционирование вспомогательных агрегатов и механизмов. В результате ухудшаются эффективные и экономические показатели работы двигателей. Характер этих отклонений определяется условиями появления переходных процессов, степенью приспособленности двигателя к ним, особенностями всей конфигурации изделия конечного назначения.

Основным этапом проектирования механизмов и машин является кинематический анализ, на котором определяются положения точек и звеньев, их скоростей и ускорений. Отличительной особенностью ДВС и обязательным условием работы является наличие нескольких открытых кинематических цепей, к которым относятся кривошипно-шатунный механизм (КШМ), газораспределительный механизм (ГРМ) и механизмы систем рабочего импульса (РИ), в качестве которых могут быть: система впрыскивания топлива или система распределения зажигания в карбюраторных двигателях. В процессе проектирования и регулировки таких машин важным элементом является согласование законов движения выходных звеньев и взаимного положения их конечных точек. Сказанное относится к координации положений верхней головки поршня, контактной точки клапана и исполнительного органа рабочего импульса, к которым относится клапан форсунки или бегунок распределителя зажигания.

На качество работы реальных машин и механизмов влияют зазоры в кинематических парах привода и упругость звеньев. В длинных кинематических цепях эти факторы проявляются весьма значительно. Уменьшить эти ошибки можно за счет использования систем обратной связи, которые применяются в современных двигателях внутреннего сгорания зарубежных конструкций посредством использования самоподнастраивающихся узлов с микропроцессорным управлением.

Все задачи теории точности механизмов являются многомерными, т.е. такими, у которых эксплуатационных и служебных характеристик несколько. Даже если имеется одна выходная характеристика, указанная в чертеже, технических условиях или стандарте, то даже без указания в технической документации изделия подразумеваются определенные требования к надежности изделия в целом. Классифицировать задачи анализа и синтеза точности объектов по числу входных параметров, возмущений и выходных характеристик можно как [3]:

- одномерные;
- множественные;
- многомерные.

Обычно при решении расчетных задач теории точности подразумевают некоторые условия работоспособности, сохраняющиеся в течение длительного времени. К их числу можно отнести:

- зависимости, используемые для расчета допусков, предельных отклонений и отклонений средних, которые учитывают все существенные для работы изделия входные и возмущающие факторы;
- количественные значения внешних и внутренних возмущений в период использования показателей точности остаются неизменными, или же их изменения пренебрежимо малы по своему влиянию на работу изделия или системы.

Малые отклонения формы, взаимного расположения поверхностей, осей и образующих, кромочные эффекты и другие факторы и возмущения малой величины исчезают в первоначальный период работы изделия, в течение которого характерная для механизмов происходит приработка, гистерезис (характерный для некоторых упругих элементов) или другие подобные явления. Этот период можно назвать периодом становления системы.

Известны три группы источников вариации качества:

- внешние, которые зависят от вариации условий окружающей среды;
- внутренние, обусловленные старением, износом и т. п.;
- производственные, приводящие к различию между единицами продукции даже внутри одной партии продукции.

Влияние на первые две группы источников можно оказать только в процессе проектирования. Основным источником силового нагружения деталей кинематических цепей ДВС являются давление газов и инерционные силы, которые вызывают деформации сжатия деталей, прогиб коленчатого вала, выборку зазоров в подвижных соединениях и пр. Наибольшее влияние они оказывают на величину рабочего зазора в камере сгорания, а также на динамическое рассогласование кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов. Поэтому расчетам влияния силовых воздействий подлежат размерные цепи, определяющие их общее замыкающее звено.

В процессе сборки ДВС формируется множество функциональных взаимосвязей составных частей, определяющих качество функционирования и долговечность эксплуатации. Наибольшее значение оказывает характер увязки различных функционально связанных составных частей и, в частности, кривошипно-шатунного механизма и цилиндропоршневой группы [4]. Одним из геометрических параметров точности, оказывающим влияние на процесс изнашивания узла сочленения шатуна с поршнем является размер между осями поршня и головки шатуна.

В общем случае при работе многосвязных механизмов и машин на детали действует сложный комплекс нагрузок, связанных с реализацией рабочего цикла, инерционными силами, воздействием технологических сред, сопровождающих рабочий процесс. В результате естественного физико-механического износа происходит изменение размеров подвижных сопряженных поверхностей, что в свою очередь вызывает нарушение кинематического баланса механизма, заложенного в конструкцию и реализующего рабочий процесс. Непостоянство рабочих усилий при различных режимах работы и жесткости деталей в различных их положениях приводит к достаточно существенному изменению размеров деталей.

В целях повышения точности функционирования машин, необходимо аналитически учитывать причины и следствия воздействия всего спектра эксплуатационных нагрузок. При работе двигателей внутреннего сгорания традиционных конструкций одним из основных факторов нарушения расчетных характеристик является появление упругих деформаций в основных системах, совместно обеспечивающих эффективность рабочего цикла. Для определения параметров, характеризующих величину рассогласованности совместной работы различных систем, необходимо иметь сведения об отклонениях реальных точек выходных исполнительных органов от соответствующих номинальных. Обычно при расчете отклонений, вызываемых упругими отжатами выходных звеньев, используют понятие податливости, которую по вполне обоснованным допущениям можно считать изотопной [5]. Такое допущение должно давать удовлетворительную схожесть расчетных и экспериментальных данных, поскольку главные направления перемещений исполнительных органов совпадают с направлениями вызывающих их сил, а границы эпюр податливостей незначительно отличаются от окружностей. Если принять, что основные узлы ДВС работают в пределах упругих

деформаций, подчиняющихся закону Гука, то границы эпюр податливостей узлов в общем случае можно аппроксимировать эллипсами. При этом большие и малые полуоси могут различаться совсем незначительно, однако их направление может не совпадать с направлением действующих сил.

Проведенный анализ эксплуатационных факторов показал, что обеспечение надежной работы двигателей внутреннего сгорания должно базироваться на максимально полном их учете всех в процессе конструкторского проектирования. Основой данного проектирования является размерный анализ конструкции, который представляет собой выявление геометрических взаимосвязей деталей и базируется теории размерных цепей, основные положения которой разработаны Б.С. Балакшиным [6]. Несмотря на то, что данная теория явилась важным научным открытием, она не лишена ряда недостатков, основными из которых являются:

- рассмотрение деталей как абсолютно твердых тел, к которым полностью применимы законы статики, рассматривающей тела как материальные точки;
- рассмотрение детали как «куска материала», ограниченного геометрически правильными поверхностями и не имеющего различий в свойствах во всех направлениях;
- необходимость и достаточность шести связей, несмотря на то, что они не имеют физических аналогов, и не позволяют в большинстве случаев обеспечить полную стабильность положения под действием технологических и эксплуатационных нагрузок;
- использование ограниченного комплекта базирующих поверхностей, не позволяющего практического обеспечения эксплуатационных свойств и приводящего к появлению избыточности базирования;
- неучитывание динамического характера работы, выражающегося в изменчивости рабочих режимов и соответствующих изменениях температурных и силовых воздействий на детали кинематической цепи, наличии мертвых ходов, шаткостей и прочих проявлений.

Анализ основных размерных связей двигателей внутреннего сгорания с учетом указанных эксплуатационных воздействий показал, что использование стандартизованного в настоящее время подхода к их расчету не может обеспечить создания конкурентной продукции вследствие большого количества условностей в их использовании, малой точности в условиях функционирования. Необходимо более полно учитывать эксплуатационные нагрузки, особенности реального базирования деталей, весь спектр производственных погрешностей макро и микроуровня, особенности контактирования деталей.

**Список литературы:** 1. Фундаментальные проблемы теории точности/ Под ред. В. П. Булатова, И. Г. Фриндлендера. – СПб.: Наука, 2001. – 504 с. 2. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник/ А. К. Костин и др. –Л.: Машиностроение. Ленигр. отд-ние, 1989. – 284 с.: ил. 3. Сергеев В. И. Проваторова Е. А. Актуальные вопросы точности и параметрической надежности кинематических цепей// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1998. – №5. – С. 31 – 41. 4. Назаров А. Д., Ризаев А. М. Расчет зазоров между гильзой цилиндра и головкой поршня двигателей// Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – №12. – С. 130- 136. 5. Сарбанов С. Т. Методика определения упругих отжатию жестких деталей сложной формы// Изв. вузов. Машиностроение. – 1978. – №11. – С. 141- 143. 6. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения: В 2 – х кн. – М.: Машиностроение, 1982.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И СВОЙСТВА ДЕМПФИРУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ ЦИНК–АЛЮМИНИЙ

Скворцов А.И. (ВятГУ, г. Киров, Россия)

Тел. +7 (8332) 74-24-91; E-mail: skvorcov@vyatsu.ru

**Abstract:** *The properties and structure of zinc–aluminum-based alloys are studied. The advantage of the ZA26 alloy in comparison with the known alloys based on zinc, aluminum in terms of physical and mechanical properties and corrosion resistance is shown.*

**Keywords:** *Alloys based on the zinc–aluminum system, properties, structure, heat treatment.*

### Введение

Информация [1] о высоких демпфирующих свойствах сплавов системы Zn–Al определило направление их практического применения в качестве демпфирующих. Развитие изучения этих сплавов было осуществлено, в частности, в работах [2–5].

Цель работы – изучение свойств и структуры в зависимости от способа обработки сплавов на основе цинк–алюминий с целью их практического использования в качестве виброшумопоглощающего материала технических изделий.

### Результаты исследования и их анализ

В результате изучения сплавов на основе цинк–алюминий методами амплитудной зависимости внутреннего трения, металлографии, рентгеноструктурного анализа, исследования физико-механических свойств, коррозионной стойкости установлены, в частности, следующие закономерности.

В литом состоянии насыщение демпфирующей способности в сплавах Zn–Al происходит вблизи содержания алюминия в сплаве 22 % (здесь и далее % – массовые).

Закалка сплавов Zn–Al от температуры, существенно превышающей температуру монотектоидного превращения 275 °С, резко повышает демпфирующую способность сплавов с содержанием Al = 16 – 49 %. Закаленное от 300 °С состояние характеризуется также тем, что увеличение содержания алюминия в сплаве от 23 до 63 % ведет к увеличению содержания остаточной при комнатной температуре  $\alpha'$ -фазы, и это сопровождается повышением твердости, ослаблением низкоамплитудного внутреннего трения.

Старение снижает демпфирующую способность сплавов. В частности, низкотемпературное стабилизирующее старение (при 90 °С) ослабляет низкоамплитудное внутреннее трение и повышает твердость преимущественно из-за выделения в структуре дисперсных частиц. Самая низкая демпфирующая способность сплавов наблюдается после старения при субкритических температурах и после отжига.

Эффективно на повышение демпфирующей способности сплавов монотектоидного типа влияет степень дисперсности монотектоида. Ее увеличение за счет повышения скорости охлаждения от температуры, превышающей 275 °С, ведет к повышению демпфирующей способности сплава. Этим и объясняется резкое повышение демпфирующей способности сплавов после закалки, в частности, от 300 °С. А увеличение демпфирующей способности при повышении содержания цинка и ее насыщение в области содержания 22%Al в закаленных сплавах объясняется увеличением количества монотектоида и выходом его на насыщение вблизи содержания 22%Al.

Сплавы цинк–алюминий монотектоидного типа отличаются прямой зависимостью демпфирующей способности от температуры испытаний вплоть до температуры чуть ниже линии солидуса в отличие от известных демпфирующих

сплавов на основе меди, марганец–медь, никель–титан, демпфирующая способность которых резко снижается при температурах  $100\pm 50$  °С в связи с фазовым превращением.

При практическом использовании сплавов цинк–алюминий, подвергаемых закалке, необходимо учитывать степень их размерной стабильности. Так, например, закаленный сплав Zn–23%Al в результате старения при комнатной температуре изменяет свои размеры в течении двух суток. Поэтому сплавы необходимо подвергать старению.

Оптимизация соотношения содержания цинка и алюминия, легирования, модифицирования сплавов цинк–алюминий улучшает ряд свойств, а также комплексные показатели физико-механических свойств, учитывающих демпфирование. В Проблемной лаборатории демпфирующих материалов Вятского государственного университета разработан сплав ЦА26. Из таблицы видно, что сплав ЦА26 превосходит известные сплавы на основе цинка, алюминия по комплексному показателю физико-механических свойств, учитывающего демпфирование,  $\delta\sigma_{0,2}E/\rho$ , а также обладает достаточно большой пластичностью и хорошей коррозионной стойкостью.

Таблица 1. Свойства сплавов на основе цинка и алюминия

Свойства, показатели*	ЦА26	ЦА22	ЦА4М1	АК7Ц9	ZA27**
$\delta$ , % ( $\gamma=10^{-4}$ )	5–6	8–9	0,2–0,4	0,03–0,05	0,8–1,4
$\sigma_{0,2}$ , МПа	240–260	120–140	170–220	180–200	310–330
$\Delta\varepsilon/\varepsilon$ , %	20–65	80–110	2–4	1–2	3
$\delta\sigma_{0,2}E/\rho$ , (МН) <sup>2</sup> (кг·см)	2,4–2,7	1,7–2,1	0,08–0,09	0,013–0,02	0,4–0,7
П, $10^{-2}$ мм/год	3,3	3,6	5,4	3,7	-

\*  $\delta$  – логарифмический декремент,  $\gamma$  – амплитуда деформации при крутильных колебаниях,  $\Delta\varepsilon/\varepsilon$  – относительное удлинение, E – модуль упругости,  $\rho$  – плотность, П – скорость коррозии в 3% водном растворе NaCl.

\*\* по данным работ [6, 7].

О достаточно высокой технологичности при литье сплавов Zn–Al монотектоидного типа можно судить по рисунку, на котором показаны заготовки деталей электромеханизмов, полученные литьем под давлением.

### Выводы

Разработанный сплав на основе цинк–алюминий, по составу соответствующий области вблизи монотектоидной концентрации, ЦА26 наряду с хорошими технологическими свойствами (высокими пластичностью, жидкотекучестью) обладает высокой демпфирующей способностью, удовлетворительными механическими свойствами, стоимостью, относительно невысокой для цветного сплава. Эти достоинства являются показателем перспективности сплавов такого типа в качестве демпфирующего материала для динамически нагруженных изделий.

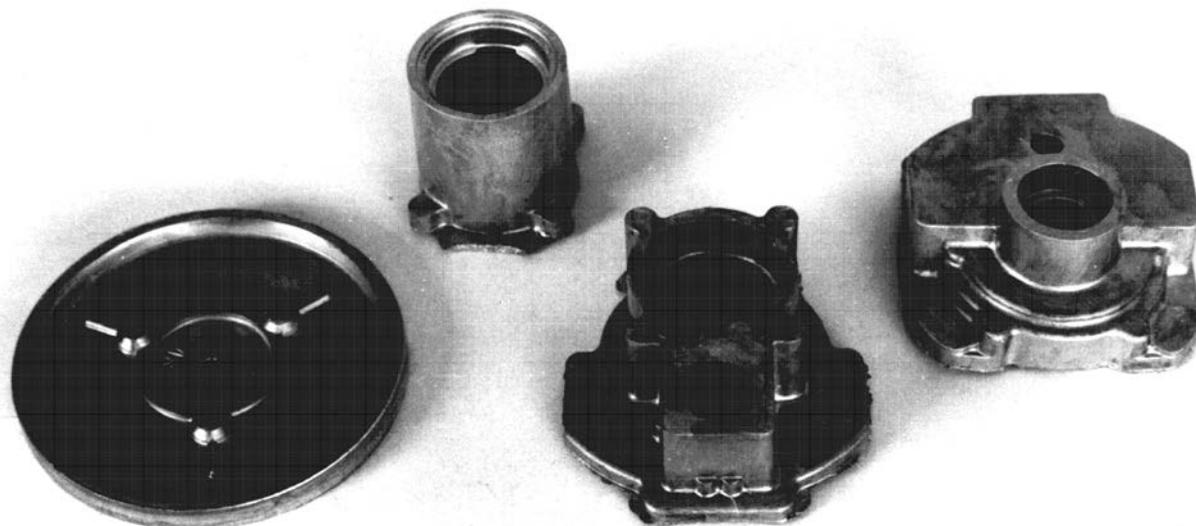


Рис. 1. Заготовки деталей электромеханизмов из сплавов Zn–Al монотектоидного типа, полученные литьем под давлением

**Список литературы:** 1. Nowick A.S. Anelastic effects arising from precipitation in aluminium-zinc alloys // *Journal of Applied Physics*. 1951. V. 22, № 7. P. 925–933. 2. Tagamai M., Ohtani T., Usami T. Effects of heat treatment, contents of Cu and Mg, and rolling reduction on the damping capacity and mechanical properties of Zn–Al alloy // *J. Japan Institute Light Metals*. 1988. V. 38. P. 107–113. 3. Скворцов А.И. Демпфирующие и механические свойства сплавов цинк–алюминий // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1991. № 1. С. 118–122. 4. Скворцов А.И., Полев В.В. Разупрочнение и упрочнение металлов и сплавов системы Al–Zn при пластической деформации // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 8. С. 31–36. 5. Скворцов А.И., Мельчаков М.А., Сергеева А.В., Козлов В.А. Влияние пластической деформации и старения на амплитудную зависимость внутреннего трения и структуру демпфирующего сплава ЦА27 // *Технология металлов*. 2020. № 5. С. 54–57. 6. Goldenstein H., Cunha Flores DA/D, Braga P., Fuoco P. As ligas zinco–aluminio: características gerais e alguns resultados de resistencia ao desgaste // *Metalurgia-ABM*. 1987. V. 43, № 6. P. 97–102. 7. Rithie J.G., Pan Z-L, Goodwin F.E. Characterization of the damping properties of die-cast zinc–aluminium alloys // *Metallurgical Transaction A*. 1991. V. 22A, № 3. P. 617–622.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА И НЕФТИ

Степанова Е.А., Рахимов Ю.Г.

(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)

E-mail: [len\\_sta@rambler.ru](mailto:len_sta@rambler.ru); [blabomth8@gmail.com](mailto:blabomth8@gmail.com)

**Abstract:** A comparative analysis of the types of separators. The advantages and disadvantages of each are given.

**Keywords:** oil and gas, purification, decontamination, oil dehydration, separator.

### Введение

Очистка и обработка пластовой жидкости или природного газа после добычи на месторождении играет ключевую роль в нефтегазовой промышленности. Зачастую это система процессов, направленных непосредственно на очистку, дегазацию и обезвоживание нефти, добытой из-под земли. Пластовая жидкость представляет из себя состав пластовой воды (до 80%), попутный нефтяной газ, твердые частицы горных пород и непосредственно сами углеводородные соединения.

Пластовая вода представляет из себя подземные воды, сильно обогащенные минеральными соединениями вплоть до 300 г/л. Так же вместе с ней, вытесняются и закаченные в скважину поверхностные воды, необходимые для поддержания пластового давления на нефтяных залежах. Нефтяной газ по своей сути является смесью газов, состоящей из метана, этана, пропана, бутана и изобутана. Он так же содержит в себе различные высокомолекулярные жидкости вроде пентанов, фенолформальдегидных смол и других. Среди твердых частиц коллекторами нефти и газа выступают такие породы, как, терригентные (различные пески, алевролиты, песчаники, алевролиты и некоторые глинистые породы), карбонатные (известняки, мел или доломиты), вулканогенно-осадочные и кремнистые. Необходимо выделять углеводородные соединения (нефть) и попутный нефтяной газ.

Нефтегазовый сепаратор – это важнейший тип оборудования, применяемый в нефтяной и газовой промышленности для разделения газовых и жидкостных сред.

Существует несколько видов сепараторов, созданных каждый под свои задачи. По характеру действующих сил: гравитационные; инерционные; центробежные; смешанного типа. По форме и положению в пространстве: цилиндрические (горизонтальные, вертикальные и наклонные); сферические.

Горизонтальный трёхфазный сепаратор типа НГСВ показан на рис. 1. Процесс сепарации в трёхфазном сепараторе можно разделить на четыре фазы.

Основная сепарация. Предназначена для предварительного отделения газа во время прохождения им входной секции. Представляет из себя ввод газожидкостной смеси в аппарат через входной штуцер оборудованный специальной перегородкой, которая изменяет направление движения жидкости.

Стадия осаждения. В процессе турбулентного движения смеси, газ, как самая легкая фракция, поднимается вверх резервуара. Вода, как самая тяжелая фракция осаждается в специальной емкости расположенной внизу цилиндра.

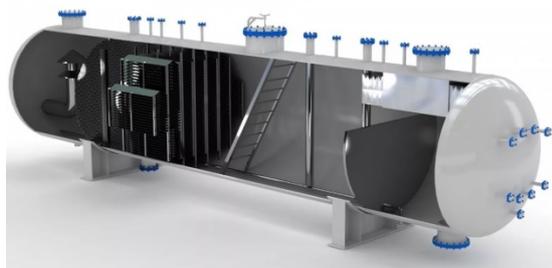


Рис. 1. Сепаратор трёхфазный НГСВ в разрезе

дрического корпуса. Нефть же, как средняя по тяжести среди трёх, фракция, переваливается через специальную перегородку, расположенную в центре корпуса, во вторую его половину, где осуществляется ее накопление.

Стадия сбора жидкости. Вода удаляется через нижний штуцер из аппарата по мере накопления, а отсепарированный нефтяной продукт, по мере его накопления, выводится сливным штуцером расположенным в задней части корпуса.

Стадия заключительного очищения газа. Очищенный газ проходит через специальное каплеотбойное устройство – демистер, для окончательного осушения и удаления оставшейся влаги.

Достоинства горизонтальных трёхфазных сепараторов: простота конструкции; простота сборки; высокий КПД; автономность.

Недостатки горизонтальных трехфазных сепараторов: горизонтальные сепараторы не столь эффективно работают с потоками, содержащими механические примеси. В линии с таким сепаратором необходимо размещать аппараты для дальнейшей очистки от твердых частиц (фильтры, отстойники и т.д.). Сепаратор должен быть оборудован несколькими дренажными линиями, проведенными по всей его длине. Это необходимо для того чтобы выводить из аппарата осевшие на дно твердые частицы. Сепараторы занимают большую площадь, чем вертикальные с такой же производительностью.

Вертикальные центробежные сепараторы СЦВ предназначены для более глубокой очистки газожидкостного потока от твердых частиц (различных примесей). Внешний вид СЦВ показан на рис. 2.

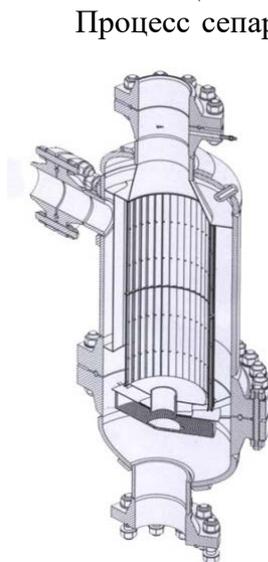


Рис. 2. Вертикальный центробежный сепаратор в разрезе

Процесс сепарации в подобном СЦВ во многом схож с трёхфазным сепаратором, однако все же есть некоторые отличия. Здесь, как и в предыдущем случае, существуют четыре фазы сепарации. Если первая и четвертая фазы фактически ничем не отличаются, то вторая и третья в своей сути основываются не на принципе осаждения жидкости за счет разности плотностей, а на принципе отбрасывания центробежной силой капель жидкости на стенки корпуса сепаратора, чтобы они далее, под действием гравитационных сил газового потока, нисходящей спиралью транспортировались вниз, проходя через кольцевой зазор, располагающийся внизу установки, к сливному штуцеру. Газ же, в верхней, суженной части дефлектора ударяется о дугообразную пластину, направленную по отношению к горизонтали под прямым углом. В результате чего газовый слой, вращающийся непосредственно по внутренней поверхности лопастей барабана, разделится на три слоя со своими векторами осевых скоростей: непосредственно у стенки направлен вниз, далее промежуточный слой, который называется «неподвижный» и следующий третий основной слой, направленный вверх.

Достоинства вертикальных центробежных сепараторов: высокая степень сепарации газа, вплоть до 99%; очистка от механических примесей; меньше занимает места по сравнению с горизонтальным сепаратором при той же производительности.

Недостатки вертикальных центробежных сепараторов: сложность конструкции и проектировки; сложность сборки подобного сепаратора по месту; высокая стоимость из-за реализации крутящегося лопастного барабана.

Существуют специальные горизонтальные сепараторы для очистки только газа на газовых и газоконденсатных скважинах. Такие сепараторы называют ГС – газовый сепаратор. Схематичное изображение ГС представлено на рис. 3.

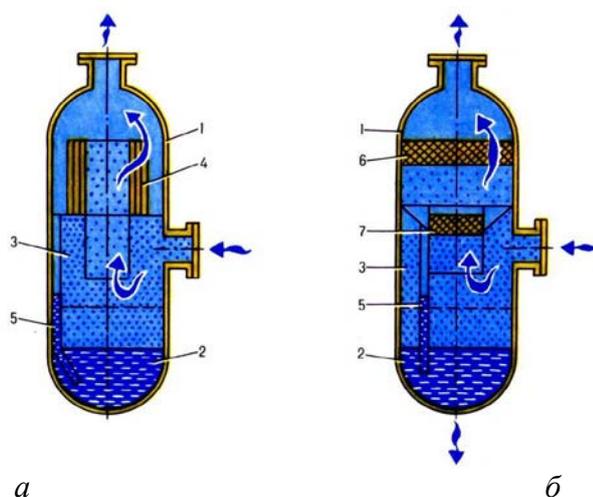


Рис. 3. Схемы гравитационно-инерционного с жалюзийной насадкой (а) и гравитационно-инерционного с сетчатой насадкой (б) газовых сепараторов: 1 - корпус, 2 - сборник жидкости, 3 - секция предварительной (гравитационной) сепарации, 4 - кольцевая жалюзийная насадка, 5 - сливная труба с гидрозатвором секции тонкой сепарации, 6 - сетчатая насадка, 7 - сетчатый коагулятор

Принцип его работы основывается на многократном отклонении потока газа при помощи специальных насадок, которые могут быть выполнены из металлических пластин различной конфигурации, различных фильтрующих материалов и коалесцирующих набивок.

Гравитационно-инерционный газовый сепаратор, помимо перечисленных выше качеств также создан для защиты запорно-регулирующей арматуры и газоперекачивающего оборудования от капельной влаги, углеводородного конденсата и механических примесей. Хотя он и прост в производстве, его существенный недостаток – высокая металлоемкость, а также громоздкость.

**Список литературы:** 1. Горная энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия. Под редакцией Е. А. Козловского. 1984 - 1991. 2. Каспарьянц К.С. Процессы и аппараты для объектов промышленной подготовки нефти и газа. - Москва: «Недра». - 1977 г - 78 с. 3. Шевелев Т.Г. Сооружение и эксплуатация объектов подготовки и хранения углеводородного сырья. - Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела ТПУ, 2004 - 206с. 4. Синайский Э.Г., Лапига Е.Я., Зайцев Ю.В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. - М.: Недра, 2002. - 622с. 5. Гуревич Г.Р., Карлинский Е.Д. Сепарация природного газа на газоконденсатных месторождениях. - М., Недра, 1982. -- 197 с. 6.Тронов В.П. Сепарация газа и сокращение потерь нефти. - Казань: «Фен», 2002. -- 408 с. 7. Разделительное и сепарационное оборудование. Каталог. -- М., ОАО «Курганхиммаш», 2012.

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ТОЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Тюрин А.Н. (ЗКИТУ, г.Уральск, Республика Казахстан)

т. 8 777 563 46 17, email [turin56@mail.ru](mailto:turin56@mail.ru)

***Annotation.** The most important task of precision machining at the present stage is the development of more efficient technological processes for the production of details that ensure not only the achievement of high accuracy while minimizing the cost of storage, but also the maintenance.*

*One of the main factors leading to the reduction of primary accuracy of details is the relaxation of residual stresses. The increase in the deviations of their forms, caused by the relaxation of the stresses, inevitably leads to a reduction in reliability and a reduction in the service life of the machine, a reduction in their operational properties.*

*This article considers one of the areas of improvement of technological processes in the production of precision machinery, which can allow to compete with the production of products in the world market.*

**Keywords.** Relaxation of residual stresses, burning, aging, ultrasonic relaxation.

В своем послании «Стратегия «Казахстан-2050» - новый политический курс состоявшегося государства» глава государства, внес коррективы в планы научных, проектных и внедренческих работ с целью более эффективного использования бюджетных средств выделяемых на проведение научных исследований и получения действительно прорывных результатов по различным направлениям.

Машиностроение является важнейшей отраслью экономики любого индустриального развитого государства. Производя всевозможное оборудование, машины станки, приборы, а также товары для населения, машиностроение обеспечивает стабильность деятельности агропромышленного комплекса, энергетического и металлургического секторов, транспорта и других ключевых отраслей экономики.

Устойчивое развитие и надежность функционирования машиностроения во многом определяют энергоемкость и материалоемкость экономики, производительность труда, уровень экологической безопасности промышленного производства и, в конечном итоге, экономическую и военную безопасность страны.

Развитие конкурентноспособного машиностроения невозможно без модернизации производства и внедрения инноваций.

Ни в одной отрасли промышленности внедрение прогрессивных технологий и новой техники не дает столь быстрых и весомых результатов, как в машиностроении. На окупаемость затрат на внедрение прогрессивных технологий требуется 1,5-2 года, а затраты на новое производственное оборудование окупаются за 2-2,5 года. Кроме того, эффекты, получаемые от внедрения прогрессивных технологий, обеспечивают повышение качества выпускаемой продукции и улучшение экологических характеристик машиностроительного производства.

В данной статье рассматривается одно из направлений совершенствования технологических процессов производства продукции точного машиностроения, которые могут позволить конкурировать производимой продукции на мировом рынке. Важнейшей задачей точного машиностроения на современном этапе является разработка более эффективных технологических процессов изготовления деталей, обеспечивающих не только достижение высокой точности при минимуме затрат, но и сохранение первоначальных показателей точности в течение всего срока службы изделия.

Одним из основных факторов, приводящих к снижению первоначальной точности деталей, является релаксация остаточных напряжений. Увеличение отклонений их формы, вызываемое релаксацией напряжений, неизбежно приводит к снижению надежности и уменьшению срока службы машин, снижению их эксплуатационных свойств.

Особенно остро проблема стабилизации геометрических параметров стоит перед производством подшипников качения классов точности 6 и выше, шеек коленчатых и распределительных валов и других подобных деталей, которые, широко используются в различных машинах и агрегатах в том числе и военного назначения. Даже незначительное изменение размеров в течение определенного интервала времени приводит к резкой потере точности этих изделий, а затем и машины в целом.

Чтобы избежать потери качества изделий в процессе эксплуатации, осуществляют релаксацию остаточных напряжений в процессе изготовления изделий. Из известных способов уменьшения или устранения остаточных напряжений и стабилизации размеров для прецизионных деталей точных приборов наибольшее применение имеет термическая обработка - отжиг и старение.

Основными недостатками существующих технологий релаксации являются следующие:

- а) их низкая производительность;
- б) большие затраты энергии;
- в) длительность цикла обработки;
- г) необходимость использования дорогостоящего оборудования (печей) для осуществления обработки;
- д) большие потребные производственные площади;
- е) сложность достижения заданного качества обработки, так как требуется жестко использовать необходимый режим обработки, иначе в некоторых случаях термическое воздействие на упруго нагруженный материал может вновь вызвать возникновение остаточных напряжений, особенно у изделий сложной формы и при ускоренном нагреве и последующим охлаждении.

Ученые и специалисты Западно-Казахстанского инновационно – технологического университета, Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина и АО «НИИ «Гидроприбор» исследовали различные способы снижения остаточных напряжений: термические, криогенные, механические и ультразвуковые. Свой выбор исследователи остановили на ультразвуковых способах снижения остаточных напряжений как наиболее перспективных.

Установлено, что при обработке ультразвуковыми колебаниями металла, содержащего дислокации, энергия ультразвуковой волны преимущественно поглощается дислокациями и преобразуется в энергию перемещения этих дислокации. Это вызывает развитие внутри зерен металла дополнительной дислокационной деформации, которая будет способствовать пластическим сдвигам, способствующим уменьшению уровня остаточных напряжений [1], [2], [3]. По сравнению с традиционной обработкой, построенной на основе низкотемпературного термического отпуска, ультразвуковая релаксация остаточных напряжений имеет следующие преимущества (Табл.1):

- а) обеспечивает более высокое качество обработки: по сравнению с термоотпуском остаточные напряжения снижаются в 1,4 раза, стабилизируются размеры деталей, овальность деталей снижается в 1,6 раза, отклонение от круглости – в 1,5 раза, волнистость – на 44%, повышается твердость деталей и существенно уменьшается разброс показателей качества.

- б) более высокая (в десятки раз) производительность по сравнению с термообработкой;
- в) снижение (в десятки раз) капитальных затрат, так как для релаксации изделий не требуется дорогостоящее термическое оборудование, обработка осуществляется на простом ультразвуковом автомате;
- г) оборудование легко встраивается в автоматическую линию;
- д) резко (на порядок и более) уменьшаются затраты энергии;
- е) требуются небольшие производственные площади;
- ж) ультразвуковая технология экологически чиста и безопасна для окружающих.

Таблица 1. Основные показатели процесса релаксации остаточных напряжений

№ п/п	Наименование параметров	Единица измерения	Значение параметра	
			Предлагаемая технология	Существующая технология
1.	Длительность цикла	мин	0,1	600
2.	Точность	кавалитет	6	7
3.	Число одновременно обрабатываемых заготовок	шт.	1	500
4.	Способ перемещения заготовок		напроход	загрузка-выгрузка в кассетах
5.	Габаритные размеры оборудования	м	0,7 × 1,3 × 1,5	5,0 × 2,5 × 2,0
6.	Потребляемая мощность	кВт	0,1	80
7.	Стоимость оборудования	тыс. руб	720	3580

Важным показателем рассматриваемой технологии является ее значительно меньшее потребление электрической энергии.

Реализация предлагаемого способа ультразвуковой релаксации напряжений контактным способом проводилась специалистами ЗКИТУ, СГТУ им. Ю.А. Гагарина и АО «НИИ «Гидроприбор» в лаборатории СГТУ им. Ю.А. Гагарина на опытной установке по отработке технологии стабилизации, на кольцах 206-01Б взятых после операции шлифования по наружному и внутреннему диаметрам и предварительного шлифования желоба.

При этом сравнивали три группы колец, из которых 1-ю группу колец обработали по заводской технологии дополнительного отпуска (отпуск при температуре 150°C в печи в течение 3-х часов), 2-ю группу колец обработали по усредненным режимам ультразвуковой обработки и 3-ю контрольную группу не подвергалась никаким видам обработки.

Из данных Табл.2 следует, что ультразвуковая обработка обеспечивает лучшие показатели по всем, принятым в программе, контролируемым показателям:

- после ультразвуковой обработки величина наружного диаметра кольца не изменяется, тогда как после дополнительного отпуска увеличивается в среднем на 1-2 мкм;
- по сравнению с дополнительным отпуском после ультразвуковой обработки отклонение от круглости колец уменьшается в 1.8 раза;
- ультразвуковая обработка повышает твердость материала кольца в среднем на 0.18-0.19 единиц HRC<sub>3</sub>, по сравнению с дополнительным отпуском и контрольной группой колец соответственно;

– ультразвуковая обработка обеспечивает более эффективное снятие напряжений (в среднем в 1.41 раза) по сравнению с дополнительным отпуском.

Следует подчеркнуть, что ультразвуковая релаксация остаточных напряжений обладает удивительным свойством: она обеспечивает одновременно и более эффективное снижение остаточных напряжений и меньшую деформацию детали в процессе релаксации, сохранение ее исходной геометрической формы.

Таблица 2. Средние величины контролируемых параметров остаточных напряжений после различных видов обработки

Обработка	Параметры					
	Изменение наружн. диаметра $\Delta D$ , мкм	Изменение некругл. $\Delta V$ , мкм	Изменение твердости $\Delta H, HRC_3$	Разность диаметров до и после резки $\Delta D$ , мкм	Сила от внутрени. напряжений Н	Величина внутрени. напряжений $\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup>
Отпуск в печи при 150°C в течение 3-х часов	0.0017	0.48	-0.19	-16.66	4.298	12.39
Ультразвуковая обработка: $\delta=0.3$ мм; $A=10$ мкм; $t=15$ с	0.00	0.263	0.00	-10.66	2.455	7.5
Контрольная группа (не обработанные)	0.0001	0.086	-0.18	-21.6	5.302	15.30

Таким образом, ультразвуковая релаксация остаточных напряжений позволяет эффективно заменить традиционный способ релаксации в печах и обеспечивает существенное снижение трудоемкости изготовления деталей, снижение энерго затрат и повышение качества обработки.

**Список литературы:** 1. Патент РФ № 2140842. Бюл. №8 20.03.99 Способ вибростарения деталей. / Королев А.В., Чистяков А.М., Кривега В.А., Моисеев Г.Н. 2. Инновационный патент РК на изобретение № 25807 от 29.04.2012 г. Способ снятия остаточных напряжений в шейках коленчатого вала./ Тюрин А.Н., Тюрин Н.А. 3. Тюрин А.Н. Повышение ресурса работы шеек коленчатых валов за счет релаксации остаточных напряжений // «Ремонт. Восстановление. Модернизация» - 2012. - №8. - С.3-6.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ШЛИФОВАНИЯ ЛЕПЕСТКОВЫМИ КРУГАМИ

Унянин А.Н., Чистяков В.С. (УлГТУ, г. Ульяновск, Россия)  
Тел./Факс: +7 903 3205351; E-mail: a\_un@mail.ru

**Abstract:** Numerical simulation of the cutting parameters and the temperature field of the milling process with the periphery of end mills with different pitch between the teeth is performed. The regularity of changes in the geometric parameters of the cut, forces, capacities of heat sources and temperatures from the pitch of the teeth of the milling cutter is revealed. It is found that the temperature field changes more when the pitch is varied during processing with a constant feed rate.

**Keywords:** milling cutter, uneven pitch, force, temperature, workpiece

Обработка лепестковыми кругами из шлифовальной шкурки является одним из перспективных методов полирования и удаления дефектного слоя с поверхностей заготовок.

В процессе обработки лепестковый круг располагают относительно обрабатываемой поверхности заготовки на расстоянии, при котором лепестки деформируются. Сила  $P_n$ , с которой лепестковый круг воздействует на обрабатываемую поверхность, складывается из центробежной и упругой составляющих [1]. Этой силой можно варьировать за счет изменения различных факторов, в том числе угловой скорости круга и его деформации. Сила, с которой лепестковый круг воздействует на заготовку, должна быть равна радиальной составляющей силы диспергирования кругом материала заготовки. В противном случае не будет обеспечена требуемая скорость съема материала заготовки. Поэтому необходимо знать силы, возникающие в процессе шлифования.

Зависимости для расчета сил шлифования лепестковыми кругами приведены в работе [2], однако они не учитывают изменение глубины внедрения абразивных зерен в заготовку по длине траектории контакта и диспергирование заготовки пластически деформирующими зернами. Аналитическое исследование сил шлифования лепестковыми кругами, приведенное в [3], выполнено для случая, когда расстояние между рабочими частями деформированных лепестков весьма мало и его значением можно пренебречь. Когда деформация лепестка в процессе шлифования незначительная, при расчете сил следует учитывать расстояние между смежными лепестками, однако подобные исследования до сих пор не выполнены.

Радиальную составляющую силы шлифования представили в виде четырех составляющих, обусловленных: микрорезанием материала заготовки и трением режущих зерен ленты о поверхность заготовки ( $P_{yp1}$  и  $P_{yp2}$ ),  $N$ ; пластическим деформированием материала заготовки и трением пластически деформирующих зерен о поверхность заготовки ( $P_{уд1}$  и  $P_{уд2}$ ),  $N$ .

Исходная зависимость для расчета оставляющей  $P_{yp1}$ :

$$P_{yp1} = \int_0^{l_k} \left[ \int_0^{y(l)} P_{yp1i} \cdot n_{зк1} \cdot K_z \cdot c_k \cdot dy \right] \cdot dl,$$

где  $l_k$  – длина траектории контакта режущих зерен лепесткового круга с заготовкой, м;  $P_{yp1i}$  – сила микрорезания единичным зерном лепестка, Н;  $n_{зк1}$  – число зерен на поверхности лепестка в сечении плоскостью, параллельной оси круга, 1/м;  $n_{зк1} = z_0 \cdot H$ , где  $z_0$  – число зерен на единичной площадке, находящейся на рабочей поверхности ле-

пестка,  $1/m^2$ ;  $H$  – размер обрабатываемой поверхности заготовки в направлении, параллельном оси круга, м;  $K_z$  – коэффициент, учитывающей расстояние между смежными лепестками ленты;  $c_k$  – коэффициент [4];  $y(l) = h_n + a_z(l)$ , где  $h_n$  – износ лепестка, м;  $a_z(l)$  – функция, описывающая изменение глубины внедрения зерна в материал заготовки по длине контакта  $l$ .

Коэффициент  $K_z$  можно определить как

$$K_z = \frac{l_p}{l_p + l_l},$$

где  $l_p$  – размер рабочей деформированной части лепестка, м;  $l_l$  – расстояние между деформированными лепестками, м (рис. 1).

$$l_l = \frac{t_l \cdot (R + L) - R \cdot l_p}{R},$$

где  $t_l$  – толщина лепестка, м;  $l_p$  – размер рабочей (деформированной) части лепестка, м;  $R$  – радиус ступицы шлифовального круга, м;  $L$  – длина лепестка, м.

Размер рабочей (деформированной) части лепестка можно определить по зависимости [1]

$$l_p = C_N \cdot \delta^{0,365} \cdot \omega^{0,628} \cdot L^{0,123},$$

где  $C_N$  – коэффициент, зависящий от свойств шлифовальной шкурки, из которой изготовлен лепесток;  $\delta$  – деформация лепестка, мм;  $\omega$  – угловая скорость круга, рад/с;  $L$  – длина лепестка, мм.

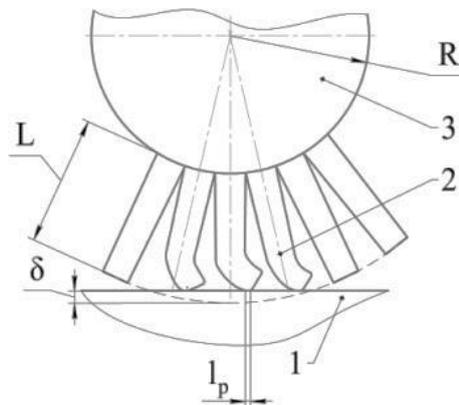


Рис. 1. Схема к расчету расстояния между деформированными лепестками: 1 – заготовка; 2 – лепесток круга; 3 – ступица

Зависимость для расчета силы микрорезания единичным зерном, представленным в виде усеченного конуса, приведена в [3]. Для расчета глубины внедрения в заготовку режущего зерна использована зависимость, приведенную в [5, 6]. Функция, описывающую изменение глубины внедрения режущего зерна в материал заготовки по длине контакта  $l$ , представлена в виде [5]:

$$a_z(l) = \frac{V_s \cdot \sin \alpha_{max} \cdot l_{ms} \cdot l}{\pi \cdot D_k \cdot n_k \cdot l_k},$$

где  $l_{ms}$  – среднее расстояние между режущими абразивными зёрнами лепестка, м;  $V_s$  – скорость продольной подачи, м/мин;  $D_k$  – диаметр лепесткового круга, м;  $n_k$  –

частота вращения круга, 1/мин;  $\alpha_{max}$  – угол, соответствующий длине траектории контакта зерна с заготовкой, град. [5, 6].

Для расчета  $P_{yp1}$  получена зависимость

$$P_{yp1} = k_y \cdot \tau_s \cdot tg\gamma \cdot n_{зк1} \cdot K_z \cdot c_k \cdot (2 \cdot h_u^2 \cdot C \cdot l_k + (6 \cdot h_u \cdot C + 7 \cdot h_u^2 + C^2) A \cdot \frac{l_k^2}{2} + h_u \cdot C^2 \cdot l_k + (h_u + C) \cdot h_u^2 \cdot l_k + \frac{h_u^3 \cdot l_k}{3});$$

$$A = \frac{V_{s\text{ пр}} \cdot \sin\alpha_{max} \cdot l_{ms}}{\pi \cdot D_k \cdot n_k \cdot l_k}; \quad C = a_{кр} + h_{и} - h_{ирср},$$

где  $\tau_s$  – напряжение сдвига, возникающее в процессе микрорезания зерном материала заготовки, Па;  $k_y$  – коэффициент [4];  $h_{ирср}$  – износ зерна, осуществляющего микрорезание, м;  $\gamma$  – половина угла при вершине зерна, град.;  $a_{кр}$  – критическая глубина микрорезания, м.

Когда расстояние между рабочими частями деформированных лепестков весьма мало и его значением можно пренебречь, среднее расстояние между зернами лепестка

$$l_m = \frac{1}{\sqrt{z_0 \cdot c_k \cdot (h_u + a_m)}},$$

где  $a_m$  – максимальная глубина внедрения зерна в заготовку, м;  $c_k$  – коэффициент:  $c_k = 1/\Delta$ , где  $\Delta$  – толщина рабочего слоя лепестка, м [7].

Число зерен на единичной площадке, находящейся на рабочей поверхности лепестка, можно определить по зависимости [7]:

$$z_0 = \frac{k \cdot 10^9}{p},$$

где  $k$  – коэффициент засыпки зерен;  $p$  – размер зерна, мкм.

Когда деформация лепестка в процессе шлифования незначительная, при расчете следует учесть расстояние между смежными лепестками. В этом случае среднее расстояние между зернами можно определить как

$$l_{ms} = \frac{1}{2}(l_m + l_l).$$

При обработке плоских поверхностей длина дуги контакта режущих зерен лепесткового круга с заготовкой может быть определена по формуле

$$l_k = \sqrt{D_k \cdot t}$$

где  $t$  – глубина шлифования, м.

Составляющую силы шлифования  $P_{yp2}$  определили из зависимости

$$P_{yp2} = \int_0^{l_k} \left[ \int_0^{y(l)} P_{yp2i} \cdot n_{зк1} \cdot K_z \cdot c_k \cdot dy \right] \cdot dl,$$

где  $P_{yp2i}$  – сила трения режущего зерна о заготовку, Н [3, 5].

Для расчета  $P_{yp2}$  получена зависимость

$$P_{ур2} = \frac{\pi \cdot l_{2p}^2 \cdot k_y \cdot n_{зк1} \cdot K_z \cdot c_k \cdot \tau_s}{12 \cdot \mu_s} \cdot (h_n \cdot l_k + \frac{A \cdot l_k^2}{2}),$$

где  $l_{2p}$  – размер площадки затупления на режущем зерне, м.

Исходная зависимость для расчета составляющей силы шлифования  $P_{уд1}$ :

$$P_{уд1} = \int_0^{l_{к1}} \left[ \int_0^{a_{кр}} P_{уд1i} \cdot n_{зк1} \cdot K_z \cdot c_k \cdot dy \right] \cdot dl,$$

где  $P_{уд1i}$  – сила пластического деформирования материала заготовки единичным зерном, Н [5, 6];  $l_{к1}$  – длина траектории контакта пластически деформирующих зерен лепесткового круга с заготовкой, м.

В результате вычислений и преобразований получена зависимость

$$P_{уд1} = \frac{c \cdot \sigma_T \cdot n_{зк1} \cdot K_z \cdot c_k \cdot tg\gamma}{2} \cdot (\sin\gamma + \mu_0 \cdot \cos\gamma) \cdot l_{к1} \cdot a_{кр} \cdot \left( \frac{a_{кр}^2}{3} - h_{идср}^2 \right),$$

где  $c$  – коэффициент;  $\sigma_T$  – предел текучести материала заготовки, Па;  $h_{идср}$  – износ зерен, осуществляющих пластическое деформирование, м;  $\mu_0$  – коэффициент трения зерна о заготовку.

Сила, обусловленная трением пластически деформирующих зерен о заготовку

$$P_{уд2} = \int_0^{l_{к1}} \left[ \int_0^{a_{кр}} P_{уд2i} \cdot n_{зк1} \cdot K_z \cdot c_k \cdot dy \right] \cdot dl,$$

где  $P_{уд2i}$  – сила трения пластически деформирующего зерна о заготовку, Н [5, 6].

После вычислений и преобразований получена зависимость

$$P_{уд2} = \frac{1}{12} \cdot c \cdot \sigma_T \cdot k_y \cdot \pi \cdot l_{2д}^2 \cdot n_{зк1} \cdot K_z \cdot c_k \cdot a_{кр} \cdot l_{к1}$$

где  $l_{2д}$  – размер площадки затупления пластически деформирующего зерна, м.

Полагаем, что пластическое деформирование материала заготовки реализуется на участке контакта лепестков круга с заготовкой, которая зависит от деформации круга (лепестков). Размер (длина) траектории этого участка определяется по формуле

$$l_{к1} = 2\sqrt{\delta \cdot (D_K - \delta)}$$

Радиальная составляющая силы шлифования складывается из четырех составляющих, каждая из которых зависит от деформации круга  $\delta$ . Составляющие  $P_{уд1}$  и  $P_{уд2}$  от пластически деформирующих зерен пропорциональны длине  $l_{к1}$  траектории контакта пластически деформирующих зерен с заготовкой, которая определяется параметром  $\delta$ . Аргументом составляющих  $P_{ур1}$   $P_{ур2}$ , обусловленных микрорезанием и трением режущих зерен, также является параметр  $\delta$ . Все четыре составляющие радиальной силы являются функцией коэффициента  $K_z$ . Этот коэффициент определяется числом зерен лепестков, находящихся в контакте с заготовкой  $a$ , следовательно, зависит от размера рабочей части лепестка  $l_p$ , которая, в свою очередь, зависит от параметра  $\delta$ . Поэтому из зависимостей для расчета радиальной силы невозможно в явном виде выразить параметр  $\delta$ .

Предлагается следующая методика расчета силовых параметров процесса шлифования лепестковым кругом.

1. Исходя из рекомендуемого значения натяга  $\delta$  [1], определяется нормальная сила, с которой лепестковый круг действует на обрабатываемую поверхность.

2. Для этого значения натяга для различных сочетаний продольной подачи  $V_{спр}$  и глубины шлифования  $t$  рассчитывается значение радиальной силы  $P_y$ .

3. Для реализации процесса шлифования принимают значения продольной подачи и глубины шлифования, при которых  $P_y = P_n$ . Скорость съема материала заготовки определяется произведением параметров  $V_s$  и  $t$ .

4. Определяют, обеспечивают ли полученные значения  $V_s$  и  $t$  качество обработанной поверхности и требуемую производительность. Рассчитывают значение параметра  $R_a$  по зависимостям, предложенным в работе [1], или проводят эксперимент, в процессе которого определяют параметр  $R_a$  и другие параметры качества. Если не обеспечивается заданное качество, то уменьшают натяг  $\delta$  и повторяют расчеты для этого значения.

В случае, если параметры качества не достигают заданных предельных значений, можно увеличить производительность обработки. Увеличивают величину натяга  $\delta$  и повторяют расчеты по пунктам 2 и 3.

Чтобы уменьшить объем расчетов радиальной силы при различных значениях параметров  $V_s$  и  $t$ , можно получить регрессионные зависимости радиальной силы от этих параметров при различных значениях деформации круга  $\delta$ .

Если предположить линейную зависимость радиальной силы  $P_y$  от параметров  $V_s$  и  $t$ , то можно получить зависимости вида:

$$P_y = b_0 + b_1 \cdot V_s + b_2 \cdot t + b_{12} \cdot V_s \cdot t,$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  – коэффициенты уравнения.

Чтобы получить уравнения, необходимо выбрать основные уровни параметров  $V_{спр}$  и  $t$  и интервалы варьирования этих параметров, составить матрицу планирования по образцу матрицы планирования многофакторного эксперимента и рассчитать коэффициенты регрессии для различных значений деформации круга.

В результате выполненных исследований получены математические зависимости для расчета радиальной составляющей силы шлифования лепестковыми кругами.

*Исследования выполнены при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 19-48-730002*

**Список литературы:** 1. Гдалевич А.И. Полирование деталей лепестковыми кругами / А.И. Гдалевич, С.И. Житницкий, В.И. Хрычев и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 80 с. 2. Дубровский П.В. Шлифование титановых сплавов лепестковыми кругами. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 100 с. 3. Унянин А.Н., Евстигнеев А.Д. Аналитическое исследование сил шлифования лепестковыми кругами, Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий [Электронный ресурс] : сб. тр. науч. семинара; Донской гос. техн. ун-т. – Электрон. текстовые дан. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2020. – С. 268 – 274. 4. Ефимов В. В. Модель процесса шлифования с применением СОЖ. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1992. – 132 с. 5. Худобин Л. В., Унянин А. Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с. 6. Худобин Л. В., Унянин А. Н. Исследование силовой напряженности шлифования заготовок из пластичных материалов // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 4. – С. 27 – 33. 7. Вerezуб В.Н. Шлифование абразивными лентами, М.: Машиностроение, 1972. – 103 с.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ КООРДИНАТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ МОДУЛЕЙ

Федуков А.Г., Хандожко А.В.

(ФГБОУ ВО «БГТУ», г. Брянск, Россия)

(4832) 58-82-89, [fedukov.lvdu@gmail.com](mailto:fedukov.lvdu@gmail.com)

**Abstract:** *The issues of design and technological quality assurance of technological equipment created on the basis of unified modules are considered. The principles of designing individual units are proposed on the example of a linear coordinate with a ball screw for machine equipment. Dependences for estimating contact approaches of extended flat joints are given. Possible criteria for assigning permissible errors of dimensional circuits are considered.*

**Key words:** *accuracy, unified modules, ball-screw pair, linear guides, contact stiffness.*

Широкое использование модульного принципа проектирования изделий машиностроения в целом и технологического оборудования в частности является устойчивой тенденцией. Специализация предприятий, массовое производство позволяет обеспечивать высокие технические показатели изделий при приемлемых экономических.

Для таких конструкторских решений характерно большое число стыков, большей частью плоских. Как известно, жесткость оборудования во много определяется жесткостью стыков, а значит, проблемы обеспечения жесткости изделий обостряются.

Существующие методики проектирования лишь в некоторой мере учитывают рост числа стыков и их жесткость, а также сложность возникающих размерных цепей. Это относится как к научным разработкам, так и практическим рекомендациям производителей оборудования. В лучшем случае производитель в своих каталогах, паспортах или другой документации дает общие рекомендации по схемам монтажа, способам сборки, подбору классов (групп) точности и жесткости модулей. Но при этом в этих рекомендациях не учитывается жесткость стыков.

Совершенствование методик проектирования, зависимостей для расчета контактных сближений, формирование критериев назначения допустимых погрешностей сборки является актуальной задачей.

Рассмотрим некоторые аспекты этой задачи на примере линейной координаты на основе шарико-винтовой пары (ШВП) и рельсовых направляющих. На рисунке 1 показан спроектированный и изготовленный стенд, имитирующий характерное конструктивное решение линейной координаты станка.

Элементы модуля (рисунк 1) монтируются на базовой плите 1, которая устанавливается на станине. На этой плите расположены 2 линейные рельсовые направляющие 2 и 2 подшипниковые опоры винта ШВП 5. Стол 6 крепится к кареткам 3 через проставки 4. Гайка ШВП крепится к столу.

Базовая плита изготовлена из стали 20, механической обработкой получена точность поверхности соответствующая 9-10 степени точности по ГОСТ 24643-81. Шероховатость рабочей поверхности составляет Ra 0,063 мкм в продольном и 0,32 мкм в поперечном направлении. На плите выполнены резьбовые отверстия для закрепления рельсов различной длины. В экспериментах использован направляющий рельс номинального размера 30 высокого класса точности (Н). Шероховатость опорной поверхности рельса Ra 0,02 мкм в продольном и 0,32 мкм в поперечном направлении. Рельсы использовались длиной 125, 215, 315, 400, 450, 650 мм.

Как видно из рисунка 2, положение оси винта ШВП одновременно определяется размером F подшипниковой опоры винта и размером G гайки ШВП. Номинальные размеры деталей не позволяют выполнить сборку без проставки 4, увеличивающей число стыков. Проставка при этом является звеном пригонки, подшлифовкой которой обеспечивается нужная точность узла. Альтернативное решение по «заглублению» опорных поверхностей подшипниковых опор эффективно, но представляет дополнительные технологические сложности и требует наличие крупного точного оборудования.

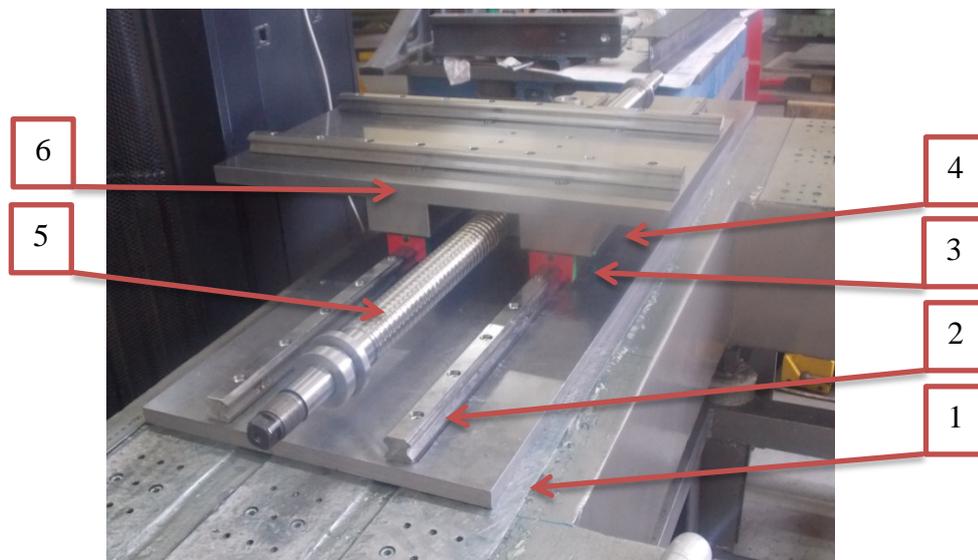


Рис. 1.– Конструкторское решение линейной координаты

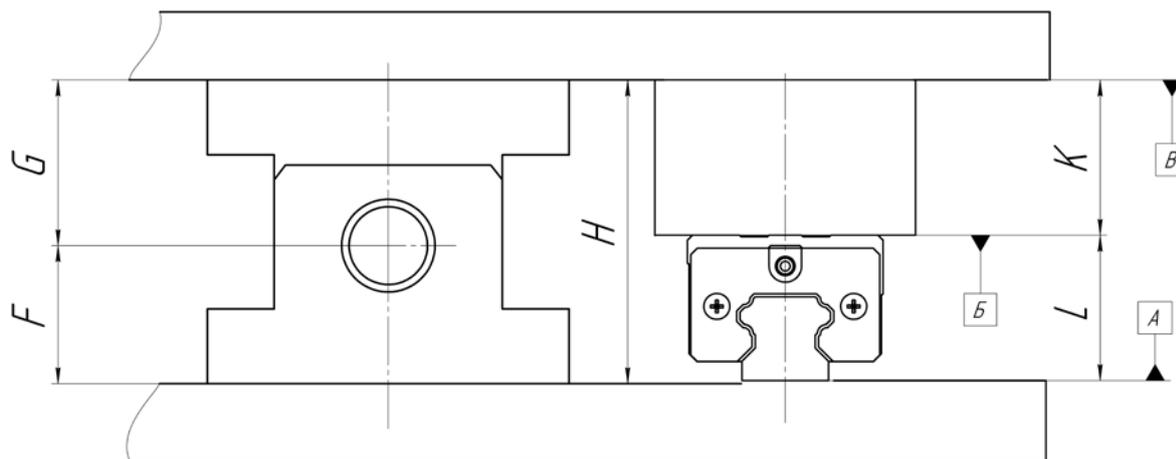


Рис. 2. Размерная цепь элементов модуля линейных перемещений

Очевидно, что обеспечение одновременно совпадения положения оси подшипниковых опор и гайки винта является сложной технологической задачей даже в постановке, не учитывающей возникающие контактные сближения в многочисленных стыках. Проблемы в значительной мере связаны с наличием допусков на комплектующие, порой весьма значительные. Например, размер L у изделий фирмы SKF имеет допуск от  $\pm 0,1$  мм у стандартного класса точности (P5) до  $\pm 0,02$  мм у высокого (прецизионного) (P1) класса точности. То же самое относится к допускам на размер положения оси у подшипниковых опор. Контактные сближения дополнительно усложняют задачу. Предварительные исследования показали, что при монтаже

рельсовых направляющих и стола возникают суммарные деформации в стыках, величиной которых не всегда можно пренебречь (более 0,05 мм). В нормативной документации рекомендаций по оценке величины этих деформаций, их учета в проектных расчетах нет. Существующие зависимости по расчету деформаций, например представленные в работе [2], разработаны для стыков ограниченного размера и для протяженного стыка «плита-рельс» требуют коррекции.

На базе данного узла для стыка «базовая плита – направляющий рельс» были проведены экспериментальные исследования контактной жёсткости. Результаты экспериментов сравнивались с результатами расчетов по известным зависимостям.

Для расчетов использовались две широко используемые формулы [1-4]:

$$\delta = C\sigma^m;$$

$$\delta = Ra \cdot C_0 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{E}}.$$

Первая зависимость учитывает параметры качества контактирующих поверхностей лишь косвенно, вторая включает в себя некоторые параметры микрогеометрии и механических свойств. Характерной особенностью обеих зависимостей является применимость лишь к деталям ограниченного размера, при этом учет макроотклонений и волнистости не выполняется.

Сопоставление расчетных значений и фактических позволило получить поправочные коэффициенты для указанных зависимостей, учитывающие значительную площадь контакта и наличие волнистости и макроотклонений контактирующих поверхностей.

Другой стороной указанное проектной задачи является установление критериев для назначения допустимых погрешностей замыкающего звена размерной цепи (или точности исполнения звена регулирования – проставки). Существующие погрешности приводят к возникновению деформаций деталей. В наибольшей мере к деформации склонна наименее жесткая деталь – винт ШВП (рис. 3).

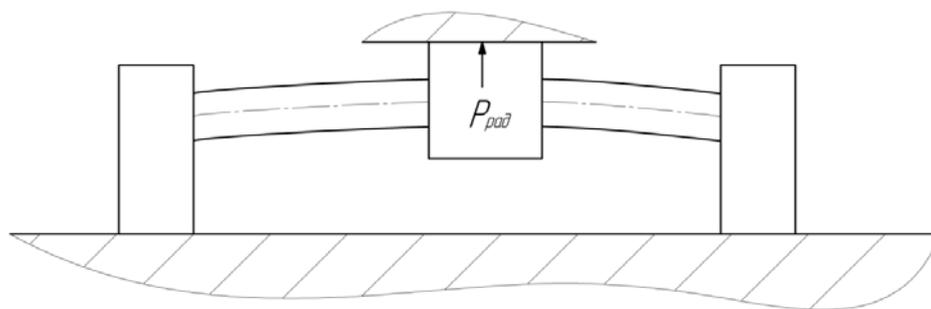


Рис. 3. Схема изгиба винта ШВП в линейной координате



Рис. 4. Расчётная схема для оценки максимальной осевой силы возникающая в ШВП из-за погрешности замыкающего звена

Рассмотрим упрощенную расчетную схему. Наиболее распространена установка винта в подшипники с использованием жесткой и плавающих опор. С учетом использования в жесткой опоре двойных подшипников и преднатяга в них мы можем рассматривать винт в первом приближении закрепленным консольно (рисунок 4). На балку с жесткой заделкой с одной стороны

действует радиальная сила, обеспечивающая деформацию балки на постоянную величину  $\omega$  в точке приложения силы.

Для оценки величины возникающей радиальной силы можно использовать известные зависимости механики:

$$P = \left( \frac{3EI\omega}{l^3} \right)$$

Эта сила приводит к росту крутящего момента. Для оценки величины этого дополнительного момента холостого хода используем следующую схему, на основе решения задачи распределения нагрузки между телами качения (рисунок 5) [5].

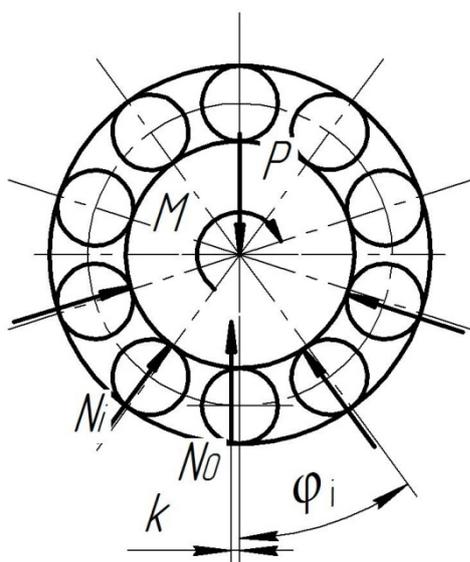


Рис. 5. Схема расчета дополнительного крутящего момента от радиальной силы, действующей на гайку ШВП

Решая уравнение равновесия внутреннего кольца нагруженного радиальной силой  $P$ , получим зависимость для оценки дополнительного крутящего момента холостого хода линейной координаты:

$$M_{швп} = z \sum_1^n M_i = z \sum_1^n N_i \cdot f \quad (3.51)$$

где:  $f$  – коэффициент трения качения,  $z$  – число тел качения. В общем случае качения стальных тел  $f = 0,001-0,05$ , производители ШВП часто указывают величину этого коэффициента около 0,004 для своей продукции.

Величина этого дополнительного крутящего момента может быть использована в качестве критерия допустимой погрешности замыкающего звена рассмотренной размерной цепи. В рекомендациях по проектированию приводов рекомендуют использовать коэффициент, величина которого, в зависимости от требований к конструкции, составляет от 0,04 до 0,2.

Таким образом, задавшись величиной коэффициента увеличения мощности привода из-за потерь на трение, можно обоснованно сформулировать требования к точности звеньев размерной цепи, погрешности замыкающего звена и методам достижения требуемой точности. Расчет может быть выполнен итерационным путем или по более сложным алгоритма.

**Список литературы:** 1. Решетов Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков, т.1 М., «Машиностроение», 1972, с. 664. 2. Демкин, Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин //М.: Машиностроение, 1981. 244 с. 3. Иванов А.С. Обоснование предлагаемых расчетов на контактную жесткость при конструировании машин // Механика и физика фрикционного контакта и граничных слоев: Межвуз. сб. науч. трудов / Под ред.Н.Б. Демкина. - Тверь: ТГТУ, 2005. - С. 8 - 14. 4. Федукон А.Г., Хандожко А.В., Польский А.Н., Щербаков А.Н. Обеспечение точности станочных узлов на базе унифицированных модулей с учетом контактной жесткости стыков // Вестник «БГТУ». Машиностроение машиноведение. 2019. №3. С. 51 -59. 5. Биргер И.А., Шорр Б.Ф, Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник/ - М.: Машиностроение, 1993 г. – 640 с.

## О ПРИМЕНЕНИИ ПРОФИЛИРОВАННЫХ НАКОВАЛЕН ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Шажко Я.В., Шатохин С.В. Ожегова Л.Д., Соколов К.И.

(ГУ «ИФГП», г. Донецк, ДНР)

Тел./Факс: +38 (062) 3115285; E-mail: syarilo@mail.ru

**Abstract:** Analysis of the study of the stress-strain state of rocks in high-pressure apparatuses with profiled anvils. Assessment of changes in the clay shale of the deformed compaction, when a critical value of 5kBar is reached, where the phase transition of crystalline quartz to amorphous occurs and the recrystallization phase begins with further crushing.

**Key words:** stress-strain state, rocks, quartz, phase transition.

Исследованию напряженно-деформированного состояния твердых материалов посвящены многие работы отечественных и зарубежных исследователей [1–4]. Недостаток данных исследований обусловлен с одной стороны значительными трудностями при проведении эксперимента, с другой – отсутствием к настоящему времени надежной, проверенной экспериментально, теории, связывающей большие упругопластические деформации с напряженным состоянием материалов типа горных пород при высоких давлениях до 1ГПа. Однако изучение процесса пластического формоизменения деформируемых прокладок и контейнеров в аппаратах высокого давления (АВД) имеет большое прикладное значение. Оно обусловлено необходимостью более полно и адекватно описать механизм создания давления в твердофазовых АВД, который определяется упругопластическим деформированием горной породы, изучить влияние различных факторов, в том числе, различных конструктивных параметров АВД и контейнера (деформируемого уплотнения) и состояния их контактирующих поверхностей на характер течения сжимаемого материала.

Сложности, возникающие при экспериментальном исследовании деформируемого уплотнения и контейнера АВД, обуславливают необходимость разработки методов физического моделирования напряженно-деформированного состояния этих элементов АВД.

Из всех известных методов, используемых в АВД, позволяющих достигать метод значительных значений в деформировании твердых тел получили наковальни Бриджмена в условиях высокого квазигидростатического давления, при этом, твердость и структура многих материалов выравниваются по площади образца.

Такая структура была названа диссипативной [5], а деформация, к ней приводящая – интенсивной [6]. До настоящего времени существенными и не решенными до конца остаются вопросы, связанные непосредственно с предельным измельчением структуры при деформации. Все еще неясно, при каких условиях формируется диссипативная структура и от чего зависит критическое значение угла поворота. Аппарат высокого давления - профилированные наковальни широко известен. Применяют его в качестве удобного инструмента для экспериментального исследования свойств материалов при высоком и сверхвысоком давлении ввиду простоты конструкции и сравнительной простоты подготовки и проведения эксперимента.

АВД типа «наковальня с углублением» (рис. 1) отличается от АВД типа «наковален Бриджмена» (плоские наковальни) наличием обращенных друг к другу матрицы и пуансона т.е. углубления и выступающей части в виде полусфер, образующих полость, в которую помещается образец.

Роль уплотнения выполняет тонкий слой материала, сжимаемый в профилированной наковальне. Уплотнение, формируется из материала, вытесняемого из полости высокого давления при сжатии. В этом случае такой тонкий слой материала способен

выдерживать высокие радиальные напряжения без разрушения.

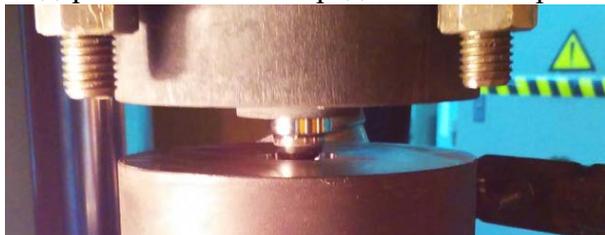


Рис. 1. Профилированная наковальня (наковальня с углублением) для исследования образцов горных пород

Таким образом, исследуемый измельченный материал помещают между полусферическими торцами в форму полусферы (радиуса  $R$ ) профилированной наковальни и воздействуют на него заданным сжимающим усилием  $F$  и поворотом нижней плиты. В результате происходит упруго-пластическая деформация диска, продолжающаяся до тех пор, пока внешнее усилие уравнове-

сится равнодействующей внутренних напряжений диска.

Излишки материала в результате уменьшения объема диска вытесняются за пределы полусферических торцов наковален. Усилие  $F$ , радиус полусферы  $R$  и давление в центре диска  $P$  можно измерить с высокой точностью. Эти характеристики определяются деформационными свойствами материала при высоком давлении и больших градиентах напряжения. Такие условия позволяют хрупким материалам деформироваться пластически без разрушения.

В настоящей работе обработке под давлением (1, 3, 5 кБар со сдвигом 1 об/мин.) подвергались образцы глинистого сланца шахта им. А.А. Скочинского. Использовали термобарические методы исследований образцов глинистых сланцев, подвергнутых интенсивной деформации, которые моделируют большое давление горного массива. Определена энергия активации дегидратации воды в образцах по методу Бройдо-Прокопчука.

В процессе пластического течения глинистого сланца под высоким давлением происходят существенные изменения как в кристаллической, так и в аморфной фазах. Ряд данных свидетельствует о том, что, несмотря на воздействие высокого давления, в принципе подавляющего молекулярную подвижность, при пластическом деформировании в образцах проявляется высокая подвижность [7]. Поскольку при высоком давлении полимерные вещества находятся в основном в стеклообразном состоянии, перемещение сегментов, а также осколков макромолекул на значительные расстояния, вызванные сдвиговой де-

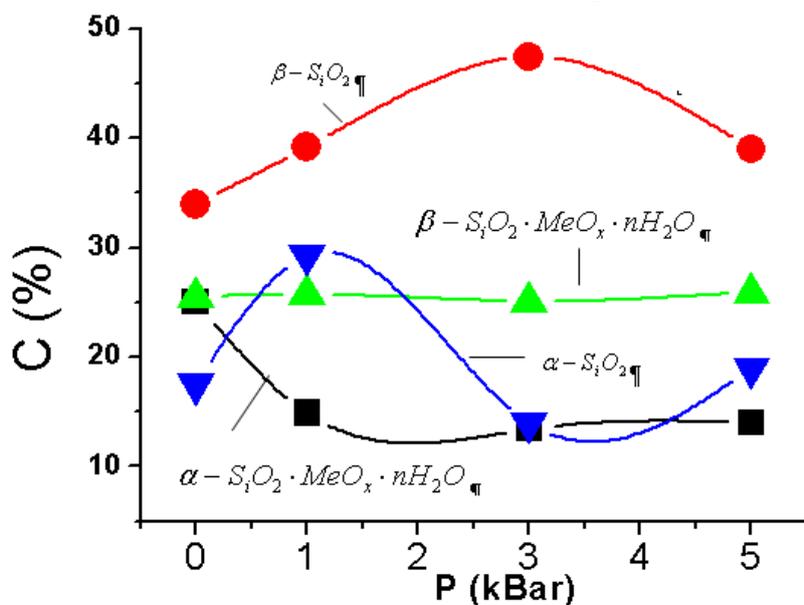


Рис. 2. Изменение фазового состава образцов ш. А.А. Скочинского, 7м от нарушения, в зависимости от воздействия приложенного давления

формацией, приводят к резким изменениям кинетики накопления и диссипации энергии.

Результаты фазового анализа образцов шахта им. А.А. Скочинского в процессе воздействия деформации с использованием профилированной наковальни, представлены в виде графика (рис. 2).

Результаты показывают (рис. 2), что в процессе воздействия деформации с использованием профилированной наковальни при давлении

$P=1$  кБар в образце увеличилась концентрация  $\alpha$ - $\text{SiO}_2$  и  $\beta$ - $\text{SiO}_2$  соответствующих пластичной и прочной фаз кварца.

Повышение давления с  $P=1$  кБар, до  $P=3$  кБар, вызывает фазовый переход типа  $\alpha$ - $\text{SiO}_2 \rightarrow \beta$ - $\text{SiO}_2$ . Дальнейшее же увеличение давления сопровождается обратным фазовым переходом типа  $\beta$ - $\text{SiO}_2 \rightarrow \alpha$ - $\text{SiO}_2$ . При этом  $\alpha$ -кристаллобалит резко уменьшается по своей концентрации при увеличении давления до  $P=3$  кБар, при дальнейшем росте давления до  $P=5$  кБар остается практически неизменным, около 14%, по сравнению с 23% в исходном состоянии. Однако  $\beta$ -кристаллобалит остается стабильным. Энергетическая картина процесса сверхвысокой нагрузки на образцы представлена на рис. 3.

Анализируя данные на рисунке 3 можно отметить некоторую зависимость пиков энергии активации от роста приложенного давления к образцам. Так наибольшее значение отмечено в исходном образце: при давлении в 1 кБар происходит снижение показателя при неизменной температуре в  $400^\circ\text{C}$ , при росте давления до 3 кБар отмечаем два близких пика с изменением температуры с  $400^\circ\text{C}$  до  $300^\circ\text{C}$  т.е. происходит фазовый переход. С ростом давления до 5 кБар наблюдается рост энергии активации, но уже при температуре  $300^\circ\text{C}$ .

Для объяснения экспериментальных фактов выдвинуто предположение, что при взрывных превращениях на профилированной наковальне осуществляется низкотемпературная твердофазная детонация, движущей силой которой является упругая волна. Энергия химической реакции непосредственно переходит в механическую в виде упругих напряжений, которые вызывают распространение энергии в системе упругой волной. Экзотермический процесс поддерживает распространение упругой волны, не давая ей затухать, что и приводит к самораспространению детонационного превращения в объеме исследуемого образца [8].

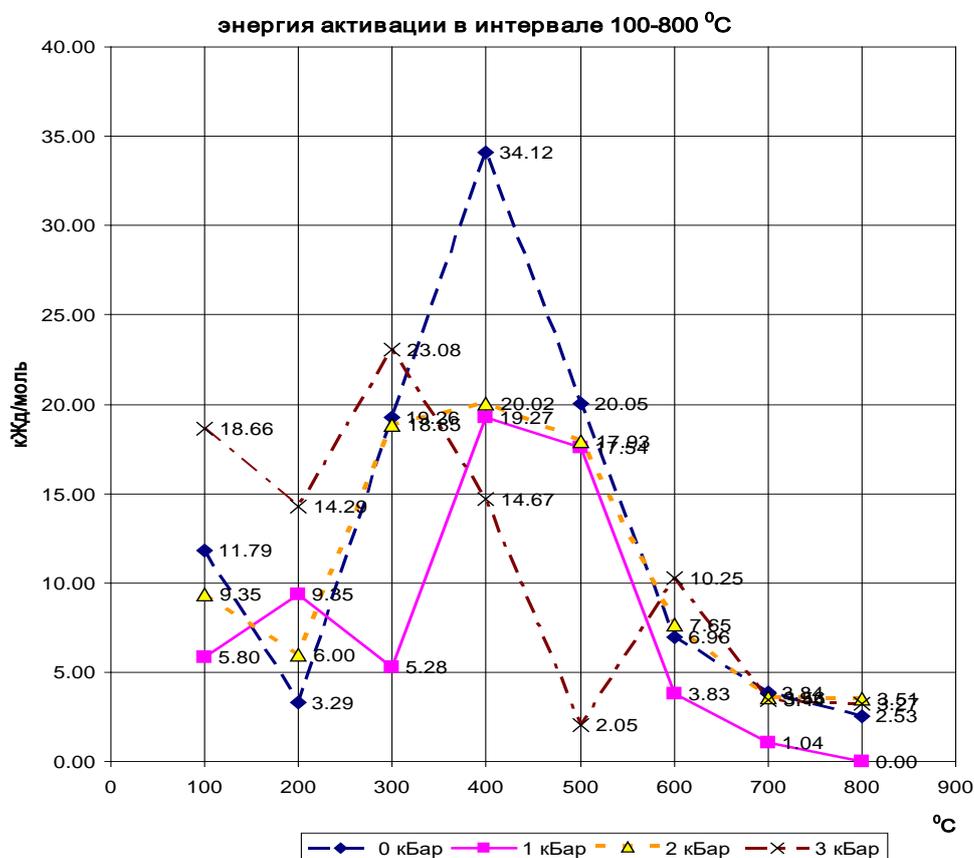


Рис. 3. Энергия активации дегидратации образцов глинистого сланца после обработки их кручением под давлением в камере Бриджмена

Упругая волна, осуществляя реакцию, переносит избыток энергии со скоростью звука по всей системе и поглощается установкой высокого давления (наковальни, пресс). Поскольку масса установки по сравнению с массой исследуемого вещества огромна, то установка играет роль термостата и ее температура практически не меняется.

Таким образом, установлено, что с ростом давления в профилированной наковальни глинистый сланец подвергается деформациям уплотнения, при достижении критического значения происходит фазовый переход кристаллического в аморфное и при дальнейшем дроблении начинается фаза рекристаллизации. Данные переходы характерно выражены в виде  $\alpha \rightarrow \beta$  и  $\beta \rightarrow \alpha$  фазовых переходов кварца.

К моменту состояния предразрушения исходная микроструктура в виде конгломерата поликристаллических зерен трансформируется во фрагментированную структуру особого типа, в которой сосуществуют две фазы — кристаллическая, с высокой плотностью дислокаций в границах зерен и субзерен, и аморфноподобная квазикристаллическая с высокой плотностью дисклиний.

Образующиеся при этом локальные зоны, как очаги опасности, могут существовать в нетронутом породном массиве довольно длительное время: их эволюция будет определяться изменением горного давления, скоростью метаногенераций, тектоническими нарушениями и т.д.

В реальных условиях это приведет, прежде всего к изменению структуры вещества зоны: появления новых микротрещин, изменению скорости метаногенерации, появлению мелких фракций и т.д. Поэтому в очагах опасности порода будет всегда в «помятом» состоянии с наличием мелких фракций и метана в свободном состоянии, что и подтверждается практикой.

**Список литературы:** 1. Новиков Н.В., Герасимович А.В. Исследование деформируемых уплотнений АВД типа наковальни с углублениями // Сверхтвердые матер. – 1983. – № 4. – С. 3–7. 2. Бакуль В.Н., Герасимович А.В., Ивахненко С.А. Зависимость напряжений сдвига литографского камня и пиррофиллита от давления // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 2. – С. 25–30. 3. Герасимович А.В., Кулемза В.В., Крикун В.Н. Исследование материалов деформируемых уплотнений АВД // Сверхтвердые матер. – 1982. – № 4. – С. 9–11. 4. Виноградов С.А., Доценко В.М. Обобщение результатов испытаний горных пород на наковальнях Бриджмена с целью выбора материала контейнера АВД // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2010. – № 13 – С. 352-357. 5. Теплов В.А., Пилюгин В.П., Талуц Г.Г. Образование диссипативной структуры и фазовые переходы в сплавах железа при сдвиге под давлением // Известия РАН. Металлы. - 1992. - № 2. - С. 109–115. 6. Попов А.А., Валиев Р.З., Пышминцев И.Ю. Демаков С.Л., Илларионов А.Г. Формирование структуры и свойств технически чистого титана с нанокристаллической структурой после деформации и последующего нагрева // Физика металлов и металловедение. - 1997. - Т. 83. Вып. 5. - С. 127 – 133. 7. Жорин В.А., Мухина Л.Л., Разумовская И.В. Микротвердость ряда полимеров после пластического течения под высоким давлением // Высокомолекулярные соединения. Серия Б., - 1988, - том 40. №7. – С. 1209-1212. 8. Глезер А.М., Метлов Л.С. Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // Физика твердого тела – 2010. - том 52, вып. 6 – С. 1090-1097

## АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВЫШЕННОЙ ВИБРАЦИИ БАРАБАННОГО РОТОРА ТУРБИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СТЕНДЕ

Шатохин В.Ф., Чеботарёв В.Н., Скок А.А.

(ПАО «Калужский турбинный завод», 248010, Россия, г. Калуга, Россия)

e-mail: shatokhin\_vf@paoktz.ru

**Abstract:** *The results of computational and experimental studies of the dynamic behavior of the drum rotor of the turbine, carried out in connection with unsatisfactory vibration characteristics during testing of the system of turbine rotors-flexible coupling-hydraulic brake on the bench, are presented. For different compliances of the turbine rotor supports, the spectra of frequencies and vibration modes of the rotor system, as well as the amplitude-frequency characteristics (AFC) of the rotor system when excited by the unbalance of the turbine rotor or the clutch span, are determined. For computational studies, the software package of the enterprise was used, which makes it possible to determine the spectra of frequencies and vibration modes, the frequency response in the vertical and horizontal planes of vibrations of a multi-support rotor on two-mass supports, taking into account the dynamic properties of the film of plain bearings. The calculations are made for the case when water is used as a lubricant for two turbine plain bearings or all bearings are oil lubricated. The results of computational studies are compared with experimental data. Of significant interest is the process of development of an accident during testing, represented as a change in the vibration amplitudes of the bearing depending on the rotor speed. Based on the calculation and experimental work, an analysis was made of the causes of the accident of the front bearing pair along the course.*

**Key words:** *rotor, stator (bearings, seals, housing), spectrum of frequencies and vibration modes, amplitude-frequency characteristic, synchronous and asynchronous rolling of the stator by the rotor, angular velocity of rotation of the rotor, angular velocity of the rotor precession.*

Ротор барабанной конструкции обеспечивает, как правило, высокую изгибную и крутильную жесткости и, таким образом, хорошую отстройку резонансных зон от рабочего диапазона скоростей вращения установки. Однако для конкретного исполнения ротора турбины этого не произошло из-за особенностей конструкции (см. ниже), не учёт которых на этапе проектирования привел к неверной оценке первой собственной частоты (критической скорости) ротора. Было получено расчетное её значение  $f = 180\text{--}200$  Гц (10000-12000 об/мин) в зависимости от жесткости опор. Рабочая частота вращения ротора турбины -3000 об/мин.

Исследования барабанного ротора турбины с применением специальных методик (программного комплекса) были выполнены только после выхода из строя переднего подшипника турбины во время испытаний на стенде. Следует отметить, что предварительные пуски турбины на стенде проходили относительно удовлетворительно, и вибрационные характеристики её, при хорошо отбалансированном роторе, не вызывали беспокойства. В общей сложности турбина наработала около 40 часов. Аварийный пуск характеризовался относительно высоким уровнем вибрации и закончился (рис.1) выходом из строя переднего по ходу пара подшипника 1. На рис. 1 показан процесс развития аварии в виде изменения амплитуд вибрации в зависимости от частоты вращения ротора. Переход через резонанс (изменения во времени оборотов ротора показано стрелками) сопровождался повышенной вибрацией, сохранявшейся и при последующей работе. Обратный переход через резонанс при сбросе оборотов турбины привёл к резкому возрастанию амплитуд вибрации и аварийному останову. Последствия аварии могли

быть более значительными, если бы не срабатывание системы защиты установки. На рис. 1, а показана работа системы регулирования при поддержании заданного числа оборотов ротора. Этот пуск отличался от предыдущих пусков следующими особенностями:

- на муфту со стороны турбины установлена дополнительная масса, имитирующая массу генератора;
- ротор при транспортировке скатился с опор и ударился входным тонким концом (забоины на уплотнениях и на нарезке винтового насоса);
- перед установкой ротор не был отбалансирован.

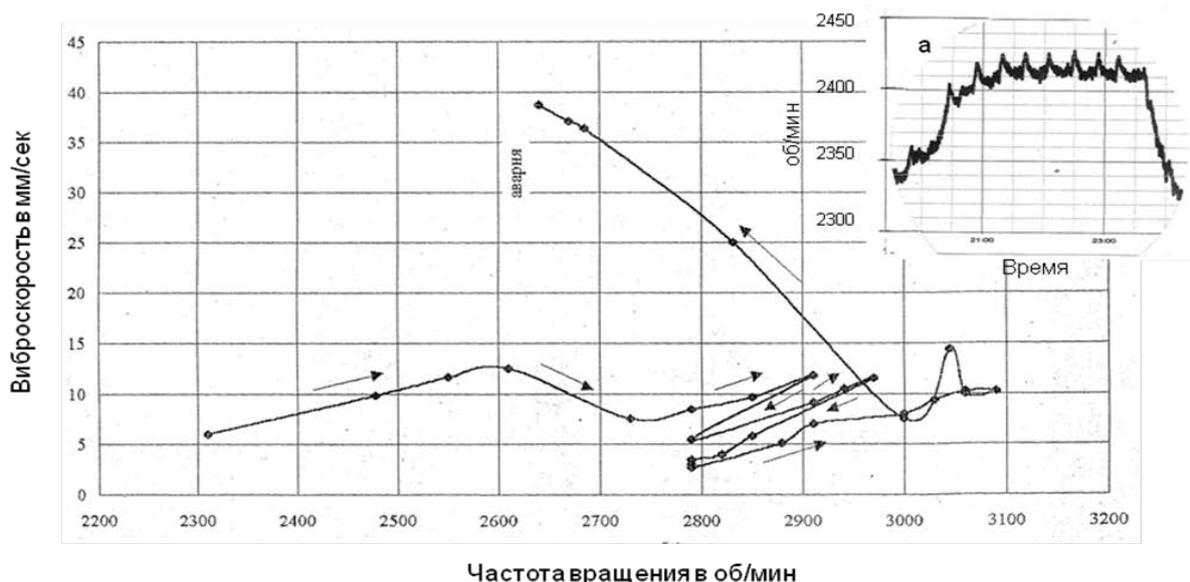


Рис. 1. Развитие аварии ротора турбины при испытаниях на стенде системы роторов турбина-гибкая муфта-гидротормоз: а – изменение скорости вращения ротора в процессе периодических контактов с подшипником

Анализ конструкции установки выявил следующие особенности конструкции ротора турбины и стенда:

- зазоры между корпусом и уплотнениями ротора малы, что не исключает (при повышенных вибрациях) касания твёрдых поверхностей;
- конструкция ротора такова, что на входном конце барабан опирается на внутренний вал через фторопластовую втулку. Модуль упругости фторопласта на несколько порядков меньше, чем у сплава. Поэтому маловероятно включение жесткости барабана при изгибных колебаниях внутреннего вала;
- схема подачи воды (стендовая) на подшипники турбины не исключает попадания её во внутреннюю полость вращающегося ротора через фторопластовое уплотнение и сверления во внутреннем вале.
- пролёт муфты более, чем в 2 раза больше пролёта турбины;
- корпусные и фундаментные конструкции в районе подшипников турбины имеют значительно большую податливость, чем в районе гидротормоза.

Ротор турбины конструктивно выполнен таким образом, что оказывается весьма сложным для моделирования в рамках традиционных расчетных схем, принятых для типовых стационарных турбомашин. Поэтому выбранная в соответствии с указанными особенностями конструкции расчетная схема была проверена сопоставлением результатов расчета и эксперимента для отдельного свободного безопорного ротора турбины.

При этом, из системы роторов (рис.2, а) была выделена собственно турбина (первый пролет вплоть до соединения с гибкой муфтой). Этот подход обоснован и по той причине, что гибкая муфта в определенной степени развязывает стендовую систему роторов на две подсистемы.

Наличие внутреннего вала с барабаном, жестко связанным одним концом с валом, а другим опорой через фторопластовое уплотнительное кольцо, заставило выбрать расчётную схему ротора турбины, учитывающую только изгибную жесткость внутреннего вала с массой барабана, сосредоточенной либо в месте жесткой связи с барабаном, либо разнесённой по сечениям, где расположены входной и выходной конуса барабана. На первом этапе фигурировали обе расчётные схемы, хотя разница в результатах была невелика, но в последующем остановились на схеме с разнесённой массой барабана (рис. 2, а). В таблице 1 приведено сравнение результатов экспериментального и расчётного определения собственных частот колебаний свободного безопорного ротора турбины при принятой расчётной схеме. Собственные частоты в эксперименте определялись возбуждением ротора ударом.

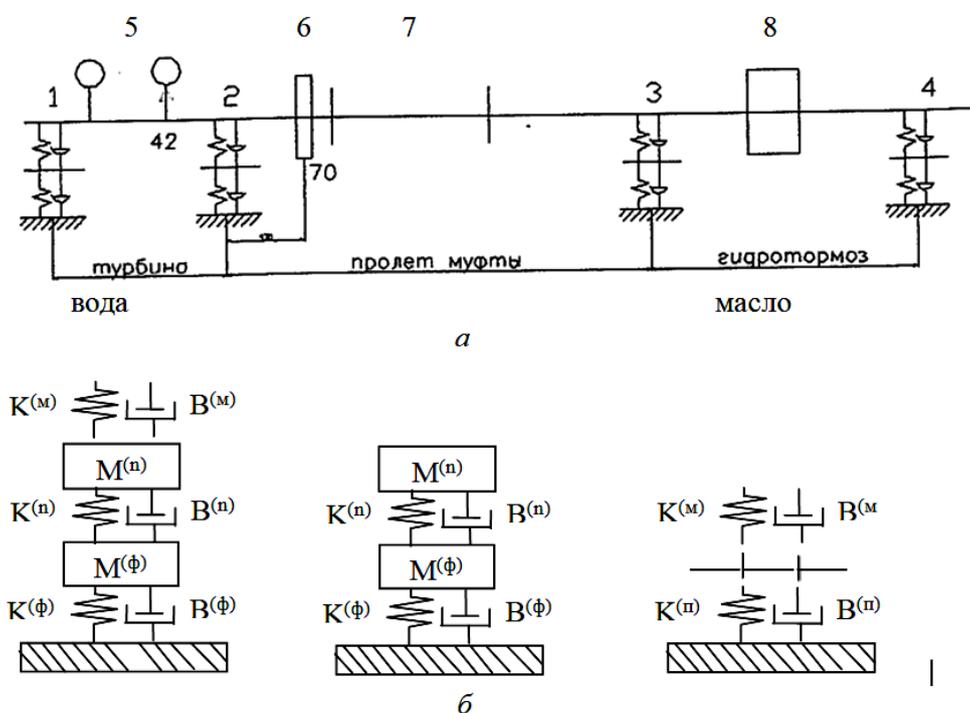


Рис. 2. Расчётная схема (а) системы роторов турбина-гибкая муфта-гидротормоз: 1-4 – номера опор; 5 – масса барабана; 6 – масса имитатора генератора; 7 – муфта; 8 – масса гидротормоза; 42, 70 – номера сечений ротора; б –схематизация опор в горизонтальной и вертикальной плоскостях колебаний; индексы при М, К и В обозначают, соответственно: м – плёнка подшипников скольжения; п – подшипник; ф – фундамент

Результаты подтвердили предположение, что барабан не увеличивает жесткость внутреннего ротора при изгибных колебаниях, а реальная изгибная жесткость не столь велика, чтобы обеспечить гарантированный запас по критическому числу оборотов, если податливость опор (плёнки подшипников, корпусных конструкций) будет выше чем в эксперименте. Для расчётных исследований использован программный комплекс предприятия [1-4], позволяющий определить спектры частот и форм колебаний, АЧХ в вертикальной и горизонтальной плоскостях колебаний многоопорного ротора на двухмассовых опорах с учётом динамических свойств плёнки подшипников скольжения. Инерционные, жёсткост-

ные и демпфирующие характеристики каждой опоры могут отличаться в горизонтальном и вертикальном направлении (рис. 2, б). Параметры каждой из опор могут быть определены по экспериментальным динамическим податливостям опор типовых конструкций. Отсутствие данных по опорам ротора, привело к упрощению схематизации опор (рис. 2, а).

Таблица 1. Результаты расчёта и эксперимента для ротора турбины

	Расчёт, Гц	Эксперимент, Гц Ротор возбуждался ударом
Свободный безопорный ротор	227,6	237
Ротор на опорах стенда*) «Шенк», $K = 0.25 \cdot 10^6$ кН/м без дополнительной массы	48.5 (71.8)	42 -

\*) Длина пролёта ротора с опорами стенда «Шенк» увеличена на 200 мм.

В скобках приведено расчетное значение первой собственной частоты ротора турбины со штатным расстоянием между опорами.

В таблице 2 приведены значения собственных частот колебаний системы роторов, а на рис. 3 формы колебаний системы роторов турбина-гибкая муфта-гидротормоз (стендового валопровода на четырёх опорах) при жёсткости опор  $K^{(n)}_{1,2}$  и системы. Число участков разбиения системы роторов  $z=100$ . Наличие массы имитатора генератора, установленного на полумуфте со стороны турбины, заметно снизило первые собственные частоты даже при значениях жесткости опор, характерных для стационарных энергетических машин. При снижении жесткости опор турбины до величин  $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^6$  кН/м первая собственная частота становится меньше рабочей частоты вращения. Имитатор генератора, таким образом, определяет первую форму колебаний системы роторов для принятой жесткости опор  $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^6$  кН/м. Заметна развязка системы роторов по гибкому элементу муфты.

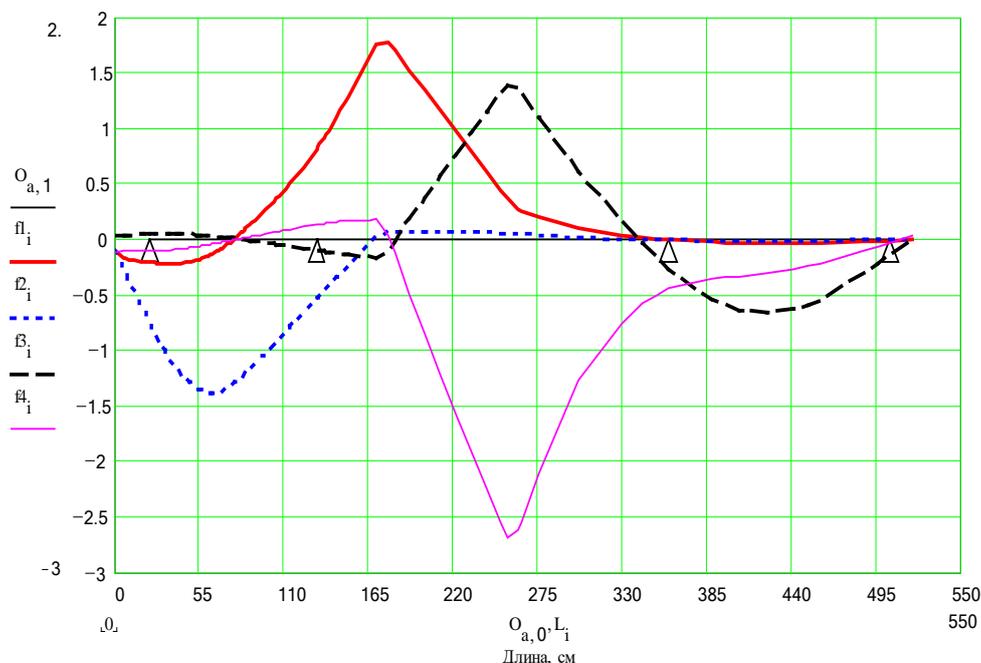


Рис. 3. Формы спектра разложения по частотам для системы роторов (рис. 2, а) без учёта податливости плёнки подшипников скольжения. f1-f4 – номер формы колебаний; жесткость опор:  $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^6$  кН/м;  $K^{(n)}_{3,4} = 0.1 \cdot 10^7$  кН/м

Таблица 2. Спектр частот колебаний системы роторов

Частоты, Гц	Жесткость опор: $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^6$ кН/м; $K^{(n)}_{3,4} = 0.1 \cdot 10^7$ кН/м	Жесткость опор: $K^{(n)}_{1-4} = 0.1 \cdot 10^7$ кН/м
$f_1$	47.4	61.1
$f_2$	63.0	88.5
$f_3$	88.9	112.2
$f_4$	115.9	114.0

Выполненные расчеты с принятой жесткостью опор показательны только для ориентировочной оценки частотных характеристик системы роторов, так как не учитывают динамических характеристик пленки (жесткости и демпфирования, зависящих от скорости вращения цапфы ротора) подшипников скольжения. Расчет вынужденных колебаний системы роторов с определением амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) дает более конкретную картину вибрационного состояния установки. Ниже приводятся результаты расчета АЧХ и сопоставление с результатами эксперимента.

В рассматриваемой системе роторов два подшипника турбины водяные, а два подшипника гидротормоза масляные. Расчёты жесткостных и демпфирующих характеристик подшипников на воде и на масле выполнены по методикам, разработанным на предприятии с учётом данных [5]. При этом расчёт жесткости и демпфирования подшипников на воде выполнен по заданному перепаду давления  $\Delta p$  при условии осевой подачи воды в зазор. Методика расчета динамических характеристик пленки воды подшипников скольжения подробно изложена в [3, 4].

В опорные элементы расчетной схемы (рис.2, а), таким образом, включены жесткость и демпфирование (К, В) пленки жидкости подшипников скольжения и жесткость (К) опорных элементов корпуса (фундамента). При этом жесткость пленки воды на рабочей частоте вращения ротора оказывается в 5-8 раз меньше жесткости пленки масла. В результате увеличение жесткости корпусных конструкций для пролета турбины мало сказывается на суммарной жесткости опорных элементов цапф ротора турбины. В таблице 3 приведен спектр разложения (по частотам) в случае отсутствия демпфирования в системе роторов. Приведенные в таблице 3 данные показательны в том плане, что они дают те низшие значения спектра частот колебаний, до которых могут опуститься собственные частоты системы роторов при отсутствии демпфирования. Формы колебаний системы роторов приведены на рис. 4.

Задача вынужденных колебаний системы роторов решается методом разложения по собственным формам колебаний [1 - 4]. Неуравновешенность принята на фланце полумуфты со стороны турбины (сечение 70, рис. 2, а) и равна 1 Нм.

Таблица 3. Спектр разложения (по частотам) для системы роторов с учётом жесткости пленки подшипников скольжения

Частоты, Гц	Жесткости опор: $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^6$ кН/м; $K^{(n)}_{3,4} = 0.1 \cdot 10^7$ кН/м	Жесткости опор: $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^7$ кН/м $K^{(n)}_{3,4} = 0.1 \cdot 10^7$ кН/м
$f_1$	21.16	22.07
$f_2$	24.92	25.42
$f_3$	42.3	42.33
$f_4$	64.85	64.86

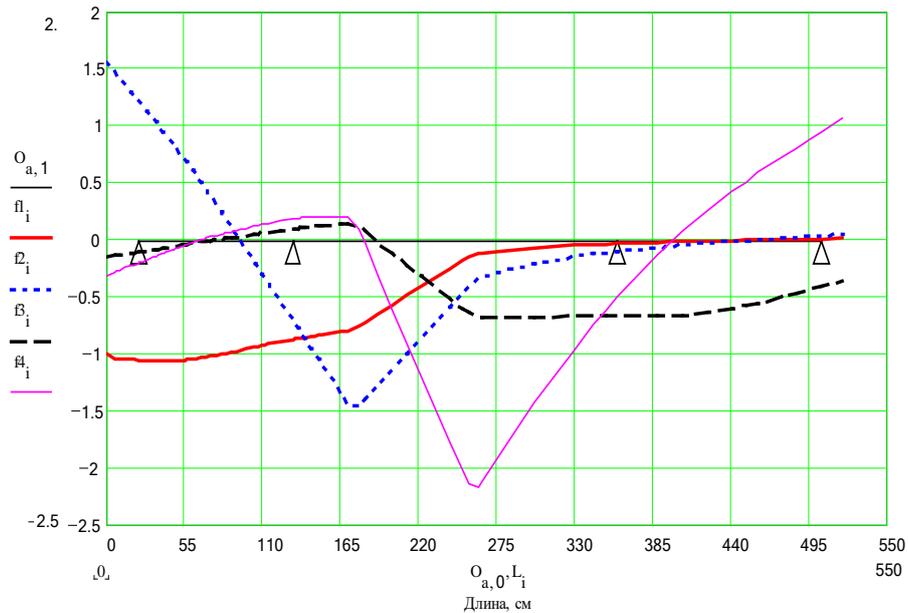


Рис. 4. Формы спектра разложения по частотам для системы роторов (рис. 2, а) с учётом податливости плёнки подшипников скольжения.  $f_1$ - $f_4$  – номер формы колебаний; жесткости опор:  $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^7$  кН/м;  $K^{(n)}_{3,4} = 0.1 \cdot 10^7$  кН/м

На рис. 5, 6 приведены расчетные АЧХ системы роторов для сечения 42 ротора (входной конус барабана) и сечения 70 (фланец полумуфты со стороны турбины) ротора. Сопоставление с данными (рис.8) испытаний ротора турбины на разгонно-балансировочном стенде «Шенк», выполненных позднее, показывает близкое совпадение положения резонансных зон (расчетных и экспериментальных). Обозначения величин на рисунках АЧХ:  $A_{g_i}$ ,  $A_{v_i}$  - амплитуды вынужденных колебаний в горизонтальном и вертикальном направлении колебаний, мкм;  $\omega$  - угловая скорость вращения ротора, рад/с.

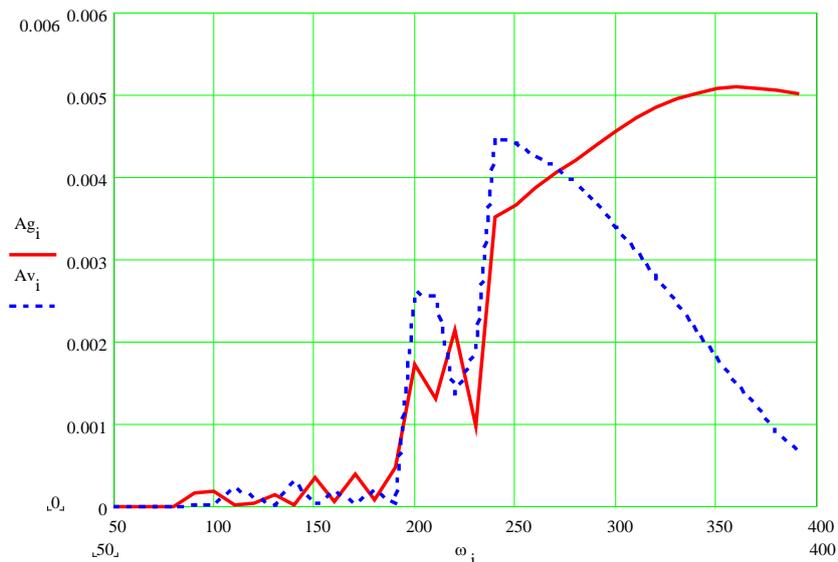


Рис. 5. АЧХ сечения 42 (передний конус барабана) при неуравновешенности на полумуфте со стороны турбины (сечение 70). Жёсткость и демпфирование плёнки воды подшипников 1, 2 турбины и плёнки масла подшипников 3, 4 гидротормоза, зависит от оборотов ротора. Жесткость опор:  $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^6$  кН/м;  $K^{(n)}_{3,4} = 0.1 \cdot 10^7$  кН/м.  $\omega_i$  – угловая скорость вращения ротора в рад/сек

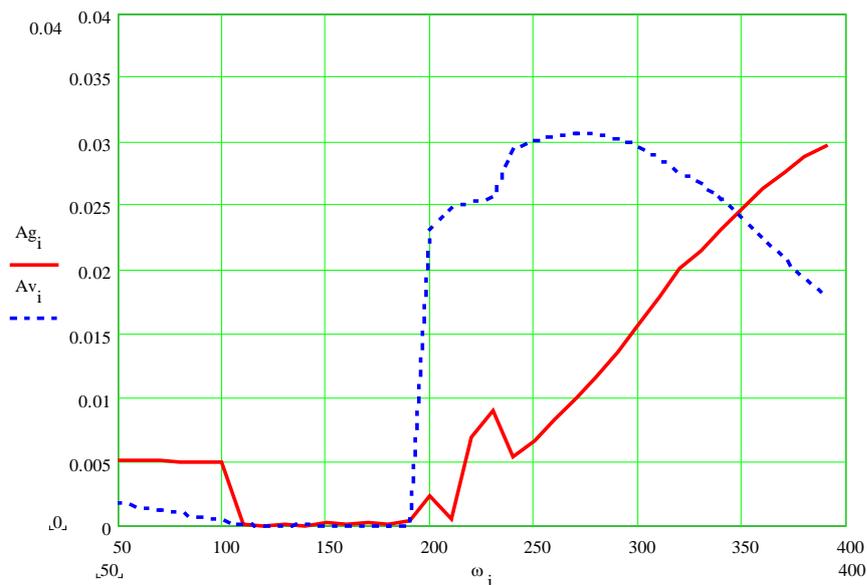


Рис. 6. АЧХ сечения 70 (фланец полумуфты со стороны турбины) при неуровненности на полумуфте со стороны турбины (сечение 70). Жёсткость и демпфирование плёнки воды подшипников 1, 2 и плёнки масла подшипников 3, 4 гидротормоза, зависит от оборотов ротора. Жесткость опор:  $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^6$  кН/м;  $K^{(n)}_{3,4} = 0.1 \cdot 10^7$  кН/м.  $\omega_i$  – угловая скорость вращения ротора в рад/сек.

На рис. 7 приведены АЧХ системы роторов для случая замены подшипников на воде на масляные подшипники скольжения. В последнем случае (при сохранении остальных условий расчета) резонансная зона выводится за пределы рабочей скорости вращения и тем больше, чем больше жесткость опор турбины.

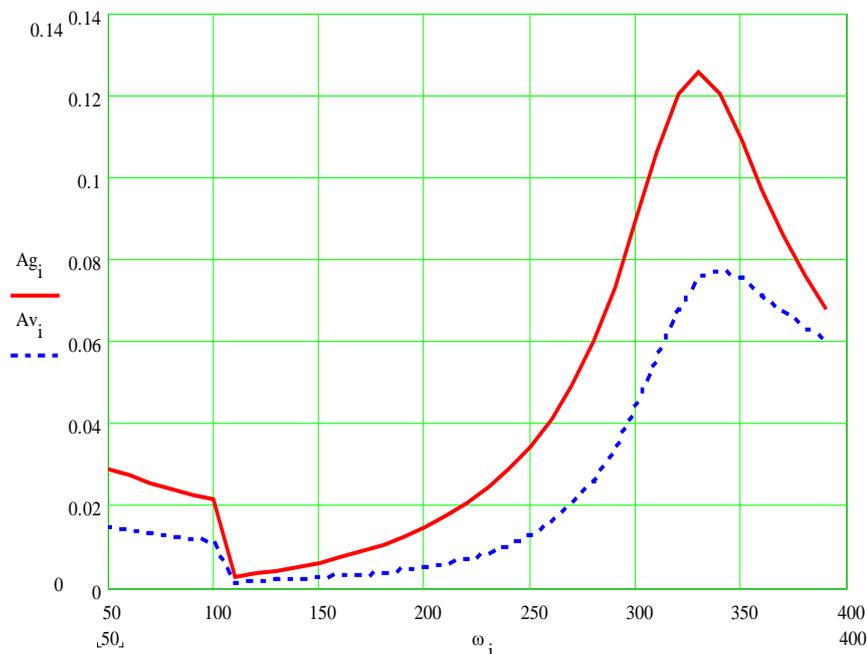


Рис. 7. АЧХ сечения 70 (фланец полумуфты со стороны турбины) при неуровненности на полумуфте со стороны турбины (сечение 70), если подшипники 1, 2 на воде заменены на масляные подшипники скольжения. Жесткость опор:  $K^{(n)}_{1,2} = 0.1 \cdot 10^6$  кН/м;  $K^{(n)}_{3,4} = 0.1 \cdot 10^7$  кН/м.  $\omega_i$  – угловая скорость вращения ротора в рад/сек

Таким образом, расчетные и экспериментальные исследования показали, что резонансная зона в рабочем диапазоне скоростей вращения определяется собственно ротором, а не корпусными элементами установки. Наличие её объясняет высокую виброактивность системы роторов с имитатором генератора при испытаниях. При этом формы колебаний ротора, значения собственных частот и положение резонансной зоны определяются, в основном, деформациями внутреннего вала и податливостью опорных элементов.

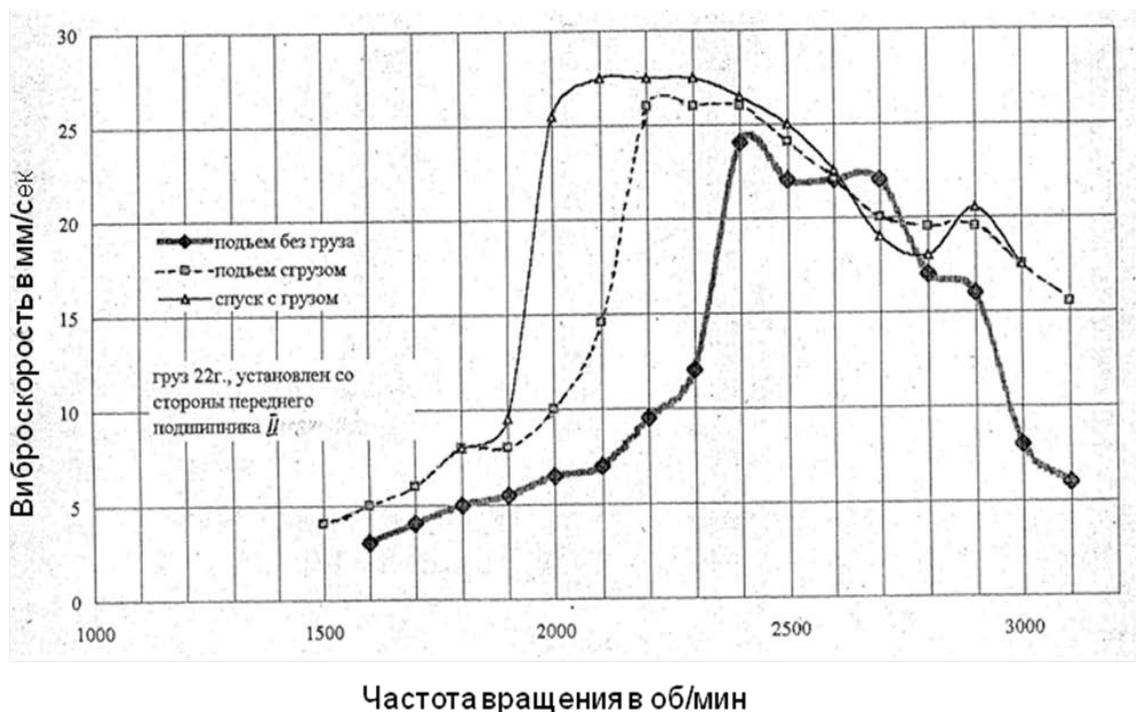


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика переднего (по ходу пара) подшипника ротора турбины, полученная на разгонно-балансирующем стенде «Шенк»

По результатам проведенных расчетов, подтвержденных экспериментом, и анализа конструкции ротора аварийную ситуацию на стенде можно объяснить следующим образом.

Объяснение возможной причины аварии. Вибрация хорошо отбалансированного турбинного ротора типовой конструкции остается в допустимых пределах даже при работе на критических оборотах. Поскольку произошла авария с труднообъяснимыми последствиями (например, расплавление вкладыша из тугоплавкого карбида вольфрама), то, очевидно, что здесь произошло событие, выходящее за рамки обычного.

Возможны две причины аварии:

Первая причина: полное или частичное прекращение подачи воды на подшипники. Это объяснение было бы самым простым и потребовало бы лишь схемных доработок установки для предотвращения повторения подобного отказа. Результаты проведенных расчетных исследований и анализа конструкции помогают в этом случае объяснить картину зарождения и развития аварии. Однако, как показал анализ аварии, вода на подшипники турбины подавалась во время эксперимента непрерывно.

Вторая причина: обкат ротора по корпусу. Уменьшенные зазоры между вращающимся ротором и неподвижными частями турбины при появлении прецессионного движения ротора могут привести к задеванию ротора о корпусные конструкции и, в конечном счете, к обкату ротора по корпусу и проскальзыванию по подшипникам. Воз-

можно два варианта обката: синхронный и асинхронный.

В первом варианте сохраняется проскальзывание, когда относительная линейная скорость ротора в точке контакта с корпусом не равна нулю. Ротор прижимается одной стороной к корпусу; сила взаимодействия между ротором и корпусом больше нуля, ротор тормозится силой трения и угловые скорости обката и собственного вращения ротора выравниваются. При этом, по крайней мере, усы уплотнений на роторе срабатываются, причём, с одной стороны. Уменьшение возбуждения по какой-либо причине (например, при выходе из резонансной зоны за счет торможения) нарушает контакт между ротором и корпусом и этот режим обката прерывается.

Асинхронный обкат наиболее опасен [2, 3]. Возникает он, когда происходит

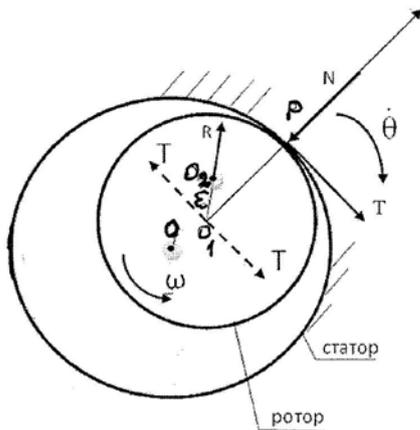


Рис. 9. Силы, действующие на ротор при его радиальном контакте со статором.  $P$  – точка контакта ротора со статором;  $O$  – центр расточки статора;  $O_1$  – центр сечения ротора;  $O_2$  – положение центра масс ротора;  $\omega$  – угловая скорость ротора;  $\dot{\theta}$  – угловая скорость прецессионного движения ротора;  $N$  – реакция статора;  $T$  – сила трения скольжения;  $R = M\omega^2\varepsilon$  – сила от небаланса ротора;  $\varepsilon$  – величина радиальной разбалансировки;  $M$  – масса ротора

сцепление ротора с корпусом в точке контакта. Этот вариант обката развивается при появлении достаточной силы прижатия, что возможно при значительных амплитудах прецессионного движения, обусловленного или автоколебаниями, или большим небалансом. Кинематическая схема контактного взаимодействия ротора с жёстким статором приведена на рис. 9. Контактное взаимодействие ротора с податливым статором, с анализом сил, возбуждающих синхронный и асинхронный обкат, влиянием различных факторов на развитие или погашение обката рассмотрено в [2, 3, 9].

В нашем случае сцеплению ротора с корпусом могла способствовать конструкция уплотнений с малыми зазорами: выступающие усы надбандажных уплотнений просто заклинило в канавках, прорезанных ими в керамических вставках. Линейные скорости ротора в точке контакта становятся равными нулю. Угловая скорость собственного вращения ротора уменьшается в соответствии с законом сохранения энергии, зато резко возрастает скорость прецессионного движения, которая теоретически (при жёстком статоре), по кинематическим соображениям, может достичь величины [2, 3, 8]:

$$\Omega = (R/\Delta) \cdot \omega = (500/0.20) \cdot \omega = 2500 \cdot \omega,$$

где  $\Omega$  – угловая скорость прецессионного движения;  $\omega$  – угловая скорость собственного вращения ротора;  $R$  и  $\Delta$  – радиус и зазор в районе надбандажных уплотнений.

При этом резко, в соответствии с увеличением скорости прецессионного движения, увеличивается сила прижатия ротора к корпусу, которая в несколько тысяч раз может превысить исходную неуравновешенность ротора. В этом случае развиваются самовозбуждающиеся колебания ротора от действия сил контактного взаимодействия ротора со статорными элементами. Вследствие этого процесс обката становится необратимым. Дальнейшие последствия аварии существенно зависят от податливости и демпфирования в местах контакта системы роторов со статорными элементами, быстрого действия системы защиты установки [9].

При обкате ротора по корпусу, по бандажным уплотнениям возросшая сила

прижатия деформирует корпус настолько, что выбираются зазоры в подшипниках (которые и без того невелики) и подшипники тоже нагружаются громадной силой прижатия. При этом в них, в отличие от точки контакта на корпусе, сохраняется проскальзывание с большими относительными скоростями, поскольку каждая точка контакта на корпусе в районе надбандажных уплотнений является мгновенным центром скоростей для ротора. Сочетание значительных усилий прижатия и скоростей проскальзывания в подшипниках привело практически к мгновенному выделению громадного количества тепла в локальной зоне: вся кинетическая энергия стенового валопровода в течение нескольких секунд за счет трения обратилась в тепло. Это и обусловило разрушение подшипника.

Скорее всего, при выбеге ротора, по мере приближения к резонансным оборотам и увеличения вибрации, ротор прошел обе стадии обката: синхронную и асинхронную. “Инициатором” всего процесса могла стать вода, попавшая в полость бочки ротора.

По нашему мнению, вторая причина аварии, рассмотренная выше, очень вероятна, при неуравновешенном роторе с установкой имитатора ротора генератора. Поэтому для повышения надежности работы турбины в эксплуатации необходимы конструктивные изменения ротора, увеличивающие его жесткость и исключают попадание воды во внутреннюю полость ротора, тщательная балансировка ротора, а также изменение конструкции подшипников. Разумеется, следует выбирать между малыми зазорами в уплотнениях, способствующими росту экономичности установки, и необходимостью увеличения зазоров между жесткими элементами ротора и корпуса, как одним из способов борьбы с возникновением наиболее опасной формы обката - асинхронного обката.

#### **Выводы.**

1. Связь между наружным барабаном и внутренним валом через фторопластовое уплотнительное кольцо имеет очень малую жесткость. В процессе эксплуатации эта связь может вообще исчезнуть из-за разрушения или обмятия кольца и появления зазора. При такой схеме закрепления наружный барабан фактически представляет собой диск своеобразной конструкции со значительным экваториальным моментом и центром масс, смещенным вдоль оси относительно места закрепления диска. Такое своеобразие соединения барабана с валом способствует прецессионному движению ротора.

2. Гидростатические водяные подшипники центрируют ротор по оси подшипников. В этих условиях толщина пленки воды намного больше, чем при гидродинамическом режиме работы. По нашей оценке, это привело к тому, что водяная плёнка имеет заметно меньшую жесткость и демпфирование, чем водяная или масляная пленка в обычном гидродинамическом подшипнике. Жесткость пленки воды настолько мала, что управление динамическими свойствами ротора ужесточением опорной конструкции может оказаться малоэффективным.

3. Значение критической частоты вращения ротора с учетом жесткости пленки воды в подшипниках ниже рабочих оборотов (ротор гибкий). Это означает, что при наборе оборотов или при выбеге, при проходе через резонансную зону возможно повышение вибрации, амплитуда которой тем больше, чем больше небаланс и меньше демпфирование. В варианте расчета с обычными масляными подшипниками гидродинамической смазки резонанс расположен выше рабочей частоты вращения, т.е. в этом случае ротор жесткий и отстройка от рабочей частоты тем больше, чем больше жесткость опор (корпусных конструкций).

4. Имитатор ротора генератора увеличивает массу консоли. Известно, что консольные роторы более виброактивны, чем роторы без консолей. Массивная консоль, так же как и барабан, способствует прецессионному движению ротора. Закрепление имитатора на одной из полумуфт может вызвать появление большого небаланса, по-

скольку с валом полумуфта соединена шлицевым соединением, имеющим зазоры.

5. Проверка плотности уплотнения фторопластовым кольцом показала, что после непродолжительной работы турбины оно начинает пропускать воду (до 60 мл/мин) во внутреннюю полость. В условиях прецессионного движения ротора эта вода создает значительный небаланс, который, суммируясь с небалансом имитатора ротора генератора, вызывает высокий уровень вибрации при прохождении резонансной зоны. При наличии воды во внутренней полости возможны также явления автоколебаний [6, 7].

6. Конструкция уплотнений обеспечивает малые величины зазоров в них. Это обстоятельство, благоприятное для экономичности, может способствовать аварии. С другой стороны, если усики уплотнений прорезают канавки в уплотнительных кольцах (как это было в эксперименте), то демпфирование колебаний с большими амплитудами увеличивается, что снижает опасность развития асинхронной формы обката ротором статорных элементов.

#### Список обозначений

$f$  - собственная частота колебаний, Гц; индекс внизу означает номер частоты;

$K$  – жесткость, кН/м;  $B$  – демпфирование, кН·с/м; индекс 1-4 внизу обозначает номер опоры;

$A_g, A_v$  - амплитуды вынужденных колебаний в горизонтальном и вертикальном направлениях, мкм;

$\omega, n$  - угловая скорость вращения ротора, рад/с и частота вращения ротора, об/мин (Гц);

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

$n_{кр}$  - критическая частота вращения, об/мин (Гц);

$R, \Delta$  – радиус и зазор в районе надбандажных уплотнений, мм;

$\Omega$  - угловая скорость прецессионного движения, рад/с.

**Список литературы:** 1. Костюк А.Г., Шатохин В.Ф. Колебания турбоагрегата на фундаменте, вызываемые неуравновешенностью валопровода // Теплоэнергетика. 1971, №12, с.79-82. 2. Шатохин В.Ф. Колебания роторов турбоагрегатов с обкатом ротором статора (методы математического моделирования и программные средства). Dusseldorf: Lambert Academic Publishing. 2016 г.– 308 с. 3. Шатохин В.Ф. О частотных характеристиках ротора питательного насоса ПН-1500- 350 // Вестник машиностроения, 1999, № 6, с.13-19. 4. Шатохин В.Ф., Методы моделирования и анализ динамических характеристик питательного турбонасосного агрегата // Тяжёлое машиностроение. 2015, № 11-12, с.29-34. 5. Позняк Э.Л. Динамические свойства масляной плёнки в подшипниках скольжения // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. - 1961. - №6. - С.53-67. 6. Епишев Л.В. О динамической неустойчивости вращающегося ротора при неполном наливе жидкости // Научные доклады высшей школы. Машиностроение и приборостроение. 1959, №2, с. 66-73. 7. Дайч И.М., Бар И.Л. Колебания вращающегося твердого тела с полостью, частично заполненной вязкой жидкостью // Прикладная механика. 1973, том 1X, в. 5, с. 64-69. 8. Денисов Г.Г. и др. Об обкате ротора по жесткому подшипнику // Механика твердого тела . 1973, №6, с. 4-13. 9. Шатохин В.Ф. Возбуждающие обкат силы при колебаниях ротора с задеваниями о статор // Теплоэнергетика. 2017. №7. С. 17-22.

## ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО СТЕРЖНЯ НА ПОЯВЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ МЕЖСЛОЙНЫХ ТРЕЩИН

Щугорев В.Н., Евреинова Г.Д., Хроматов В.Е., Горбачев П.А., Гольцев А.А.

(НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия)

Тел./Факс: +7 (916) 6043425; E-mail: [Shchugorev.VN@gmail.com](mailto:Shchugorev.VN@gmail.com)

**Abstract:** *The work is devoted to the study of the nature of the reaction of a half-space of a laminated glass composite to a low-speed impact. To assess the stress state, the exact theoretical solution and the results obtained experimentally using high-speed video are compared. The study makes it possible to predict the formation of defects due to contact interaction, as well as the appearance of layering inside the volume, generated by wave processes.*

**Keywords:** *composite materials, indenter, stresses, glass composite, tension, compression, crack, experiment, theoretical solution.*

Композитные материалы (композиты) обладают рядом уникальных свойств, которые проектируются под работу конкретного элемента [1]. Они открывают широкие возможности для улучшения существующих и разработки новых конструкций. Такие материалы можно с уверенностью назвать материалами будущего, поскольку ими можно заменить классические материалы, такие как сталь, алюминий и т.д. В настоящее время композитные материалы все чаще применяют в энергомашиностроении из-за их высоких механических свойств: легкости, высокой прочности, жесткости и немагнитности.

Однако наряду со всеми их положительными качествами существуют и недостатки. Например, композиты довольно слабо сопротивляются межслойным напряжениям, что определяется свойствами матрицы (связующего) создавать и удерживать форму конструкции; армирующим же компонентам - высоко прочным и жестким волокнам - отводится роль элемента, воспринимающего нагрузку.

На данный момент широко разработаны эффективные методы оценки поведения конструкций из композиционных материалов в условиях статического нагружения, однако не существует сравнимых по эффективности методов расчета поведения композитных конструкций при ударном воздействии [2].

Исследования проведены в лаборатории механики кафедры РМДиПМ (рис. 2). Экспериментальная установка представляет собой ударник (4) (тело, массой 15 кг со стальным сферическим индентором (3)), находящийся в канале-направителе (6), а также покоящуюся на стальном постаменте (1) мишень (2) (композитный блок, с толщиной 100 мм). В канале-направителе для удобства замера высоты подъема ударника изготовлены смотровые окна (5). Мишень в сравнении с размерами ударника можно считать полубесконечным пространством. Ударник поднимается на высоту  $H$  с помощью условно нерастяжимого для данного эксперимента каната (8), пропущенного через блоки (7).

Для видеофиксации использовалась высокоскоростная видеосъемка с частотой 1000 кадров в секунду [3], однако скорость волновых процессов выше, что позволяет фиксировать факт появления расслоений в материале.

В работе исследовался и сравнивался характер реакции полупространства из слоистого стеклокомпозита на низкоскоростное ударное воздействие. Возникающие при ударе повреждения в области площадки контакта зависят от энергии, импульса, жесткости и радиуса индентора и мишени. Вместе с тем в объеме материала создаются волны растяжения и сжатия, меняющие свой знак при отражении от границ исследуемой области.

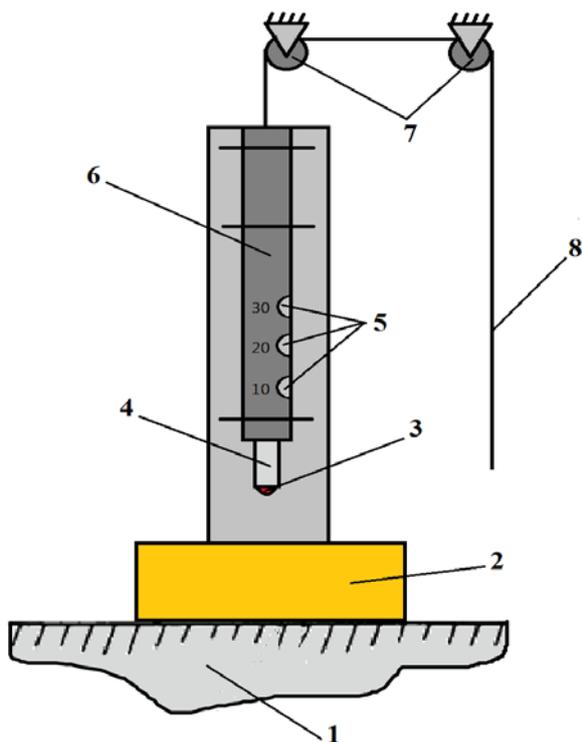


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. Экспериментальная установка на кафедре РМДиПМ

Таким образом, напряжения могут значительно увеличиваться в исследуемом объеме. Это, в свою очередь, приводит к образованию расслоений вне области контакта, показанной на рис. 2. Трещины выделены проникающей жидкостью (пенетрантом).

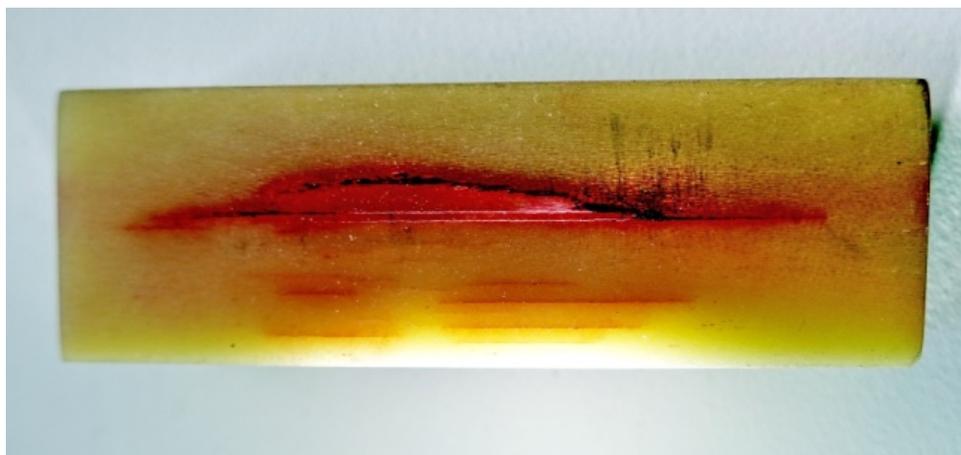


Рис. 3. Появление вторичных трещин при ударе по внешней поверхности

Для оценки напряженно-деформированного состояния был проведен конечно-элементный расчет стержня из слоистого композита на действие низкоскоростного удара. В качестве расчетной схемы (рис. 4) рассматривается стержень с габаритными размерами 2см×2см×6см (аналогичный экспериментальному образцу) с приложенной в центре верхней грани динамической нагрузкой.

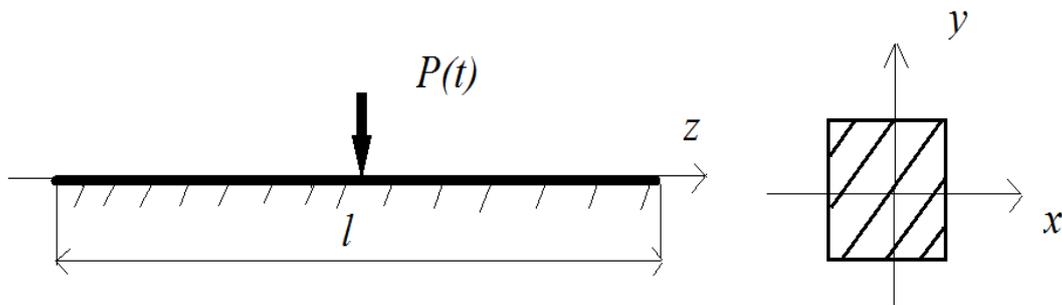


Рис. 4. Расчетная схема

В качестве удара в задаче предлагается рассматривать давление, зависящее от времени и действующее на площади контакта индентора и стержня. Сосредоточенная нагрузка, действующая в момент удара, рассчитана по формуле 1.

$$F = \left( \frac{4 \cdot \sqrt{R_1}}{3 \cdot \pi \cdot (k_1 + k_2)} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \left( \frac{5 \cdot V^2}{4 \cdot M} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

$$\text{где } M = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}; k_{1,2} = \frac{1 - \nu_{1,2}^2}{\pi \cdot E_{1,2}}$$

где  $m_1$  – масса индентора,  $m_2$  – масса мишени,  $R_1$  – радиус ударника,  $t$  – время удара,  $\nu_{1,2}$  – коэффициенты пуассона для материалов,  $E_{1,2}$  – модули упругости материалов,  $V$  – скорость индентора перед ударом.

Давление, действующее в области контакта, находим по формуле 2:

$$P = \frac{F}{S} \quad (2)$$

где  $S$  – площадь контакта

Конечно-элементная модель показана на рисунке 5.

График зависимости давления на площадку контакта от времени приведен в таблице 1.

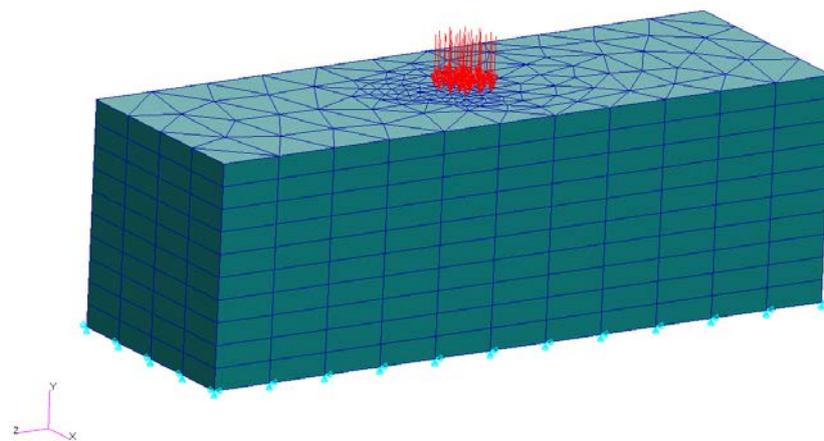


Рис. 5. Конечно-элементная модель  
График зависимости давления от времени

Таблица 1.

Время, с	Давление, P
0	0
0,05	1,95E9
0	0

Анализ результатов показал, что перемещения распределяются волнообразно (рис. 5,6) не только на внешнем слое, но и на протяжении всего объема.

Модель достаточно точно описывает волновые процессы в рассматриваемом композите.

Перемещения имеют конечное значение даже после окончания действия нагрузки. Это говорит о разрушении верхних слоев стеклотекстолита вследствие превышения предела прочности материала.

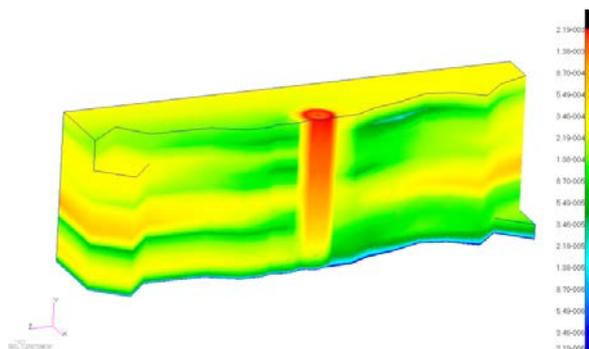


Рис. 5. Перемещения в объеме элемента в момент удара

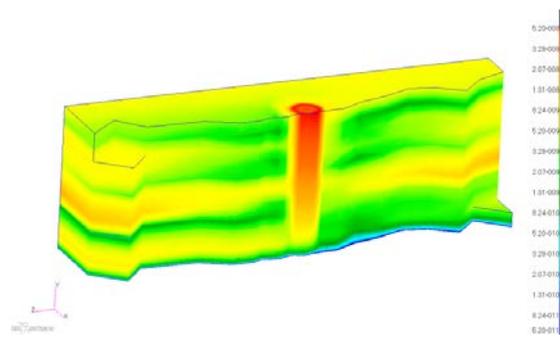


Рис. 6. Перемещения в объеме элемента после удара

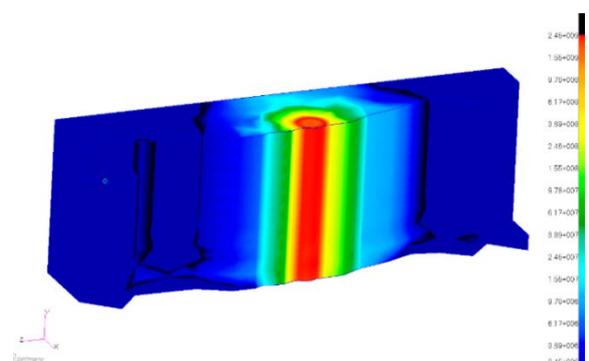


Рис. 7. Напряжения в объеме элемента в момент удара

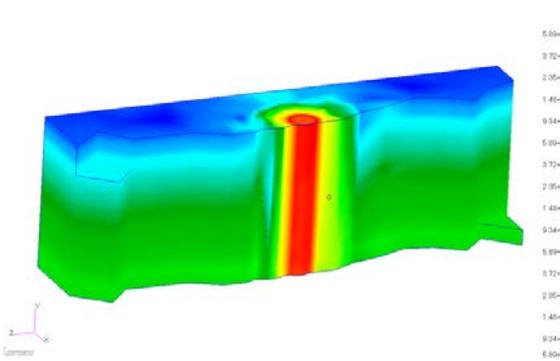


Рис. 8. Напряжения в объеме элемента после удара

На рис. 8 видно волновое распределение напряжений после окончания действия нагрузки. Данный результат позволяет спрогнозировать дальнейшее поведение модели из стеклотекстолита, а именно – в каком месте при следующем нагружении в модели произойдет разрушение.

Изучение волновых процессов с помощью эксперимента достаточно дорогая процедура, требующая много времени, однако после проведения данных мероприятий (высокоскоростная видеофиксация) можно получить достаточно информации для полного изучения процесса и при этом понять все его особенности. В настоящее время совершенствование CAE-программ позволяет изучать такие процессы при отсутствии возможности изучить их экспериментально.

В настоящей работе оценена возможность появления вторичных трещин. Проведенное исследование позволяет прогнозировать образование поверхностных дефектов, обусловленных контактным взаимодействием, а также появление расслоений внутри объема, порождаемых волновыми процессами. Эти данные необходимо учитывать в конструкциях из композитов и в областях, где может происходить похожее ударное взаимодействие.

**Список литературы:** 1. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1990. 2. Евреинова Г.Д., Гольцев А.А., Макаров М.С., Щугорев В.Н. Влияние динамического нагружения композитного стержня на появление вторичных межслойных трещин // Тез. Докл. XXVIII Междунар. НТК студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика». – М.: ООО «ЦПУ «Радуга», 2022. 3. Мурзаханов Г.Х., Щугорев В.Н., Щугорев А.В., Цой В.Э. Использование скоростных Action-видеокамер для регистрации быстро протекающих механических процессов. Вестник РАЕН. 2018 Т. 18. № 2.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ БАЛКИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ

Щугорев В.Н., Сапунова Л.С., Егоров А.В., Попиль С.В., Щугорев А.В.  
(НИУ МЭИ, г.Москва, Россия)  
E-mail: Shchugorev.VN@gmail.com

**Abstract:** The aim of the work was to evaluate the contribution of internal friction of a composite beam when comparing attenuation decrements.

**Keywords:** composite beam, decrement, vibrations, damping characteristics, amplitude, frequency, composite materials, dissipation, energy, natural frequency.

В настоящее время композиционные материалы все чаще применяются в энергомашиностроении из-за их высоких механических свойств. Исходя из результатов работы можно в дальнейшем применять композитные материалы при конструировании различных подводных и надводных сооружений. За счет слоистой структуры [1] композитных материалов, достигаются хорошие прочностные характеристики и стойкость к воздействию окружающей среды. В настоящее время немаловажным являются сейсмические расчеты подводных сооружений, в этом случае необходимо знать, как ведут себя различные элементы конструкции, к примеру, балочные элементы конструкции, в водной среде.

Были проведены эксперименты с образцами из органопластика (1, рис. 1), углепластика (2, рис. 1), полиметилметакрилата (3, рис. 1) и стали (4, рис. 1), при разных давлениях (0, 50-80, 100, 300, 760 мм рт ст).

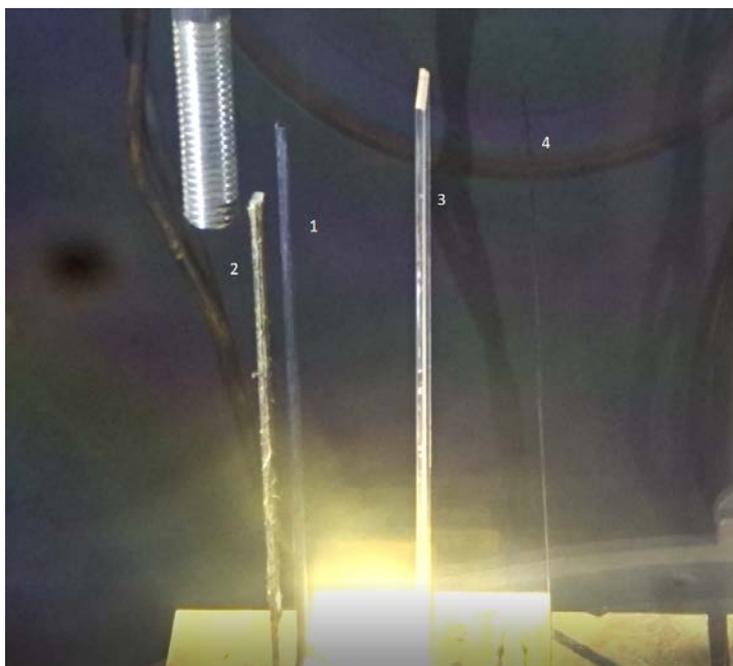


Рис. 1. Установка

Установка находилась в вакуумной камере объемом 5 куб. м. С одной стороны балка «жестко» закреплялась, а с другой – нагружалась с помощью манипулятора. В качестве фиксации использовалось современное видеоборудование GoPro [2], с помощью которого можно записать колебания балки со скоростью 250 кадров в секунду, что позволяет определить амплитуду колебаний. На рис. 2 представлены положения образца за время полупериода.

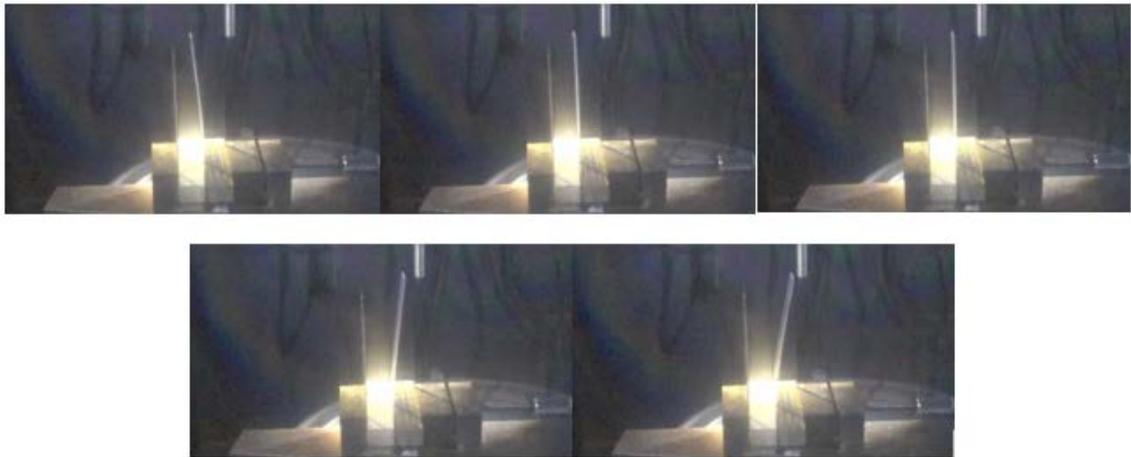


Рис. 2. Положения образца

После обработки видео материалов в программе SonyVegasPro, были получены декременты затуханий колебаний балок при разном давлении (рис. 3).

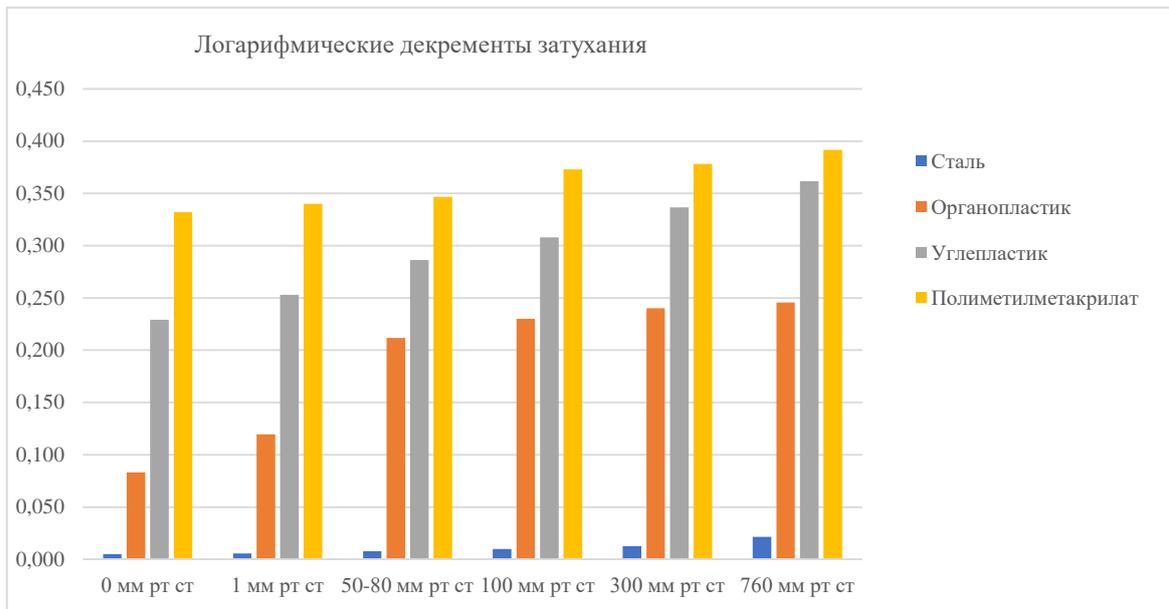


Рис. 3. Диаграмма декрементов затухания

При сравнении логарифмического декремента колебаний в зависимости от разного давления можно оценить вклад внешнего трения, при разности логарифмических декрементов, когда есть давление с логарифмическим декрементом при вакууме (рис. 4).

Конструкционное трения полагается равным нулю, т.к. балка жестко закреплена. Логарифмические декременты затухания для образцов в вакууме определяют вклад внутреннего трения.

Данные эксперименты позволяют проводить расчеты типовых элементов конструкции каким является балка в разных средах, это является очень актуальным сегодня, при строительстве северного потока, колебания в соленой воде труб, в нефтегазовой промышленности – ректификационные колонны (физический способ разделения смеси компонентов, например смесь делится на газ, бензин, и др. вещества), везде есть балочные элементы ну и в пищевой промышленности, подсолнечное масло

широко применяется в быту оно выпускается в огромных объемах и везде присутствуют балочные элементы которые являются как крепежными элементами внутри баков и чанов с этим маслом.

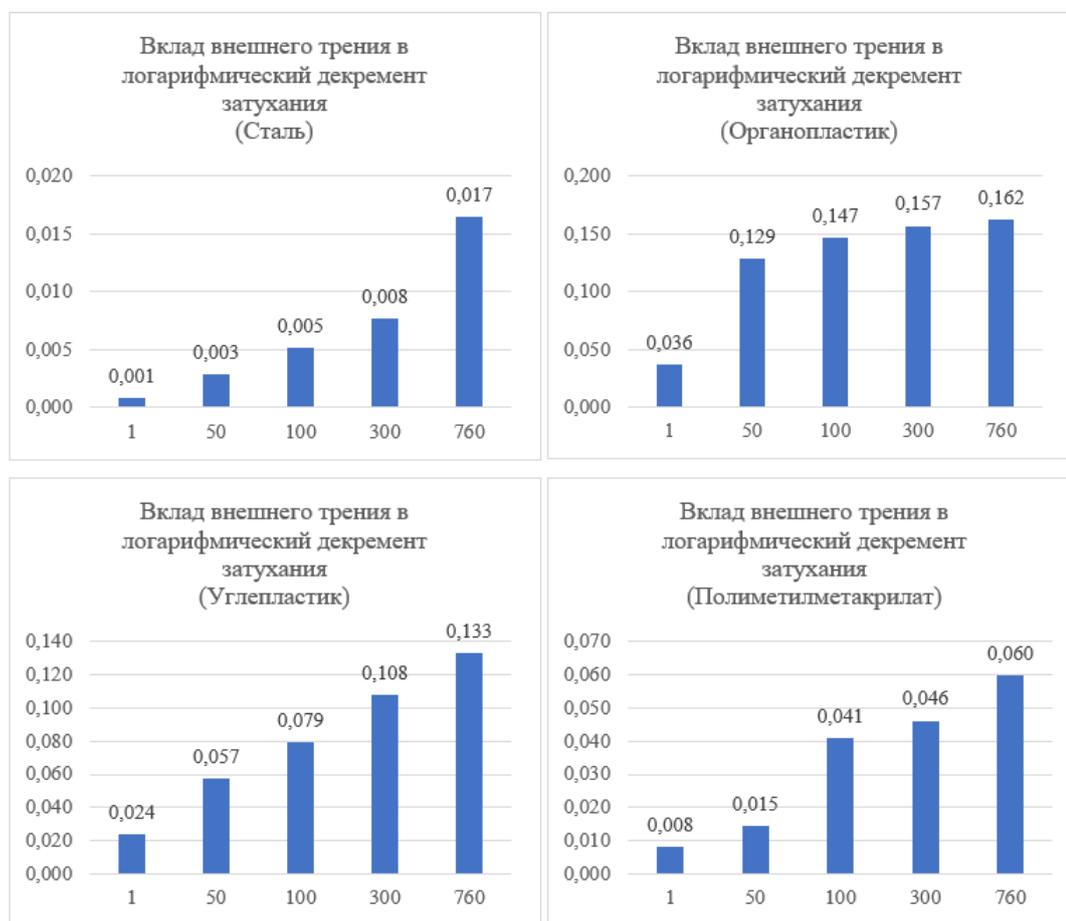


Рис. 4. Вклад внешнего трения в логарифмический декремент затухания от давления

Балочные элементы используются везде, это может быть крылом, которое колеблется, если это безвоздушное пространство – космические корабли, даже если взять просто бак, в котором будем откачивать воздух, чтобы его спроектировать там тоже много всевозможных балочных элементов внутри этого бака, они тоже требуют расчета.

**Список литературы:** 1. Болотин В.В. Механика разрушения композитов // Композиционные материалы, справочное издание/В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. М. Машиностроение, 1990. - С. 158 - 188. 2. Мурзаханов Г. Х., Щугорев В. Н., Щугорев А.В., Цой В.Е. Использование скоростных Action видеокамер для оценки частот собственных колебаний композитной балки. Тр. 32-й сессии Российского акустического общества. – 2019. 3. Гольцев А.А., Егоров А.В., Щугорев В.Н. Экспериментальный анализ композитной балки с использованием высокоскоростной видео и аудио фиксации в водной среде // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Р 154 Двадцать седьмая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (11–12 марта 2021 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2021. — 1248 с.

## TO THE DESIGN OF RECONFIGURABLE AND BALANCED MULTIPURPOSE ASSISTIVE DEVICES

Ghazaryan S.D.<sup>1</sup>, Harutyunyan M.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (NPUA, Yerevan, Armenia) Tel.: +374(044)228840;

E- mail: [sarik.ghazaryan@polytechnic.am](mailto:sarik.ghazaryan@polytechnic.am)

<sup>2</sup> (NPUA, Yerevan, Armenia) Tel.: +374(093)998840; E- mail: [mharut@seua.am](mailto:mharut@seua.am)

**Abstract.** *Over the past decades, devices for assisting the human musculoskeletal system have been successfully integrated as well into medicine, healthcare and daily life, as into industry, military affairs and astronautics. To ensure the portability of such devices, the static gravity balancing of their links is often done with the use of springs, since having small masses they provide significant force balancing.*

*In this paper, constructive schemes with different degree of mobility of multipurpose portable devices for human limbs supplementary assisting are suggested, their static balancing methods and approaches which can also be applied in the design of manipulation systems, are given.*

**Keywords:** *assistive device, exoskeleton, gravity balancing, spring.*

**Introduction.** Assistive devices, such as exoskeletons and manipulation mechanisms, are the linkage mechanisms that can enhance the functionality of human limbs not only physically, but also quantitatively. Depending on the purpose, these active and/or passive assistive devices can operate in static/quasi-static and dynamic modes and have one or more degrees of mobility (DOF). To statically balance the links from acting gravitational forces and their moments different balancing systems are used [1-5]. In linkage mechanisms, each degree of freedom needs its own balancing system, hence the increasing of the device mobility requires an increase in the number of such systems. This can falter the portability of the device, but the application of the springs, providing force balancing and having small masses [3, 4] can assure back the portability.

Assistive devices can also be conditionally divided into the "Total" ones - that assist a human whole loco-motional system and have an emphasis on the ground, allowing a person to lift heavy weights, and the "Local" ones - that only distribute the physical loads and weights over the user's body. Previously, the auteurs published different series of total [3, 4] and local [4, 6, 7] assistive devices, such as balanced movable orthoses and exoskeletons for the lower and upper extremities, as well as a multipurpose reconfigurable portable passive-balanced local device with different DOF, designed to hold heavy and uncomfortable objects, tools and firearms in the desired position (Fig. 1 and Fig. 2) [8, 9]. In this paper, the application, modeling, and applied static balancing methods/ approaches are considered for these recently published schemes.

**1. Portable passive 1-DOF balanced assistive device for industrial purposes.** The principles of reconfigurability of the portable passive-balanced device-supporter, designed to hold heavy and uncomfortable objects and tools in the desired position are shown in Fig. 3. Here, telescopic links are used to adjust the geometry of the device, as well as coil springs and force adjusting mechanisms for the system balancing and the convenient use of the device.

A lumbar rigid link 1 with weight distribution pillows 1' is attached to the operator's lower back by using a belt and/or a vest-corset. Then, on this link 1 on the right for right-handers, or the left for left-handers, through the h1 hinge, telescopic links are attached: 2-2'-

horizontally (lateral support) and 3-3' - vertically (elbow support), an elbow pad 4 is placed on link 3' (see Fig. 3a).

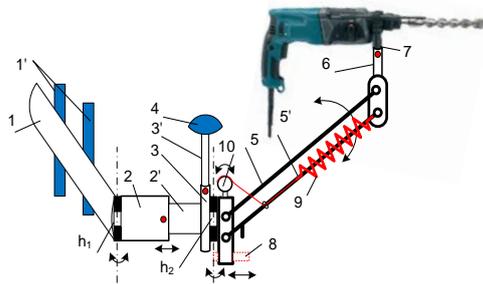


Fig. 1. Industrial assistive device - supporter (with 1 DOF) for the distribution of the weights of heavy instruments [8].

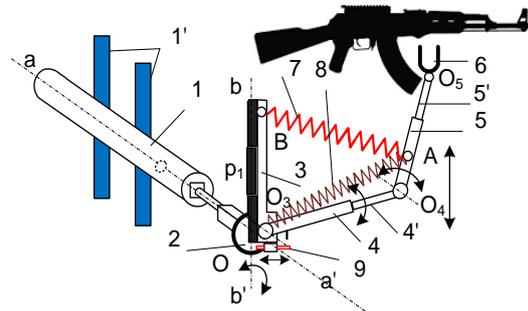


Fig. 2. Military assistive device-stabilizer-supporter (with 2 DOF) for the distribution of the weights of firearms [9].

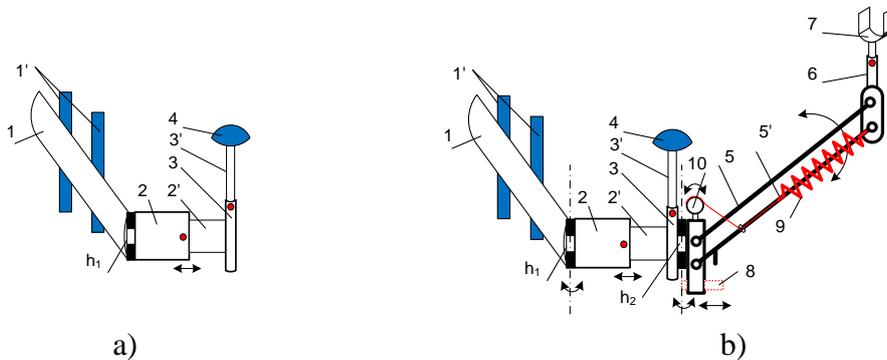


Fig. 3. Reconfigurability of the Industrial assistive device-supporter (with 1 DOF): a- lumbar, side and elbow basic support, b- 1 DOF balanced 3rd-hand-support

Such a support structure has the right to individual existence, and can find application not only in industry, but also in military affairs to support arms and weapons or ammunition, and also in medicine for supporting an injured or operated arm. If necessary, pad 4 can be easily removed from the elbow support and assistance can be stopped.

To ensure the structural reliability - strength and stiffness conditions - it will be necessary to consider the torsion case in the h1 hinge zone arising by the moment

$$M_{1gtor} = F_{1gmax}l_{h1}, \quad (1.1)$$

formed by gravity force of supported weight  $F_{1gmax}$  and lever  $l_{h1}$ .

By attaching pantograph 5 (that can also be telescopic) with an adjustable telescopic link 6 to the lateral support through the h2 hinge, a new system can be reconfigured (see Fig. 3b). Link 6 can have various gripping-attachments designed for the required application. To balance the pantograph 5 a linear non-zero initial length cylindrical tension spring 9 is applied [2-5]. The free end of this spring is retracted to a roller regulator by means of a metallic cable; this connection allows varying the force of balancing spring and assuring the condition of the system balance. So now, the pantograph can swing in balance in the angle range  $\varphi \in [0^{\circ}; 180^{\circ}]$ , and if necessary, its lowering can be limited using lock 8.

Now we should consider a new torsion case in the h1 hinge zone formed not only by the gravity force  $F_{1gmax}$ , but also by the reduced gravity force  $F'_{2gmax}$ :

$$M_{2gtor} = (F_{1gmax} + F'_{2gmax})l_{h1}. \quad (1.2)$$

Also, it is important to consider the strength and stiffness conditions for torsion case in the h2 hinge zone formed by the gravity force  $F_{2gmax}$ :

$$M_{3gtor} = F_{2gmax}l_{h2max} = F_{2gmax}l_5. \quad (1.3)$$

This gravitational moment is defined as

$$M_{3gtor} = (m_{struc} + m_{supp})l_5g \sin \varphi, \quad (1.4)$$

where  $m_{struc} \approx m_5 + m_6 + m_7 + m_9$  is the mass of the construction reduced to the point D; the mass of the spring  $m_9$  can be estimated and/or included in the mass of link 5, or totally excluded by applying the spring remoting technique [5];  $m_{supp} = m_{11}$  is the mass of the supported object,  $l_5$  is the length of the link 5,  $g$  is the gravitational constant,  $\varphi$  is the positioning angle of the link 5.

The balancing moment is defined as

$$M_{b9} = F_S r_{XA} = F_S l_{O5A} \sin \gamma \quad (1.5)$$

where  $F_S$  is the elastic force of the balancing spring, defined as

$$F_S = F_0 + k(l_S - l_0); \quad (1.6)$$

where  $k$  is the stiffness coefficient,  $l_0$  and  $l_S$  are the initial and current values of the working length;  $F_0$  is the initial force of the spring. By turning the winding roller 10 with radius  $r_{10}$  on an angle  $\beta$  we can assure the desired value of  $F_0$ :

$$F_0 = k\beta\pi r_{10}/180; \quad (1.7)$$

and, in a particular case when

$$F_0 = kl_0 \quad (1.8)$$

the balancing moment can be expressed as

$$M_{b9} = kl_S l_{O5A} \sin \gamma = kl_S l_{O5A} l_{O5B} \sin \varphi / l_S = kl_{O5A} l_{O5B} \sin \varphi. \quad (1.9)$$

The unbalance of the system is estimated by the difference in moments from the gravitational forces of the links 5-7 and supported object 11 and the balancing force of the spring 9:

$$M_u = M_{3gtor} - M_{b9} = ((m_{struc} + m_{supp})l_5g - kl_{O5A}l_{O5B})\sin \varphi. \quad (1.10)$$

So, the system can be considered balanced, when the constant part of this equation is equal to zero:

$$(m_{struc} + m_{supp})l_5g - kl_{O5A}l_{O5B} = 0 \quad (1.11)$$

By solving this equation, we obtain the value of  $k$ .

**Numerical example 1 - Static balancing of a system with 1-DOF.** The system balancing is performed in the case of the following values of the system parameters:  $m_5 = 0.2$  kg,  $m_6 = 0.1$  kg,  $m_7 = 0.1$  kg,  $m_9 = 0.2$  kg,  $l_5 = 0.5$  m,  $l_0 = 0.2$  m,  $l_{O5A} = l_{O5B} = 0.15$  m,  $m_{11} = 10$  kg. We get:  $k = 2356$  Nm,  $F_0 = 471$  N.

**2. Portable passive 2-DOF balanced assistive device for military purposes.** The next schema proposed by the authors was a reconfigurable, portable and passive-balanced local exoskeleton designed to hold a firearm during one-handed shooting.

There are three main firearm-shooting positions: standing, kneeling and prone. When shooting from standing and kneeling positions, the shooter should hold the firearm with both hands to ensure the retention and stability of the firearm. But in the case of one-handed shooting, often right hand, the shooter must exert greater efforts to overcome the gravity of the firearm, as well as to compensate for its knockback. To ensure required gripping and firearm stability, it is necessary to use a ground-supported stand for fixed-position shooting, or a local stabilizer for weapons with support on the shooter's back for mobile shooting.

In a local shooter-weapon-support system, it is necessary to provide the stability and balance of the weapon in the profile plane for the targeting fire. The design of a reconfigurable 2-DOF passive-balancing device intended to hold a firearm when firing with one hand from standing, kneeling and prone positions, shown in Fig.4 [9] is suggested for this purpose.

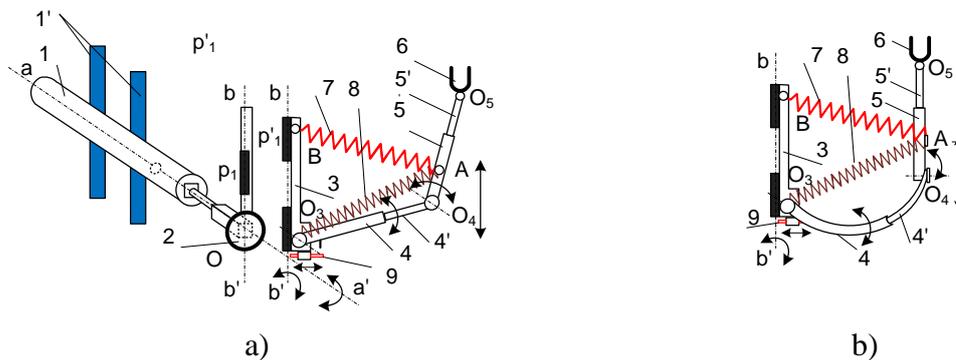


Fig. 4. Reconfigurability of the military assistive device-supporter (with 2 DOF): a- a principal design, b- 1 DOF balanced 3rd-hand-support

Here, as before, the telescopic links are used to adjust its geometry and the cylindrical springs are applied for power balancing these links [6-8]. The cylindrical zero-free length springs are used [2-5], and from the system potential energies constancy condition, the "indifferent balancing" is ensured throughout the entire swing range of both swinging links of the assisting device. The lumbar rigid link 1 with weight distribution pillows 1' are attached to the operator's lower back using a belt and/or a vest-corset. In the sleeve, first with a square, and then a circular section of the hole of link 1 on the right, a pin of link 2 is horizontally inserted, respectively, with round and square sections (see Fig. 4). This prevents the action of torque relative to the axis a-a' when the finger of link 2 is fully inserted. Link 3 is connected to the vertical end of link 2 through the hinge p1, which allows the entire subsequent structure to rotate relative to the vertical part of link 2. The authors previously [3, 4] have published the rest part of the structure, balancing methods and modeling. Thus, links 4 and 5 are telescopic to provide them with the necessary dimensions, according to the individual parameters of the operator and the firearm. Various attachments-grips 6 or hangers can be installed on the link 5' through the hinge O5, specially designed for the required purpose. The balancing is carried out by the linear cylindrical tension 7 and compression 8 springs with zero-free lengths. This system provides exact static balancing of links 4 and 5 over the entire range of the rotation angle  $\varphi_{4,5}$ . The link 4 rotation can be limited by latch 9, if necessary.

If we make the telescopic link 4 from a strong, but unilaterally flexible material, or give it the necessary curvature (see Fig. 4b), we can ensure a significant increase in the firing sector for the weapon mounted on the proposed device.

Such a structure can easily provide weapon-balanced gripping for shooting from standing and kneeling positions. But for the prone position, the pin of link 2 must be not fully inserted, so the system will be able to rotate about the axis a-a'. The determination of optimal dimensions of the structure, allowing for a convenient and continuous transition from one position to another, can be a new challenge.

The device can be used not only in military applications, for supporting human hands, weapons or ammunition, but also in industry, for maintaining tools or heavy objects, and in medicine, for supporting an injured or already operated human hand.

As mentioned above, to balance the system from gravity forces the linear zero-free length linear cylindrical tension 7 and compression 8 springs are applied [3, 4]. Both springs are connected to link 5 at point A, which is chosen from the following condition:

$$M = 0.5m_4 + m_5 + m_6 + m_f, \quad s_m = (0.5m_5 + m_6 + m_f)l_5/M, \quad (2.1)$$

where  $l_5$  is the length of link 5,  $s_m$  is the distance of point A from point  $O_4$ ,  $M$  is the mass of the rotating links of the system reduced to point A,  $m_4$ ,  $m_5$  and  $m_6$  are the mass of correspondent links.  $m_f$  is the mass of supported firearm. And the static balancing is realized from the condition of constancy of potential energy of the system:

$$P = P_g + P_{S1} + P_{S1} = \text{const}, \quad (2.2)$$

where  $P_g$  is the potential energy of links reduced at point A:

$$P_g = -[M + 0.5(m_7 + m_8)]gl_{O3A} \sin \beta, \quad (2.3)$$

where  $m_7 = m_{S1}$  and  $m_8 = m_{S2}$  are the mass of the applied springs,  $\beta$  is the angle  $XO3A$ . The springs are prepared with the same stiffness coefficient  $k$ , but as their origins are different, so for the potential energies of springs we can write:

$$P_{S1} = 0.5kl_{S1}^2, \quad P_{S2} = -0.5kl_{S2}^2, \quad (2.4)$$

where  $l_{S1}$  and  $l_{S2}$  are the current lengths of springs 7 and 8.

From unite resolution of expressions (2.2) - (2.4) we obtain:

$$P = -[M + 0.5(m_7 + m_8)]gl_{O3A} \sin \beta + 0.5kl_{S1}^2 - 0.5kl_{S2}^2. \quad (2.5)$$

From the triangle  $BAO3$  we can see that

$$l_{S1}^2 = l_{O3B}^2 + l_{O3A}^2 + 2l_{O3B}l_{O3A} \sin \beta, \quad (2.6)$$

where  $l_{O3B}$  is the distance from point B to point  $O3$ , respectively:

$$P = (kl_{O3B} - Mg - 0.5g(m_7 + m_8))l_{O3A} \sin \beta + 0.5kl_{O3B}^2. \quad (2.7)$$

The potential energy rests constant if the following condition is achieved:

$$kl_{O3B} - Mg - 0.5g(m_7 + m_8) = 0. \quad (2.8)$$

By solving this equation, we obtain the value of  $k$ .

**The numerical example 2 - Static balancing of a system with 2-DOF.** The balancing of the system is performed in the case of the following values of the system parameters:  $m_4 = 0.6$  kg,  $m_5 = 0.2$  kg,  $m_6 = 0.1$  kg,  $m_f = 6$  kg,  $l_4 = 0.4$  m,  $l_5 = 0.5$  m,  $m_7 = 0.5$  kg,  $m_8 = 0.5$  kg,  $l_{03B} = 0.1$  m. We get:  $M = 6.5$  kg,  $s_m = 0.38$  m,  $k = 700$  Nm.

**Conclusions.** Proposed designs of statically balanced multifunctional and reconfigurable portative adjustable assistive devices can assure the lift and holding in desired/required positions of heavy and uncomfortable objects. It becomes possible due to the adjustability of the system and the use of balancing systems.

Moreover, the applied approaches to the design of balanced devices are quite versatile and can be used in the design of not only assistive devices but also other linkage-based manipulation systems.

**Bibliography:** 1. Agrawal S., Fattah A. Gravity-Balancing of Spatial Robotic Manipulators // Mechanism and Machine Theory. - 2004.- Vol.39, No.12.- pp. 1331-1344. 2. 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.- pp. 693-709. 3. 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). - pp. 565-575. 4. 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 / IPM-2018 Mechanical Engineering Solutions. Design, Simulation, Testing and Manufacturing. September 17-19, 2018, Yerevan, Armenia, MES-2018-25, pp. 71-80. 5. Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G., Arakelian V.H. Actual aspects of manipulation mechanism's swinging links spring balancing // XXVI International Scientific and Technical Conference "Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI Century", September 23-29, 2019, Sevastopol, - pp. 450-454. 6. Harutyunyan M.G., Ghazaryan S.D., Zakaryan N.B., Shahinyan S.S. Passive balancing solution for a human walking and sitting assisting exoskeleton // Advanced technologies and mechanical engineering systems; National Technical University of Donetsk, 2019 № 2 (65) pp. 95-99. 7. Ghazaryan S.D, Harutyunyan M.G., Zakaryan N. B., Arakelian V. Design Concepts for Human Walking and Sitting Wearable Exoskeletons // Intelligent Technologies in Robotics, October 21-23, 2019, Moscow, Russia. pp. -63-71. 8. Ghazaryan S. D., Harutyunyan M. G., Zakaryan N. B., Sargsyan Yu. L. Portable passive balanced assistive device for industrial purpose // Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. Donetsk National Technical University (Donetsk). Issue: 2 (73) Year: 2021 pp. 42-46. 9. Ghazaryan S. D., Harutyunyan M. G., Zakaryan N. B., Sargsyan Yu. L. Portable assistive device for military purpose / Proc. of the First International Scientific and Technical Conference "Current Problems of Science and Technology", Sarapul, 2021, May 20 - 22, 2021. pp.142-146.

# CHOICE OF PARAMETERS OF THE PROCESS OF OBTAINING MULTILAYER PLASMA COATINGS FROM COMPOSITIONS OF CERAMICS AND NICKEL M-CROUL

**Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Okovity V. V.**

*(Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus)*

*Tel. / Fax+375 17 293-95-99, niil\_svarka@bntu.by*

**Astashinsky V. M.** *(V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)*

*Tel. / Fax +375 17 284-24-91, ast@hmti.ac.by*

**Abstract:** *The article presents the results of a study of the influence of plasma jet parameters on the characteristics of multilayer composite coatings based on nickel-chromium, nickel-chromium-aluminum-yttrium and aluminum and titanium oxides. In the process of obtaining sprayed wear-resistant layers from the developed powder materials, there are a large number of process factors that affect the properties of the created protective coatings. The main factors are the speed of the devices for moving the plasma burner or substrate, the distance used for spraying, the consumption of the plasma-forming and transporting gases used, the consumption of the material used for spraying, the power supplied, depending on the voltage and current of the electric arc of the plasma torch. Optimization was carried out on the basis of obtaining the maximum utilization factor of the powder. The results of studies of the morphology of the formed coatings performed using scanning electron microscopy are presented.*

**Keywords:** *plasma jet, process optimization, powder utilization coefficient, plasma compression flows, operational characteristics.*

**Introduction.** Based on the analysis of modern application and features of metal-ceramic plasma coatings, it can be stated that these compositions (oxide-metal component) are used as dielectric, heat-protective and wear-resistant coatings [1-8]. Our proposed research area concerns the technology of formation of coatings with increased wear resistance to improve the performance characteristics of tribo joint parts operating in severe conditions with increased loads in the absence of lubricant, temperature fluctuations (motor engineering, metallurgical equipment, aviation and space technology) [1-5]. According to the results of the studies carried out for such conditions, coatings applied by plasma spraying with subsequent high-energy processing by plasma pulses (laser radiation) are effective [9, 10]. The factors of wear resistance in this case include the composition of the composite particles of the initial powders, which provides an effective structure of the coatings. In addition, high-energy processing of plasma coatings provides their strengthening due to compaction and the formation of a crushed (nanocrystalline), nonequilibrium (amorphous) structure during ultrafast cooling of fused layers 30–100  $\mu\text{m}$  thick [10]. At the same time, for the final conclusions and decisions aimed at the successful implementation of the above-mentioned coatings, it is advisable to study the prospects for the synthesis of new composite powders from cermets and to develop criteria for predicting the properties of coatings from them obtained by plasma spraying; to investigate and optimize the technological parameters of the plasma spraying of composite powders. Within the framework of this work, special attention will be paid to the issues of the influence of the formed structure on the physicomechanical and operational properties of coatings: based on MCrAlYTa alloys reinforced with oxides (for example,  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ ). Pure MCrAlYTa are not suitable for tribological applications because their low hardness can lead to very high wear under sliding

contact conditions, especially during the running-in stages at low temperatures. Therefore, the manufacture of composite coatings based on MCrAlYTa alloys reinforced with oxides seems to be a necessary solution in order to relate the resistance of the metal to oxidation with the hardness and chemical stability of the ceramic phase [3].

**The technology of applying multilayer plasma coatings from materials based on nickel m-rabbits.** In accordance with the technique developed by us, the optimization of the plasma spraying of powder coatings on a plasma spraying unit in air was carried out according to the utilization factor of the sprayed powder material (CPM). In this case, the morphology of individual particles of powder materials applied to the polished surface after their interaction with the base (substrate) (“Splat-test”) was also taken into account. Based on the results of examination under a microscope for similar technological modes as for “Splat-Test”, the optimization process was carried out based on the creation of coatings with the maximum IQ (coefficient of use of the powder material). In the process of obtaining sprayed wear-resistant layers from the developed powder materials, there are a large number of technological process factors that affect the properties of the created protective coatings. The main factors are the speed of the devices for moving the plasma torch or substrate, the distance used for spraying, the consumption of the plasma-forming and transporting gases used, the consumption of the material used for spraying, the input power, which depends on the voltage and current of the electric arc of the plasmatron [10]. As an example, Figure 1-7 shows typical dependencies, which, using the instrumentation-universal characteristic, show the effect of the listed conditions and spraying modes on the process efficiency. A qualitative optimization of all the most important parameters of APS (plasma spraying under atmospheric conditions) of the process of creating wear-resistant coatings from powder materials NiCrAlITa (for creating sublayers), as well as NiCrAlITa-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> (for creating wear-resistant layers) has been carried out. It was carried out in stages. First, for fixed parameters of the arc current and plasma-forming nitrogen, the distances for creating coatings were varied. The second is the change in the amount of nitrogen forming the plasma at constant distances of powder material deposition and the value of the applied current. Then, at the third stage, for certain constant values of the distance of spraying of the powder material and the flow rates of the plasma-forming gas-nitrogen, we changed the values of the supplied current. For NiCrAlITa, the obtained sublayer modes (arc current of the plasma torch is 550 A, the velocity when the base moves  $V_{sub} = 300$  mm / s, the flow rate of nitrogen forming the plasma is 45 l / min, the distance for coating formation is 100 mm, the fractional composition of the powder material is 40-63 microns, powder material consumption - 4.0 kg / h) formed by subcoating of the coating with KIP - 85%. For NiCrAlITa-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> - a wear-resistant layer (arc current of a plasma torch - 550 A, speed when moving the base  $V_p = 300$  mm / s, flow rate of nitrogen forming plasma - 50 l / min, distance for coating formation - 110 mm, fractional composition powder material - 40-63 microns, powder material consumption - 4.0 kg / h) formed by subcoating of the coating with KIP - 80%. At the indicated values of technological parameters, a microheterogeneous structure of the sprayed coating is formed, containing elements that ensure its wear resistance (Cr<sub>1.12</sub>N<sub>12.88</sub>,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, orthorhombic phase of titanium oxide TiO<sub>2</sub>, Mo compounds). In this case, the spreading of molten particles on the substrate is achieved, there is no splattering and losses upon collision with the substrate.

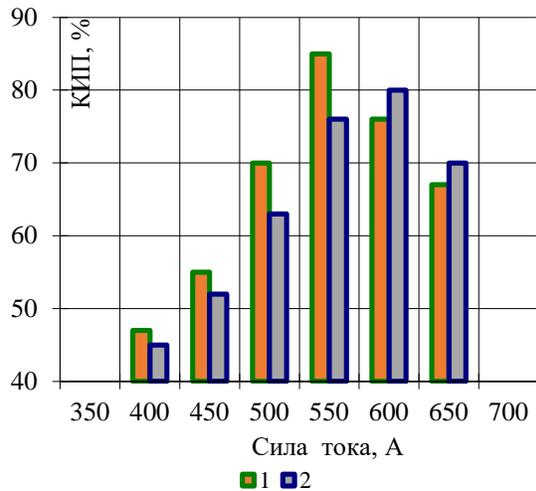


Fig. 1. Influence on the parameters of KIP,% of the values of the parameters of the input current of the plasmatron (I, A) for the powder material of the sublayer: 1 - NiCrAlTi (R por. = 4.0 kg / h, powder fraction 40-63  $\mu\text{m}$ ,  $R_N = 45$  l / min; L = 100 mm); 2- powder fraction 63-80 microns

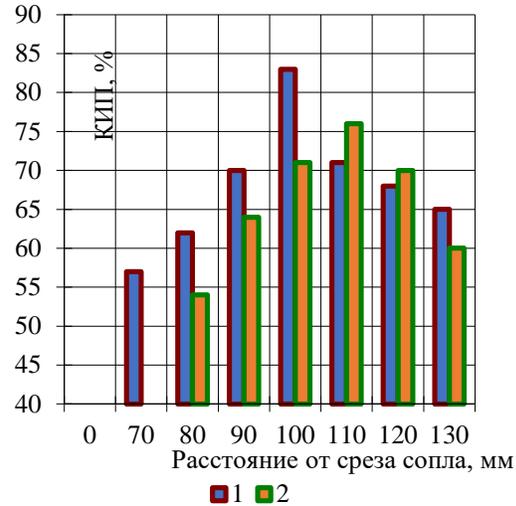


Fig. 2. Influence on the parameters of KIP,% of the distance of formation of coatings L, mm for the material of the intermediate sublayer: 1- NiCrAlTi (R por. = 4.5 kg / h, powder fraction 40-63 microns,  $R_N = 45$  l / min; I = 550 A); 2 - powder fraction 63-80 microns

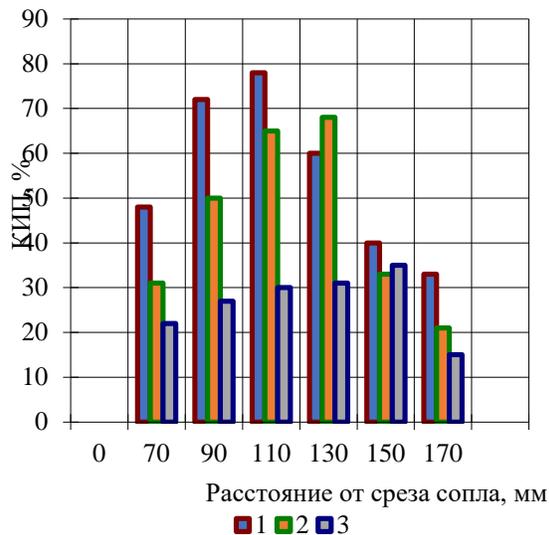


Fig. 3. Influence on the parameters of KIP,% of the distance of formation of coatings L, mm for a powder material of a wear-resistant layer: 1 -  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlTi}$  (fraction 40 ... 63  $\mu\text{m}$ ; I = 500 A,  $R_N = 45$  l / min, R por. = 4.5 kg / h); 2- fraction 63-80 microns; 3 - fractional composition - 80-100 microns

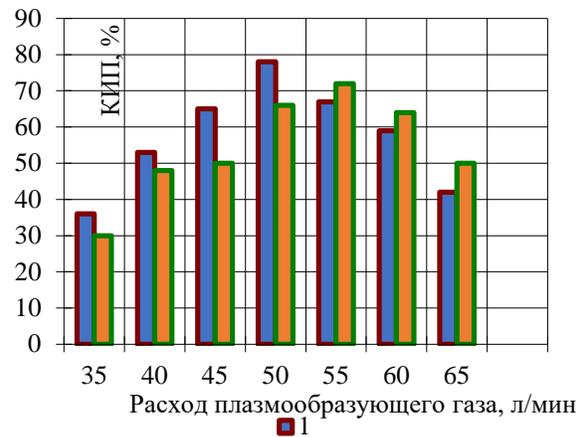


Fig. 4. Influence of indicators of KIP,% on the consumption of plasma-forming nitrogen for powders of wear-resistant layers: 1 -  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlTi}$  (L = 110 mm; I = 500 A); 2 - with a fraction of 63-80 microns

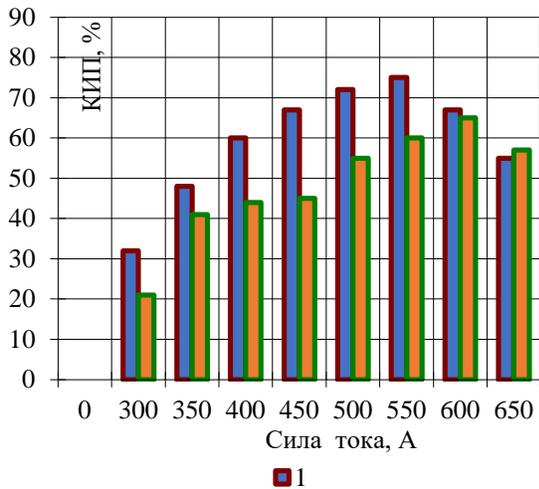


Fig. 5. Influence of KIP,% on the values of the parameters of the input current of the plasmatron for powder materials of wear-resistant layers: 1 -  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlITa}$  ( $L = 110$  mm;  $RN = 50$  l / min, fraction 40-63 microns); 2 - fraction 63-80 microns

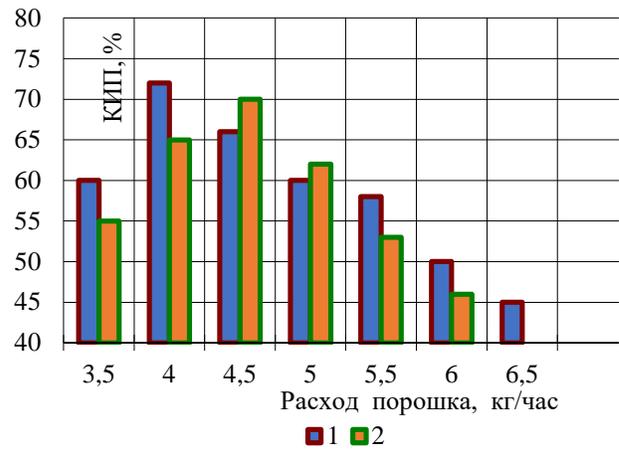


Fig. 6. Influence of KIP,% on the consumption of powder material for the formation of wear-resistant layers: 1 -  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlITa}$  ( $L = 110$  mm;  $I = 500$  A, with a fraction of 40-63 microns); 2 - with a fraction of 63-80 microns

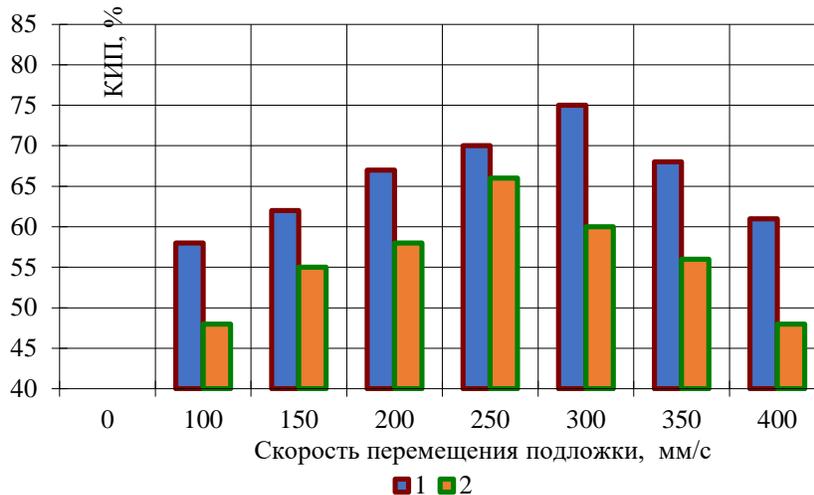


Fig. 7. Impact indicators of KIP,% on the speed when moving the bases for powder materials, the values of the layers: 1-  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlITa}$  ( $L=110$  mm;  $I=500$  A;  $R_{por.}= 4.5$  kg / hour, with a fraction of 40-63 microns); 2-with a fraction of 63-80 microns

### Conclusions.

Optimization of all the most important parameters of APS (plasma spraying under atmospheric conditions) of the process of creating wear-resistant coatings from powder materials NiCrAlITa (to create sublayers), as well as NiCrAlITa- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  (to create wear-resistant layers) has been carried out. At optimal technological parameters, a microheterogeneous structure of the sprayed coating is formed, containing elements that ensure its wear resistance ( $\text{Cr}_{1.12}\text{Ni}_{2.88}$ ,

$\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, orthorhombic phase of titanium oxide TiO<sub>2</sub>, Mo compounds). The coating has a good density, without surface defects, ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> aggregates are bonded to each other, and some of the large ceramic particles are embedded in molten NiCrAlYTa coatings. Such microstructural characteristics are associated with the mobility of molten liquid-phase NiCrAlYTa components, which can fill the gaps and cracks that arise during plasma spraying of the oxide coating and improve the coating density. The lamellar microstructures indicate that the sprayed droplets have not yet solidified before impact, impacting the substrate or previously deposited layers at a high speed. The degree of particle melting largely determines the porosity, microhardness, and subsequent properties of the coating.

**References:** 1. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant / Okovity V // J. Welding International - 2003.-vol. 16, No. 11 - P. 918-920. 2. Ilyuschenko, A. Investigation of composite powders with a carbide phase for plasma spraying of wear resistant coatings / A. Ilyuschenko, A. Shevtsov, V. Okovity and other // Thermal Spray 2001: Proceedings of the International Thermal Spray Conference, 28 -30 May, 2001.- Singapore-P.1119-1121. 3. Okovity, V. Deposition of underlayer for heat shield coatings by methods of thermal spraying / V.A. Okovity, A. Ph. Ilyuschenko, A.I. Shevtsov // Danube Adria Association For Automation & Manufacturing: Proc. of the 3-st International Conference- Tallinn (Estonia), 2002.- P. 197-200. 4. Shevtsov, A. Modification of thermal sprayed wear-resistant composite coatings by pulsed plasma flow / Shevtsov A., Okovity V., Astashynski V. // Proceedings of the 4th International Conference "Plasma physics and plasma technology", Minsk 2003. Vol. 2.P. 681-621. 5. Ilyuschenko, A. Investigation of sprayed composite powder particles with hard lubricant spreading on the substrate / Ilyuschenko A., Shevtsov A., Okovity, Buikus K. // Euro PM 2004 hard materials proceedings, Vena, 2004.p.1117- 1120. 6. Panteleenko, F.I. Development of a composite material based on oxide ceramics with solid lubricant inclusions for thermal spraying /, Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. // Science and Technology. BNTU - Minsk, 2012.-Issue 4.- P.17-22. 7. Panteleenko, F.I. Investigation of the structure of plasma wear-resistant coatings based on oxide ceramics with solid lubricant inclusions / Panteleenko F.I., Okovity V.A., Talako T.L., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. // "Science and Technology", BNTU - Minsk, 2013.-Issue 5.- P.15-21. 8. Bound, V.A. Investigation of the processes of processing laser radiation pulses of plasma coatings made of materials based on multifunctional oxide ceramics // Okovity VA, Panteleenko FI, Devoino OG, Panteleenko AF, Okovity VV, // " Science and technology ", BNTU - Minsk, 2014.-Issue 4.- P.3-10. 9. Okovity, V.A. Parameters optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / Okovity V.A., Shevtsov AI, Okovity VV, Astashinsky VM, EA Kostyukevich // High Temperature Material Processes 18 (1-2), 45-62 (2014). 10. Panteleenko, F.I. Development of a composite material based on multifunctional ceramics for plasma spraying / Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Astashinsky V.M., Okovity V.V. // "Strengthening technologies and coatings", Mechanical engineering, Moscow, 2015.-Issue 2.- P.43-47.

## THE FORMATION OF THE MULTILAYER PLASMA-BASED COATING COMPOSITIONS OF THE OXIDE

**Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Okovity V. V.**

*(Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus)*

*Tel. / Fax+375 17 293-95-99, niil\_svarka@bntu.by*

**Astashinsky V. M.** *(V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)*

*Tel. / Fax +375 17 284-24-91, ast@hmti.ac.by*

**Abstract:** *Presents the results of studying the process of deposition of multilayer composite plasma oxide coatings and optimizes the technological parameters of the deposition of multilayer plasma coatings based on  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  and  $HfO_2$ - $Y_2O_3$ . A gradient plasma coating with a smooth change in physical and mechanical properties has been developed. The technologies of plasma spraying in air (APS) and in vacuum (VPS) were used.  $HfO_2$ -15%  $Y_2O_3$  was chosen as a ceramic powder for spraying, since after spraying this powder, the maximum amount of the tetragonal phase (up to 98%) remains in the coating, which has a major effect on the heat-shielding properties. Nickel-based alloys were selected as the sublayer  $NiCrAlY$ . Gradient (five-layer) coatings sprayed from  $HfO_2$ -15%  $Y_2O_3$  and  $HfO_2$ -25%  $Y_2O_3$  powders according to the technology developed by the authors showed heat resistance 1.2-1.3 times higher compared to two-layer coatings sprayed from the same powders and 1.4 - 1.5 times higher compared to gradient coatings sprayed from  $ZrO_2$ -20 wt %  $CeO_2$ ;  $ZrO_2$ -25 wt. %  $CeO_2$ .*

**Key words:** *multilayer plasma coatings, zirconium dioxide, thermomechanical stresses, residual stresses, technological modes of coating deposition, crystal lattices*

**Introduction.** The main method used for the deposition of zirconium dioxide coatings is plasma sputtering (up to 90% of developments) [1-3]. Nevertheless, the predominant spread of plasma sputtering remains, primarily due to its high performance and versatility, which allows applying metal and ceramic materials of a given chemical and phase composition. In general, the coating is a multi-layer system that includes a metal sublayer, an outer ceramic layer, and transition ceramic layers [4-7]. The main reason for the destruction of plasma coatings is the thermomechanical stresses that occur during heat changes in engines, due to the mismatch of the thermal expansion of the base metal and the ceramic layer, as well as the uneven distribution of the temperature field in the coating. Thermomechanical stresses are aggravated by the action of residual stresses that occur in the coating during deposition, and are weakened by the effects of plasticity and creep that are realized in the metal sublayer [5]. The significant structural sensitivity of the properties of zirconium dioxide-based coatings requires strict reproducibility of the results. This imposes particularly strict restrictions on the quality of the materials used and the accuracy of maintaining the technological modes of coating application [8-12]. Hafnium oxide was chosen for use as a powder for heat-shielding coatings along with zirconium dioxide due to their similarity in structural modification, lattice, chemical and physical properties, and its increased temperature of structural transformations. The similarity of  $Hf^{+4}$  and  $Zr^{+4}$  cations leads to the formation of identical metastable phases during rapid quenching. The differences in the crystal lattices of  $ZrO_2$  and  $HfO_2$  are very small, due to the equivalent valence band and the almost equivalent ionic radii of  $Zr^{+4}$  and  $Hf^{+4}$ . For this reason, the  $ZrO_2$  -  $HfO_2$  system can form continuous substitution solutions, and it is possible to isolate the X-ray diffraction patterns of  $ZrO_2$ ,  $HfO_2$  in solid solutions only by using extremely high resolution of the X-ray diffraction method. The similarity between  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  and  $HfO_2$ - $Y_2O_3$  in the equilibrium phase diagrams also

extends to the formation of non-equilibrium phases. All the considered compositions of hafnium dioxide, partially stabilized by yttrium oxide under rapid cooling, show one metastable t' phase, with a microstructure equivalent to the pure t' phase. In addition, the temperature of phase transformations during the transition of tetragonal phase to monoclinic with increasing Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration decreases, and when the concentration of HfO<sub>2</sub> increases, making the system HfO<sub>2</sub> - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the equilibrium phase diagrams also extends to the formation of non-equilibrium phases. All the considered compositions of hafnium dioxide, partially stabilized by yttrium oxide under rapid cooling, show one metastable t' phase, with a microstructure equivalent to the pure t' phase. In addition, the temperature of phase transformations during the transition of tetragonal phase to monoclinic with increasing Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration decreases, and when the concentration of HfO<sub>2</sub> increases, making the system HfO<sub>2</sub> - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> promising for obtaining coatings with desired properties. Taking into account the above, it is assumed that the use of HfO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> will allow obtaining coatings with a resource exceeding the resource of ZrO<sub>2</sub>-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> - CeO<sub>2</sub> coatings. Improving the properties of heat-protective coatings is also carried out by changing the structure of the ceramic layer of the heat-protective coating, by creating gradient layers. Gradient layers combine the heat resistance of ceramics with the ductility of metals. A gradual change in the microstructure without sharp interfaces, a smooth change in the microhardness and the convergence of the elastic modulus of the ceramic and metal layers leads to an increase in the strength of the coating and its durability. Hafnium oxide was chosen for use as a powder for heat-shielding coatings along with zirconium dioxide due to their similarity in structural modification, lattice, chemical and physical properties, and its increased temperature of structural transformations. The similarity of Hf<sup>+4</sup> and Zr<sup>+4</sup> cations leads to the formation of identical metastable phases during rapid quenching. The differences in the crystal lattices of ZrO<sub>2</sub> and HfO<sub>2</sub> are very small, due to the equivalent valence band and the almost equivalent ionic radii of Zr<sup>+4</sup> and Hf<sup>+4</sup>. All the considered compositions of hafnium dioxide, partially stabilized by yttrium oxide under rapid cooling, show one metastable t' phase, with a microstructure equivalent to the pure t' phase. In addition, the temperature of phase transformations in the transition of tetragonal phase to monoclinic with increasing Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration decreases, and when the concentration of HfO<sub>2</sub> increases, making the system HfO<sub>2</sub> - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> promising for obtaining TZP with desired properties. Taking into account the above, it is assumed that the use of HfO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> will allow to obtain a TP with a resource exceeding the resource of ZrO<sub>2</sub>-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> - CeO<sub>2</sub> coatings.

**Formation of a multi-layer coating.** A gradient plasma coating with a smooth change in physical and mechanical properties has been developed. In this case, the technologies of plasma spraying in air (APS) and in vacuum (VPS) were used. HfO<sub>2</sub> with 15% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was chosen as the ceramic powder for spraying, since after spraying this powder, the maximum amount of the tetragonal phase (up to 99%) remains in the coating, which has the main effect on the heat-shielding properties. A nickel-based alloy is selected as the sublayer. including 25 wt. % chromium, 10 wt. % aluminum and 0.5 wt. % yttrium. As noted, two types of coatings were sprayed for comparative analysis :

a) a five-layer coating, sprayed according to the source technology [7]. The coating includes a ceramic layer of ZrO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>-100 microns, intermediate layers of 80 % (ZrO<sub>2</sub> - CeO<sub>2</sub>) – 20% NiCrAlCe - 100 microns, 50% (ZrO<sub>2</sub> - CeO<sub>2</sub>) – 50% NiCrAlCe-100 microns and 20% (ZrO<sub>2</sub> - CeO<sub>2</sub>) – 80% NiCrAlCe - 100 microns, as well as a sublayer of NiCrAlCe-100 microns. The NiCrAlCe sublayer and the two intermediate layers closest to the substrate, 20 % (ZrO<sub>2</sub> - CeO<sub>2</sub>) – 80% NiCrAlCe and 50% (ZrO<sub>2</sub> - CeO<sub>2</sub>) – 50% NiCrAlCe, were applied in vacuum at reduced pressure, with a gradual increase in it with an

increase in the amount of ceramics in the mechanical mixture. The two upper layers were sprayed in air (APS) with intensive cooling; b) the five – layer coating includes a ceramic layer of  $\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3 - 100$  microns, intermediate layers of  $80\% (\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3) - 20\% \text{NiCrAlY} - 100$  microns,  $50\% (\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3) - 50\% \text{NiCrAlY} - 100$  microns and  $20\% (\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3) - 80\% \text{NiCrAlY} - 100$  microns, as well as the NiCrAlY sublayer-100 microns. The NiCrAlY sublayer and the two intermediate layers closest to the substrate,  $20\% (\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3) - 80\% \text{NiCrAlY}$  and  $50\% (\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3) - 50\% \text{NiCrAlY}$ ;), were applied in vacuum at reduced pressure, with a gradual increase in it with an increase in the amount of ceramics in the mechanical mixture. The top two layers were sprayed in air (APS) with intensive cooling.

The gradient ratio of ceramics and nickel-based alloy in the intermediate layers was created according to the prototype scheme. The adhesion strength was determined on the Instron installation. The quantitative estimates of the parameters were determined as averaged over five dimensions. The coatings were cyclically tested in a furnace at  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ . The temperature in the furnace was measured with a platinum thermocouple and maintained within  $1300\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ$ . The cycle consisted of heating for 10 minutes, holding at  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  for 60 minutes, and sixty minutes of cooling to  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . For every 10 cycles, samples were removed from the furnace for testing when the temperature dropped to  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . The tests continued until the destruction of the ceramic coating, which was assumed to be the formation of a crack visible to the naked eye. Data for heat resistance and adhesion strength of the coatings obtained on the technology presented in [7] and can be shown in figures 1A and b. According to figure 1A gradient (five-layer) coating of powders  $\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{HfO}_2 - 25\% \text{Y}_2\text{O}_3$ , developed by the authors, showed the thermal stability of the 1.2 - 1.3 times higher compared to the same bilayer. In comparison with gradient coatings made of  $\text{ZrO}_2$  powders-20 wt. %  $\text{CeO}_2$  and  $\text{ZrO}_2 - 25$  wt. %  $\text{CeO}_2$  efficiency increased by 1.4-1.5 times. The adhesion strength of gradient (five-layer) coatings made of  $\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{HfO}_2 - 25\% \text{Y}_2\text{O}_3$  powders is 1.6 - 1.7 times higher in comparison with gradient coatings of  $\text{ZrO}_2 - 20$  wt. %  $\text{CeO}_2$  and  $\text{ZrO}_2 - 25$  wt. %  $\text{CeO}_2$ .

**Conclusion.** Criteria for obtaining high-quality multilayer plasma coatings based on hafnium oxide stabilized with yttrium oxide are developed. The application modes of the material based on hafnium oxide stabilized with yttrium oxide were optimized to obtain the maximum content of the tetragonal phase in the coating. Improving the properties of heat-protective coatings was carried out by creating gradient layers. Gradient layers combine the heat resistance of ceramics with the ductility of metals. A gradual change in the microstructure without sharp interfaces, a smooth change in the microhardness and the convergence of the elastic modulus of the ceramic and metal layers leads to an increase in the strength of the coating and its durability. Gradient (five-layer) coatings sprayed from  $\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{HfO}_2 - 25\% \text{Y}_2\text{O}_3$  powders according to the technology developed by the authors showed heat resistance 1.2-1.3 times higher compared to two - layer coatings sprayed from the same powders and 1.4 - 1.5 times higher compared to gradient coatings sprayed from  $\text{ZrO}_2 - 20$  wt powders. %  $\text{CeO}_2$ ;  $\text{ZrO}_2 - 25$  wt. %  $\text{CeO}_2$ . The adhesion strength of gradient (five-layer) coatings sprayed from  $\text{HfO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{HfO}_2 - 25\% \text{Y}_2\text{O}_3$  powders is 1.3 - 1.4 times higher compared to two - layer coatings sprayed from the same powders and 1.6-1.7 times higher compared to gradient coatings sprayed from  $\text{ZrO}_2 - 20$  wt powders. %  $\text{CeO}_2$ ;  $\text{ZrO}_2 - 25$  wt. %  $\text{CeO}_2$

**References:** 1. Panteleenko, F. I. Formation of multifunctional plasma coatings based on ceramic materials / F. I. Panteleenko, V. A. Okovity // BNTU-Minsk. 2019. - 231 p. 2. Khor, K.A. Properties of plasma sprayed functionally graded YSZ/ NiCoCr AlY composite coatings. / K.A. Khor, Y.W.Gu, Z.L. Dong // United thermal spray conference: Lectures and

posters presented at the conference.- Kobe (Japan), 2000. - P. 1241-1248.

**3.** Okovity, V. A. Development of heat-protective plasma coatings / Okovity V. A. // *Welding and related technologies-Minsk: Tonpik*, 2005. - Issue 7. - p. 80-82.

**8.4.** Okovity, V. A. Optimization of the process of applying ZrO<sub>2</sub>-U<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Okovity V. A. // *Powder metallurgy.- Minsk: Belorusskaya nauka*, 2007. - Issue 30. - pp. 245-249.

**5.** Okovity, V. V. Technological features of the formation of heat-protective coatings based on zirconium dioxide /Okovity V. V., Devoino O. G., Okovity V. A., Astashinsky V. M. // "Science and Technology" BNTU, 2016. - Issue.3. - p. 193-199.

**6.** Okovity, V. A. Formation and research of multilayer composite oxide plasma coatings on elements of screen anti-meteor protection " for the international scientific and technical journal/ Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. // "Nauka i tekhnika" BNTU , 2016. - Vol.5. - P. 357-364.

**7.** Eurasian patent 031920 Method of applying a gas-thermal coating / Okovity V. A., Panteleenko F. I., okovity V. V. ,V. M. Astashinskii-No. 2017/EA/0018; Appl. 05.04.17.

**8.** Gao, J. G. Fabrication and high temperature oxidation resistance of ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> micro laminated coatings on stainless steel / J.G. Gao, Y.D. He, D.R. Wang // *Materials chemistry and physics*. -2010. -№ 123. – P. 731–736.

**9.** S. Sathish, S. Comparative study on corrosion behavior of plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings / S. Sathish, M. Geetha // *Transactions of nonferrous metals so-ciety of China*. – 2016. - № 26. - P. 1336–1344.

**10.** Microstructural studies of stabilized NiCrAlY - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cermet coatings ZrO<sub>2</sub> deposited by a plasma arc (PTA) / C.Demian. [et al.] // *Mater. Sci. Forum*. – 2010. - No. 65. - P. 248-261.

**11.** Mechanical properties and thermal shock resistance of HVOF sprayed NiCrAlY coatings without and with nano segiat / X. Sun [et al.] // *Thermal spraying technology*. – 2012. - № 21. - P. 818–824.

**12.** Microwave dielectric properties of low power plasma sprayed NiCrAlY/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings / L. Zhou [et al.] // *Surface and coatings technology*. -2012. - No. 210. - P. 122-126.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Азимова Н.Н., Бедоидзе М.В., Купцова И.С., Милев И.Ю., Русляков Д.В.</b> АНАЛИЗ РАЗМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ОБДИРОЧНО-ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ЧУГУНА.....	<b>6</b>
<b>Азимова Н.Н., Русляков Д.В., Шаповалов Д.А., Чеченев А.В.</b> РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДРЕВЕСНОЙ ПЫЛИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ.....	<b>9</b>
<b>Аноприенко А. Я.</b> НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СИСТЕМОДИНАМИКИ ТЕХНОСФЕРЫ: ТЕОРИЯ, МОДЕЛИ, ПРАКТИКА.....	<b>13</b>
<b>Баранов А. В., Карачев А. В., Бахриев Ф.А., Воронцов А.А.</b> К ВОПРОСУ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ПРИ РУЖЕЙНОМ СВЕРЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ.....	<b>24</b>
<b>Безкоровайный П. Г., Шестаков В. С., Бахарева В.И.</b> ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАРЬЕРНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА.....	<b>28</b>
<b>Борзов Д.Б., Кулагина Е.С.</b> ВОПРОСЫ АНАЛИЗА, СИНТЕЗА, МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	<b>31</b>
<b>Борзов Д.Б., Кулагина Е.С.</b> ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ЕВРАЗИЙСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	<b>33</b>
<b>Бохонский А.И., Варминская Н.И.</b> РЕВЕРСИОННЫЙ ПРИНЦИП ОПТИМАЛЬНОСТИ.....	<b>37</b>
<b>Буялич Г. Д., Тащиенко В. П.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОМОЛОТОВ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.....	<b>42</b>
<b>Вегера И.И., Голубев В.С., Ходюш В.Е., Дробышевский П.С.</b> ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ И ИНДУКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ.....	<b>45</b>
<b>Величко Н. И., Макухин А.Г.</b> ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГИПЕРБОЛОИДНЫХ ПЕРЕДАЧ.....	<b>50</b>
<b>Васильева М.А., Волчихина А.А.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ИНЕРЦИОННОГО СГУСТИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО ДОЗАКЛАДКЕ.....	<b>55</b>
<b>Ворошилов И.В., Шамаров М.В.</b>	

РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЗОТНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В КОМПРЕССОРЕ.....	59
<b>Галоян Г.А., Закарян Н.Б., Арутюнян М.Г., Саргсян Ю.Л.</b> ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ МИКРОРОБОТОВ ГИБРИДНОЙ КОНСТРУКЦИИ.....	65
<b>Гараев Р.А., Царенко С.Н.</b> АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ВАЛОПРОВОДА ГРЕБНОГО ВИНТА...	69
<b>Гарченко А.А., Рябцев А.Д., Коровин В.А., Маслов К.А.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ИЗЛОЖНИЦ ДЛЯ РАЗЛИВКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ.....	72
<b>Герасимов А.В., Мухамадиев Р.Р.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ.....	76
<b>Горобец И.А., Лахин А.М., Киселица Д.О., Жарких Д.С.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ КОНСТРУКЦИЙ 3D-ПРИНТЕРА..	80
<b>Гусев Е.Л.</b> ПРИМЕНЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ.....	84
<b>Гутаревич В.О., Прибой М.Н.</b> СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СТРЕЛОЧНЫЙ ПЕРЕВОД ШАХТНОЙ ПОДВЕСНОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ДОРОГИ.....	89
<b>Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И., Артюкевич А.В.</b> ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ, В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ	94
<b>Егоров Н.Т., Крымов В.Н.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ СВОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ТОЛСТОЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ.....	99
<b>Ермишкин В.А., Минина Н.А., Кулагин С.П., Палий Н.А.</b> ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	104
<b>Закарян Н.Б., Акопян Н.Г.</b> РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ЭКЗОСКЕЛЕТОНА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ КИСТИ РУКИ ЧЕЛОВЕКА.....	109

<b>Калинин А.В.</b> К ВОПРОСУ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО СБОРКИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО КОНТЕЙНЕРА.....	<b>113</b>
<b>Каракозов А.А.</b> ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ БУРЕНИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН УДАРНЫМ СПОСОБОМ.....	<b>116</b>
<b>Каракозов А.А., Паршков А.В.</b> РАЗРАБОТКА УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПРИХВАТОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ПЕРЕПАД ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЕ И СКВАЖИНЕ.....	<b>121</b>
<b>Каракозов А.А., Украинцев А.А.</b> РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ДЕКОЛЬМАТАЦИИ ФИЛЬТРОВ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН.....	<b>127</b>
<b>Кардаполова М.А., Девойно О.Г., Погудо Е.В., Косякова И.М.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ПГ-12Н-01.....	<b>130</b>
<b>Картафенков Д. В.</b> ПУТЬ К МЕЧТЕ - СОЗДАНИЕ ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА С НУЛЯ И ОСВОЕНИЕ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС С КРУГОВЫМИ ЗУБЬЯМИ ЗУБОРЕЗНЫМИ ГОЛОВКАМИ НА ФРЕЗЕРНОМ СТАНКЕ С ЧПУ.....	<b>135</b>
<b>Киреев А.Н., Киреева М.А.</b> АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ДВУХЧАСТОТНОГО МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	<b>138</b>
<b>Коваленко В.И.</b> ИНЖЕНЕРНАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ И БИОРИТМОВ.....	<b>143</b>
<b>Колганова Е.Н., Мельникова Е.П., Лебедев В.А., Шишкина А.П.</b> ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ.....	<b>147</b>
<b>Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Набиуллин Р. Ш., Хорошавин С. А.</b> ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ГОРНЫХ МАШИН (НА ПРИМЕРЕ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ).....	<b>151</b>
<b>Кондуоров Е.П., Кругликов П.А., Сухоруков Ю.Г.</b> ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВЫЗОВ: ПАРТНЕРЫ, СОПЕРНИКИ ИЛИ ПРОТИВНИКИ.....	<b>155</b>

<b>Костенко А.В., Пожидаева Л.А., Аликина А.Д.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ.....	<b>160</b>
<b>Красильников Д.В., Ян А. Игнаткина Е.Л.</b> СИСТЕМА ТОРМОЖЕНИЯ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ.....	<b>161</b>
<b>Ладоша Е.Н., Холодова С.Н., Цымбалов Д.С., Яценко О.В.</b> СОДЕРЖАНИЕ ГИДРОКСИЛА В РЕАКТИВНЫХ ВЫБРОСАХ СОВРЕМЕННЫХ ЖИДКОТОПЛИВНЫХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ: УТОЧНЕННАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА.....	<b>163</b>
<b>Лапаева И.В., Горобец И.А.</b> РИСКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ .....	<b>168</b>
<b>Лахин А.М., Горобец И.А., Цокур В.П., Салосин В.И.</b> ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНОЙ ОСНАСТКИ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	<b>173</b>
<b>Малашенко Т.И., Малашенко В.В.</b> ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК.....	<b>176</b>
<b>Мирошниченко С.В.</b> ОБ АЛГОРИТМЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХСЛОЙНОГО ШТАМПА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ПО СХЕМЕ РЕВЕРСИВНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ.....	<b>179</b>
<b>Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С., Недашковский А.П.</b> ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	<b>183</b>
<b>Михайлов А.Н., Котляров В.Б. Котляров Б.С., Котляров С.Б., Пичко А.П.</b> ПОРЯДОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ФОТ ОРЕБРЕННЫХ МЕДНЫХ ТРУБ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ МАНЕВРОВЫХ ТЕПЛОВОЗОВ.....	<b>186</b>
<b>Михайлов А.Н., Матвиенко С.А., Лукичев А.В., Стрельник Ю.Н.</b> ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО- ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ.....	<b>195</b>
<b>Михайлов Д.А., Михайлов А.Н., Хавлин Т.В., Пичко А.П., Шейко Е.А.</b> КОМПЛЕКСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ГТД НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ.....	<b>199</b>

<b>Михайлов Д.Л., Ермишкин В.А., Минина Н.А.</b> ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПО ДАННЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.....	206
<b>Момотов А.А., Семенов А.Н.</b> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СБОРКИ И МОНТАЖА ГАЗОТУРБИННЫХ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....	209
<b>Мороз О.К.</b> ОПЫТ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НЕВЗРЫВЧАТЫМИ РАЗРУШАЮЩИМИ СОСТАВАМИ.....	212
<b>Неструев Д.С., Борзов Д.Б., Дюбрюкс С.А.</b> АЛГОРИТМ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ БЕСПРОВОДНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА С ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕОРГАНИЗАЦИЕЙ РОЛЕЙ.....	217
<b>Овчинников Е.В., Музыка И.И., Эйсымон Е.И., Овчинников А.Е.</b> АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ.....	221
<b>Овчинников Е.В., Семенов А.В., Музыка И.И., Эйсымонт Е.И.</b> ДИСПЕРСИОННЫЙ СОСТАВ НАНОДИСПЕРСНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СВС	226
<b>Овчинников Е.В., Чекан Н.М., Акула А.П., Семенович И.А.</b> НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ В ВАКУУМНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЯХ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЯХ.....	230
<b>Павлыш В.Н., Дегонский А.И., Чупахин А.С.</b> ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЗРИТЕЛЕЙ, ПРИСУТСТВУЮЩИХ В КИНОКОНЦЕРТНЫХ КОМПЛЕКСАХ..	235
<b>Павлыш В.Н., Зайцева М.Н.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПАКЕТА МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИНОСТРАННЫХ ЯЗЫКОВ В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ.....	239
<b>Павлыш В.Н., Кодеругин Т.А.</b> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К ПОИСКУ ВИРУСНЫХ ПРОГРАММ.....	243
<b>Павлыш В.Н., Лазебная Л.А.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ	

АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ.....	247
<b>Павлыш В.Н., Перинская Е.В.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АППАРАТОВ КОНВЕКТИВНОГО ТИПА.....	250
<b>Папулова Г.Н.</b> ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ КОРРОЗИОННОМ ИЗНОСЕ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ТОЛЩИНЫ ЛКП ОТ ПРОПИТЫВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛКМ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	254
<b>Петряева И.А., Ивченко Т.Г., Шарипов В.А., Грешникова В.В.</b> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ.....	258
<b>Плохов И.В., Козырева О.И., Савраев И.Е.</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОЛЬЗЯЩЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА.....	261
<b>Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Бурьков Д.В.</b> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ, И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ.....	268
<b>Радин В.П., Щугорев А.В., Щугорев В.Н., Буланова М.А., Чирков В.П.</b> ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ КОНСОЛЬНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ СЛЕДЯЩЕЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ СИЛ.....	274
<b>Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.</b> НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЗОВОЙ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	278
<b>Рябичев В.Д., Витренко В.А., Ефимов А.В., Михайлова А.Д.</b> РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗУБОРЕЗНЫХ ФРЕЗ В ПРОСТРАНСТВЕННОМ СТАНОЧНОМ ЗАЦЕПЛЕНИИ.....	288
<b>Рябичева Л.А., Королько В.В.</b> НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ СВОБОДНОМ ДОРНОВАНИИ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК.....	291
<b>Савин Л.А., Шутин Д.В., Поляков Р.Н., Корнаев А.В.</b> СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОПОР РОТОРОВ С АВТОМАТИЧЕСКИМ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ.....	296
<b>Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Ланкин К.А., Мифтахов Р.А.</b> ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕТОРТ.....	300

<b>Семенов А.Н., Сергеев В.А.</b> ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НЕСТАЦИОНАРНЫХ РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....	<b>303</b>
<b>Скворцов А.И.</b> РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И СВОЙСТВА ДЕМПФИРУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ ЦИНК–АЛЮМИНИЙ.....	<b>307</b>
<b>Степанова Е.А., Рахимов Ю.Г.</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА И НЕФТИ.....	<b>310</b>
<b>Тюрин А.Н.</b> ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ТОЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ.....	<b>313</b>
<b>Унянин А.Н., Чистяков В.С.</b> АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ШЛИФОВАНИЯ ЛЕПЕСТКОВЫМИ КРУГАМИ.....	<b>317</b>
<b>Федуков А.Г., Хандожко А.В.</b> ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ КООРДИНАТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ МОДУЛЕЙ.....	<b>322</b>
<b>Шажко Я.В., Шатохин С.В. Ожегова Л.Д., Соколов К.И.</b> О ПРИМЕНЕНИИ ПРОФИЛИРОВАННЫХ НАКОВАЛЕН ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД.....	<b>326</b>
<b>Шатохин В.Ф., Чеботарёв В.Н., Скок А.А.</b> АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВЫШЕННОЙ ВИБРАЦИИ БАРАБАННОГО РОТОРА ТУРБИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СТЕНДЕ	<b>330</b>
<b>Щугорев В.Н., Евреинова Г.Д., Хроматов В.Е., Горбачев П.А., Гольцев А.А.</b> ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО СТЕРЖНЯ НА ПОЯВЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ МЕЖСЛОЙНЫХ ТРЕЩИН.....	<b>341</b>
<b>Щугорев В.Н., Сапунова Л.С., Егоров А.В., Попиль С.В., Щугорев А.В.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ БАЛКИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ.....	<b>345</b>
<b>Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G.</b> TO THE DESIGN OF RECONFIGURABLE AND BALANCED MULTIPURPOSE ASSISTIVE DEVICES.....	<b>348</b>
<b>Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M.</b> CHOICE OF PARAMETERS OF THE PROCESS OF OBTAINING	

MULTILAYER PLASMA COATINGS FROM COMPOSITIONS OF CERAMICS  
AND NICKEL M-CROUL..... 354

**Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Okovity V. V.,  
Astashinsky V. M.**  
THE FORMATION OF THE MULTILAYER PLASMA-BASED COATING  
COMPOSITIONS OF THE OXIDE..... 359

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрамов В. В.	278	Ермишкин В.А.	104, 206
Азимова Н.Н.	6, 9	Ефимов А.В.	288
Акопян Н.Г.	109	Жарких Д.С.	80
Акула А.П.	230	Зайцева М.Н.	239
Аликина А.Д.	160	Закарян Н.Б.	65, 109
Анастасьев А.В.	183	Ивченко Т.Г.	258
Аноприенко А. Я.	13	Игнаткина Е.Л.	161
Артюкевич А.В.	94	Калинин А.В.	113
Арутюнян М.Г.	65	Каракозов А.А.	116, 121, 127
Баранов А. В.	24	Карачев А. В.	24
Бахарева В.И.	28	Кардаполова М.А.	94, 130
Бахриев Ф.А.	24	Картафенков Д. В.	135
Бедоидзе М.В.	6	Киреев А.Н.	138
Безкоровайный П. Г.	28	Киреева М.А.	138
Борзов Д.Б.	31, 33, 217	Киселица Д.О.	80
Бохонский А.И.	37	Коваленко В.И.	143
Буланова М.А.	274	Кодеругин Т.А.	243
Бурьков Д.В.	268	Козырева О.И.	261
Буялич Г. Д.	42	Колганова Е.Н.	147
Варминская Н.И.	37	Комиссаров А. П.	151
Васильева М.А.	55	Кондуров Е.П.	155
Вегера И.И.	45	Корнаев А.В.	296
Величко Н. И.	50	Коровин В.А.	72
Витренко В.А.	288	Королько В.В.	291
Волчихина А.А.	55	Костенко А.В.	160
Воронцов А.А.	24	Косякова И.М.	130
Ворошилов И.В.	59	Котляров Б.С.	186
Галоян Г.А.	65	Котляров В.Б.	186
Гараев Р.А.	69	Котляров С.Б.	186
Гарченко А.А.	72	Красильников Д.В.	161
Герасимов А.В.	76	Кругликов П.А.	155
Голубев В.С.	45	Крымов В.Н.	99
Гольцев А.А.	341	Кулагин С.П.	104
Горбачев П.А.	341	Кулагина Е.С.	31, 33
Горобец И.А.	80, 168, 173	Купцова И.С.	6
Грешникова В.В.	258	Лагунова Ю. А.	151
Гусев Е.Л.	84	Ладоса Е.Н.	163
Гутаревич В.О.	89	Лазебная Л.А.	247
Девойно О.Г.	94, 130	Ланкин К.А.	300
Дегонский А.И.	235	Лапаева И.В.	168
Дробышевский П.С.	45	Лахин А.М.	80, 173
Дубяго М.Н.	268	Лебедев В.А.	147
Дюбрюкс С.А.	217	Лукичев А.В.	195
Евреинова Г.Д.	341	Луцко Н.И.	94
Егоров А.В.	345	Макухин А.Г.	50
Егоров Н.Т.	99	Малашенко В.В.	176

Малашенко Т.И.	176	Савраев И.Е.	261
Маслов К.А.	72	Салосин В.И.	173
Матвиенко С.А.	195	Сапунова Л.С.	345
Мельникова Е.П.	147	Саргсян Ю.Л.	65
Милев И.Ю.	6	Сафин Р.Г.	300
Минина Н.А.	104, 206	Семенов А.В.	226
Мирошниченко С.В.	179	Семенов А.Н.	209, 303
Мифтахов Р.А.	300	Семенович И.А.	230
Михайлов А.Н.	183, 186, 195, 199	Сергеев В.А.	303
Михайлов Д.А.	199	Скворцов А.И.	307
Михайлов Д.Л.	206	Скок А.А.	330
Михайлова А.Д.	288	Соколов К.И.	326
Момотов А.А.	209	Сотников В.Г.	300
Мороз О.К.	212	Степанова Е.А.	310
Музыка И.И.	221, 226	Стрельник Ю.Н.	195
Мухамадиев Р.Р.	76	Сухоруков Ю.Г.	155
Набиуллин Р. Ш.	151	Тациенко В. П.	42
Недашковский А.П.	183	Тюрин А.Н.	313
Неструев Д.С.	217	Украинцев А.А.	127
Овчинников А.Е.	221	Унянин А.Н.	317
Овчинников Е.В.	221, 226, 230	Федуков А.Г.	322
Ожегова Л.Д.	326	Хавлин Т.В.	199
Павлыш В.Н.	235, 239, 243, 247, 250	Хандожко А.В.	322
Палий Н.А.	104	Ходюш В.Е.	45
Папулова Г.Н.	254	Холодова С.Н.	163
Паршков А.В.	121	Хорошавин С. А.	151
Перинская Е.В.	250	Хроматов В.Е.	341
Петряева И.А.	258	Царенко С.Н.	69
Пилецкая Л.И.	94	Цокур В.П.	173
Пичко А.П.	186, 199	Цымбалов Д.С.	163
Пичко Н.С.	183	Чеботарёв В.Н.	330
Плохов И.В.	261	Чекан Н.М.	230
Погудо Е.В.	130	Чеченев А.В.	9
Пожидаева Л.А.	160	Чирков В.П.	274
Полуянович Н.К.	268	Чистяков В.С.	317
Поляков Р.Н.	296	Чупахин А.С.	235
Попиль С.В.	345	Шажко Я.В.	326
Прибой М.Н.	89	Шамаров М.В.	59
Радин В.П.	274	Шаповалов Д.А.	9
Ракунов А. Ю.	278	Шарипов В.А.	258
Ракунов Ю. П.	278	Шатохин В.Ф.	330
Рахимов Ю.Г.	310	Шатохин С.В.	326
Русяков Д.В.	6, 9	Шейко Е.А.	199
Рябичев В.Д.	288	Шестаков В. С.	28
Рябичева Л.А.	291	Шишкина А.П.	147
Рябцев А.Д.	72	Шутин Д.В.	296
Савин Л.А.	296	Щугорев В.Н.	274, 341, 345
		Щугорев А.В.	274, 345
		Эйсымон Е.И.	221

Эйсымонт Е.И.	226
Ян А.	161
Яценко О.В.	163
Astashinsky V. M.	354, 359
Devoino O. G.	354, 359
Ghazaryan S.D.	348
Harutyunyan M.G.	348
Okovity V. A.	354, 359
Okovity V. V.	354, 359
Panteleenko F. I.	354, 359
Sidorov V. A.	354, 359

**XXIX международная  
научно-техническая конференция  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА»**

**Сборник трудов**

**ISSN 2079-2670**

Главный редактор  
*д-р техн. наук, проф. А.Н. Михайлов*  
E-mail: [tm@fimm.donntu.ru](mailto:tm@fimm.donntu.ru)  
*Технический редактор И. А. Петряева*

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУВПО «ДОННТУ»,  
тел. +38 (062) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел.+ 7 949 306-08-79,  
+38 (062) 301-08-05. E-mail: [tm@fimm.donntu.ru](mailto:tm@fimm.donntu.ru) . Сайт: <http://konf-sev.donntu.ru>

Подписано к печати 30.07.2022 г.  
Формат 60x84<sup>1/16</sup>. Бумага Maestro.  
Гарнитура «Times New Roman». Печать лазерная.  
Усл. печ. л. 12,17. Уч.-изд. л. 14,35. Тираж 100 экз.

Отпечатано в рекламно-издательском отделе учредителя  
РИО «Донецкая политехника»  
Адрес: г. Донецк, ул. Артема, 58  
Тел.: +38 (062) 301-09-67