



XXXIII МНТК МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА

Сборник трудов XXXIII международной
научно-технической конференции



2026

2026 ДОНЕЦК

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА **XXI ВЕКА**

Сборник трудов
XXXIII Международной научно-технической конференции
г. Севастополь, 14-20 сентября 2026 г.

Донецк
2026

УДК 621.01:502.22(063)
ББК 34.4:20.17
М38

Рекомендовано к изданию
Ученым советом ФГБОУ ВО «ДонНТУ»
(протокол № 5 от 26.06.2026 г.)

Ответственный редактор – Огренич Дмитрий Витальевич

Редакционная коллегия:

Михайлов А. Н. (председатель); Горобец И. А.; Лахин А. М.; Бутенко В. И.;
Витренко В. А.; Лебедев В. А.; Плохов И. В.; Хандожко А. В.

Машиностроение и техносфера XXI века : сб. трудов
М38 XXXIII Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополь, 14 – 20 сент.
2026 г. / Ред. кол.: А. Н. Михайлов (пред.); И. А. Горобец;
А. М. Лахин [и др.]; отв. ред. Д. В. Огренич. – Донецк : ДонНТУ, 2026. –
Систем. требования : просмотрщик PDF-файлов. –
Загл. с титул. экрана.

В сборнике приведены 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, а также освещены современные проблемы материаловедения в машиностроении.

Издание может быть интересно научно-техническим работникам, аспирантам, молодым ученым, специалистам в области машиностроения и техносферы, всем, кто интересуется данной тематикой.

Тексты трудов печатаются в авторской редакции.

ISSN 2079-2670

УДК 621.01:502.22(063)
ББК 34.4:20.17

© ФГБОУ ВО «ДонНТУ», 2026

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Сопредседатели: Ректор ДонНТУ, к.т.н., профессор **Аноприенко А.Я.**; ректор УГТУ, д.т.н., профессор **Агиней Р.В.**; ректор ДонГТУ, д.т.н., профессор **Вишневский Д.А.**; ректор КамчатГТУ, д.соц.н., проф. **Левков С.А.**; ректор ЛНУ им. В. Даля, д.т.н., профессор **Рябичев В.Д.**; ректор БГТУ, д.т.н., проф. **Федонин О.Н.**

Члены: нач. отдела ИМАШ РАН, д.т.н., проф. **Базров Б.М.**; профессор ГИУА, д.т.н. **Баласанян Б.С.**; зав. кафедры РГАТУ им. П.А. Соловьева, д.т.н., проф. **Баранов А.В.**; профессор ИМ и СС АН РУ, д.т.н. **Бахадиров Г.А.**; проректор ДонНТУ, д.т.н., проф. **Бирюков А.Б.**; 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.**; профессор ЛГУ им. В. Даля, д.т.н. **Брешев В.Е.**; 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.**; директор ГУ «ПКТИ» **Ванин А.А.**; 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.**; директор ВШМ СПбПУ, д.т.н., проф. **Гасюк Д.П.**; ген. директор ЗАО УЭМЗ **Гришанова Т. А.**; зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., профессор **Гусев В.В.**; профессор ОИФТПС ЯНЦ СО РАН, д.т.н. **Гусев Е.Л.**; зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Гутаревич В.О.**; профессор КазАТУ, д.т.н. **Данияров Н.А.**; проректор АГУ, д.т.н., проф. **Делба В.В.**; директор Горловского АДИ ДонНТУ, к.т.н., проф. **Заглада Р.Ю.**; 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 ЛГУ им. В. Даля, д.т.н. **Киреев А.Н.**; профессор УГТУ, д.т.н. **Киселев Е.С.**; профессор УГТУ **Комиссаров А.П.**; зав. кафедрой КамчатГТУ, к.т.н., доц. **Костенко А.В.**; проф. Волгодонского филиала НИЯУ «МИФИ», д.т.н. **Кравченко П.Д.**; зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Криводубский О.А.**; гл. научн. сотр. ОАО «НПО ЦКТИ», д.т.н. **Кругликов П.А.**; гл. инженер ГУ «ПКТИ» **Кыткин В.П.**; зав. кафедрой УГТУ, д.т.н., проф. **Лагунова Ю.А.**; профессор ДГТУ, д.т.н. **Лебедев В.А.**; ОАО НПО "Искра", профессор, д.т.н. **Макаров В.Ф.**; декан СПГУ, д.т.н., профессор **Максаров В.В.**; профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н. **Малышева Г.В.**; зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Мельникова Е.П.**; ректор ДГТУ, д.т.н., проф. **Месхи Б.Ч.**; зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Михайлов А.Н.**; директор НПО ЯМЗ **Мурай В.Ю.**; зав. кафедры РГАТУ им. П.А. Соловьева, д.т.н., проф. **Непомилуев В.В.**; зам. директора ММИ УрФУ, д.т.н., проф. **Овчинникова В.А.**; 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.**; профессор ППИ, д.т.н. **Плохов И.В.**; профессор КазНУ им. Аль-Фараби, д.т.н. **Поветкин В.В.**; профессор СевГУ, д.т.н., проф. **Покинтелица Н.И.**; зав. кафедрой ДонНТУ, д.т.н., проф. **Полтавец В.В.**; директор ВФ УГТУ, д.э.н., профессор **Полякова Л.П.**; зав. кафедрой ТГУ, д.т.н., проф. **Прейс В.В.**; 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. **Бедарев С.А.**; декан РГАТУ им. П.А. Соловьева, д.т.н., проф. **Семенов А.Н.**; 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.**; засл. деятель науки и техники, почетный предс. Президиума Ассоциации технологов-

машиностроителей России, д.т.н., проф. **Суслов А.Г.**; зав. кафедрой ДГТУ д.т.н., проф. **Тамаркин М.А.**; председатель ДРО «Союз машиностроителей России», д.э.н., проф. **Трубчанин В.В.**; 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.**; НПО «Искра», д.т.н., проф. **Шайдунова Г.И.**; директор Высшей школы инженеров Меджез Эль Баб, проф. **Халед Эль Муддеб**; ректор Университета Джендуба, профессор **Хишем Себаи**.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель – заведующий кафедры ТМ ДонНТУ, д.т.н., проф. **Михайлов А.Н.**

Заместители председателя: доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Горобец И.А.**; доцент кафедры ТМ ДонНТУ, к.т.н. **Ляхин А.М.**

Ученый секретарь – инженер кафедры ТМ ДонНТУ **Огренич Д.В.**

Члены: доктор Багдадского ТУ, к.т.н., доцент **Аль-Судани Т.Т.**; аспирант каф. ТМ ДонНТУ **Анастасьев А.В.**; нач. отдела аспирантуры и докторантуры ДонНТУ, доцент, к.т.н. **Булах И.В.**; доктор Тунисского ТУ, к.т.н., доцент **Гитуни А.**; зам декана ФИМП ДонНТУ **Гулин В.В.**; зам. генерального директора НПО ГКМП, к.т.н. **Добровольский Г.И.**; к.т.н. **Котляров Б.С.**; аспирант кафедры ТМ ДонНТУ **Котляров В.Б.**; аспирант кафедры ТМ ДонНТУ **Котляров С.Б.**; профессор СПбПУ, д.т.н. **Кудрявцев В.Н.**; нач. отдела внешних связей ДонНТУ, доцент, к.т.н. **Кукушкина Л.А.**; доцент ДонНТУ, к.т.н. **Лазебная Л.А.**; доцент кафедры МД ДИ ГПС МЧС России, к.т.н. **Михайлов Д.А.**; доцент кафедры ДонНТУ, к.т.н. **Мороз О.К.**; доцент кафедры ДонНТУ, к.т.н. **Перинская Е.В.**; доцент ППИ, к.т.н. **Савраев И.Е.**; соискатель каф. ТМ ДонНТУ **Стрельник Ю.Н.**; доцент ДИ ГПС МЧС России, к.т.н. **Шейко Е.А.**; доцент кафедры ДонНТУ, к.т.н. **Цокур В.П.**; доктор Высшей школы инженеров Меджез Эль Баб, к.т.н. **Сахби Зантур**.

УЧРЕДИТЕЛИ КОНФЕРЕНЦИИ

Донецкое региональное отделение «Союз машиностроителей России»; Ассоциация технологов-машиностроителей России; Абхазский государственный университет; Брянский государственный технический университет; Воронежский государственный технический университет; Высшая школа инженеров Меджез Эль Баб; Донбасский государственный технический университет; Донецкий национальный технический университет; Донецкий ГУ «ПКТИ», Донской государственный технический университет; Казахский национальный университет имени Аль-Фараби; Камчатский государственный технический университет; Луганский государственный 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; АО «Феодосийский оптический завод»; ОАО НИИ «Изотерм»; Производственный комплекс «Снежнянский машиностроительный завод» АО «ОДК-Климов»; НПО «Ясиноватский машиностроительный завод»; ЗАО «Ухтинский экспериментально-механический завод»; ООО «НПО ГКМП»

Уважаемые дамы и господа, дорогие друзья и коллеги!

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

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

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

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

Особенно необходимо подчеркнуть то, что данная конференция проводится при содействии Донецкого регионального отделения «Союз машиностроителей России». Основной и важнейшей задачей работы этой Общероссийской общественной организации «Союз машиностроителей России» является объединение усилий российских машиностроителей в отстаивании интересов отечественного машиностроительного комплекса, содействие выработке и утверждению органами государственной власти общероссийских стратегий и программ развития машиностроительной отрасли России, с учетом стратегических интересов национальной экономики, местного самоуправления, предприятий и организаций всех форм собственности.

Организационный комитет конференции убежден, что эта встреча традиционно пройдет творчески и плодотворно, будут способствовать консолидации ученых и специалистов стран ЕАЭС, широкому обмену информации научно-технической характера, а также даст необходимый творческий импульс для дальнейшего развития машиностроения и техносферы.

С наилучшими пожеланиями

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

ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВО, ТЕХНООПТИМИЗМ И СИСТЕМОДИНАМИКА ТЕХНОСФЕРЫ

Аноприенко А. Я. (ДонНТУ, Донецк, ДНР)

E-mail: anoprien@ya.ru

The concept of technosphere system dynamics has been consistently discussed by the author in a series of articles and reports over the course of more than a quarter of a century, including at the conferences "Mechanical Engineering and Technosphere of the 21st Century" in 2018-2025. This report focuses on the need to develop inventiveness as a prerequisite for achieving technological leadership, as well as on techno-optimism as an essential component of an engineering mindset. This, combined with knowledge and understanding of the patterns of technological development, allows us not only to address current challenges, including those related to technological leadership, but also to foster a more constructive and positive outlook on our near and distant future.

Key words: invention, techno-optimism, technological leadership, system dynamics of the technosphere.

Концепция системодинамики техносферы последовательно рассматривается автором в целой серии статей и докладов на протяжении более чем четверти века, в том числе на конференциях «Машиностроение и техносфера XXI века» [1-8] в 2018-2025 гг. Данный доклад акцентирует внимание на необходимости развития изобретательства как обязательного условия достижения технологического лидерства, а также – на технооптимизме как важнейшей составляющей инженерного мировоззрения, что в совокупности со знанием и пониманием закономерностей развития техносферы позволяет не только способствовать решению текущих задач, в том числе с связанных с технолидерством, но и содействовать формированию существенно более конструктивных и позитивных взглядов на наше ближнее и дальнее будущее.

Можно утверждать, что необходимость достижения Россией на текущем историческом этапе не только технологического суверенитета, но и технологического лидерства была со всей очевидностью осознана уже к концу 2024-го года (рис. 1).



Рис. 1. В конце 2024-го года перед техническими вузами была поставлена задача подготовки инженерных кадров для достижения технологического лидерства

При этом одним из основных практических вопросов, требующих настоящего решения на этом пути, является повышение производительности труда, где, с одной стороны, наблюдается весьма и весьма существенное отставание России от ведущих стран мира (рис. 2-5), а с другой – имеются немалые резервы, которые надо научиться мобилизовать и эффективно использовать.



Рис. 2. Одной из основных проблем России, решение которой безусловно необходимо для достижения технологического лидерства, является низкая производительность труда – на решение этой проблемы должно быть направлено развитие изобретательства в стране



Рис. 3. К середине 1960-х годов Советский Союз вышел на лидерские позиции в мировом изобретательстве, которые начали утрачиваться уже в 1980-е и стремительно рухнули в 1990-е. При этом доля России в мировой изобретательской деятельности снизилась с более чем 15% до менее чем 1%!

World Intellectual Property Organization: World Intellectual Property Indicators 2025				
№	Страна	Заявки всего	Заявки резиден- тов	Заявки нерези- дентов
1	Китай	1 828 054	1 672 001	156 053
2	Соединённые Штаты Америки	603 194	270 295	332 899
3	Япония	306 855	237 169	69 686
4	Южная Корея	246 245	195 786	50 459
5	Индия	105 157	63 217	41 940
6	Германия	59 262	40 085	19 177
7	Канада	35 374	4 304	31 070
8	Австралия	30 487	2 542	27 945
9	Россия	26 698	21 502	5 196
10	Бразилия	25 597	5 752	19 845
11	Великобритания	18 952	11 105	7 847
12	Мексика	16 189	1 172	15 017

Рис. 4. Страны-лидеры по количеству заявок на изобретения: Россия на 9-м месте, но от лидеров отстаёт многократно [8]

Место	Страна	Патентов на 1 млн жителей
1	Южная Корея	3 599
2	Япония	1 770
3	Швейцария	1 119
4	Китай	1 010
5	Германия	791
6	США	790
7	Финляндия	661
8	Швеция	645
9	Дания	634
10	Нидерланды	493
20	Россия	139

Рис. 5. Страны-лидеры по количеству патентов на душу населения: Россия только на 20-м месте и от лидеров отстаёт на порядок! [8]

Это тем более актуально в условиях начавшейся технологической революции, связанной с тотальной интеллектуализацией и роботизацией техносферы.

В этих условиях развитие изобретательства приобретает первостепенное значение, что, в частности, обусловило необходимость существенных изменений в деятельности всероссийского общества изобретателей и рационализаторов (ВОИР) (рис. 6-8).



Рис. 6. Символика (и развитие) общества изобретателей и рационализаторов (ВОИР) в Советском Союзе и России

С 2024-го года: На базе ДонНТУ начало функционировать региональное отделение ВОИР



28-30 мая 2024 года в ДонНТУ в рамках юбилейного X Форума «Инновационные перспективы Донбасса» были **впервые проведены мероприятия Всероссийского фестиваля ВОИР «Наука и изобретения для жизни»**

Рис. 7. В 2024-м году практически синхронно с постановкой задач технологического лидерства в стране на базе ДонНТУ начало функционировать Донецкое региональное отделение ВОИР

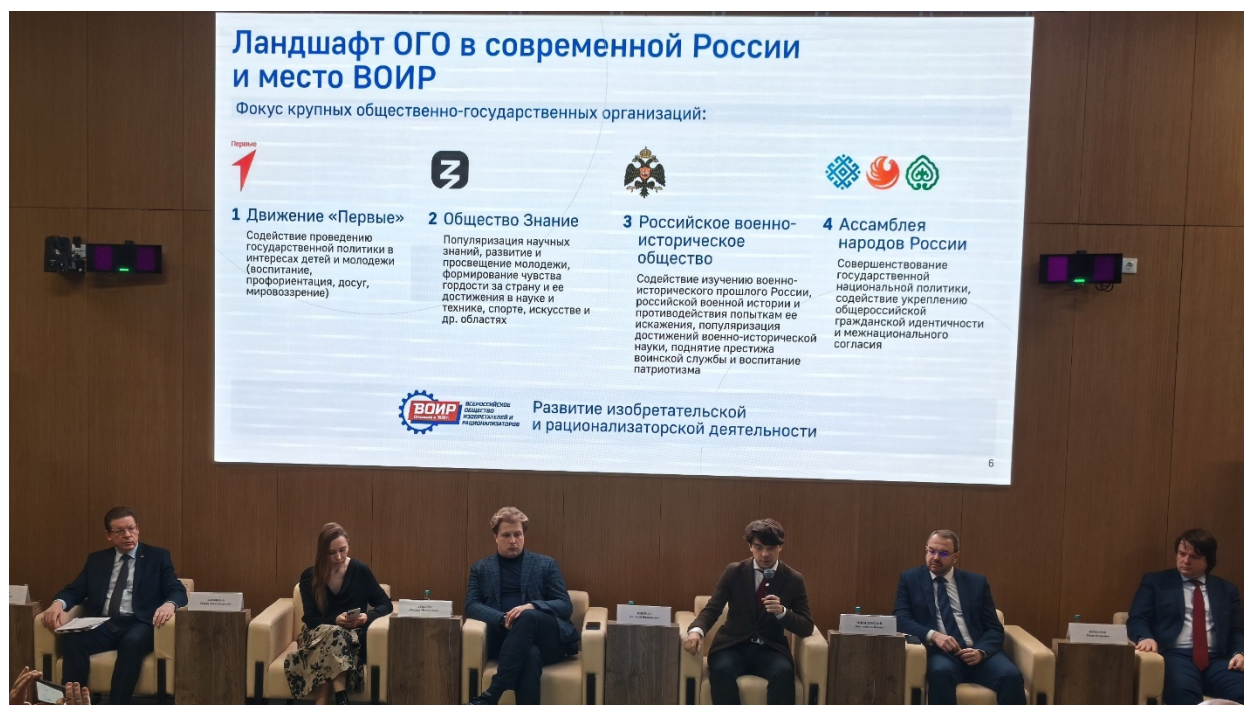


Рис. 8. Своего рода индикатором признания изобретательства как одного из важнейших инструментов достижения технологического лидерства стало преобразование ВОИР из общественной в общественно-государственную организацию в 2026-м году

В рамках решения этой задачи 20 июня 2026 года в Национальном центре «Россия» состоялся Учредительный съезд Общероссийской общественно-государственной организации «Всероссийское общество изобретателей и рационализаторов» (ВОИР).

Президент Российской Федерации Владимир Владимирович Путин в приветствии участникам съезда отметил, в частности, следующее: «Нынешний форум открывает новую страницу в истории ВОИР — авторитетной и легендарной организации, объединяющей своими задачами тысячи талантливых, инициативных, увлечённых людей — настоящих творцов и созидателей».

Всего в работе съезда приняли участие 245 делегатов, представляющих изобретательское сообщество из 72 субъектов нашей страны. От ДНР и, соответственно, от Донецкого отделения ВОИР в работе съезда приняла участие делегация из 3-х человек в следующем составе: ректор ДонНТУ и председатель Донецкого отделения ВОИР Аноприенко Александр Яковлевич, проректор ДонНТУ по научной работе Борщевский Сергей Васильевич и Курган Елена Геннадьевна – заместитель директора по научной работе в сфере интеллектуальной собственности Донецкого института научно-технической информации (рис. 9-11).

Заместитель Председателя Правительства Российской Федерации Дмитрий Николаевич Чернышенко, открывая этот съезд не только зачитал приветственный адрес Президента, но и подчеркнул следующее: «При поддержке Президента Владимира Владимировича Путина мы возвращаем мощнейший институт изобретательства и научно-технического творчества, который в советские годы объединял более 14,5 млн человек. Это была армия новаторов, которая поднимала целину, покоряла космос и создавала индустриальную мощь нашей страны. Сейчас перед Россией стоят ещё более амбициозные и масштабные задачи. Президент утвердил национальную цель – технологическое лидерство нашей страны. Ключевую роль в её достижении играют инженеры, изобретатели и рационализаторы, которые способны нестандартно мыслить и решать прикладные технические задачи».

К делегатам съезда обратился Валерий Николаевич Фальков – министр науки и высшего образования Российской Федерации: «Нам предстоит совместно развивать диалог между изобретателями, многие из которых трудятся в университетах, научных организациях и предприятиях нашей промышленности. Привлекать в инженерное творчество студентов, аспирантов и молодых ученых. Заниматься совершенствованием нормативно-правового регулирования в области интеллектуальной собственности и патентного права. Рассчитываем на поддержку со стороны ВОИР и в развитии современного инженерного образования». Министр также добавил, что запрос на инженерные кадры со стороны рынка труда в последние годы последовательно растет. При этом важно перейти к подготовке инженеров-творцов, способных к созданию собственной инновационной продукции. Перед участниками съезда выступил также заместитель Министра науки и высшего образования Константин Могилевский.

В рамках съезда делегаты утвердили устав организации, определили её организационную структуру и избрали руководящие органы. Председателем ВОИР избрали заместителя Председателя Комитета Государственной Думы по науке и высшему образованию Владимира Кононова, который в своём выступлении отметил следующее: «Сегодня мы закладываем прочный фундамент для системной работы наших изобретателей и рационализаторов на десятилетия вперёд. Изобретательское сообщество должно стать местом притяжения для талантливой молодежи, площадкой, где идеи превращаются в конкретные решения и инновационные продукты, востребованные экономикой и обществом. Уверен, что, опираясь на лучшие традиции отечественной инженерной школы и объединяя усилия общества и государства, мы обеспечим уверенное движение России к технологическому лидерству».

Съезд избрал также руководящие органы ВОИР — Координационный совет и Президиум Координационного совета, в состав которых вошёл и руководитель Донецкого отделения ВОИР Александр Аноприенко. Исполнительным директором ВОИР съезд избрал Олега Дьяченко.

Чтобы полностью понять и оценить значение прошедшего учредительного съезда необходимо вспомнить историю ВОИР. Нынешний этап в истории организации начался 14 апреля 2026 года, когда Президент Российской Федерации подписал указ о создании Общероссийской общественно-государственной организации «Всероссийское общество изобретателей и рационализаторов». Фактически речь шла о преобразовании ВОИР из общественной в общественно-государственную организацию в целях обеспечения её устойчивой государственной поддержки, а также – консолидации сил государства и общества, направленных на достижение технологического лидерства нашей страны. Общественных организации в нашей стране сотни, а важнейших для нашего будущего общественно-государственных организаций всего чуть более десяти, среди которых, например, такое известное всем общество как «Знание».

Если вспомнить более давнюю историю ВОИР и его истоки, то начать необходимо с подписанного императором Александром I накануне войны 1812 года Манифеста «О привилегиях на разные изобретения и открытия в ремеслах и художествах», ставший по своей сути первым патентным законом в России. Характерно, что первым указом о выдаче привилегии по этому Манифесту был указ «О выдаче привилегии Американских соединенных штатов города Нового Йорка жителю Роберту Фултону на устройство и употребление в России изобретенного им водоходного судна, приводимого в движение парами». Другими словами, это фактически означало, с одной стороны, что технологическая революция в России уже начинается, а, с другой стороны, фиксировало тот факт, что до достижения страной технологического лидерства впереди ещё дистанция огромного размера.

Важной датой в развитии российского изобретательства можно считать 20 мая 1896 года, когда император Николай II подписал законодательный акт «Положение о привилегиях на изобретения и усовершенствования», в котором, в частности, устанавливалось, то к прошению о выдаче изобретения теперь требовалось прилагать: полное описание изобретения или усовершенствования на русском языке, квитанцию об уплате пошлины за рассмотрение прошения и публикацию в газетах или журналах (почти как в наши дни). В конце описания требовалось перечислить отличительные особенности заявленного изобретения или усовершенствования, составляющих, по мнению просителя, его новизну. Тем самым фактически впервые было установлено правило выдачи привилегии с формулой изобретения. Кроме того, впервые был установлен единый срок действия привилегий в России – 15 лет. Объявления о всех выданных привилегиях теперь начали публиковаться в «Правительственном вестнике» и «Вестнике финансов». Отнюдь не случайно появление этого акта совпало с началом бурного роста промышленного производства и развития изобретательской активности в России. Согласно официальной статистике той поры всего за 20 лет с 1896 до 1917 гг. в стране было выдано около 30-ти тысяч привилегий (патентов), что в 5 раз превышало общее количество выданных привилегий за период с 1812 по 1896 гг., т.е. за срок практически в 4 раза более длительный!

Первым законодательным актом в области изобретательства советского периода стал Декрет Совета Народных Комиссаров (СНК) «Положение СНК об изобретениях» от 30 июня 1919 г. Сам факт принятия указанного Положения в разгар Гражданской войны свидетельствует о том, какое важное значение придавало руководство советского государства изобретательству, как одному из инструментов в восстановлении разрушенного хозяйства и подъёму экономики страны. Постановлением ЦК ВКП(б) от 26 октября 1930

г. было одобрено решение ВЦСПС об организации массового добровольного Всесоюзного общества изобретателей (ВОИЗ) и началась подготовительная работа по созданию этой организации. Так наряду с коллективизацией сельского хозяйства пришла коллективизация новаторства. К 1-му учредительному съезду ВОИЗ, который состоялся с 15 по 20 января 1932 г. в Кремлёвском дворце съездов Москвы вновь образованное общество уже насчитывало 300 тысяч членов. Многочисленные разобщенные кружки, ячейки новаторов, возникшие за годы советской власти на предприятиях, теперь преобразовывались в подразделения ВОИЗ.

Существенную роль в мобилизации новаторских рядов, пропаганде научных знаний и изобретений сыграл ежемесячный журнал «Изобретатель», который стал выходить в свет с 1929 г. Первый номер открывался полемической статьёй Альберта Эйнштейна «Массы вместо единиц». Великий физик являлся страстным поклонником Великой Октябрьской революции и утверждал на страницах нового издания, что на смену изобретателей-индивидуалов неизбежно придут массы новаторов. Но, к сожалению, волна сталинских репрессий, пик которых пришёлся на 1937-1938 гг., привела к тому, что с 1938 года на долгие два десятилетия прекратили свою деятельность и ВОИЗ, и журнал «Изобретатель».

Накануне Великой Отечественной войны (ВОВ) был принят ещё один важный законодательный акт в сфере изобретательства: 5 марта 1941 г. Постановлением СНК СССР было утверждено Положение «Об изобретениях и технических усовершенствованиях и о порядке финансирования затрат по изобретательству, техническим усовершенствованиям и рационализаторским предложениям». Страна находилась на пороге войны и руководство стремилось направить изобретательство на нужды военного времени. В итоге за 20 лет с 1941 по 1961 гг. было выдано более 60-ти тысяч авторских свидетельств на изобретения.

После победы в Великой Отечественной войне и громадных усилий по восстановлению народного хозяйства решением Президиума ВЦСПС от 17 января 1958 г. было создано Всесоюзное общество изобретателей и рационализаторов (ВОИР), который стал преемником ВОИЗа. Двумя годами раньше, с 1956 г. снова стал выходить в свет ежемесячный журнал «Изобретатель». Сначала под названием «Изобретательство в СССР», а с 1958 г. – «Изобретатель и рационализатор» (учредителем журнала стало ВОИР).

В 1973 г. ВОИР было награждено орденом Ленина, а журнал «Изобретатель и рационализатор» в 1979 г. – орденом Знак Почёта за плодотворную работу по массовому вовлечению трудящихся в активное техническое творчество. По официальным данным на 1988 г. (один из самых успешных для Общества) в ВОИР входило более 118 тыс. ведущих предприятий СССР и более 14,5 млн. изобретателей и рационализаторов. Различными формами научно-технического творчества было охвачено более 8 млн. детей и подростков, в 506 вузах действовали студенческие научно-технические общества (СНТО), которые ежегодно выполняли работ на сумму более 50 млн. рублей. Указом Президиума Верховного Совета СССР от 24 января 1979 г. был учреждён официальный праздник «Всесоюзный день изобретателя и рационализатора», который широко отмечался в последнюю субботу июня месяца. В современной России в это же время продолжают отмечать «День изобретателя и рационализатора».

За советские годы своего существования деятельность ВОИР имела впечатляющие результаты: к концу 1980-х годов ежегодно регистрировалось более 80-ти тысяч изобретений, что примерно соответствовало показателям США и значительно превышало показатели Японии (порядка 60-ти тысяч), Германии и Великобритании (порядка 30-ти тысяч). За счёт рационализаторских предложений в СССР обеспечивалось в среднем 30-35% общего роста производительности труда, 50-60% экономии материальных и сырьевых и около 80% топливно-энергетических ресурсов.

Но после развала СССР в 1991 году все показатели резко упали практически в четыре раза на фоне значительного их роста как в перечисленных выше странах, так и в Китае, лидирующем сегодня в мире по этим показателям. В итоге на сегодня мы имеем многократное отставание в изобретательской активности от ведущих стран мира, что отнюдь не способствует достижению такой национальной цели как технологическое лидерство и требует серьезного государственного вмешательства в исправление этой ситуации. Именно поэтому и было проведено преобразование ВОИР из общественной организации в общественно-государственную. ВОИР на сегодня является практически единственной в стране организацией федерального масштаба с таким статусом и имеющей по сути многовековые традиции. И как можно заметить из приведенного выше краткого обзора значительные изменения государственной политики по отношению к изобретательству и инновационной деятельности происходили в переломные для России исторические моменты. Именно такой момент наступает и сейчас.



Рис. 9. ВОИР в новом статусе призвано решать стратегические задачи страны в развитии инженерной деятельности, о чём свидетельствуют планируемые ключевые показатели её деятельности в 2026-2030 гг.



Рис. 10. Преобразование ВОИР в организацию с новым статусом состоялось на Учредительном съезде в центре «Россия» в Москве 20 июня 2026-го года. Выступает заместитель Министра науки и высшего образования Константин Ильич Могилевский. В президиуме министр науки и высшего образования Валерий Николаевич Фальков, заместитель Председателя Правительства Российской Федерации Дмитрий Николаевич Чернышенко, Председатель ВОИР и заместитель Председателя Комитета Государственной Думы по науке и высшему образованию Владимир Михайлович Кононов.



Рис. 11. Делегация ДНР, в том числе ректор ДонНТУ Аноприенко А.Я. (крайний справа) и проректор Борщевский С.В. (2-й слева) с Председателем ВОИР В.М. Кононовым (2-й справа)

Нынешний председатель ВОИР депутат Государственной Думы и заместитель Председателя Комитета Государственной Думы по науке и высшему образованию Владимир Михайлович Кононов в руководящие органы ВОИР вошёл ещё в 2017 году, когда он был избран вице-президентом ВОИР, а Президентом – Михаил Валентинович Ковальчук – президент НИЦ «Курчатовский институт». За прошедшие годы благодаря активности и усилиям Владимира Михайловича ВОИР прошло непростой путь от одной из множества общественных организаций страны к статусу государственно-общественной организации, на которую возлагаются особые надежды в контексте решения задач технологического лидерства России [9]. О значении ВОИР в новом статусе свидетельствует, в частности, и новый состав Наблюдательного Совета, возглавил который заместитель Председателя Правительства Российской Федерации Дмитрий Николаевич Чернышенко, а его заместителями стали министр науки и высшего образования Валерий Николаевич Фальков и президент Российской академии наук Геннадий Яковлевич Красников.

Но, как показывает и практика, и вся история инженерной деятельности в нашей стране и мире, изобретательство не получит должного развития и распространения без соответствующих программных, мотивационных и идеологических установок. Одним из важнейших среди них является технооптимизм, который придаёт высочайшую степень осмысленности и общественной полезности инженерной деятельности и противостоит деструктивным идеям технопессимизма и неизбежно вытекающего из него технофашизма. При этом в качестве одной из основных задач инженерных вузов необходимо рассматривать воспитание не просто технооптимистов, но воинствующих технооптимистов, готовых не просто глубоко осмысливать, понимать и отстаивать свои позитивные мировоззренческие позиции, но и всю свою профессиональную деятельность реализовывать именно в таком жизнеутверждающем формате с целью эффективного и продуктивного противостояния разрушительным по сути концепциям технопессимизма (рис. 12-13).



**Аноприенко А.Я. Изобретательство, технооптимизм
и системодинамика техносферы**




Вопреки преобладанию в фантастике и видению будущего технопессимизма (с 1970-х, но особенно 1986-го) необходимо

ВОСПИТАНИЕ ВОИНСТВУЮЩИХ ТЕХНООПТИМИСТОВ!

Технооптимизм — мировоззренческая и жизненная позиция, согласно которой техническим успехам и научно-техническому прогрессу придаётся первостепенное значение в преодолении проблем и противоречий, возникающих в ходе поступательного общественного развития

Седьмой Международный фестиваль креативных индустрий «Звёзды над Донбассом-2025» - «Фестиваль, который подарил веру в будущее»



Возможные решения




ДонНТУ - Донецкий национальный технический университет - Донецк - Donetsk National Technical University - DonNTU

Рис. 12. Не просто технооптимизм, но воинствующий технооптимизм должен быть инженерным ответом технопессимизму в теории и на практике



Технопессимизм

Проблемы глобальные
Варианты прогнозов современных
продолжатели «Пределов роста»:

Проблемы, которые
необходимо преодолеть!



2020-2030 гг:
резкий спад
всех параметров
развития
и начало конца
индустриальной
цивилизации?

Моделирование «Пределов роста» в
начале 1970-х показало, что **во всех
вариантах развития человечества**, даже
самых оптимальных (новые
технологические прорывы и пр.),
**катастрофа человечества к 2100 году
будет неизбежна** из-за истощения
невозобновляемых ресурсов и начнётся
она **с середины 2020-х годов!**

«Теория Олдувая»: завершение 100-летнего «всплеск»
индустриальной цивилизации с 1930 (?) по 2030-й с
экспоненциальным ростом только до конца 1960-х

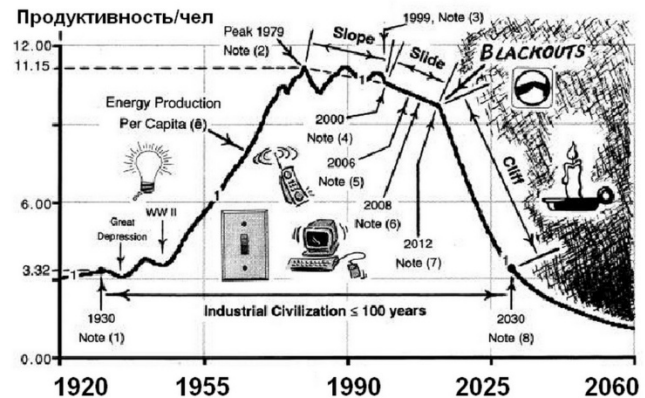


Рис. 13. Современный технопессимизм ведёт цивилизацию в тупик, провоцирует жесточайшие конфликты и лишает надежд на созидательное будущее

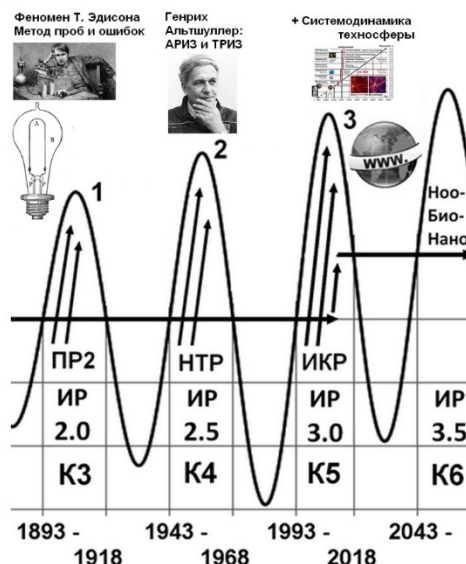
Существенной основой для жизнеутверждающего технооптимизма может являться системодинамика техносферы, в рамках которой на базе выявления объективных закономерностей развития техники и технологий формируются не только новое понимание цивилизационного развития в прошлом и будущем, но и новые подходы к изобретательской и инженерной деятельности в целом (рис. 14-15).



Возможные решения

От проб, ошибок и
«тактики ТРИЗ»
к «Стратегии
закономерностей»
на базе
системодинамики
техносферы

1946: Начало разработки
ТРИЗ. Альтушлер Г. С. ведет
исследования совместно с Р.
Б. Шапиро под лозунгом
«Метод проб и ошибок —
злейший и ужаснейший враг
человечества»



Системодинамика техносферы

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

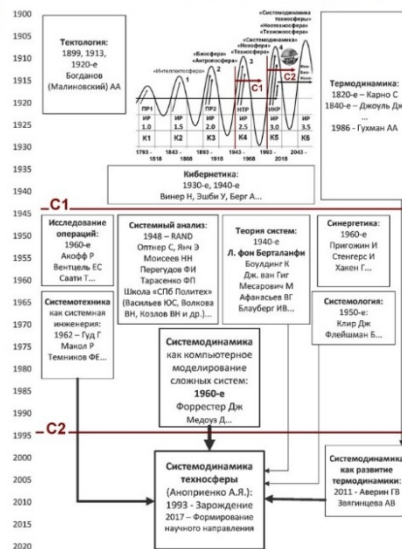
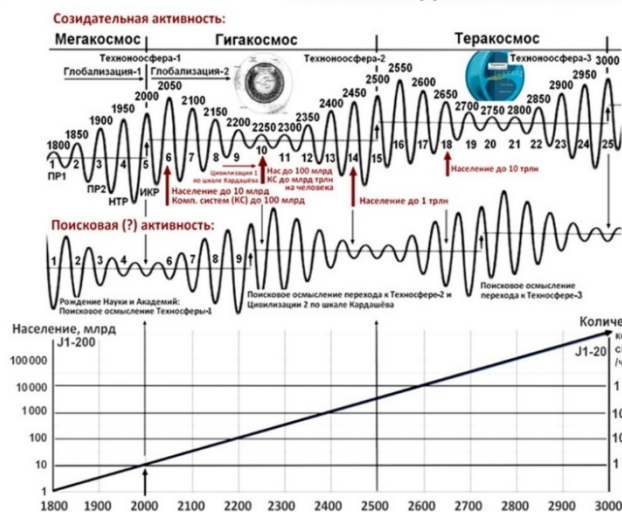


Рис. 14. Развитие изобретательства в контексте уточнённой модели волн Кондратьева: от американского метода «проб и ошибок» Эдисона к русским ТРИЗ-АРИЗ и системодинамике техносферы



Технооптимизм на базе инженерного мировоззрения и системодинамики техносферы

Возможные решения



ДонНТУ - Донецкий национальный технический университет - Донецк - Donetsk National Technical University - DonNTU

Рис. 15. Системодинамика техносферы позволяет в динамике определять границы возможного в изобретательской деятельности и задавать инженерные ориентиры на ближнее и дальнее будущее в контексте технооптимизма и соответствующих мировоззренческих установок

Более того, на текущем этапе исторического развития созрела необходимость формирования целостного инженерного мировоззрения, ориентированного на созидание космического масштаба (рис. 16).

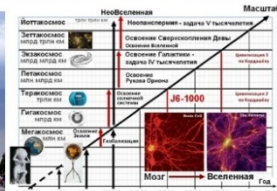


Предназначение Человека (инженерный взгляд): «Повеление стать Богом!»

Научные
вызовы
XXI

Главный мотиватор:

**Инженерное
мировоззрение для
изобретателей,
рационализаторов...
и универсальной
инженерной цивилизации!**



Синтезирующие концепции Вселенной и Бога:

1. Разумное начало в виде Создателя или Творца (но остается открытой проблема генезиса Творца)
2. Космический Разум (все та же проблема генезиса...)
3. Человек – «зародыш» Вселенной... и ее творец

Решение дилеммы Достоевского: «Кто я? Тварь дрожащая или право имею?»
– Уныние и гордыня...
Уныние: Червь во плоде! (Предельный экологизм...)
Гордыня: Человек сам по себе уже и есть Бог!
(Пассивный антропоцентризм)

**Человек в живой Вселенной: не червь во плоде,
а плод во чреве!**

Три уровня инстинктов в человеке:

1. Животные: поесть, поспать, получить удовольствие...
2. Социальные: любить...
3. Космические: познать...

**Инженерия
Универсума!**



**Эффективное
решение
проблемы
генезиса
Бога!!!**

ДонНТУ - Донецкий национальный технический университет - Донецк - Donetsk National Technical University - DonNTU

Рис. 16. Мировоззренческий технооптимизм на базе знания и понимания закономерностей системодинамики техносферы позволяет по-новому рассматривать общечеловеческие цели и задачи, а также – наше общее будущее

Таким образом, в рамках системодинамики техносферы всемерное развитие изобретательства и технооптимизма представляется на текущем этапе одним из необходимых условий движения к технологическому лидерству страны, а в дальней перспективе – для формирования уверенного исторического оптимизма и связанного с этим определенного пересмотра основных мировоззренческих установок.

Список литературы: 1. 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. Научные основы системодинамики техносферы // «Машиностроение и техносфера XXI века». Сборник трудов XXIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2022 г. – Донецк: ДонНТУ, 2022. С. 13-23. 6. Аноприенко А. Я. Выпускники и преподаватели ДонНТУ на службе России // «Машиностроение и техносфера XXI века». Сборник трудов XXX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2023 г. – Донецк: ДонНТУ, 2023. С. 343-345. 7. Аноприенко А. Я. Концепция закономерно развивающейся техносферы как основа инженерного мировоззрения // «Машиностроение и техносфера XXI века». Сборник трудов XXXI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-22 сентября 2024 г. – Донецк: ДонНТУ, 2024. С. 404-416. 8. Рейтинг стран мира по количеству патентов // Гуманитарный портал. 9. Кононов В., Ржешевский А. Изобретаем будущее. Прогресс шаг за шагом. – М.: 2022. – 236 с.

ШЛИФОВАНИЕ СТАЛИ 12Х18Н10Т АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

Азарова Н. В., Поезд С. А., Рудницкий А. В., Цокур В. П. (ФГБОУ ВО «Донецкий государственный технический университет», г. Донецк, ДНР)
Тел./Факс: +7 (856) 3010731; E-mail: msmo@fimm.donntu.ru

В статье приведены данные по исследованию изменений удельного расхода алмазов и сил резания при шлифовании алмазным кругом 1А1 250×76×16×5 АС15 160/125-4-М2-01 стали 12Х18Н10Т, рабочая поверхность которого получена в результате электроэрозионной правки, при алмазном шлифовании и с вводом технологического тока в зону резания или в зону, повернутую на 90° по направлению вращения круга.

Ключевые слова: электроэрозионное шлифование, алмазный круг, удельный расход, сталь, силы резания.

*The article provides data on the change in the specific consumption of diamonds and cutting forces during grinding with a 1A1 250*76*16*5 AC15 160/125 4 M2-01 diamond wheel of 12X18N10T steel, the working surface of which was obtained by electro-erosion dressing during diamond and combined grinding.*

Введение

Шлифование коррозионно-стойкой, жаростойкой и жаропрочной стали аустенитного класса 12Х18Н10Т [1] рекомендуют электрокорундом белым марки 25А, обеспечивающим температур в зоне резания до 600° С [2, 3, 4], хотя абразив обладает низкой теплопроводностью. Шлифовать стали алмазными кругами на металлической вязке не рекомендуется так как общепризнано, что при температурах в зоне резания свыше 500° С возможен повышенный износ алмазов. Аргументами являются низкая красностойкость, образование пленок на поверхности алмаза, химическим взаимодействием алмаза с железом, приводящее к внедрению молекул железа в решетку алмаза, что приведет к разрушению алмаза, а также железо является катализатором при превращении алмаза в графит.

Исследования А.А. Сагарды, Л.Л. Мишнаевского и О.А. Бабенко [5] показали, что главную роль в процессе алмазного шлифования играет величина площади контакта, а при плоском шлифовании периферией круга длина дуги возможного контакта алмазные зерна при повороте круга на 1° не более 1,8 мм за оборот после чего зона нагрева охлаждается потоком воздуха. Алмаз и металлическая связка М2-01 обладают высокой теплопроводностью и теплоемкостью, что снижает риск высоких температур в зоне контакта.

Основная часть

Шлифование стали 12Х18Н10Т осуществляли на плоскошлифовальном станке модели 3Г71, модернизированном для электроэрозионной правки путем электроизоляции алмазного круга и устройств от станины станка. Перед каждым экспериментом алмазный круг правили на медном электроде, снимая 0,04 мм алмазоносного слоя для удаления следов предыдущей обработки.

Исследовали три вида шлифования: алмазное шлифование (АШ), шлифование с вводом технологического тока в зону резания (АЭШ), шлифование с вводом технологического тока в зону, повернутую на 90° от зоны резания (АШП). Площадь образца

шлифовали на следующих режимах: скорость резания – 35 м/с, продольная подача – 9 м/мин, поперечная подача – 4 мм/дв.ход, глубина резания 0,015мм. Для охлаждения использовался 0,3% водный раствор кальцинированной соды. Износ рабочей поверхности алмазного круга контролировали в 5 осевых и 6 радиальных сечениях, то есть в 30 точках индикатором с ценой деления 0,001мм. Точное фиксирование ножки индикатора на измеряемой поверхности круга осуществляли микрометром и лупой Бринеля. Силы резания измеряли динамометром УДМ100. Исследования износа круга и сил резания проводили в течении 60 мин, фиксируя результаты через 15мин - при алмазном шлифовании, с подводом технологического тока в зону резания и повернутую на 90 в сторону вращения круга. Координаты РПК приведены в таблице 1, из которой следует, что в различных местах абразивного пространства износ протекает не одинаково, есть места, где износа за 15 мин не было, а в других точках он 100мкм. Особенно это видно на алмазном шлифовании, когда неизношенных участков очень много, так как сталь обладает большой вязкостью, то возможны намазывания на поверхность алмазов обрабатываемого материала, что может привести к большему значению измеряемой координаты. При АЭЭШ наблюдается большой износ за первые 15 мин шлифования - это объясняется тем, что вводимая технологическая энергия не только обеспечивает удаление связки и обеспечение выступления вершин зерен над связкой, но и удаление слабо закрепленных зерен.

Таблица 1. Динамика износа алмазного круга после трех видах шлифования

Интервалы, мкм при алмазном шлифовании	После 15мин	После 30мин	После 45мин	После 60мин
0-10	9	12	19	27
11-30	15	18	8	3
31-50	5		3	
Больше 50	2			
Интервалы, мкм с автономной правкой	После 15 мин	После 30 мин	После 45 мин	После 60 мин
0-10	8	11	4	12
11-30	11	9	15	14
31-50	8	8	9	5
Больше 50	3	1	2	2

Продолжение таблицы 1

Интервалы, мкм при алмазно-эрозионном шлифовании	После 15 мин	После 30 мин	После 45 мин	После 60 мин
0-25	0	8	5	5
26-50	1	15	16	14

Удельный износ алмазов при различных видах шлифования представлен на рисунке 1.

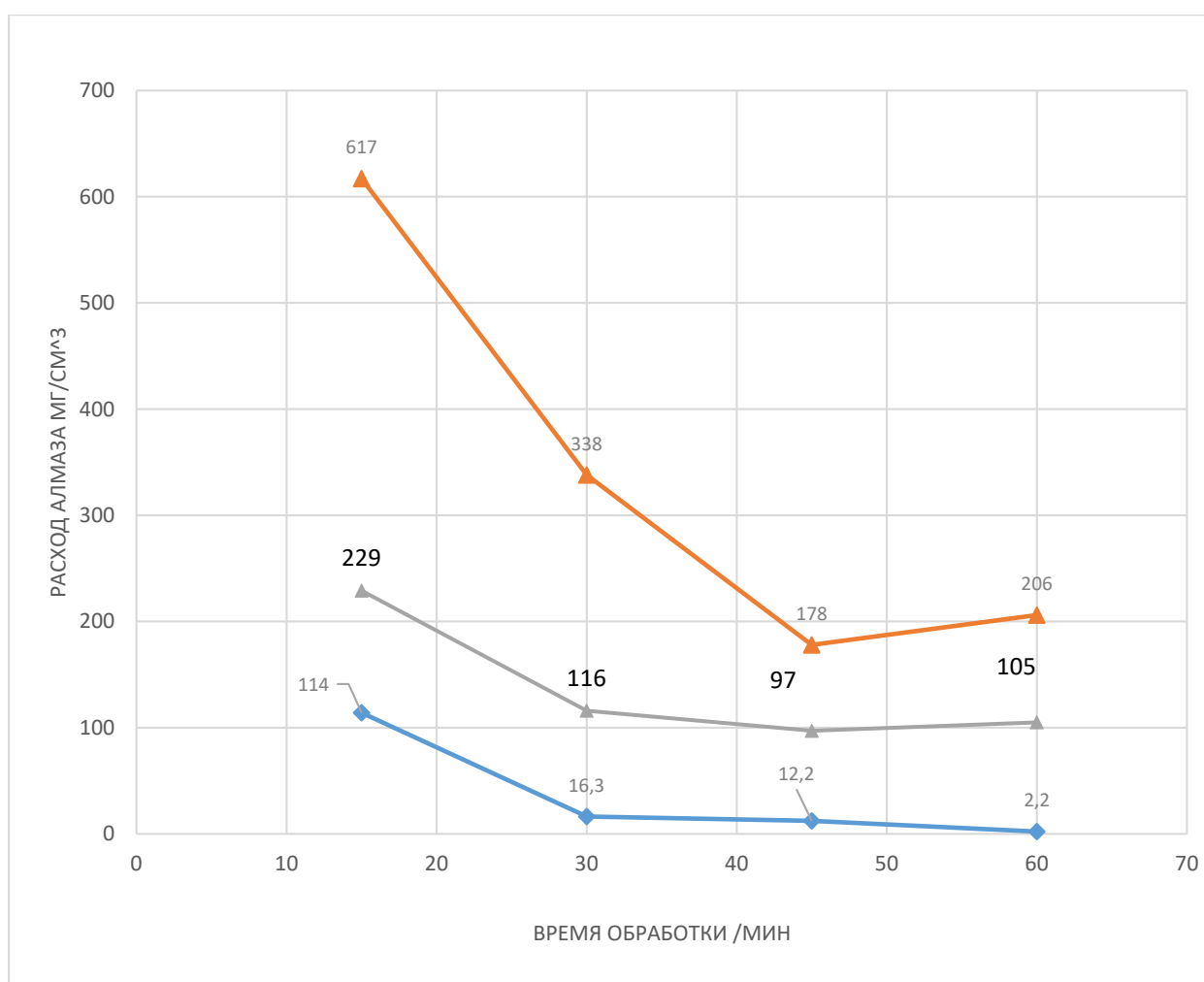


Рис. 1. Удельный расход алмазов при шлифовании стали 12318Н10Т
Верхняя кривая получена при АЭЭШ, нижняя – при АШ, средняя при АШП

Исследования показывают, что после ЭЭП в связи с удалением связки и обеспечением выступания зерен над связкой часть алмазных зерен удаляется с РПК в течении нескольких минут любого вида шлифования. Наибольшее значение наблюдается при АЭЭШ, которое превышает АШ в 4,74 раза. В последующие 30,45,60 мин шлифования

удельный расход алмазов снижается, но по сравнению с алмазным шлифованием больше в 20,7 после 30 мин.

Увеличение расхода при АШ и АШ с АП после 45 мин указывает на образование площадок износа на зернах, сглаживание рельефа РПК, рост сил резания и увеличению коэффициента трения. При АЭШ удельный расход алмазов в последующие минуты шлифования изменяется незначительно ввиду непрерывной правки РПК

На рис. 2 показана рабочая поверхность алмазного круга для трех исследуемых видов шлифования.



Рис. 2. РПК при различных видах шлифования приувеличении в 9 раз

На рис. 3 показаны РПК с различными видами шлифования при увеличении в 40 раз.

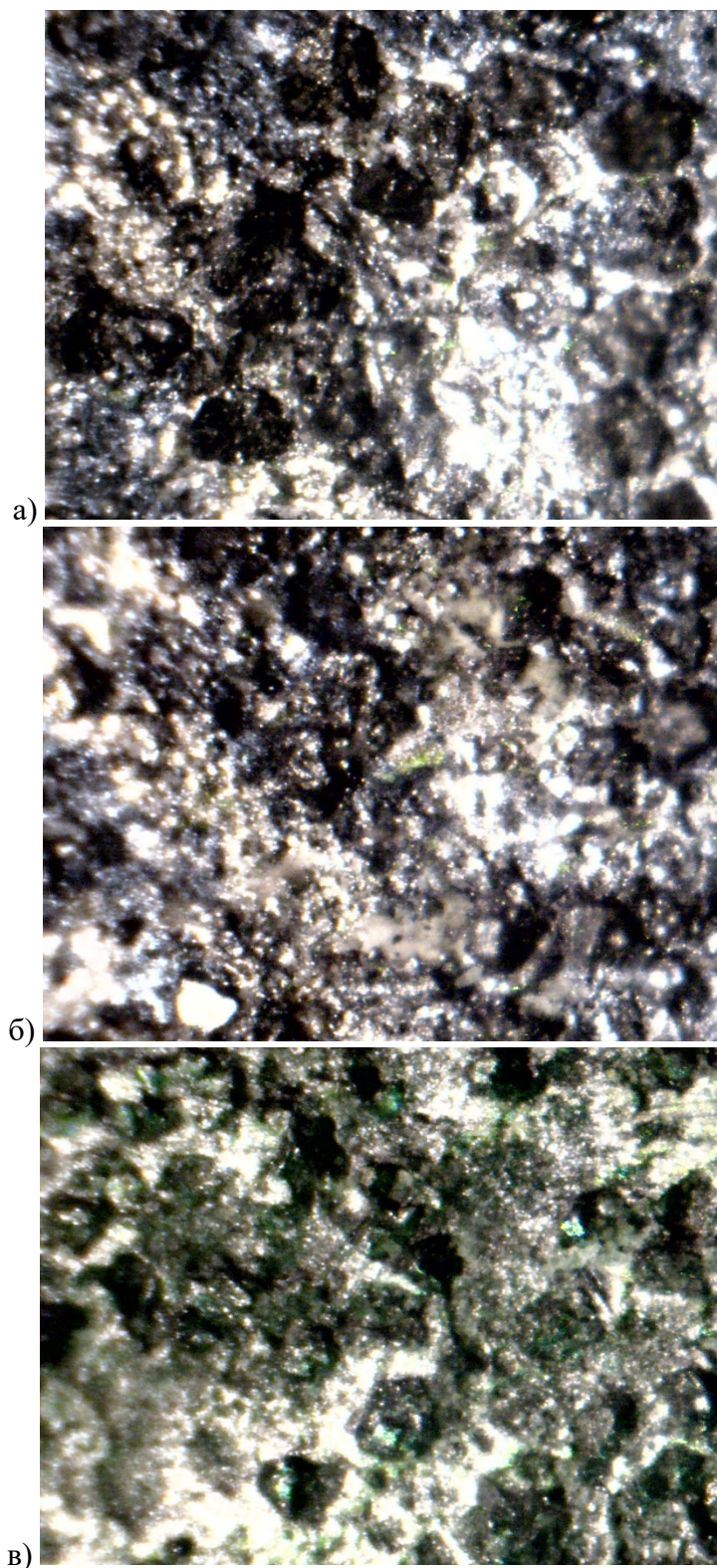


Рис. 3. РПК при различных видах шлифования при увеличении 40х: а) алмазное электроэрозионное шлифование; б) алмазное шлифование с автономной правкой; в) алмазное шлифование

На рис. 4 показано изменение сил резания для трех видов шлифования за 60 мин.

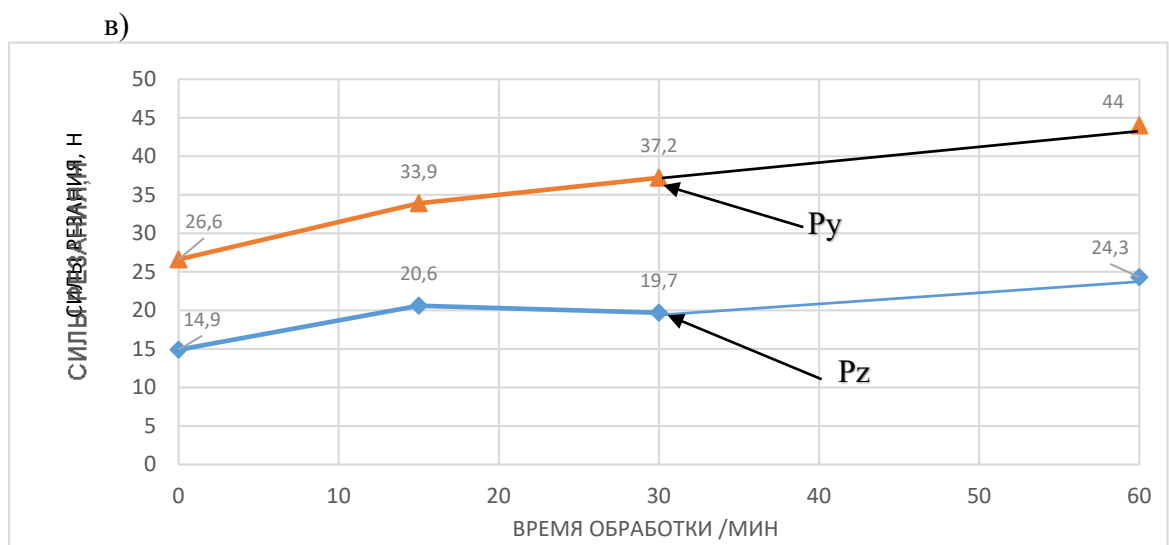
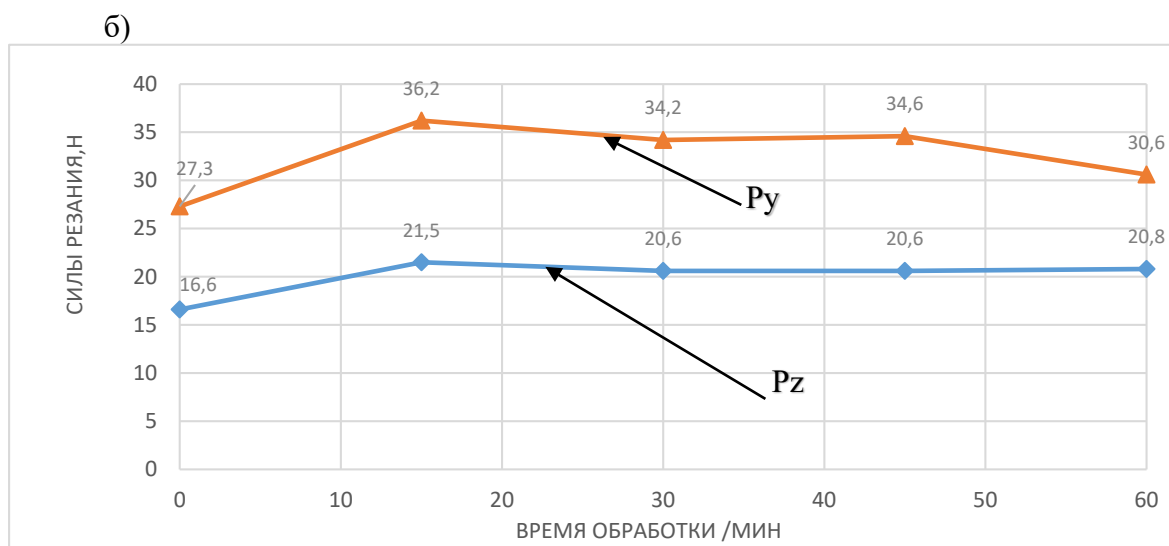
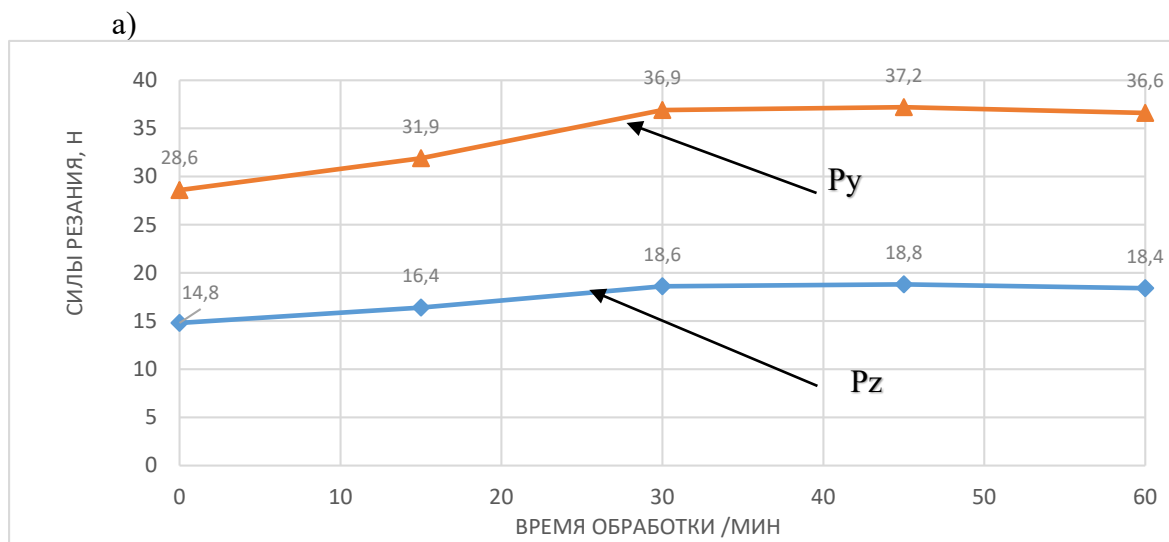


Рис. 4. Силы резания при трёх видах шлифования: а) алмазное шлифование; б) алмазное шлифование с автономной правкой; в) алмазное электроэрозионное шлифование

Вертикальная сила P_y превышает тангенциальную силу P_z в 1,8 раз при АЭЭШ, в 1,7 при АШП, в 1,68 при АШ. При АШ силы резания практически остаются постоянными, а при АЭЭШ увеличиваются

Заключение

1. Наименьший расход алмазов после 60 мин алмазного шлифования, а наибольший при АЭЭШ при равном объеме снятого материала.
2. Алмазные круги на связке М2-01 при обработке стали 12Х18Н10Т имеют стойкость 60 мин, на шлифованных поверхностях дефектов не обнаружено, а параметр шероховатости Ra после 60 минут обработки для АЭЭШ – 0,96 мкм, АШП-0,7 мкм АШ – 0,55 мкм.
3. Необходимы исследования по определению минимального удаления алмазоносного слоя при правке.

Список литературы: 1. ГОСТ 5632-2014 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ «Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные», введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2015г. 2. Романенко, А.М. Обработка шлифованием высоколегированных коррозионно-стойких сталей на примере 12Х18Н10Т/ А.М. Романенко, Д.Б. Шатько, А.А. Непогожев, Я.С. Караваев// Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2021 №3. С.98-106.//<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-98-106>. 3. Богущкий, В. Б. Изменение характеристик рабочей поверхности шлифовального круга за период его стойкости / В. Б. Богущкий, Л. Б. Шрон // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2019. — Т. 19, № 2. — С. 66–74. — DOI 10.14529/engin190206. 4. Коротков, А. Н. Сравнительный анализ применения полового сферокорунда в качестве абразива в шлифовальных кругах при плоском шлифовании / А. Н. Коротков, В. А. Коротков // Современные наукоемкие технологии. — 2022. — № 4. — С. 52–56. 5. Сагарда А.А. Шлифование быстрорежущих сталей кругами из синтетических алмазов и кубонита// А.А. Сагарда, Л.Л. Мишнаевский, О.А. Бабенко// Синтетические алмазы, 1973,- Вып.4. С.39-43.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Анастасьев А. В., Анастасьева В. А., Пичко Н. С. (АДИ ДонНТУ, г. Горловка, ДНР,
УФ УГТУ г. Усинск Республика Коми, Россия)
Тел.: +79493497428; E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

В статье рассмотрены современные тенденции проектирования и технологического обеспечения изготовления наземных робототехнических комплексов (НРТК). Выполнен анализ существующих подходов к классификации мобильных НРТК, особенностей их конструктивного исполнения и областей применения. Показано, что развитие робототехнических систем сопровождается расширением номенклатуры технических решений, внедрением современных материалов и аддитивных технологий, а также повышением требований к технологичности, ремонтпригодности и надежности конструкций. Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных образцов наземных робототехнических комплексов.

Ключевые слова: наземный робототехнический комплекс, классификация, проектирование, аддитивные технологии.

This article examines current trends in the design and manufacturing of unmanned ground vehicles (UGV). It analyzes existing approaches to classifying mobile UGV, their design features, and areas of application. It demonstrates that the development of robotic systems is accompanied by an expanding range of technical solutions, the introduction of modern materials and additive technologies, and increased requirements for manufacturability, maintainability, and reliability. The results can be used in the development and improvement of promising UGV designs.

Key words: unmanned ground vehicle, classification, design, additive technologies.

1. Введение

Наземные робототехнические комплексы (НРТК) являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной техники, находящим применение в промышленности, сельском хозяйстве, спасательных операциях, мониторинге окружающей среды, а также в военной и специальной сферах [1]. Рост функциональных возможностей НРТК сопровождается повышением требований к их надёжности, технологичности, ремонтпригодности и экономической эффективности производства. Особенно значимым фактором, определяющим вектор развития отрасли, стало стремительное внедрение аддитивных технологий и новых материалов, что позволяет пересмотреть традиционные подходы к проектированию и изготовлению. Это определяет актуальность исследований в области совершенствования конструктивно-технологических решений при создании данных комплексов.

Цель работы заключается в анализе современного состояния развития НРТК и определении основных тенденций их проектирования и изготовления. Для реализации данной цели необходимо решение ряда задач, таких как: анализ современных НРТК, их классификация, определение основных направлений их развития.

2. Основное содержание и результаты работы

В настоящее время основные понятия и определения в области НРТК регламентируются соответствующим стандартом - ГОСТ Р 60.2.0.6-2024. Роботы и робототехнические устройства. Наземные робототехнические комплексы, определяющим их как в плане наименования, основные типы, варианты конструктивного исполнения и др.

Вопросам развития и разработки новых роботизированных систем и особенностей их применения посвящено множество работ [2, 3, 4, 5], которые охватывают различные аспекты их разработки, проектирования, изготовления и эксплуатации.

Данная работа посвящена мобильным НРТК (НРТК М), к которым относятся колёсные, гусеничные, шагающие, комбинированные и иные компоновочные схемы. Как показывает практика – такие системы нашли широкое применение в различных сферах – от доставки продовольственных товаров и уборки улиц, до выполнения боевых и разведывательных задач [6, 7].

Современный НРТК представляет собой сложную систему, совмещающую в себе ряд технических комплексов, обеспечивающих перемещение, управление, позиционирование как самой системы, так и её органов управления в ручном, полуавтоматическом, автономном или комбинированном режиме (рисунок 1). При этом, существующие комплексы могут отличаться своими техническими характеристиками в широком диапазоне, например, по массе их разделяют на группы от микро (до 2х кг) до сверхтяжелых (весом свыше 18 т.), что позволяет применять как существующие наработки, особенно в области колёсной и гусеничной техники (как гражданского, так и двойного назначения), так и вести разработку новых систем с учетом современных технологий (например аддитивных технологий) [8, 9].



Рис.1. Схема взаимодействия основных элементов НРТК

Широкая номенклатура в пределах, заложенных стандартом как способов перемещения, так и массы самих НРТК охватывает практически все направления не только транспортного машиностроения, но и машиностроения в целом, дает разработчикам, проектировщикам и конструкторам обширные возможности в выборе

конструктивных решений и их реализации. Примером таких решений может выступать НРТК «Курьер», созданный небольшой группой специалистов в рамках народного ОПК и успешно зарекомендовавший себя [10]. С другой стороны, активное применение аддитивных технологий позволяет изготавливать детали и узлы для наземных колёсных и гусеничных микро НРТК, что расширяет возможности как их проектирования, изготовления и ремонта, так и позволяет добиться существенного сокращения затрат на процессы проектирования, прототипирования и испытаний.

Учитывая всевозможные конструктивные исполнения, у таких систем в качестве силовых агрегатов могут применяться как двигатели внутреннего сгорания, например бензиновые или дизельные, так и электродвигатели. В зависимости от выполняемых задач возможно внесение изменений в технические характеристики НРТК, например требуемая скорость перемещения может варьироваться от 4 км/ч до 50 и более км/ч. Необходимость перевозки полезной нагрузки, буксировки или установки дополнительного навесного оборудования – так же вносят ряд изменений в конструкцию стандартизованных НРТК и должны быть учтены на этапе проектирования.

3. Заключение

Проведенный анализ развития наземных робототехнических комплексов показал устойчивую тенденцию к расширению сфер их применения и усложнению выполняемых функций. Установлено, что существующие НРТК характеризуются значительным разнообразием конструктивных исполнений, способов передвижения, массогабаритных параметров и применяемых силовых установок, что позволяет выполнить широкий спектр задач. Их проектирование и производство требуют комплексного подхода, учитывающего как стандартные требования к надёжности и ремонтпригодности, так и специфику выполняемых задач.

При этом ключевыми тенденциями развития НРТК становятся:

1. Интеграция современных технологий, в первую очередь аддитивного производства, для снижения стоимости и сроков разработки.
2. Адаптация гражданских наработок в области колёсной и гусеничной техники для нужд робототехники.
3. Гибкость проектирования, позволяющая создавать универсальные платформы, способные нести различное навесное оборудование.

Таким образом, дальнейшее совершенствование НРТК будет определяться синергией традиционных подходов к машиностроению и внедрением инновационных производственных методов, что обеспечит создание более эффективных и экономически выгодных роботизированных систем и расширение сфер применения НРТК.

Список литературы: 1. ГОСТ Р 60.2.0.6-2024. Роботы и робототехнические устройства. Наземные робототехнические комплексы. Классификация. – Введ. 2025-01-01. – М.: Стандартинформ, 2024. 2. Чапаева, А. С. Обзор мобильных робототехнических систем / А. С. Чапаева, П. С. Шастовский // Решетневские чтения : материалы XXIX Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева: в 2-х частях, Красноярск, 10–14 ноября 2025 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2025. – С. 927-929. 3. Ющенко, В. В. Современные технологии в машиностроении / В. В. Ющенко // Гуманитарные науки в эпоху цифровых технологий: новые ракурсы исследования : Сборник научных статей. – Москва : ООО «ПЕРО», 2025. – С. 125-127. 4. Тенденции в развитии промышленных мобильных роботов / Р. И. Солямов, А. П. Моисеев, Е. О. Прокофьев, К. С. Бирюков // Проблемы и перспективы развития энергетики,

робототехники и электротехнологий : Материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 23 декабря 2024 года. – Саратов: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова", 2025. – С. 288-294. **5.** Попова, Ю. Н. Мобильная робототехника: современность и будущее / Ю. Н. Попова, Т. Х. Мухаметгалеев // Тинчуринские чтения - 2025 «Энергетика и цифровая трансформация» : статьи по материалам Международной молодежной научной конференции. В четырех томах, Казань, 23–25 апреля 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 228-232. **6.** Артемьев, А. В. Современные малогабаритные гусеничные робототехнические комплексы: состояние и перспективы / А. В. Артемьев, М. С. Носков, Р. Ю. Добрецов // Транспортные системы : сборник материалов Международной научной онлайн-конференции для молодых ученых и аспирантов, Санкт-Петербург, 29 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 69-73. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-13. **7.** Разработки робототехнических комплексов в рамках проекта "Интеллектуальная робототроника" / В. Е. Пряничников, А. Я. Ксензенко, А. В. Плотников, В. В. Чернышев // II Научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности «RoboEmercom» : Сборник материалов конференции, Москва, 16 сентября 2022 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2022. – С. 195-202. **8.** Ильичбекова, А. А. Аддитивные технологии в машиностроении / А. А. Ильичбекова, А. И. Горбатенко // Физика и современные технологии в АПК : материалы XI Всероссийской молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников с международным участием, Орел, 19 февраля 2020 года. – Орел: ООО Полиграфическая фирма «Картуш», 2020. – С. 209-212. **9.** Марлынова, А. И. О возможностях применения 3D-печати в робототехнике / А. И. Марлынова // Актуальные проблемы математических и технических наук. – Чебоксары : Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева, 2017. – С. 57-60. **10.** Полев, А. В. Исследования проведения испытаний шасси наземного робототехнического комплекса военного назначения / А. В. Полев, А. С. Тимербаев, М. В. Глуханюк // Аллея науки. – 2024. – Т. 1, № 10(97). – С. 904-908.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ ПО СИСТЕМЕ ВТА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Баранов А. В., Павлов К. А.

(РГТУ имени П. А. Соловьева», г. Рыбинск, Россия)

Тел.: +7(910) 8141404; E-mail: alexbar57@mail.ru

Рассматриваются вопросы аналитического определения энергетических критериев применительно к операциям сверления высокоточных глубоких отверстий по системе ВТА с целью повышения эффективности данных операций и создания САПР режимов резания для данного метода лезвийной обработки.

Ключевые слова: глубокие отверстия, система ВТА, САПР режимов резания, энергетические критерии

The article discusses the issues of analytical determination of energy criteria in relation to high-precision deep hole drilling operations using the BTA system in order to improve the efficiency of these operations and create a CAD system of cutting modes for this method of blade processing.

Keywords: deep hole machining, BTA system, cutting mode CAD, energy criteria

Введение. Система ВТА (Boring and Trepanning Association) (или технология STS – Single Tube System), это технология глубокого сверления, которая применяется для получения отверстий диаметром от 19 до 250 мм при сплошном сверлении. В данной системе реализуется схема наружной подачи СОЖ и внутренний отвод стружки (рис. 1). Признано, что ВТА – самая совершенная из всех технологий сверления глубоких отверстий. Обработка глубоких высокоточных отверстий по системе ВТА будет находить в ближайшее время всё большее применение [1, 2]. используется высокоточный инструмент специальной конструкции (рис. 2).

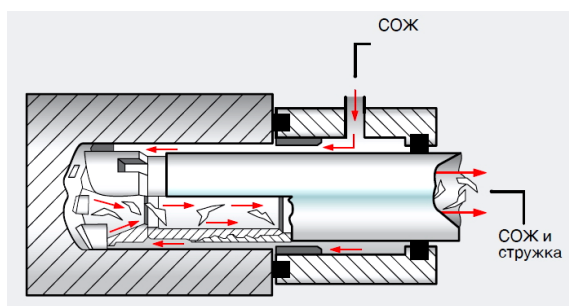


Рис. 1. Схема сверления по технологии ВТА



Рис. 2. Сверло системы ВТА:
П – периферийный режущий элемент

Известно, что эта система имеет следующие возможности: для диапазона обработки Ø19 – 250 мм: шероховатость поверхности Ra 3,2 – 1,5 мкм; точность обработки по IT9, увод инструмента до 0,25 мм/м. Данные параметры обработки могут быть обеспечены при работе на оптимальных режимах резания [2].

Установлено [2, 3], что наилучшие показатели качества поверхностного слоя и точности обработки обеспечиваются при резании на оптимальной по износостойкости режущего инструмента скорости резания v_0 , когда в зоне резания обеспечивается оптимальная температура θ_0 [4] для рассматриваемой пары «инструментальный – обрабатываемый материалы».

Как было показано в работе [5], значительный интерес при оптимизации процессов обработки отверстий представляет использование энергетических критериев. По данным профессора В.К. Старкова [6] с точки зрения дислокационных представлений выбор режима по минимуму удельной энергоёмкости (критерий η_1) даёт возможность вести обработку с максимальным коэффициентом полезного действия. А условия обработки, при которых формируется поверхностный слой с минимальной скрытой энергией (критерий η_2), обеспечивают повышенные эксплуатационные свойства деталей при высоких температурах и улучшение их коррозионной стойкости. При этом минимальна деформация, а значит, обеспечивается повышенная точность обработки. Эти же условия благоприятны для качества обработки с точки зрения получения минимальной высоты неровностей обработанной поверхности.

При аналитическом решении уравнения баланса механической и тепловой энергии и представлении его в критериальной форме для операций лезвийной обработки отверстий присутствует энергетический критерий A , характеризующий тепловую активность стружки по отношению ко всей выделяющейся в зоне резания теплоте, предложенный профессором С.С. Силиным [3]. Как с научной, так и с практической точки зрения представляет значительный интерес установление связи между энергетическими критериями η_1 , η_2 и A , в частности, при обработке глубоких высокоточных отверстий по системе ВТА.

С учётом того, что практически вся механическая энергия при резании превращается в тепловую, уравнение баланса механической и тепловой энергий запишется в виде (для режущего элемента (РЭ) $П$ (рис. 2))

$$P_z v = Q = Q_c + Q_d + Q_{и} + Q_{oc}, \quad (1)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, H ; v – средняя на рассматриваемой глубине резания РЭ скорость, м/с; Q – общее количество тепла, выделившегося в зоне резания, Дж/с; Q_c , Q_d , $Q_{и}$ и Q_{oc} – количества тепла, переходящие из зоны периферийным РЭ соответственно в стружку, деталь, инструмент и окружающую среду, Дж/с.

Если в выражение (1) подставить соответствующие формулы для Q_c , Q_d и $Q_{и}$, представленные в работе [7] (без учёта Q_{oc}), то картина распределения тепла, например для коррозионно-стойкой конструкционной стали 12Х15Г9НД и инструмента с РЭ из ВК6-М, будет иметь следующий вид (рис. 3). Здесь $Pe = va_1 / a$ – безразмерный комплекс; a_1 – толщина среза, м; a – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с)

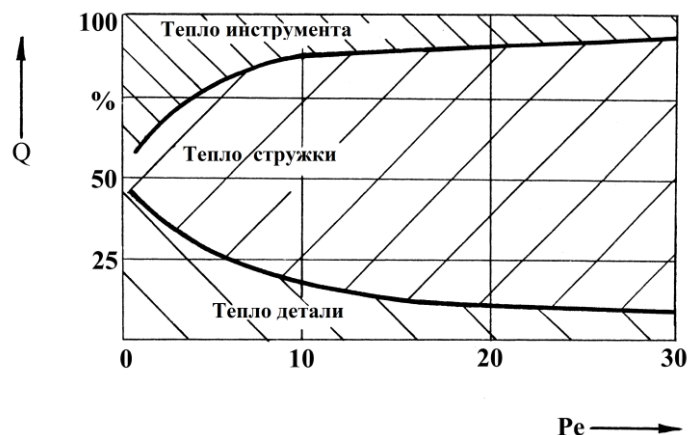


Рис. 3. Баланс тепла при сверлении по технологии ВТА 12Х15Г9НД – ВК6-М

Анализ данных графиков и соответствующих формул для выражения (1) позволяет сделать следующие выводы: 1) с ростом критерия Pe наблюдается рост Q_c , Q_d и $Q_{и}$; 2) рост критерия Pe обуславливает уменьшение относительных значений Q_d/Q и $Q_{и}/Q$ и увеличение Q_c/Q , то есть с ростом Pe бо́льшая доля энергии выносится из зоны резания со стружкой.

При аналитическом решении уравнения баланса механической и тепловой энергий (1) и представлении его в критериальной форме для операций сверления по технологии ВТА [2, 7] был использован энергетический критерий A , характеризующий собой тепло-вую активность стружки по отношению ко всей выделяющейся в зоне резания теплоте, который через температуру резания θ можно представить в виде

$$A = \frac{a_1 b_1 c_p \theta}{P_z} = \frac{st c_p \theta}{P_z}, \quad (2)$$

где a_1 и b_1 – толщина и ширина среза, м; c_p – удельная объемная теплоёмкость обрабатываемого материала, Дж/(м³·К); θ – температура резания, град; P_z – тангенциальная составляющая силы резания для РЭ.

Удельная энергоёмкость η_1 , характеризую физико-механическое состояние зоны резания, служит физическим показателем эффективности съёма материала и определяет условия работы режущего инструмента [6]. С помощью удельной энергоёмкости можно оптимизировать физические условия резания, а экономическая сторона процесса отражается в ограничениях на оптимизируемые параметры. Удельная энергоёмкость процесса (критерий, рекомендуемый для оптимизации предварительной или черновой обработки) определяется выражением

$$\eta_1 = \frac{P_z v}{v s t}, \quad (3)$$

где s и t – соответственно, подача на РЭ сверла и глубина резания. Все входящие в формулу (3) параметры указаны для периферийного элемента Π (рис.2), поскольку именно он определяет границы возможной скорости резания.

После подстановки выражения (2) в равенство (3) получаем

$$\eta_1 = \frac{c_p \theta}{A}. \quad (4)$$

Таким образом, показатель энергоёмкости η_1 связан с критерием A зависимостью (4). Чем выше значение критерия A , тем меньше величина критерия η_1 . Осуществляя оптимизацию режима в этом направлении, реализуется возможность вести обработку с максимальным коэффициентом полезного действия, как было отмечено

выше. Частным случаем выражения (4) является соотношение для условий, оптимальных по интенсивности износа инструмента

$$\eta_{10} = \frac{c\rho\theta_0}{A_0}, \quad (5)$$

где A_0 – энергетический критерий A при резании с оптимальной в зоне резания температурой θ_0 .

Формула (5) показывает, что в условиях оптимального резания, когда « $c\rho\theta_0$ » является постоянной величиной, энергоёмкость процесса полностью определяется критерием A_0 , причём при $P_z = P_{z0}$ (минимальное или минимально-стабилизированное значение силы P_z , соответствующее резанию со скоростью v_0 при оптимальной температуре в зоне резания [2, 3]) величина A_0 имеет максимальное значение, а η_{10} – минимальное. Поскольку при оптимальном резании обеспечивается максимальная размерная стойкость инструмента и наилучшие показатели качества поверхностного слоя, то из формулы (5) следует, что минимальному значению удельной энергоёмкости процесса резания η_{10} всегда соответствует наилучшее качество формируемого поверхностного слоя обрабатываемого отверстия и минимальная интенсивность изнашивания осевого лезвийного инструмента.

Введем еще одну характеристику

$$W = Q - Q_c, \quad (6)$$

Таким образом, W – это количество энергии, которое не выносится стружкой из зоны резания и перераспределяется между деталью (поверхностью резания и обработанной поверхностью) и инструментом.

Рассмотрим отношение энергии W к площади поверхности, обработанной в единицу времени

$$\omega = \frac{W}{vS} \quad (7)$$

и сопоставим с энергетическим критерием качества η_2 в виде функций $\omega = f_1(v)$ и $\eta_2 = f_2(v)$.

Расчёты для ω выполним применительно к процессу сверления по технологии ВТА (для условий работы одного - периферийного элемента $П$ (рис. 2)) с целью сопоставления с результатами для η_2 , расчётные зависимости для которого получены в работе [6] для процесса точения, при обработке стали 40Х твердосплавным инструментом из сплава Т15К6 (в первом приближении данные процессы можно считать сопоставимыми).

Результаты расчётов представлены на рис. 4. Анализ зависимостей $\omega = f_1(v)$ и $\eta_2 = f_2(v)$ показывает, что с ростом скорости резания v , часть энергии, выносимая из зоны резания со стружкой, увеличивается, и величина ω приближается к значениям η_2 , причём при значительных скоростях их величины становятся весьма близкими. Следовательно, чем больше энергии выносится из зоны резания со стружкой, тем более благоприятные условия создаются для качества и точности обработки (по аналогии с критерием η_2). То есть, при оптимизации процесса сверления по технологии ВТА целесообразно стремиться организовать его таким образом (режим обработки, инструментальный материал, геометрия инструмента), чтобы большая часть энергии выносилась из зоны резания со стружкой. Важно отметить, что, начиная с $v = v_0$, значения ω и η_2 становятся весьма близки друг другу (рис. 4). При этом расчёт ω значительно проще, чем расчёт η_2 [6].

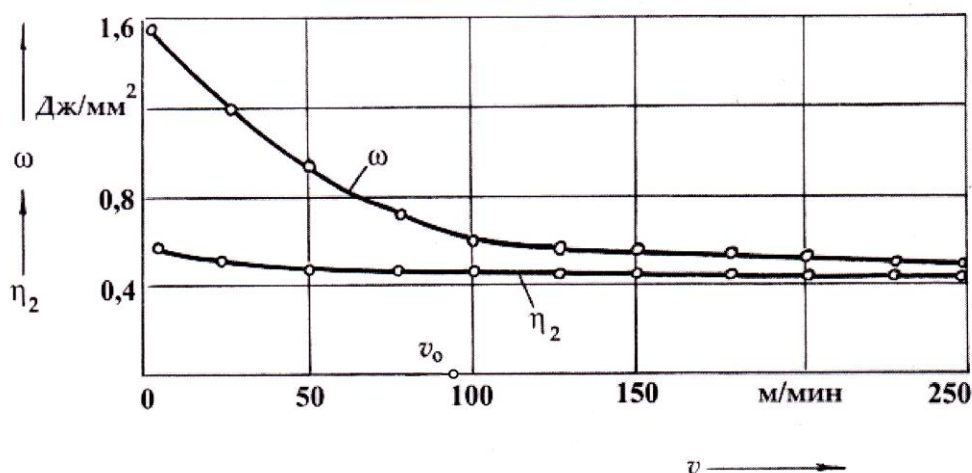


Рис. 4. Влияние скорости резания на значения ω и η_2 при сверлении по технологии ВТА

Закключение. Таким образом, обработка с оптимальными скоростями резания v_0 позволяет обеспечить минимальное значение удельной энергоёмкости процесса (при этом достигается максимальная размерная стойкость инструмента и наилучшие показатели точности и качества поверхностного слоя), а также создать условия для выноса значительного количества энергии из зоны резания со стружкой (при $v \geq v_0$). Последнее, наглядно подтверждается и графической интерпретацией балансов тепла в зоне резания при сверлении по технологии ВТА [7]. С ростом скорости резания (Pe) количество тепла, выносимого со стружкой из зоны резания, возрастает. Это во многом объясняет предпочтительность скоростей резания $v \geq v_0$ перед скоростями $v < v_0$, что важно учитывать при создании САПР режимов резания. Также известно [2], что скорости резания, соответствующие минимальной себестоимости обработки и максимальной производительности, незначительно больше скорости v_0 , которая рассчитывается из баланса механической и тепловой энергий в зоне резания [7].

Список литературы: 1. Баранов А.В. Надежность и диагностика технологических систем – Москва - Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. - 148 с. 2. Баранов А.В. Оптимизация процессов лезвийной обработки отверстий – Москва - Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. - 140 с. 3. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение. 1979. - 152 с. 4. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. - 278 с. 5. Баранов А.В. Оптимизация лезвийной обработки отверстий на основе энергетических критериев // Вестник машиностроения, 2011 - № 3. - С. 47 - 50. 6. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. - 160 с. 7. Баранов А.В., Рыкунов А.Н., Евдокимов М.А. Повышение качества поверхности и точности отверстия при сверлении по технологии ВТА // Вестник РГАТА имени П.А. Соловьёва. - Рыбинск: РГАТУ, 2025 - № 2 (73) - с. 29 - 36.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЗВУЧАНИЕ (СПЕКТР) ЖЕСТКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Бедондзе М. В., Лоскутникова И. Н., Степаницын А. С., Сулименко Д. С.,

Холодова С. Н. (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

A theoretical and numerical study investigates the acoustic spectra of flexural vibrations of rigid surfaces with various geometries and boundary constraints. Based on the equations of continuum mechanics and Bessel functions, models of circular and square plates are developed, and their natural frequencies and spectral modes are determined. Through a correlation analysis of the spectra, including hemispheres and bells, it is demonstrated that the macrogeometry of the body plays a decisive role in shaping the vibrational spectrum compared to the nature of the edge fixation.

Музыкальное искусство сочетает в себе физико-технические свойства звука и психофизиологию его восприятия. Для качественной трансляции произведения и реализации творческого замысла звукорежиссер должен глубоко понимать фундаментальные физические основы акустики [1].

Наибольшую сложность в инженерной практике представляет прогнозирование и коррекция спектрального состава звука, излучаемого реальными конструктивными элементами пространственной формы. В отличие от одномерных акустических излучателей (струн или язычков), генерирующих дискретный гармонический ряд, колебания упругих пространственных тел (компонентов ксилофона, тарелок) формируют значительно более сложную картину. Двумерный характер задачи обуславливает возникновение двух бесконечных семейств собственных чисел [2].

Математический аппарат для описания таких радиально-симметричных систем базируется на дифференциальном волновом уравнении четвертого порядка. Его пространственные решения представляются через цилиндрические функции первого рода и ограничиваются набором краевых условий [3, 4]. При переходе к сложным пространственным объектам (полусферам или колоколам) аналитический подход уступает место трехмерному численному моделированию на основе метода конечных элементов [5].

Настоящая работа направлена на детальный анализ указанных колебательных процессов. Главная задача исследования – сопоставить полученные спектры и установить, имеет ли геометрическая конфигурация объекта доминирующее значение для его акустического профиля по сравнению с фактором краевого закрепления.

Для тарелки с ее радиальной симметрией уравнение колебаний имеет вид:

$$\frac{\partial^2 S(r, \varphi, t)}{\partial t^2} + c^4 \cdot \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right]^2 S(r, \varphi, t) = 0, \quad (1)$$

$$\text{где } c = \sqrt[4]{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}}.$$

В рамках Фурье-факторизации

$$S(r, \varphi, t) = \mathbb{R}(r) \cdot \Phi(\varphi) \cdot T(t). \quad (2)$$

для гармонических колебаний $T(t)$ можно получить:

$$\left\{ \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right]^2 - \omega^2 / c^4 \right\} (\mathbb{R}(r) \cdot \Phi(\varphi)) = 0. \quad (3)$$

Из чего следует в силу круговой симметрии:

$$\begin{cases} \left(\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] - \omega/c \right) (\mathbb{R}(r) \cdot \Phi(\varphi)) = 0 \\ \left(\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] + \omega/c \right) (\mathbb{R}(r) \cdot \Phi(\varphi)) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

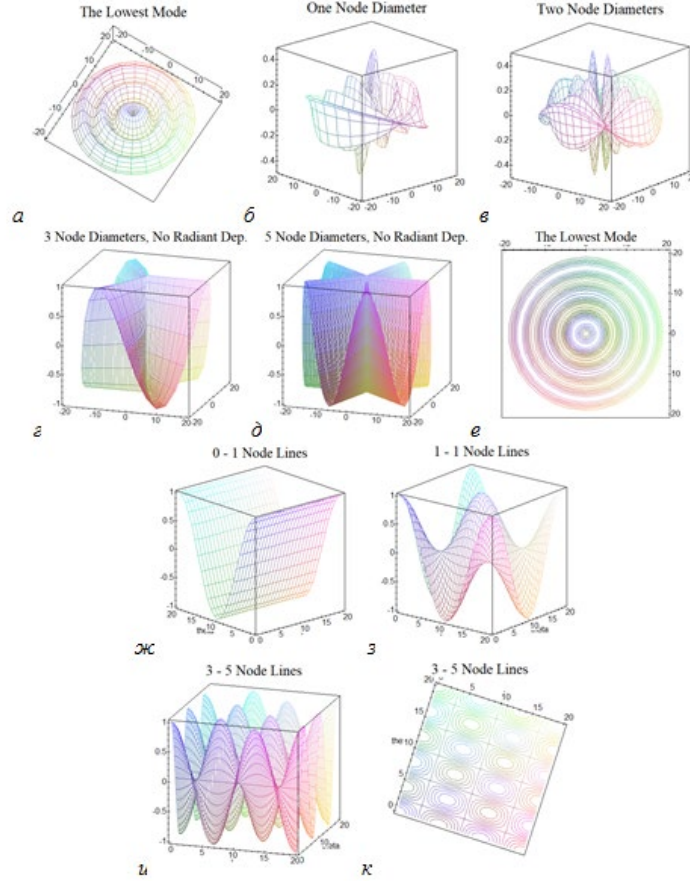


Рис. 1. Моды колебаний круглой (а – е) и квадратной (ж – к) пластин: а – узловых диаметров (УД) нет, окружностей (УО) – 4; б – УД – 1, УО – 4; в – УД – 2, УО – 4; г – УД – 3, УО – 0; д – УД – 5, УО – 0; е – УД – 0, УО – 5; ж – нет узловых линий по продольной декартовой координате x ($X = 0$), одна узловая линия по поперечной декартовой координате y ($Y = 1$); з – $X = 1$, $Y = 1$; и – $X = 3$, $Y = 5$

Исключая функцию $\Phi(\varphi)$ получаем итоговую систему уравнений:

$$\begin{cases} \left[\frac{\partial^2 \mathbb{R}(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbb{R}(r)}{\partial r} - \left(\frac{n^2}{r^2} + \omega/c \right) \mathbb{R}(r) \right] = 0, \\ \left[\frac{\partial^2 \mathbb{R}(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbb{R}(r)}{\partial r} - \left(\frac{n^2}{r^2} - \omega/c \right) \mathbb{R}(r) \right] = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Решением (5) служат обычные (J_n и Y_n) и модифицированные (I_n и K_n) функции Бесселя:

$$\mathbb{R}_n^+(r) = C_1 I_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r) + C_2 K_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r), \quad (6)$$

Поскольку $\left| \lim_{r \rightarrow 0} K_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r) \right| = \infty$, $C_2 = 0$.

Аналогично

$$\mathbb{R}_n^-(r) = C_2 J_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r) + C_3 Y_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r) \quad (7)$$

Поскольку $\left| \lim_{r \rightarrow 0} Y_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r) \right| = \infty$, $C_3 = 0$.

Общее решение для отдельной моды имеет вид:

$$RR_n(r) = C_{1n}I_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r) + C_{2n}J_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r), \quad (8)$$

а итоговая радиальная функция суть их сумма:

$$RR(r) = \sum_{n=0}^{\infty} C_{1n}I_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r) + C_{2n}J_n(1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r). \quad (9)$$

На границе тарелки должны выполняться дополнительные условия (для выделения допустимых решений краевой задачи).

Величину $1/c \cdot \sqrt{\omega} \cdot r|_{r=R}$ (радиус пилю) обозначим λ . Для функций $RR_n(r)$ допустимые λ обозначим λ_{nm} . Первый индекс отнесем к угловой функции $\Phi(\varphi) = \cos n\varphi$, второй – к радиальной.

Колебания свободной пластины описываются граничными условиями

$$\begin{cases} \left\{ \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] - (1 - \mu) \left[\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] \right\} \mathbb{R}(r) \Phi(\varphi) = 0 \\ \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] + (1 - \mu) \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \right] \right\} \mathbb{R}(r) \Phi(\varphi) = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

После подстановки (8) в (10) получаем уравнения для коэффициентов разложения C_{1n} и C_{2n} :

$$\begin{cases} \left[\left((1 - \mu) \frac{n^2}{\lambda} + 1 \right) I_n(\lambda) - \frac{1 - \mu}{2\lambda} (I_{n-1}(\lambda) - I_{n+1}(\lambda)) \right] C_{1n} + \\ + \left[\left((1 - \mu) \frac{n^2}{\lambda} - 1 \right) J_n(\lambda) - \frac{1 - \mu}{2\lambda} (J_{n-1}(\lambda) - J_{n+1}(\lambda)) \right] C_{2n} = 0 \\ \left[\left((1 - \mu) \frac{n^2}{\lambda^2} - 1 \right) (I_{n-1}(\lambda) - I_{n+1}(\lambda)) - 2(1 - \mu) \frac{n^2}{\lambda^3} I_n(\lambda) \right] C_{1n} + \\ + \left[\left((1 - \mu) \frac{n^2}{\lambda^2} + 1 \right) (J_{n-1}(\lambda) - J_{n+1}(\lambda)) - 2(1 - \mu) \frac{n^2}{\lambda^3} J_n(\lambda) \right] C_{2n} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Система (11) нетривиально разрешима (т.е. $C_{1n}, C_{2n} \neq 0$, если ее определитель нулевой). Для каждого n существует много мод или собственных значений λ_{nm} , при которых (11) вырождается. Точки вырождения системы λ_{nm} найдем, используя численные и графические возможности MathCAD.

Если края пластины жестко заделаны, ГУ имеет вид:

$$\begin{cases} \mathbb{R}(r) \Phi(\varphi)|_{r=R} = 0 \\ \left. \frac{\partial}{\partial r} (\mathbb{R}(r) \Phi(\varphi)) \right|_{r=R} = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

откуда следует

$$\begin{cases} I_n(\lambda) C_{1n} + J_n(\lambda) C_{2n} = 0 \\ (I_{n-1}(\lambda) + I_{n+1}(\lambda)) C_{1n} + (J_{n-1}(\lambda) - J_{n+1}(\lambda)) C_{2n} = 0 \end{cases}. \quad (13)$$

Условие вырожденности (13)

$$\left| \frac{I_n(\lambda)}{I_{n-1}(\lambda) + I_{n+1}(\lambda)} \right| \left| \frac{J_n}{J_{n-1}(\lambda) - J_{n+1}(\lambda)} \right| = 0. \quad (14)$$

Из условий (12) и (14) находим корни λ_{nm} и записываем в табл. 1

Таблица 1. Спектр собственных значений для круглой свободной тарелки λ_{nm}

$m \backslash n$	1	2	3	4	5
1 при $r = R$	0,558	2,347	3,549	4,69	5,801
2	4,585	5,977	7,309	8,598	9,855
3	7,773	9,215	10,604	11,954	13,273
4	10,936	12,355	13,829	15,217	16,576
5	14,09	15,577	17,024	18,438	19,825

В этой и последующей таблице: m – номер радиальной моды (число угловых окружностей), а n – номер секториальной моды (он же число угловых диаметров)

Воспользовавшись асимптотикой функции Бесселя при больших n , получаем приближенное значение λ_{nm} в следующем виде

$$\lambda_{nm} = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2}n + \frac{\pi}{2} + \pi m. \quad (15)$$

При выводе этой формулы использовались соотношения:

$$J_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos(x - \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}n), \quad I_n(x) \sim \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}, \quad K_n(x) \sim \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{e^{-x}}{\sqrt{x}}. \quad (16)$$

Решая аналогичную задачу для тарелки с жестко фиксированным краем, получаем качественно сходный результат, отображенный табл. 2.

Таблица 2. Спектр собственных значений для круглой заделанной по контуру тарелки

$m \backslash n$	1	2	3	4	5
1 при $r = R$	4,611	5,906	7,144	8,347	9,526
2	7,799	9,197	10,537	12,837	13,107
3	10,958	12,402	13,795	15,15	16,475
4	14,109	15,579	17,005	19,396	19758
5	17,256	18,744	20,192	21,608	22,998

Как свидетельствуют данные в табл. 2, спектр близок к спектру колебаний не закрепленной тарелки. Следовательно, можно получить аналогичный результат для собственных частот λ_{nm} .

Для квадратной мембраны размером $2R \times 2R$: $\begin{cases} -R \leq x \leq R \\ -R \leq y \leq R \end{cases}$ уравнение свободных колебаний имеет вид:

$$\frac{\partial^2 S(x,y,t)}{\partial t^2} + k \frac{\partial S(x,y,t)}{\partial t} + \frac{D}{\rho h} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right]^2 F(x,y,t) = 0. \quad (17)$$

Аналогично имеем:

$$S(x,y,t) = X(x) Y(y) T(t). \quad (18)$$

После подстановки (20) в (19) получаем:

$$\left\{ \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right]^2 - \frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2} \cdot \omega^2 \right\} X(x)Y(y) = 0. \quad (19)$$

После факторизации дифференциального оператора на два второго порядка получаем пару уравнений:

$$\begin{cases} \left\{ \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right]^2 - \frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2} \cdot \omega^2 \right\} X(x)Y(y) = 0 \\ \left\{ \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right]^2 + \frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2} \cdot \omega^2 \right\} X(x)Y(y) = 0 \end{cases}. \quad (20)$$

Решением первого из них служит:

$$\begin{aligned} X_n^-(x) &= C_{1n} \operatorname{ch}(nx) + C_{2n} X_n \operatorname{sh}(nx), \quad n = 0, 1, 2, \dots \\ Y_m^-(y) &= C_{3m} \operatorname{ch}(my) + C_{4m} \operatorname{sh}(my), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (21)$$

а второго

$$\begin{aligned} X_n^+(x) &= C_{5n} \cos(nx) + c_{6n} \sin(nx), \\ Y_m^+(x) &= C_{7m} \cos(my) + c_{8m} \sin(my). \end{aligned} \quad (22)$$

Если рассматривать краевые условия вида

$$S(x,y,t)|_{\{x,y\} \in \Gamma} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 S(x,y,t)}{\partial x^2} \Big|_{\{x,y\} \in \Gamma} = \frac{\partial^2 S(x,y,t)}{\partial y^2} \Big|_{\{x,y\} \in \Gamma} = 0, \quad (23)$$

получаем формулы для допустимых мод:

$$X_n(x) = C_1 \cos\left(\frac{(2n+1)\pi}{2R}x\right) + C_2 \sin\left(\frac{\pi n}{R}x\right),$$

$$Y_m(y) = C_3 \cos \frac{2m+1}{2R} \pi y + C_4 \sin \frac{\pi m}{R} y, n, m = 0, 1, 2 \dots, \quad (24)$$

$$\text{где } \omega_n = \frac{1}{4R^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} \cdot \pi^2 n^2, \omega_m = \frac{1}{4R^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} \cdot \pi^2 m^2.$$

В силу ортогональности мод

$$\lambda_{nm} = \sqrt{\lambda_n^2 + \lambda_m^2} = \frac{\pi}{2} \sqrt{n^2 + m^2} \Rightarrow \omega_{nm} = \frac{\pi^2}{4R^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} \sqrt{n^2 + m^2}. \quad (25)$$

Результаты вычислений по (25) для низших мод показаны в табл. 3. Из них следует, что качественно спектры схожи, что позволяет упрощенно оценивать спектр круглой тарелки как спектр квадратной пластины эквивалентного размера.

Таблица 3. Спектр λ_{nm} квадратной тарелки

$m \backslash n$	1	2	3	4	5
1 при $r = R$	2.221	3.512	4.967	6.477	8.01
2	3.512	4.443	5.664	7.025	8.459
3	4.967	5.664	6.664	7.854	9.159
4	6.477	7.025	7.854	8.866	10.058
5	8.01	8.459	9.159	10.058	11.107

Подытожить анализ спектров изгибных колебаний тарелок и пластин ксилофона позволяет табл. 4, в которой приведены формулы для расчета собственных частот ω_{nm} .

Таблица 4. Собственные частоты колебаний высоких мод пластин

Формула пластины, граничные условия	ω_{nm}
Круглая, свободный край	$\frac{1}{R^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} \cdot \left(\frac{3\pi}{4} + \frac{\pi}{2} n + \pi m \right)$
Круглая, жестко заделанный край	$\frac{1}{R^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} \cdot \left(\frac{-\pi}{4} + \frac{\pi}{2} n + \pi m \right)$
Квадратная, шарнирно закрепленный край	$\frac{1}{R^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \pi \sqrt{n^2 + m^2}$

В реальности колебательные моды реальных поверхностей сложнее, и для их определения требуется решать трехмерную задачу методом конечных элементов. Как пример, приведем здесь колебательные моды полусферы (рис. 2) и реального колокола (рис. 3).

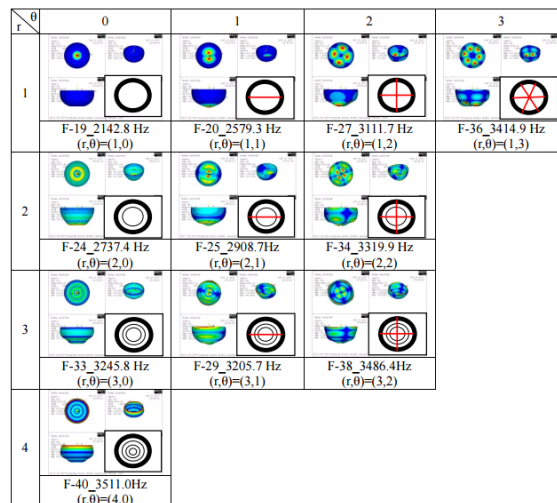


Рис. 2. Колебательные моды полусферы

Mode shapes			Frequency (Hz)	Ratio (f_n/f_1)	Frequency (Hz)	Ratio (f_n/f_1)	Damp (%)	vs FEM (%)
General xy view	zx view							
	1st family	2nd family						
			1487.6	0.5133	1487.6	0.5139	0.02	0
			1489.0 2895.2	0.5137 0.9989	1490.8 2891.8	0.5150 0.9989	0.02 0.03	0.12 0.12
			2901.6 3597.6	1.0011 1.2413	2898.1 3593.8	1.0011 1.2414	0.02 0.04	0.12 0.11
			3599.1 4831.1	1.2418 1.6668	3594.0 4854.4	1.2432 1.6688	0.04 0.02	0.14 0.48
			4841.4 6057.6	1.6704 2.0900	4855.9 6048.2	1.6774 2.0925	0.03 0.03	0.30 0.16
			6060.4	2.0909	6060.8	2.0934	0.03	0.01

Рис. 3. Колебательные моды колокола

1 Квадрат						2 Круг свободный					
Моды	1	2	3	4	5	Окр./Диа	1	2	3	4	5
1	2,22	3,51	4,97	6,48	8,01	1	0,558	2,347	3,549	4,69	5,801
2	3,51	4,44	5,66	7,03	8,46	2	4,585	5,977	7,309	8,598	9,855
3	4,97	5,66	6,66	7,54	9,16	3	7,773	9,215	10,604	11,954	13,273
4	6,48	7,03	7,85	8,87	10,06	4	10,936	12,355	13,829	15,217	16,576
5	8,01	8,46	9,16	10,06	11,11	5	14,09	15,577	17,024	18,438	19,825
3 Круг заделанный						4 Полусфера					
Окр./Диа	1	2	3	4	5	Окр./Диа	1	2	3	4	5
1	4,611	5,906	7,144	8,347	9,526	1	2579,00	3111,00	3414,00		
2	7,799	9,197	10,537	12,837	13,107	2	2908,00	3319,00			
3	10,958	12,402	13,795	15,15	16,475	3	3205,00	3486,00			
4	14,109	15,579	17,005	19,396	19,758	4					
5	17,256	18,744	20,192	21,608	22,998	5					
5 Колокол						Корреляция					
Окр./Диа	1	2	3	4	5	Форма	1	2	3	4	5
1	205,00	410,00	1089,00	1735,00		1	1	0,89926	0,90592	0,94137	0,95729
2	491,00	614,00	1076,00	1772,00		2	0,899262551	1	0,98369	0,85689	0,88082
3	821,00	1058,00	1371,00	1980,00		3	0,905923075	0,98369	1	0,84858	0,90002
4	1232,00	1582,00	1854,00	2376,00		4	0,941370282	0,85689	0,84858	1	0,87486
5	1706,00	2162,00	0,00	0,00		5	0,957290675	0,88082	0,90002	0,87486	1

Рис. 4. Схожесть спектров звучания пластин разной формы, упругих полусфер и колоколов

Заключение

Математически формализованы и аналитически решены уравнения изгибных колебаний упругих круглой и квадратной пластин, что позволило установить качественное и количественное подобие их спектров собственных значений и обосновать возможность экспресс-оценки частот диска через эквивалентную квадратную матрицу.

На основе метода конечных элементов построены трехмерные численные модели пространственных непланарных тел (полусферы и сложной геометрии колокола), учитывающие радиальную симметрию и различные сценарии фиксации опорного контура.

Выполнен корреляционный анализ полученных акустических спектров, результаты которого продемонстрировали преобладающее влияние макрогеометрии и кризисы колеблющегося тела на его спектральный профиль, показав инвариантность акустического тембра к характеру граничного закрепления.

Список литературы: 1. The Concise Oxford Dictionary. Allen, R.E., ed. 1992. Clarendon Press. Oxford: 781. 2. Порвенков В.Г. Акустика и настройка музыкальных инструментов. М.: Музыка, 1990. 3. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики [Текст] / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. — 6-е изд., испр. и доп. — М.: Изд-во МГУ ; Наука, 1999. — 798 с. 4. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки / Пер. с англ. под ред. Э. И. Григолюка. — М.: Наука, 1966. — 636 с. 5. Зенкевич, О. Метод конечных элементов : пер. с англ. / О. Зенкевич, Р. Тейлор. — М. : Физматлит, 2001. — Т. 1 : Основные процессы и основы теории. — 432 с. — ISBN 5-9221-0153-6.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И АЭРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЕЛИ

Бедоидзе М. В., Степаницын А. С., Сулименко Д. С., Сулименко А. С., Рахманов А.
(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

A comprehensive analysis of the relationship between the geometric dimensions and aeromechanical behavior of wood dust particles is carried out (using the example of spruce wood dust from various woodworking machines). A mathematical model linking the aerodynamic diameter to three linear dimensions is developed and verified. It is established that the morphological composition (cubic, sheet, strip, and needle fractions) is highly dependent on the cutting kinematics of the equipment, and the aerodynamic behavior of particles is determined not only by their size but also by their geometric shape.

Сегодня спрос на сыпучие материалы в научно-производственных сферах продолжает стремительно расти. Однако их сложное физико-механическое поведение по-прежнему ставит перед учеными серьезные задачи, стимулируя активный поиск новых решений в области оптимизации технологического оборудования. Учет геометрических параметров пылевых частиц является ключевым фактором контроля распределения древесных аэрозолей в пространстве цеха, а также разработки экологически безопасных режимов механической обработки ели.

Хорошо известно, что высокая концентрация мелкодисперсной древесной пыли в воздухе рабочей зоны представляет серьезную угрозу не только общей эффективности производственного процесса, но и здоровью персонала, существенно увеличивая риск развития профессиональных заболеваний [1, 2].

Отсутствие единой теории динамики подобных систем [3] оборачивается невозможностью точного прогнозирования зон скопления пыли, что существенно затрудняет разработку по-настоящему надежного и соответствующего санитарным нормам технологического оборудования.

Недавние статистические отчеты в области медицины труда демонстрируют, что пылевой фактор стабильно удерживает второе место в структуре формирования профессиональной заболеваемости, уступая лишь шумовому воздействию [2]. Так, например по оценкам профильных экспертных институтов, регулярному воздействию древесных аэрозолей в мире подвергаются более 12 млн. рабочих, при этом на долю производственной пыли приходится до 15-18% случаев онкологических заболеваний верхних дыхательных путей [4].

На сегодняшний день сформирован обширный комплекс методических подходов к определению дисперсного состава и аэродинамических характеристик пылевых сред. Наряду с классическим седиментационным анализом, в исследовательской практике активно задействуются методы лазерной гранулометрии, ситовой классификации и цифровой оптической микроскопии [5]. Выбор конкретного инструментария определяется балансом между требуемой детальностью описания морфологии частиц и оперативной скоростью получения экспериментальных данных.

Описанная выше научная проблема обусловила необходимость разработки комплексной методики, связывающей геометрические параметры древесных частиц с их аэромеханическим поведением. Типичным представителем таких аэродисперсных систем является пыль древесины ели; характерные особенности её фракций и составляют

предмет данного исследования.

Алгоритм проведенного исследования включал несколько последовательных этапов. На первом этапе осуществлялась фиксация времени свободного падения τ и ключевых упорядоченных линейных размеров $D \geq d \geq \delta$ образцов пыли (секундомером и микрометром соответственно), полученных на станках, принципиально отличающихся кинематикой резания и геометрией получаемой стружки, а именно: токарного, рейсмуса малого и большого, фуганка, маятниковой и фрезерной пил. На основе экспериментального времени падения вычислялась скорость витания частицы V_∞ и впоследствии с помощью широкодиапазонной математической модели для различных режимов обтекания [3, 6], определялся их аэродинамический диаметр $\phi_{\text{аэро}}$. На базе полученных массивов данных формировалась универсальная аналитическая зависимость, выражающая аэродинамический диаметр через три линейных размера. Структурно-функциональная схема комплекса показана на рис. 1.

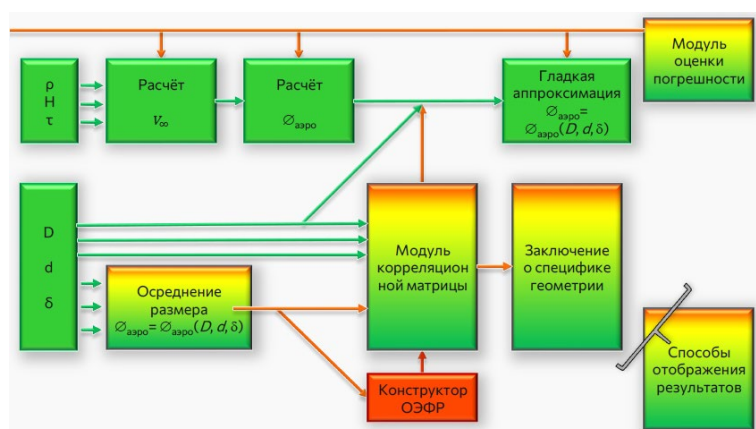


Рис. 1. Структурно-функциональная схема автоматизированной обработки данных седиментационного эксперимента

В качестве шаблона была выбрана модель

$$\phi_{\text{аэро}} = 10^\alpha \cdot D^\beta \cdot d^\gamma \cdot \delta^{1-\beta-\gamma}, \quad (1)$$

где α , β и γ – некоторые параметры. Структура модели в форме факторизованной зависимости выбрана по результатам парной корреляции $\phi_{\text{аэро}} - D$, $\phi_{\text{аэро}} - d$ и $\phi_{\text{аэро}} - \delta$.

Решение оптимизационной задачи

$$\Phi(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_i [\lg \phi_{\text{аэро}i} - (\alpha + \beta \cdot \lg D_i + \gamma \cdot \lg d_i + (1 - \beta - \gamma) \cdot \lg \delta_i)]^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $\Phi(\alpha, \beta, \gamma)$ – целевая функция, i – номер соответствующего набора экспериментальных значений, свелось к оригинальному результату:

$$\phi_{\text{аэро}} = \frac{1}{3} \cdot (D \cdot d^2 \cdot \delta^3)^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

Для верификации модели (3) на едином графическом поле было проведено совмещение экспериментально измеренных диаметров и теоретических значений, рассчитанных с учетом установленной формы частиц и типа исходного оборудования (см. рис. 2).

Также выполнялось разделение частиц по геометрической форме на основе системы двух неравенств: $D \geq d\sqrt{10}$ и $D \geq \delta\sqrt{10}$. По комбинации истинности этих условий (бинарный код) выборка дифференцировалась на кубические (11), игольчатые (10), листовые (01) и полосовые (00) фракции. На основе результатов классификации было получено распределение долей различных морфологических классов в зависимости от конкретного деревообрабатывающего станка (табл. 1).

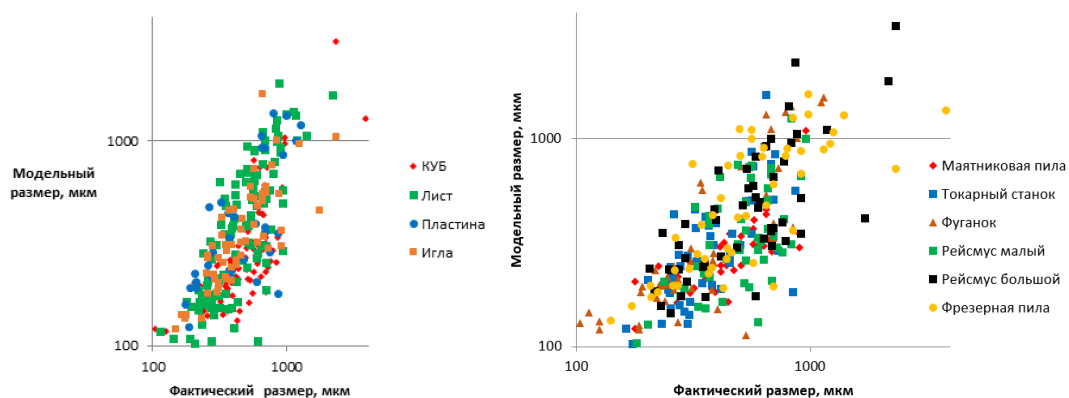


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных аэродинамических диаметров с рассчитанными в рамках модели (3)

Таблица 1. “Форменный” состав частиц в исследованных пробах древесной пыли

Показатель	Доля формы			
Станок	Объемные	Листовые	Полосовые	Игольчатые
Фрезерная пила	0,10	0,54	0,22	0,14
Рейсмус большой	0,18	0,59	0,08	0,14
Рейсмус малый	0,52	0,42	0,02	0,04
Фуганок	0,28	0,64	0,06	0,02
Токарный	0,12	0,04	0,24	0,60
Маятниковая пила	0,37	0,20	0,06	0,37

На финальном этапе формировались распределения абсолютной ошибки разработанной модели (3), указанные на рис. 3.

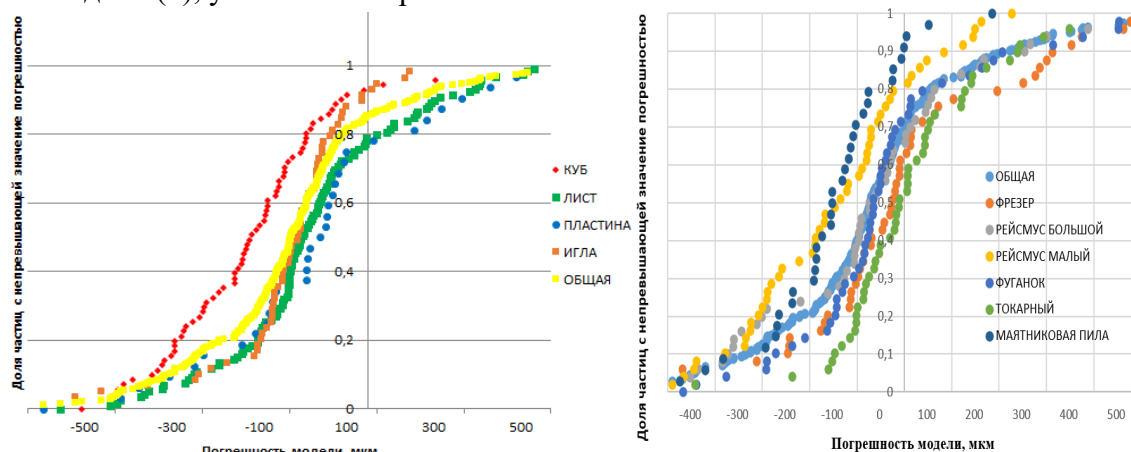


Рис. 3. Погрешность модели (3) в отношении частиц различной геометрии и обрабатываемых при различных видах обработки

Заключение

В результате исследования установлена связь между геометрическими и аэромеханическими характеристиками древесной пыли. Установлено, что поведение частиц в потоке может определяться не только размерными параметрами, но и некоторыми особенностями их взаимодействия со средой.

Список литературы: 1. Актуальные вопросы анализа риска при обеспечении санитарно-эпидемиологического благополучия населения и защиты прав потребителей : материалы VIII Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 16–18 мая 2018 г.) / под ред. А. Ю. Поповой, Н. В. Зайцевой. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – 607 с. URL: https://fcrisk.ru/sites/default/files/upload/nconference/1381/fcrisk_conf_16-18.05.2018_materials.pdf (дата обращения: 21.06.2026). 2. Профессиональная патология [Электронный ресурс] : национальное руководство / Под ред. И.Ф. Измерова. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2011. Режим доступа: <https://www.rosmedlib.ru/book/ISBN9785970419472.html> 3. Логачев, И. Н. Аэродинамические основы аспирации : монография / И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2005. – 659 с. – URL: <https://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/LogachevLogachev2005ru.pdf> (дата обращения: 21.06.2026). 4. Wood Dust // IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 62: Wood Dust and Formaldehyde. – Lyon : International Agency for Research on Cancer, 1995. – P. 35–215. – URL: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Evaluation-Of-Carcinogenic-Risks-To-Humans/Wood-Dust-And-Formaldehyde-1995> (дата обращения: 21.06.2026). 5. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – 3-е изд., перераб. – Ленинград : Химия, 1987. – 264 с. 6. Фукс, Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1955. – 352 с.

ПРИМЕРЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНИЙ ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ

Бохонский А. И., Майстришин М. М., Рыжков А. И. (ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Россия)
E-mail: bohon.alex@mail.ru

A comparison of the energy consumption of classically (variational) and reversibly constructed optimal controls for the translational motion of objects was conducted. Examples are shown for motion controls with a non-zero initial velocity or from rest to a specified velocity at the end of the motion, for which the energy expended on such motion was estimated, compared with classical control. The research showed that as the degree of the polynomial increases, the energy expended on controlling this motion also decreases.

Keywords: Motion control, energy saving, Lagrange problem, variational method, constructible control.

Методам оптимального управления системами посвящены классические работы [1 – 7]. Например, вариационным методом Ж.Л. Лагранжем решена задача оптимального управления движением объекта с предварительно задаваемым квадратичным критерием оптимальности.

Принцип наименьшего принуждения [8] сформулирован К.Ф. Гауссом в 1829 г. В работе [9] А.П. Маркеевым приведены варианты формулировок и примеры применения принципа наименьшего принуждения, утверждение о том, что в истинном движении принуждение минимально. На этом основании можно предположить, что в оптимальном движении с разгоном и торможением не исключается наименьшее энергетическое принуждение для достижения поставленной цели движения.

В [10 – 18] обращено внимание на использование алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления при конструировании оптимальных управлений типа «разгон-торможение» и показано, что при определенных условиях реализуется принцип наименьшего энергетического принуждения для достижения цели движения (из покоя в конечное состояние покоя с заданием расстояния и времени движения).

Цель исследования – сравнение вариантов реверсионно конструируемых оптимальных управлений типа «разгон-торможение» движением объекта с известным простым классическим управлением (задача Лагранжа), которое получено с использованием вариационного исчисления для решения прямой задачи – минимизации задаваемого критерия оптимальности.

Использование реверсионного метода конструирования управлений при перемещении из исходного в конечное состояние покоя, при заданном времени движения и расстоянии привело к появлению новых типов управлений, коьорым соответствуют восстановленные функционалы-критерии [11].

При решении полной обратной задачи вариационного исчисления (от функции - к функционалу) в случае управлений (переносных ускорений) в виде полиномов появились универсальные аналитические зависимости [12], в которых указаны нечетные степени полинома, причем в случае степени полинома ускорения $n=1$ из этих зависимостей следует задача Лагранжа вариационного исчисления.

Для произвольного значения степени конструируемого полинома следует [3]:

$$\begin{aligned}
 U(t) &= \frac{2(n+1)}{T^{n+2}}(T-2t)^n, \\
 V(t) &= \frac{L(n+2)}{T(n+1)} \cdot \frac{1-(T-2t)^{n+1}}{T^{n+1}}, \\
 S(t) &= \frac{1}{2T(n-1)} \cdot \left(\frac{(T-2t)^{n+2}}{T^{n+2}} + 2nt + 4t - T \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

В статье будут использованы полиномы со степенью $n=1$ (классический случай) и $n=3$ – новый тип управления.

Пример 1. Классическое управление типа разгон-торможение, задача Лагранжа, $n=1$.

Для

$$\frac{d^2 S(t)}{dt^2} = U(t), \tag{2}$$

с краевыми условиями:

$$S(0) = 0; \quad \dot{S}(0) = 0; \quad S(T) = L; \quad \dot{S}(T) = 0, \tag{3}$$

и критерием

$$J = \int \dot{U}^2 dt, \tag{4}$$

вариационный метод приводит к классическим зависимостям

$$U(t) = \frac{6L}{T^3}(T-2t), \quad V(t) = \frac{6Lt}{T^3} \cdot (T-t); \quad S(t) = \frac{Lt^2}{T^3} \cdot (3T-2t) \tag{5}$$

где L – перемещение, T – общее время движения.

Нельзя не отметить, что решение (5) может быть найдено при непосредственном удовлетворении краевым условиям (3), а также оно следует из (1) при $n=1$.

Дальше графики будут строиться при следующих исходных данных:

$S(T) = L = 1$ м, $T = 1$ с. Рисунок 1а.

Энергия, затраченная на реализацию движения $A_1 = 2 \int_0^{T/2} UV dt = 2,25$ Дж.

Если $n=3$, то при прежних условиях данная энергия $A = 1,5625$ Дж, т.е. она существенно уменьшается. Графики изображены на рисунке 1б.

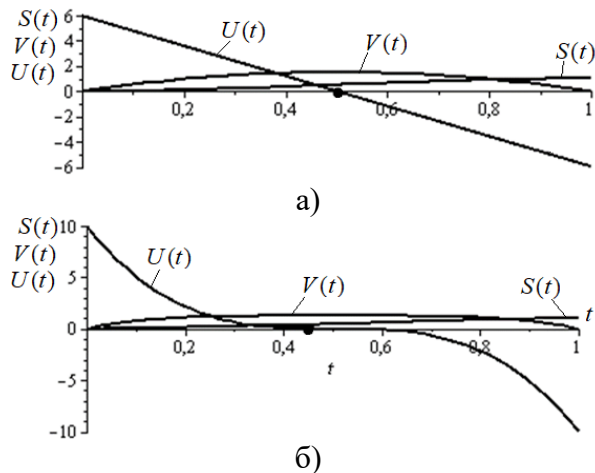


Рис. 1. Пример 1, при $V(0) = 0$ м/с:

а) классическое управление, $n=1$;

б) реверсионно котируемое, $n=3$.

Пример 2. Движение начинается при заданной начальной скорости $\dot{S}(0) = V(0) = 1$ м/с, $n=1$, управление - классический случай.

Графики изображены на рисунке 2а. Энергия для достижения цели движения

$$A_{21} = \int_0^{T_1} UVdt - \int_T^T UVdt = 1,2777, \quad (6)$$

где время $T = 0,333$ с. (fsolve(U,t);)

Для управления при $n=3$ и $S(T) = \sum_{i=1}^6 C_i t^{i-1}$ с учетом прежних условий при определении коэффициентов вариационным методом ($J = \int_0^T U^2 dt$, $\frac{\partial J}{\partial C_5} = 0$, $\frac{\partial J}{\partial C_6} = 0$) графики представлены на рисунке 2б

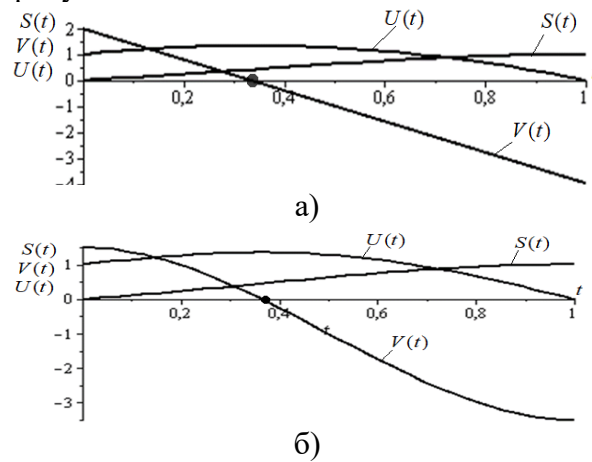


Рис. 2. Пример 2, при $V(0) = 1$ м/с:

а) классический случай, $n=1$;

б) вариационно найденное, $n=3$, $J = \int \dot{U}^2 dt$.

Энергия, затраченная на движение: $A_{2a} = \int_0^{T_1} UVdt - \int_T^T UVdt = 1,319$ Дж, где

$T_1 = 0,3632$ с.

Если же управление найдено реверсионно, т.е. используется условие отбора избыточной энергии $U(T/2) = 0$, $dU(T/2) = 0$, то в этом случае $T_1 = 0,2$ с и энергия $A = 0,827$ Дж. (рисунок 3).

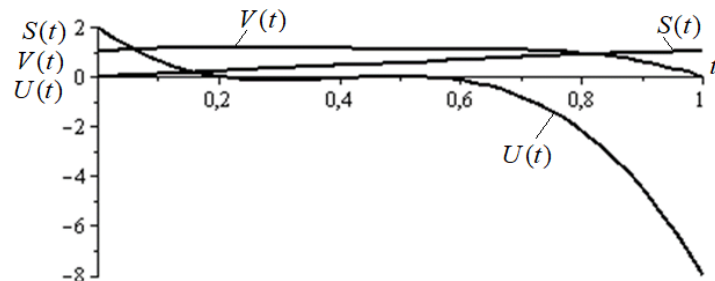


Рис. 3. Реверсионно конструируемое управление, $n=3$, $U(T/2) = 0$, $dU(T/2) = 0$

Пример 3. Движение начинается из состояния покоя, достигает за время $T = 1$ с расстояние $L = 1$ м и скорости $V = 1$ м/с.

В классическом случае $n=1$ графики функций $S(t)$, $V(t)$, $U(t)$ изображены на рисунке 4а. При этом $T_1 = 0,667$. Энергия $A_{2a} = \int_0^{T_1} UVdt - \int_T^T UVdt = 1,2777$ Дж.

Применяя реверсионный алгоритм конструирования с дополнительными условиями ($U(T/2) = 0$, $dU(T/2) = 0$), получим $T = 0,5$ с и энергию $A = 0,7656$ Дж.

Результаты решений задач сведены в таблицу 1.

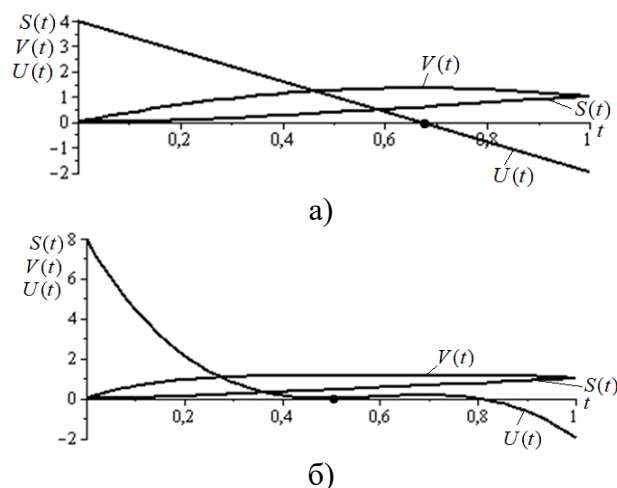


Рис. 4. Пример 3, при $V(T) = 1$ м/с:

а) классический случай, $n=1$;

б) реверсионно конструируемое, $n=3$.

Результаты решений частных задач сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Таблица вариантов расчета

NN рисунка	Тип управления, степень полинома	$V(0)$, м/с	$V(T)$, м/с	A, Дж
1а	1	0	0	2,25
1б	3	0	0	1,5625
2а	1	1	0	1,2777
2б	3	1	0	1,319
3	3	1	0	0,827
4а	1	0	1	1,2777
4б	3	0	1	0,7656

Заключение

1. В предыдущих исследованиях оптимальных переносных движений объектов установлено, что возможны такие управления (переносное ускорение), для которых при движении из исходного в конечное состояние покоя с заданным временем движения и расстоянии достигается существенная экономия энергии (по сравнению с решением задачи Лагранжа).

2. Теперь на простых примерах показано, что при движении с известной начальной скоростью либо из состояния покоя с достижением заданной скорости за

заданное время не исключает достижение цели движения с экономией энергии (в сравнении с классическим управлением).

3. Сконструированы переносные ускорения объектов (без предварительного задания критерия оптимальности), отличающиеся от классических. Оказывается, например, что если система с одной степенью свободы, то сосредоточение внимания при конструировании на левой части дифференциального уравнения приводит не только к достижению поставленной цели движения, но и к минимальному энергетическому принуждению.

Список литературы: 1. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, Б.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1969. – 384 с. 2. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с. 3. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с. 4. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк., 1982. – 116 с. 5. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем. – Л.: Машиностроение, 1976. – 236 с. 6. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с. 7. Теория автоматического регулирования. Ч. II. Теория нелинейных систем автоматического регулирования / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Госиздат, 1955. – 248 с. 8. Гаусс К. Об одном новом общем принципе механики / К. Гаусс // Вариационные принципы механики. – М.: Физматгиз, 1959. – С. 170 – 172. 9. Маркеев А.П. О принципе наименьшего принуждения / А.П. Маркеев // http://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/9801_113.pdf. 10. Бохонский А.И. Конструирование оптимального управления движением объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2016. – № 3 (317). – С. 70 – 76. 11. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с. 12. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов / А.И. Бохонский // Фундаментальные основы механики: матер. междунар. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 38 – 41. 13. Бохонский А.И. Конструирование управляемого движения объекта / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Механика, автоматика и робототехника: матер. междунар. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 64 – 69. 14. Бохонский А.И. Принцип и теоремы реверсионного исчисления / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 3 (347). – С. 12 – 20. 15. Бохонский А.И. Минимальное энергетическое принуждение для достижения цели управляемого движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Journal of Advanced Research in Technical Science. – С-Пб.: НИЦ МС, 2022. – № 28. – С. 30 – 36. 16. Бохонский А.И. Снижение энергетического принуждения при эквивалентном оптимальном управлении движением объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Журнал передовых исследований в области естествознания. – С-Пб.: НИЦ МС, 2022. – № 16. – С. 24 – 30. 17. Бохонский А.И. Экстремальное энергетическое принуждение в оптимальном перемещении упругого объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2023. – № 1 (76). – С. 13 – 18. 18. Бохонский А.И. Оценка энергоемкости минимального принуждения целенаправленного движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. – № 1 (351). – С. 15 – 20.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПРЕГНИРОВАНИЯ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ДЛЯ ЗАТОЧКИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Бутенко В. И., Кадач Р. Г. (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Тел.: +7 (961) 3115575; E-mail: rkad925@mail.ru

Приводятся результаты аналитических и экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров процесса импрегнирования абразивных кругов для заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущих сталей. Показано, что увеличение времени импрегнирования относительно расчётного значения приводит к увеличению эффективности заточки свёрл, а его оптимальное значение для водных растворов импрегнаторов равно 25 с.

Ключевые слова: абразивный круг, импрегнирование, время сушки, время выдержки, заточка, сверло, быстрорежущая сталь, стойкость

The results of analytical and experimental studies are presented to determine the optimal parameters for the impregnation process of abrasive wheels for sharpening high-speed steel cutting tools. It is shown that increasing the impregnation time relative to the calculated value leads to increased drill sharpening efficiency, and its optimal value for aqueous impregnating solutions is 25 s.

Keywords: abrasive wheel, impregnation, drying time, holding time, sharpening, drill, high-speed steel, durability

Введение. Существует ряд способов повышения эффективности заточной операции, одним из которых является импрегнирование абразивного инструмента, которое позволяет управлять физическими и химическими процессами в зоне обработки и добиваться повышения качества заточенной поверхности благодаря образованию в зоне обработки плёнок наноразмерной толщины, обладающих низким коэффициентом трения. Алгоритм создания данных плёнок при заточке с химически-активными веществами (ХАВ) включает в себя: 1- транспортировку ХАВ в поры круга в процессе пропитки; 2- сушку абразивного круга и кристаллизацию ХАВ в порах круга; 3- износ абразива при контакте с металлорежущим инструментом в процессе заточки; 4- выделение ХАВ из объёма пор изношенного абразива; 5- взаимодействие паров ХАВ с материалом поверхности инструмента и образование химического соединения; 6- удаление образованного слоя и последующее его формирование. Циклический процесс образования и удаления плёнки поддерживает низкий коэффициент трения в зоне заточки, снижает температуру резания, создаёт инструмент с большей сопротивляемостью к износу и сформирует нанослой, который будет снижать коэффициент трения при дальнейшей его работе. При этом эффективность транспортировки ХАВ в поры круга и его последующая сушка, при которой происходит кристаллизация ХАВ в объёме пор круга, определяются параметрами режимов самого процесса импрегнирования и сушки.

Целью данного исследования является аналитическое определение параметров импрегнирования абразивных заточных кругов и их последующей сушки.

Расчёт времени импрегнирования. Наиболее распространённым способом импрегнирования абразивного инструмента является метод свободного капиллярного поднятия, при котором абразивный круг погружают в раствор на глубину 0,8...0,9 его вы-

соты. Такой способ импрегнирования абразивных кругов не требует специального дорогостоящего оборудования и прост в реализации. В исследованиях применялся абразивный круг пористостью №8 по ГОСТ Р 52781-2007 типа 11 диаметром 175 мм, высотой 18 мм.

Используя формулу нахождения объёма цилиндра и с учётом номера пористости круга, был вычислен общий объём пор круга, который составил примерно 0,23 л. Тогда согласно данным, приведённым в работе [1], время заполнения жидкостью t некоторого цилиндра объёмом V можно определить по объёмному расходу жидкости Q , вычисляемому согласно закону Пуазейля по формуле:

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot L}, \quad (1)$$

где r – радиус цилиндрического капилляра, рассматриваемого в виде некоторого канала, м; для пор абразивного круга $r = 0,0001$ м [2];

ΔP – разница давлений на входе и выходе канала, Па;

η – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с; константа для воды: 0.000547 Па·с [3];

L – длина канала, м; для абразивного круга толщиной $L = 0,018$ м.

$$t = \frac{V}{Q}. \quad (2)$$

Если принять допущение о том, что поры абразивного круга – это цилиндрические трубки, то объём поры $V_{\text{поры}}$, можно найти как:

$$V_{\text{поры}} = \pi \cdot r^2 \cdot L. \quad (3)$$

Разницу давлений на входе и выходе из капилляра можно определить по капиллярному давлению Лапласа [1]:

$$P_{\text{кап}} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r}, \quad (4)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; для воды $\sigma = 67,91$ мН/м = 0,0679 Н/м [3];

θ – угол смачивания; для воды на многих материалах $\sigma \approx 0$, то $\cos \theta = 1$.

Если подставить зависимости (1), (3) и (4) в формулу (2), то после соответствующих преобразований получится:

$$t = \frac{4 \cdot \eta \cdot L^2}{r \cdot \sigma}. \quad (5)$$

Подставив в формулу (5) выше приведённые значения η , L , r и σ , расчётное время заполнения абразивного круга жидкостью составит $t = 0,15$ с.

Таким образом, время заполнения пор круга при импрегнировании в водном растворе, с учётом допущения о том, что они представляют прямые цилиндрические капилляры, осуществляется менее чем за одну секунду. Однако поры реального абразивного круга – не прямые цилиндрические капилляры и время, полученное в ходе расчёта, не ощутимо для ручного окунающего круга в водный раствор; в связи с этим минимальным временем импрегнирования абразивных кругов было принято 5 с.

Расчёт времени сушки импрегнированных кругов. Согласно простейшей модели испарения жидкости, созданной Далтоном, массовый поток испарения w (или количество испаряемого вещества из единичной площади за единицу времени) определяется из уравнения [4]

$$w = \beta_c (C_s - C_0) = \beta_p (P_s - P_0), \quad (6)$$

где β_c , β_p – коэффициенты пропорциональности;

C_s – концентрация пара на поверхности вещества, кг/м³;

C_0 – концентрация пара в окружающем пространстве, кг/м³;

P_s – давление насыщенного пара в зависимости от температуры; при температуре пара 50°C $P_s \approx 12,33$ кПа, при 25°C $P_s \approx 3,1690$ кПа [5];

P_0 – парциальное давление пара в воздухе, зависящее от влажности, Па [5];

ϕ – относительная влажность воздуха, %.

Тогда время сушки импрегнированного в водном растворе импрегнатора t_c может быть определено по следующей формуле:

$$t_c = \frac{V}{w}. \quad (7)$$

Если принять относительную влажность воздуха равной 50%, то при расчётных значениях $C_s = 0,08268$ кг/м³ и $C_o = 0,01150$ кг/м³, полученных из уравнения Менделеева-Клайперона [6], то расчётное время t_c , необходимое для сушки импрегнированного в водном растворе импрегнатора абразивного круга, составит $t_c = 2,42$ ч.

Проведены экспериментальные исследования влияния времени импрегнирования t и времени сушки t_c абразивных заточных кругов на стойкость свёрл при обработке заготовок из стали 10. Сверление отверстий диаметром 16 мм производилось на вертикально-сверлильном станке мод. 2А135 свёрлами из быстрорежущей стали Р18Ф2К8М, имеющими следующую геометрию заточки: угол конуса $2\phi = 118 \pm 2^\circ$, угол наклона поперечного лезвия $\psi = 55 \pm 1^\circ$, длина поперечного лезвия $B = 2,6$ мм. Заточка свёрл осуществлялась на универсальном заточном станке мод. 3А64М с установкой их в специальное поворотное устройство [7]. В исследованиях использовались абразивные чашечные круги типа 11 с характеристикой $175 \times 20 \times 32 \times 3$ 25А F100 L18 V 35 м/с ГОСТ Р 52781-2007 при следующих режимах заточки: $V_{кр} = 13,2$ м/с; $S_{np} = 0,06$ м/с; $S_{non} = 0,02$ мм/дв.ход.

Импрегнирование абразивных заточных кругов включало пропитку последнего водным раствором, содержащим 22,5 г диоксида хрома на литр воды, и последующую конвективную сушку импрегнированного инструмента при его вращении со скоростью $0,5 \text{ с}^{-1}$ при температуре 50°C .

Сверление отверстий в сплошном материале производилось со скоростью резания $0,335$ м/с ($n = 400$ об/мин) и подачи $0,2$ мм/об без охлаждения. Определялась стойкость свёрл в зависимости от времени их импрегнирования и сушки. За критерий износа был принят износ режущего лезвия сверла по задней поверхности на периферийном участке, равный $1,2$ мм. Износ сверла измерялся на микроскопе БМИ-1М с использованием специальной подставки [7].

На рис. 1 приведена зависимость стойкости сверла T от времени импрегнирования заточного круга t , из анализа которой следует, что с увеличением времени выдержки абразивного круга в водном растворе импрегнатора стойкость инструмента возрастает.

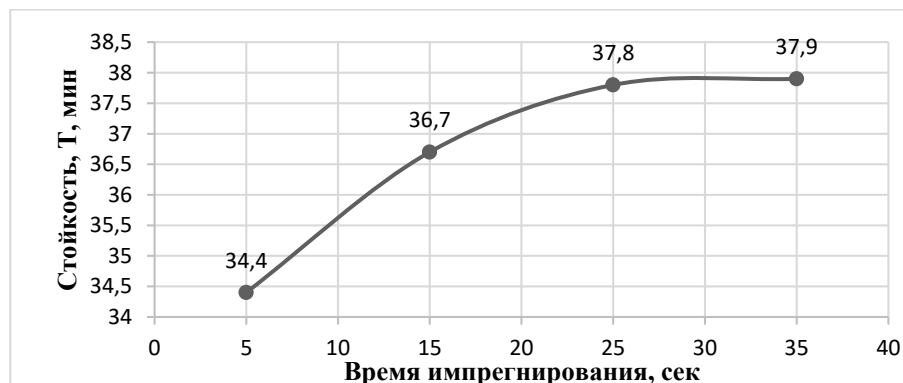


Рис. 1. Зависимость стойкости сверла T от времени импрегнирования абразивного заточного круга t

Однако при $t = 25$ с это возрастание стойкости сверла прекращается, что объясняется, по-видимому, достигнутым уровнем насыщения пор круга импрегнатором.

На рис. 2 приведены результаты экспериментального исследования зависимости стойкости свёрла T от времени сушки t_c импрегнированного диодидом хрома заточного абразивного круга, свидетельствующие о том, что длительная сушка импрегнированного круга приводит к снижению стойкости инструмента. Вероятно, это связано с тем, что при длительной сушке импрегнированного круга снижаются адгезионные свойства импрегнатора в порах между абразивными зёрнами круга.

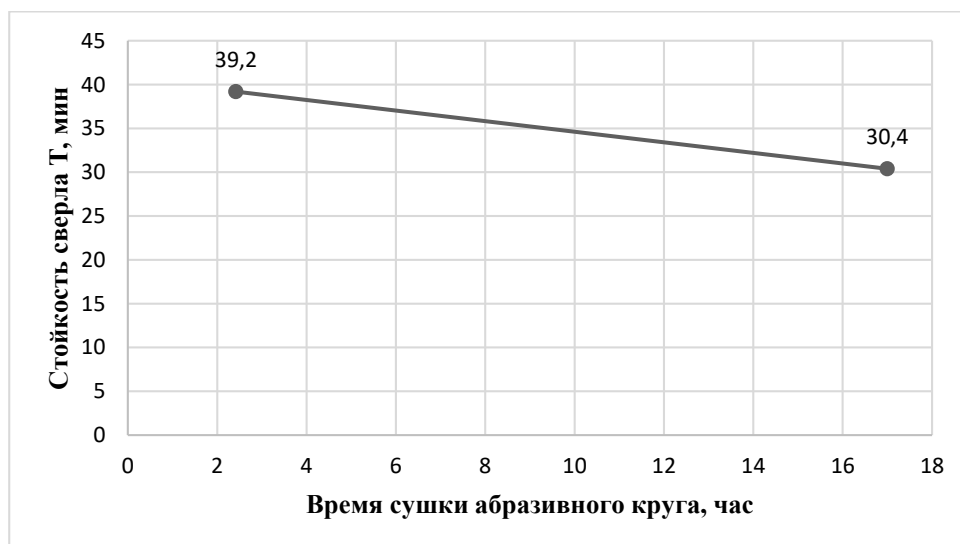


Рис. 2. Зависимость стойкости сверла T от времени сушки t_c импрегнированного абразивного круга

Заключение. Таким образом, выполненный аналитический расчёт и результаты экспериментального исследования показали важность учёта времени импрегнирования и времени последующей сушки абразивных заточных кругов, применение которых в металлообработке позволяет существенно повысить стойкость свёрл из быстрорежущей стали. Однако требуется проведение дополнительных исследований по определению времени импрегнирования круга и его сушки в зависимости от вида применяемого импрегнатора и характеристики абразивного круга.

Список литературы: 1. Сотников Г.В. Исследование капиллярной пропитки для моделирования реальных процессов в торфяных системах / Г.В. Сотников // Записки горного института. Т.155. Часть 2 / Тверской государственный технический университет, 2003, С. 85-87. 2. Крюков С.А. Определение объёмно-размерных параметров пористости шлифовальных кругов / С.А. Крюков, Н.В. Байдакова, В.М. Шумячер // Машиностроение и компьютерные технологии. 2018. №5. С. 1-8. 3. Бобылёв В.Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ: Справочное пособие / РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М., 2003. – 24 с. 4. Большаков Г.Ф., Е.И. Гулин, Н.Н., Торичнев. Физико-химические основы применения моторных, реактивных и ракетных топлив – Ленинград: «Химия», 1965. – 260 с. 5. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник – Мн.: Современная школа, 2005. – 608 с. 6. Стромберг А.Г. Физическая химия: учеб. пособие для вузов / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко // Под ред. А.Г. Стромберга. – М.: Высшая школа, 1973. – 480 с. 7. Бутенко В.И. Применение йода и его соединений в процессах обработки и эксплуатации деталей машин / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2023. – 242 с.

СВОЙСТВА УПРОЧНЁННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЙОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СМАЗКИ

Бутенко В. И. (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)
Тел/Факс: +7-(863)-2-738-385; E-mail: spu-55.4@donstu.ru

В представленной статье выполнены исследования триботехнических свойств упрочнённых поверхностных слоёв деталей при использовании йодосодержащей смазки, подаваемой в зону контакта упрочняющего инструмента с обрабатываемой поверхностью детали. Показано, что эффективность создаваемого на поверхности детали нанослоя йодидов железа зависит способа предварительной обработки детали, толщины сформировавшегося нанослоя, процентного содержания в нём йода, режимов и условий эксплуатации детали в трибосистеме.

Ключевые слова: деталь, поверхностный слой, упрочняющая обработка, нанослой, йодиды железа.

In the presented article, studies of the tribotechnical properties of hardened surface layers of parts have been performed using an iodine-containing lubricant supplied to the contact zone of the hardening tool with the machined surface of the part. It is shown that the effectiveness of the iron iodide nanolayer created on the surface of the part depends on the method of pretreatment of the part, the thickness of the formed nanolayer, the percentage of iodine in it, the modes and operating conditions of the part in the tribosystem.

Key words: part, surface layer, hardening treatment, nanolayer, iron iodides.

Введение. В работах [1 – 3] показана возможность создания в процессах упрочняющей обработки деталей машин (ДМ) на их поверхностях нанослоя йодидов железа за счёт внесения в используемую смазочную композицию или смазочно-охлаждающие технологические средства микродоз йода. Образующиеся в зоне контакта упрочняющего инструмента с обрабатываемой поверхностью детали нанослои йодидов железа обладают низким коэффициентом трения, а деформируемый в зоне обработки тонкий слой металла приобретает повышенную пластичность и другие свойства в результате адсорбционно-пластифицирующего действия инструмента и среды. В результате существенно повышается износостойкость материала поверхностного слоя (ПС) детали, его несущая способность и другие эксплуатационные показатели.

Очевидно, что от удельного веса элементов, входящих в сформировавшийся в процессе упрочняющей обработки детали ПС, зависят эксплуатационные свойства материала ПС и период сохраняемости нанослоя йодидов железа, влияющий на такие триботехнические показатели детали, как сила и коэффициент трения. В связи с этим актуальным является определение элементного состава материала упрочнённого ПС детали, подвергнутой, например, обкатке с использованием йодосодержащей смазочной композиции (ИСК), подаваемой в зону контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью детали.

Цель исследования: определение элементного состава и свойств материала упрочнённых ПС ДМ при использовании в процессе их обработки ИСК и влияние состояния нанослоя йодидов железа на трибологические характеристики упрочнённых поверхностей деталей.

Методика исследований. Экспериментальные исследования проводились на плоских образцах из стали 12ХН3А путём обкатки их на вертикально-фрезерном станке мод. 6Н12ПБ с использованием специального устройства закрепляемого в шпинделе станка [1, 3]. Упрочняющий ролик в устройстве изготавливался из быстрорежущей стали Р6М5 и подвергался закалке до твёрдости $HRC\ 62...65$ и имел следующую характеристику: диаметр наружной поверхности – 48 мм, высота – 16 мм, радиус рабочего профиля – 20 мм, фаска профиля – 2 мм, шероховатость по наружной поверхности ролика – $Ra = (0,16 - 0,20)$ мкм.

Для определения силы $F_{тр}$ и коэффициента $f_{тр}$ трения, возникающих в трибоконтакте при проведении исследований упрочнённых поверхностей образцов использовалась установка, описанная в работе [1]. В качестве контртела использовались специально подготовленные бруски из быстрорежущей стали Р6М5, подвергнутые термообработке и имеющие шероховатость контактной поверхности $Ra = 0,4 - 0,6$ мкм. Для фиксации колебаний силы трения в трибоконтакте на подвижном тросе установки дополнительно помещалось специальное устройство с записывающим устройством – потенциометром КСУ-1.

Смазочная композиция, подаваемая капельным путём в зону контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью исследуемого образца, имела следующий состав: масло «Индустриальное И-20А» - 1000 мл; спирт этиловый – 20 мл; кристаллический йод – 3 – 5 г.

Показателями состояния ПС исследуемых образцов после их предварительной обработки были приняты:

- параметр шероховатости Ra , который фиксировался портативным профилометром мод. Surftest SJ-210;
- технологические остаточные напряжения в материале ПС $\sigma_{ост}$, определяемые на автоматизированной системе АСКОН-3-КАИ;
- толщина ПС с изменёнными физико-механическими свойствами ΔH , определяемая при помощи специального четырёх зондового устройства [3, 4].
- толщина создаваемого на поверхности детали йодосодержащего слоя h_c , определяемая при помощи толщиномера «Константа К-5».

Исследования состояния поверхности образцов после упрочняющей обработки с использованием ИСК выполнялись на сканирующем электронном микроскопе Quanta-200 (FEI Company), а для определения элементного состава спектра анализа состояния поверхностного слоя образца после обкатки его упрочняющим роликом с использованием ИСК использовался сканирующий (растровый) электронный микроскоп (SEM) Zeiss EVO MA18 с приставкой энергодисперсионного анализатора X-Max 50N и программным обеспечением Aztec [5].

Результаты исследования и их обсуждение. Проведены исследования влияния способов и режимов предварительной обработки плоских поверхностей ДМ на толщину получаемого в процессе последующей упрочняющей обработки йодосодержащего слоя h_c и коэффициент трения $f_{тр}$. В качестве способов предварительной обработки плоских поверхностей деталей рассматривались следующие: плоское шлифование, чистовое фрезерование цилиндрической фрезой, чистовое строгание, наружное протягивание, абразивная доводка текстолитовым притиром [1], обкатка поверхности роликом.

В табл. 1 приведены средние значения величин Ra , $\sigma_{ост}$, ΔH , h_c и $f_{тр}$ в зависимости от способов предварительной обработки плоских поверхностей деталей, анализ которых указывает на то, что эксплуатационные свойства созданного в процессе

Таблица 1. Зависимость коэффициента трения от способов и режимов предварительной обработки плоской поверхности детали

Способ предварительной обработки	Режимы предварительной обработки	Начальное состояние поверхности			Толщина йодосодержащего слоя h_c , нм	Коэффициент трения $f_{тр}$
		Ra , мкм	$\sigma_{ост}$, МПа	ΔH , мм		
Шлифование	$V_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 0,02$ м/с; $S_{вр} = 0,01$ мм/дв.х.; $m = 3$	1,6	+310	0,32	30	0,20
Чистовое фрезерование	$V = 2,5$ м/с; $S_{мин} = 120$ мм/мин; $t = 0,5$ мм	2,4	+280	0,28	25	0,22
Чистовое строгание	$V = 0,03$ м/с; $t = 0,5$ мм	2,2	+270	0,25	25	0,22
Протягивание	$V = 0,02$ м/с; $a_z = 0,05$ мм/зуб	2,8	+270	0,23	20	0,21
Доводка текстолитовым притиром	$V = 0,05$ мм/с; $p = 0,01$ МПа; $m = 3$	1,0	>+50	0,05	40	0,17
Обкатка	$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,02$ мм/с; $m = 2$	1,6	-330	0,51	40	0,16

упрочняющей обработки йодосодержащего слоя, выраженные через коэффициент трения $f_{тр}$, и его толщина h_c во многом зависят от принятого способа предварительной обработки поверхности. Установлено, что на эксплуатационные свойства упрочнённых йодосодержащих ПС деталей существенное влияние оказывают начальные значения параметра шероховатости Ra , а также величина и знак предварительно созданных в материале ПС технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$. Наилучшие показатели по параметрам h_c и $f_{тр}$ получены при назначении в качестве предварительной обработки поверхности детали обкатки или абразивной доводки текстолитовым притиром.

Исследования состава и свойств материала упрочнённых поверхностей деталей, сформировавшихся при обкатке их с использованием ИСК, проводились на плоских образцах из стали 12ХН3А, которые подвергались обкатке роликом на следующих режимах: нагружающее усилие ролика $P = (490 - 980)$ Н, продольная подача стола станка с закреплённым на нём исследуемым образцом $S_{пр} = (0,01 - 0,03)$ м/с, поперечная подача стола станка $S_{поп} = 0,5$ мм/дв. ход, число проходов ролика $m = 1 - 3$. Исследования эксплуатационных показателей $F_{тр}$ и $f_{тр}$ упрочнённых поверхностей образцов осуществлялось при скорости скольжения контртела $V_{ск} = 0,05$ м/с и давлении $q = 0,3$ МПа. Одновременно проводились исследования элементного состава спектра состояния ПС образцов, сформированного в результате упрочняющей обработки его роликом с использованием ИСК. Установлено, что с увеличением нагружающего усилия P на поверхность исследуемого образца при одних и тех же значениях режимных показателей $S_{пр}$, $S_{поп}$ и m содержание йода в материале ПС увеличивается до некоторого критического значения силы P , обусловленной состоянием и прочностными свойствами обрабатываемой стали, содержанием йода в смазочной композиции, а также формой и размерами рабочего профиля упрочняющего ролика. Увеличение продольной подачи стола станка $S_{пр}$ приводит к незначительному уменьшению содержания йода в материале упрочнённого ПС образца, а число проходов ролика m влияет на содержание йода в ПС в зависимости от усилия P . Исследования показали, что структура и состояние упрочнённых йодосодержащих ПС деталей, влияющих на силу трения $F_{тр}$ и

коэффициент трения $f_{тр}$ зависят как от способа предварительной обработки поверхности, так и от режимов окончательной упрочняющей обработки. В связи с этим были проведены исследования колебания силы трения $\Delta F_{тр}$ от режимов упрочняющей обработки с использованием ИСК при постоянном давлении контртела $q = 0,3$ МПа и скорости скольжения контактируемых поверхностей трибосистемы $V_{ск} = 0,05$ м/с. Исследования показали, что наилучшие результаты по эффективности применения упрочнённых йодосодержащих слоёв достигаются при нагрузочном усилии упрочняющего ролика $P = 735$ Н, продольной подаче стола с закреплённым образцом $S_{пр} = 0,01$ мм/с и числе его проходов $m = 2$ (табл. 2). При этом было установлено, что на распределение йодидов железа по упрочнённой поверхности образцов нагружающее усилие ролика P влияет в большей мере, чем подача $S_{пр}$. При значениях нагружающего усилия $P > 1500$ Н (давление ролика на поверхность детали $p > 2,5$ МПа) равномерность распределения йодидов железа по обработанной поверх-

Таблица 2. Влияние режимов обработки на состояние упрочнённого йодосодержащего ПС и показатели трения в зоне контакта «образец – контртело»

Режимы упрочняющей обработки	Состояние поверхностного слоя		Показатели трения в зоне контакта		
	Ra , мкм	h_c , нм	$(F_{тр})_{ср}$, Н	$\Delta F_{тр}$, Н	$f_{тр}$
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,01$ м/с; $m = 1$	0,21	25	20,4	3,0	0,21
$P = 986$ Н; $S_{пр} = 0,01$ м/с; $m = 1$	0,23	35	21,5	3,5	0,20
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,02$ м/с; $m = 1$	0,20	30	20,6	2,8	0,21
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,03$ м/с; $m = 1$	0,22	35	21,8	3,2	0,20
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,01$ м/с; $m = 2$	0,17	40	20,1	1,3	0,18
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,01$ м/с; $m = 3$	0,17	40	21,3	2,6	0,20

ности нарушается, что приводит к увеличению коэффициента трения в контактной зоне сопряжённых деталей при их эксплуатации. Изменение подачи $S_{пр}$ в диапазоне (0,01 – 0,03) м/с и числе проходов упрочняющего ролика $m = 1$ существенно не влияют на равномерность распределения йодидов железа по упрочнённой поверхности детали. Увеличение числа проходов упрочняющего ролика $m > 2$ и давления его на обрабатываемую поверхность детали $p > 2,5$ МПа приводит к перенаклёпу материала ПС при любых значениях подачи $S_{пр}$.

Оценочным показателем целесообразности использования ИСК для создания на упрочняемых поверхностях ДМ нанослоёв йодидов железа является период их сохраняемости $T_{сх}$, который зависит как от состава, структуры и толщины сформированного нанослоя h_c , так и условий эксплуатации деталей в узлах трения машин и механизмов. Проведены исследования зависимости периода сохраняемости нанослоёв йодидов железа $T_{сх}$ на плоских поверхностях образцов из стали 12ХН3А, подвергнутых предварительной упрочняющей обработке обкаткой и последующему упрочнению роликом с нагружающим усилием $P = (735 - 980)$ Н, подачей $S_{пр} = (0,01 - 0,02)$ м/с, числом проходов упрочняющего ролика $m = 2$ и различным составом ИСК, от толщины нанослоя h_c , процентного содержания в нём йода, давления контртела q и скорости скольжения контактируемых поверхностей $V_{ск}$ при температуре в зоне контакта $\Theta = 25 \pm 5^\circ\text{C}$ (табл. 3). Достижение периода сохраняемости нанослоя йодидов железа $T_{сх}$ фиксировалось резким возрастанием средней величины силы трения и её ко-

Таблица 3. Влияние состояния нанослой йодидов железа и режимов трения на период сохраняемости нанослой $T_{сх}$

№ эксп.	Состояние нанослой йодидов железа		Режимы трения		Период сохраняемости нанослой $T_{сх}$, мин
	h_c , нм	Содержание йода, %	q , МПа	$V_{ск}$, м/с	
1	30	3,52	0,1	0,05	25
2	40	4,03	0,2	0,05	32
3	40	4,01	0,2	0,08	34
4	30	3,37	0,2	0,05	20
5	50	4,26	0,1	0,05	30
6	40	4,05	0,3	0,08	28
7	25	2,95	0,2	0,05	16
8	40	4,08	0,3	0,10	27

лебаний. Установлено, что наибольшее влияние на период сохраняемости нанослоёв йодидов железа $T_{сх}$ оказывает толщина нанослой h_c , процентное содержание в нём йода и давление контртела q , которые непосредственно воздействуют на адгезионно-когезионные связи в контактной зоне трибосистемы «образец – контртело».

Заключение. Таким образом, выполненные исследования позволили установить следующее:

1. Экспериментально доказано, что создание на поверхности детали нанослой йодидов железа в процессе её упрочняющей обработки позволяет уменьшить силу и коэффициент трения в зоне сопряжённых деталей трибосистемы.

2. Эффективность создаваемого на поверхности детали в процессе её упрочняющей обработки с использованием ИСК нанослой йодидов железа зависит от многих факторов, основными из которых являются: способ предварительной обработки поверхности детали; толщина сформировавшегося нанослой; процентное содержание в нём йода, а также режимы и условия эксплуатации детали в узле трения машины.

3. Теоретическую и практическую значимость имеют дальнейшие исследования, направленные на восстановление нанослоёв йодидов железа в процессе эксплуатации деталей, а также поведение их в агрессивных средах. Исследования адгезионных, структурных свойств нанослоёв йодидов железа и их сдвиговой неустойчивости методами атомно-силовой микроскопии позволят глубже понять триботехнические характеристики упрочнённых ПС деталей при использовании ИСК.

Список литературы: 1. Бутенко В.И. Эффективные технологии и процессы обработки деталей машин – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2025. – 320 с. 2. Бутенко В.И. Применение йода и его соединений в процессах обработки и эксплуатации деталей машин – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2023. – 242 с. 3. Бутенко В.И. Отделочно-упрочняющая обработка деталей: технологии и их эффективность – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2022. – 220 с. 4. Патент РФ №76708 МПК G01B 7/06, C01R 27/16. Устройство для измерения толщины поверхностного токопроводящего слоя изделия / В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, Л.В. Гусакова. – 2008. – Бюлл. № 27. 5. Колесников В.И. Квантово-химический анализ межатомных взаимодействий на зернограницных поверхностях в стали / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, В.Н. Доронькин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – №12. – С. 8-13.

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОРМОЗНЫХ БАРАБАНОВ АВТОМОБИЛЕЙ В ПЕРИОД ИХ «ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА»

Быков В. В., Мельникова Е. П., Абрамов А. Г. (Автомобильно-дорожный институт
(филиал) ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка,
Россия, ДНР)

Тел./Факс: +7 (949) 40-88-909; E-mail: melnikova_adi@mail.ru

Статья посвящена повышению долговечности тормозных барабанов автомобилей путем обеспечения геометрической точности и заданной шероховатости их рабочих поверхностей при обработке на мобильном токарном оборудовании в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: автомобиль, тормозной барабан, токарное оборудование

The article is sacred to the increase of longevity of brake drums of cars by providing of geometrical exactness and set roughness of their working surfaces at treatment on a mobile lathe equipment in the process of exploitation.

Keywords: car, brake drum, turning equipment

Введение. В процессе эксплуатации большинство деталей и узлов автомобиля подвергаются значительным динамическим, тепловым, статическим, вибрационным нагрузкам и влиянию агрессивной окружающей среды. Наиболее ответственными и наименее долговечными деталями автомобиля являются элементы тормозной системы – пара трения «тормозной барабан – тормозная колодка», которые непосредственно влияют на эффективность и стойкость автомобиля в процессе торможения, что оказывает существенное влияние на безопасность дорожного движения. Ежегодно на дорогах происходит тысячи дорожно-транспортных происшествий, при которых погибают люди – однако по объективным данным число жертв можно значительно снизить, если внедрить эффективную систему контроля технического состояния автомобилей и использовать современные технологии при обслуживании и замене деталей тормозной системы на всех этапах их жизненного цикла.

В связи с этим совершенствование способов поддержания тормозной системы автомобилей в технически исправном состоянии, путем обработки тормозных барабанов в процессе эксплуатации, для обеспечения требований производителей является важной и актуальной задачей. Данная задача может быть решена за счет бездемонтажной механической обработки тормозных барабанов непосредственно на автомобиле, что позволит повысить их долговечность, безопасность и за счет этого снизить аварийность и себестоимость эксплуатационных затрат.

Целью работы является повышение долговечности тормозных барабанов автомобилей за счет совершенствования технологии механической обработки в период их «жизненного цикла».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать дефекты, возникающие в процессе эксплуатации и оказывающие влияние на долговечность тормозных барабанов автомобилей.
2. Провести анализ технологических возможностей токарной обработки, как метода обеспечения необходимых параметров точности и шероховатости тормозных барабанов автомобилей.

Анализ статистических данных, полученных в лаборатории диагностики кафедры Автомобильного транспорта АДИ ДонНТУ показал, что 88% от общего количества проверенных автомобилей не соответствуют требованиям ДСТУ-3649-97. Овальность

рабочих поверхностей тормозных барабанов наблюдалась у 38% от общего количества автомобилей. Из-за овальности тормозных барабанов увеличивается тормозной путь, появляется вибрация на педали тормоза при торможении.

Особенности конструкции тормозного барабана вызывают его неравномерный разогрев от центра к периферии. Температурные деформации искажают форму тормозного барабана, что приводит к неравномерному износу рабочей поверхности. При работе тормозного барабана в режиме термоциклирования, когда происходит чередование состояний его нагрева и охлаждения, возникает нарушение геометрической точности. Опыт эксплуатации автомобилей показал, что работоспособность детали зависит от состояния поверхностного слоя. Поверхностный слой оказывает существенное влияние на надежность работы детали, узла и машины в целом. При эксплуатации поверхностный слой подвергается наиболее сильному физико-химическому воздействию. Разрушение детали в большинстве случаев начинается с поверхности. Известно, что при механической обработке тормозного барабана в нем сохраняются остаточные напряжения, способствующие впоследствии при эксплуатации появлению дефектов. Перегрев тормозного барабана и микродеформации ступицы от постоянных ударов в процессе движения автомобиля приводят к биению ступицы, что существенно снижает эффективность параметров тормозных качеств автомобиля.

Эксплуатация автомобиля с изношенными до металла колодками приводит к появлению задиров на рабочих поверхностях тормозных барабанов. Состав тормозных колодок не является абсолютно однородным. Для достижения высоких фрикционных свойств и долговечности в него добавляют металлическую стружку, что приводит к неравномерному износу тормозного барабана.

Производители жестко стандартизируют главные параметры тормозного барабана. Отклонение от цилиндричности рабочей поверхности не должно превышать 0,07мм, радиальное биение рабочей поверхности относительно базовых поверхностей не более 0,08мм, шероховатость рабочей поверхности R_a не более 2мкм [1].

Новые барабаны в процессе производства сохраняют остаточные напряжения, способствующие впоследствии при эксплуатации появлению дефектов. Поэтому целесообразным является рассмотрение вопроса о механической обработке тормозных барабанов непосредственно на автомобиле в процессе эксплуатации.

Основными факторами, оказывающими влияние на продолжительность «жизненного цикла» тормозных барабанов автомобилей, являются условия эксплуатации, а также характеристики их рабочих поверхностей. Если величина дефектов поверхностей трения достигает критических значений, то безопасная эксплуатация автомобиля становится невозможной. Критерием предельного состояния тормозных барабанов являются: овальность более 0,07 мм, износ более чем предельный внутренний диаметр, установленный производителем.

Устранить данные дефекты можно следующим образом:

1. Заменой тормозных барабанов на новые.
2. Проточкой рабочих поверхностей тормозных барабанов на токарном станке путем снятия его с автомобиля.
3. Проточкой рабочих поверхностей на мобильном токарном оборудовании без снятия тормозного барабана с автомобиля.

Однако при замене тормозных барабанов автомобилей не компенсируется биение ступицы, возникающее от постоянных ударов колеса о неровности дороги в процессе эксплуатации автомобиля. Это приводит к микродеформации ступицы, что требует обработки тормозного барабана после установки его на автомобиль.

Для обработки рабочих поверхностей тормозных барабанов применяется универсальное токарное оборудование. Обработка рабочей поверхности тормозного барабана осуществляется путем механической обработки внутренней поверхности на токарном станке со снятием тормозных барабанов с автомобиля. Однако при демонтаже

тормозного барабана с автомобиля и установку его на соответствующее токарное оборудование невозможно выбрать удовлетворительную требованиям технологическую базу. Вследствие чего снижается действительная точность обработки тормозного барабана. Это в свою очередь влечет дополнительные затраты времени и средств на демонтаж тормозного барабана, замену смазки подшипников, особенно если это пара «тормозной барабан – ступица».

Поэтому восстановление тормозных барабанов путем механической обработки непосредственно на автомобиле актуально. Следовательно, есть необходимость рассмотрения и проведения исследования о возможности продления «жизненного цикла» тормозных барабанов, путем восстановления рабочей поверхностей в период эксплуатации.

По литературным данным достаточно широко изучено влияние технологических факторов на процесс обработки и степени их воздействия на качество и точность формируемой поверхности стационарными станками. Однако такие исследования не проводились для мобильного токарного оборудования.

Поэтому существует потребность в разработке нового мобильного оборудования для обеспечения высокой точности и качества обработки тормозных барабанов. В соответствии с поставленными задачами была разработана мобильная токарная установка [2], изображенная на рис. 1.

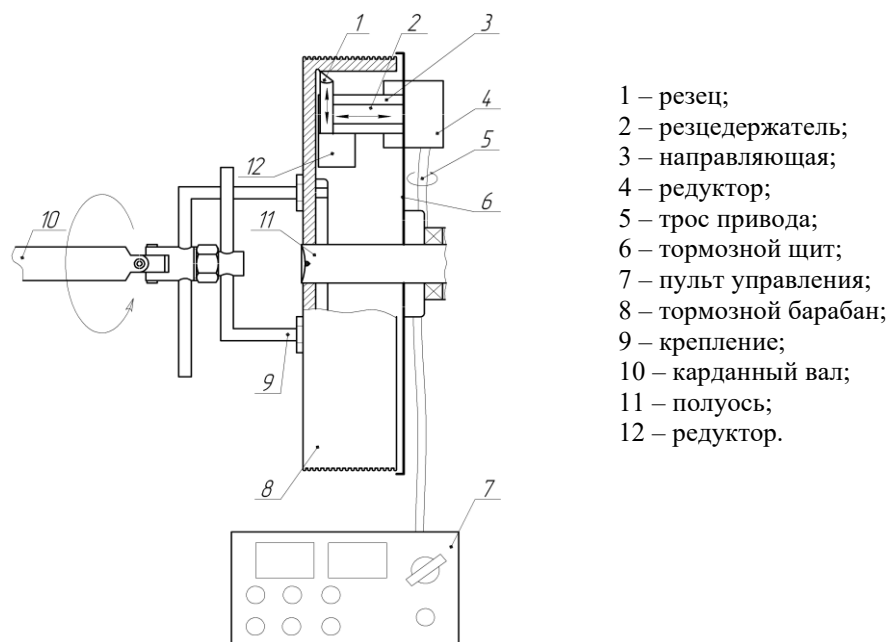


Рис. 1. Установка для обработки рабочих поверхности тормозного барабана

Заключение. Разработанная установка позволяет производить механическую обработку рабочей поверхности тормозного барабана непосредственно на автомобиле [3], что повысит долговечность тормозных барабанов автомобилей при обработке на мобильным токарном оборудовании и обеспечит геометрическую точность в период эксплуатации.

Список литературы: 1. Колодки, диски и барабаны тормозные ТС: ГОСТ 31341-2007. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2007. – 17 с. - (Межгосударственный стандарт). 2. Патент на полезную модель №65778. Модуль для проточки тормозных дисков. № 65778. Заявлено 21.06.11; Опубл. 12.12.2011, Бюл. №23, 2011. – 4 с. 3. Быков, В.В. Повышение долговечности тормозных дисков транспортных машин за счет совершенствования технологии механической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Быков Валерий Васильевич. – Донецк, 2012. – 170 с.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Витренко В. А., Воронцов И. Б., Ефимов А. А., Креселюк Ю. В., Стоянов А. А.

(ЛГУ им. В. Даля, ЛНР)

тел/факс: +7 (959)1380834; e-mail: vitrenko.vl@gmail.com

В представленной статье предложена новая схема формообразования наружной и рабочей поверхности зубьев многозаходных шлифовальных кругов, применяемых для чистовой и черновой обработки зубьев тяговых зубчатых колес подвижного состава. Профилирование поверхности зуба шлифовального круга осуществляется на зубошлифовальных станках «Комсомолец» с использованием протяжных приспособлений за счет вращения и перемещения формообразующих роликов вдоль прямолинейной образующей профилируемого круга. Полученные шлифовальные круги могут применяться для чистовой и черновой обработки зубчатых колес с любым количеством зубьев.

Ключевые слова: шлифовальный круг, схема формообразования, профиль, зубчатое колесо, ролик, поверхность.

The given article proposes a new scheme of shape-formation of the external and working surfaces of multi-pass grinding wheels teeth used for finishing and roughing of the rolling stock traction gears teeth. Profiling of the surface of grinding wheel tooth is performed on the teeth-grinding machine-tools "Komsomoletz" using broaching devices by rotating and moving the shaping rollers along the straight line of the profiled circle. The resulting grinding wheels can be used for finishing and roughing gear-wheels with any number of teeth.

Key words: grinding wheel, scheme of shape-formation, profile, gear-wheel, roller, surface

Введение. Черновое и чистовое шлифование зубьев тяговых зубчатых колес применяется на большинстве машиностроительных предприятий. Такая технологическая операция является обязательной для отделочной и черновой обработки зубьев зубчатых колес. Согласно, технологического процесса, такая операция может занимать до 70% машинного времени на изготовление такой детали. Обработка может осуществляться как методом копирования, так и методом обката. Для обработки поверхности зуба тягового зубчатого колеса применяется большая номенклатура инструмента, что резко удорожает процесс такой обработки. Кроме того, из-за высоких скоростей и нагрузок при обработке инструмент быстро изнашивается, снижается точность обработки, требуется постоянная корректировка его профиля. Износ инструмента приводит к уменьшению его диаметра, а следовательно, меняется его профиль и профиль обрабатываемого зубчатого колеса. Чем больше диаметр шлифовального круга, тем меньше отклонение теоретического профиля от практического. Борьба за повышение производительности требует от технологов, конструкторов и инструментальщиков создание новых, многозаходных, высокопроизводительных инструментов. Это требует создания новых станков, обладающих различными формообразующими движениями, новых инструментов и станочных приспособлений. Создание многозаходных шлифовальных кругов позволяет в значительной степени сократить время на шлифовальную операцию.

Основная часть. В данном исследовании попытаемся сконструировать различные многозаходные шлифовальные круги и разработать несколько схем формообразования для такого инструмента. Если обрабатывать большое количество тяговых зубчатых колес с одинаковым числом зубьев, то можно изготовить многозаходные шлифовальные круги на серийных зубошлифовальных станках без их модернизации. Необходимо, чтобы кинематика станка позволяла соблюдать это условие, т. е. была возможность настроить гитару деления зубошлифовального станка.

При шлифовании зубьев цилиндрических зубчатых колес при помощи инструмента с эвольвентным профилем зуба сложно осуществить. В промышленных условиях эвольвентный абразивный червяк заменяют на архимедовый или конволютный. В этом случае появляется погрешность при обработке зубьев цилиндрических зубчатых колес. С увеличением диаметра инструмента эта ошибка уменьшается. Это приводит к уменьшению угла подъема витка инструмента, что увеличивает точность обработки. С увеличением числа заходов шлифовального круга точность обработки зубьев уменьшается.

Попытаемся изготовить многозаходный шлифовальный круг, при помощи которого можно шлифовать зубья зубчатых колес имеющих одинаковое количество зубьев. Для этого настроим гитару деления станка и при помощи цилиндрического и профильного роликов заправим поверхность многозаходного гиперболоидного круга. На столе станка установим, поочередно заправочные ролики, которые описывают диаметр впадин и наружный диаметр цилиндрического зубчатого колеса. Ролики можно закреплять на разных расстояниях на столе станка. Это позволяет изготавливать многозаходные шлифовальные круги различной геометрии. Изготавливаемый шлифовальный круг перемещается вдоль оси вращения стола станка. Схема изготовления такого инструмента представлена на рисунке 1.

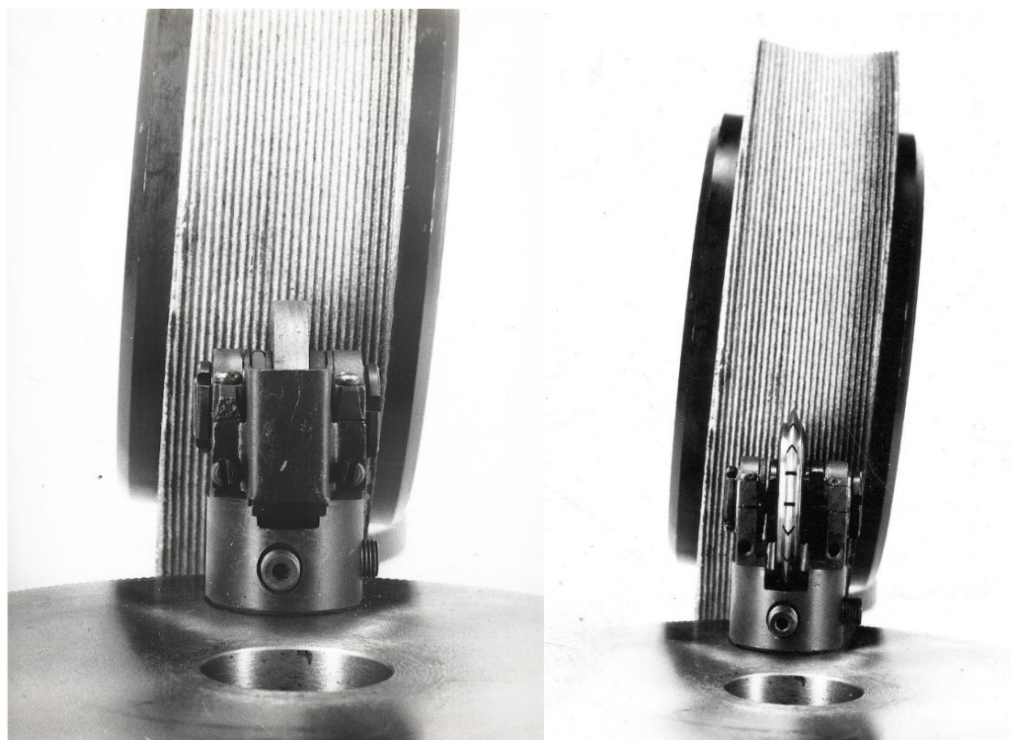


Рис.1. Схема профилирования наружной и боковой поверхности шлифовального круга

При изготовлении абразивного червяка необходимо чтобы его боковая поверхность была расположена по винтовой линии с выбранным шагом и имела бы заданное значение половины угла профиля. В этом случае основная инструментальная поверхность такого абразивного червяка это его вся боковая поверхность, которая является режущей кромкой. Погрешности такого профилирования могут возникать из-за неточностей в цепи профилирования. Предложенная схема формообразования абразивного червяка позволяет изготовить инструмент, у которого основная инструментальная поверхность совпадает с его производящей поверхностью. При помощи этого инструмента можно шлифовать зубья зубчатых колес, число которых равно или меньше числа зубьев, описанных роликами при формообразовании инструмента.

В промышленности стоит острая необходимость в создании зубошлифовального многозаходного инструмента способного шлифовать зубья зубчатых колес с различными геометрическими параметрами. Для изготовления такого инструмента необходимо разработать новые зубошлифовальные станки, оснащенные протяжным суппортом или приспособление, способное перемещать формообразующие ролики вдоль прямолинейной образующей выкатываемого многозаходного гиперboloидного шлифовального круга.

При изготовлении такого инструмента оси заготовки (шлифовальный круг) и инструмента (формообразующий ролик) скрещивают, сообщают им вращения вокруг них с угловыми скоростями, обратно пропорциональными количеству витков, изготовление зубьев ведут несколькими дисковыми инструментами с прямолинейным профилем зуба, количество которых равно или не кратно числу выкатываемых зубьев. Дисковый инструмент перемещается вдоль прямолинейной образующей гиперboloидной заготовки, описывая в своем относительном движении винтовую линию.

На рисунке 2 представлена схема формообразования шлифовального круга. Выкатывающие ролики перемещаются из начального положения (позиция 1) в конечное положение (позиция 2). Для реализации предложенной схемы выкатывания шлифовального круга его устанавливают на шпинделе горизонтально фрезерного или шлифовально-заточного станка с ЧПУ. Дисковый инструмент устанавливают на инструментальной оправке станка. Оси заготовки и инструмента скрещивают на угол γ . Дисковый инструмент перемещают с подачей $\vec{S}$ из положения I в положение II, описывая в своем относительном движении винтовую линию вдоль зубчатой рейки или зубчатого колеса бесконечно большого диаметра.

Заключение. Разработаны новые конструкции многозаходных шлифовальных кругов, применяемых для черновой и чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес. Найден профиль предложенного инструмента в пространственном станочном зацеплении и на этой основе разработаны схемы формообразования многозаходных шлифовальных кругов на серийных зубообрабатывающих станках.

Список литературы: 1. Витренко В.А., Ефимов А.А., Михайлова А.Д., Стоянов А.А. Способ изготовления гиперболоидных зубчатых колес. Патент на изобретение № 2844052. Дата регистрации 24.07.2025. 2. Витренко В.А., Ефимов А.А., Михайлова А.Д., Стоянов А.А. Способ изготовления зубчатых колес. Патент на изобретение № 2840513. Дата регистрации 26.05.2025. 3. Витренко В.А. Проектирование инструмента для накатки деталей подвижного состава поверхностным пластическим деформированием / В.А. Витренко, М.Н. Кузнецова, А.А. Стоянов // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля [Научн. журнал]. – Луганск: Изд-во Луг. гос. ун-та им. В. Даля, 2025. – № 1.2025. – с. 36-40. – ISSN 2522-4905. 4. Витренко В.А. Разработка накатного инструмента для накатки деталей подвижного состава / В.А. Витренко, А.А. Ефимов, М.Н. Кузнецова, А.Д. Михайлова, А.А. Стоянов // Вестник Донбасского государственного технического университета. [Научн. журнал]. – Алчевск: Изд-во ДонГТУ, 2025. – № 9 (83) 2025. – с. 69-74. ISSN 2077-1738. 5. Суслов А.Г. Технология машиностроения. Учебник. Москва. Издательство Кнорус, 2020, 336с. 6. Лебедев В.А. Современные технологии формообразования / В.А. Лебедев, А.И. Болдырев, М.А. Тамаркин и др. М.: Инфра-М, 2019, 320с.

ВОСПИТАТЕЛЬНАЯ РАБОТА – ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ЛИЧНОСТИ СТУДЕНТА

Волков А. Ф. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)
Тел.: +7(949) 334 94 73 Email: af.volkov2020@bk.ru

В данной статье описаны основные задачи воспитательной работы, которые должны реализовываться на кафедрах. Рассмотрены проблемы, возникающие при осуществлении воспитательного процесса.

Ключевые слова: воспитание, воспитательный процесс, цели воспитания, средства и способы воспитания, проблемы, оценка результатов.

This article describes the main tasks of educational work that should be implemented in departments. The problems that arise during the educational process are also discussed.

Key words: education, educational process, goals of education, means and methods of education, problems, and evaluation of results.

Введение. В девяностые годы XX века в школах и вузах была упразднена воспитательная функция и учебные заведения всех уровней подготовки стали предоставлять «образовательные услуги». С последствиями этого шага мы сталкиваемся до сих пор. Широкое распространение в молодёжной среде получили пристрастие к компьютерным играм, нетерпимое отношение к представителям других национальностей, наркомания, алкоголизм [1]. Изменилось отношение к такой ключевой позиции, как труд, появились проблемы с патриотическим воспитанием.

Основная часть. Эгоистическое, потребительское отношение молодёжи к жизни стало угрозой для будущего страны, поэтому возобновление воспитательной работы в учебных заведениях превратилось в необходимость времени. В современной системе высшего образования воспитательная работа является основополагающим фактором по формированию выпускника вуза, так как согласно современным требованиям, предъявляемым к специалистам, использовать полученные знания на практике можно только опираясь на личностные качества, которые формируются в процессе воспитания. Поэтому в настоящее время с процесса передачи знаний акцент сместился на комплексный процесс образования, который обеспечивает формирование личности, обладающей профессиональными знаниями и имеющей высокий культурный уровень.

Особенность воспитательной работы в вузе заключается в том, что студенчество является мобильной социальной группой. Эта группа отличается по своему социальному и национальному составу, возрасту и обладает рядом специфических особенностей. С одной стороны в процессе совместной учебной деятельности формируется студенческий статус, который имеет временный характер. С другой – специфический студенческий образ жизни создаёт благоприятные условия для активного общения, интенсивного личностного роста, формирования системы ценностных ориентаций.

Стратегию воспитательной работы в вузе определяют ректор и Учёный совет, который утверждает «Положение о воспитательной работе», программу и календарный план воспитательной работы. Координацию работы осуществляет проректор по воспитательной работе. В целом в воспитательном процессе традиционно большую роль играют выпускающие кафедры, так как преподаватели этих кафедр назначаются

кураторами или наставниками групп. Воспитательную работу выпускающие кафедры ведут с учётом будущей профессиональной деятельности выпускника. Основная задача кураторов при работе со студентами первого курса – помочь первокурсникам как можно быстрее адаптироваться к системе высшего образования, потому что эффективность и успешность обучения зависят от того, насколько быстро студент освоит новую вузовскую среду [2]. На старших курсах основной акцент делается на формирование практических навыков работы с моделями и решению проблемных ситуаций, которые могут возникнуть на производстве или в рабочем коллективе. Социологические исследования показывают, что воспитанник вуза остаётся в основном таким же, каким он был в студенческие годы. Это накладывает определённые обязательства на профессорско-преподавательский состав вуза. Таким образом, основная задача выпускающих кафедр – формирование профессиональных и интеллектуальных компетенций.

Воспитательная работа может осуществляться как на учебных занятиях, так и во внеучебное время, то есть через систему различных мероприятий. К ним относится участие в научно-практических конференциях и конкурсах научных работ, прохождение учебной и производственной практики, участие в различного рода культурно-массовых мероприятиях, спортивных соревнованиях. Но нельзя воспитание подменять мероприятиями и плакатами. Мероприятия зачастую ничего, кроме отторжения, не вызывают.

Подготовка специалистов должна быть сопряжена с нравственным, этическим, правовым и культурным воспитанием. Воспитание должно осуществляться неназойливо. Здесь велика роль общеобразовательных кафедр. Возможность воспитательной работы заложена как в повседневном общении со студентами, так и в чтении учебных курсов. При чтении практически любого учебного курса можно и нужно при рассмотрении даже абсолютно научных или профессиональных вопросов подключать к ним проблематику воспитательного характера. Приведём пример. Рассматривая тему «Явление электромагнитной индукции» необходимо рассказать о некоторых фактах биографии Майкла Фарадея. В 19 лет ему подарили билет на цикл публичных лекций в Королевском институте знаменитого химика и физика Гемфри Дэви. Майкл подробно записал и переплёл четыре лекции Дэви и послал ему вместе с письмом с просьбой взять его на работу. Этот, как выразился сам Фарадей, «смелый и наивный» шаг оказал на его судьбу решающее значение. Через несколько месяцев Дэви пригласил его на место лаборанта. Нужно обратить внимание студентов на то, что человек должен в жизни добиваться всего сам, а не ждать, пока кто-то будет решать их проблемы и устраивать на работу. Также нужно научиться правильно себя представлять, пытаться найти работу. Каждая кафедра имеет своё направление работы.

Кафедры педагогики и психологии дают установку в сфере культуры и этики поведения, кафедры истории и политологии основной упор должны делать на патриотическое воспитание, кафедра физвоспитания и спорта приобщает к здоровому образу жизни и т. д. Задача кафедр физики и математики – заложить основы мировоззрения, научить мыслить аналитически, делать выводы, аргументировать их. Физика как наука в содержании образования должна быть представлена не только как основа техники, но и как важнейший элемент культуры. Особую роль в понимании физики как культуры, играет история развития физики во взаимосвязи с культурой в целом. Для реализации этой задачи нужен подбор соответствующего материала и выбор методов и средств обучения. Следует отметить, что высокий уровень формализации таких наук физика и математика привёл к технократическому способу мышления, который сыграл определённую положительную роль. Но отторжение науки от общечеловеческой культуры приводит к воспитанию человека знающего, но не

всегда нравственного. Поэтому необходимо сблизить естественно-научное знание с гуманитарным и обеспечить целостное восприятие мира и культуры [3]. Вопросы воспитания решаются непосредственно в ходе учебного процесса и НИРС. Во время лекций и практических занятий преподаватель может давать нравственную оценку тех или иных факторов или событий. Во время лабораторных работ, при подготовке к выступлениям на конференциях можно проводить индивидуальные беседы. Нужно помнить, что личность преподавателя имеет огромное значение. Более того, учебная дисциплина, как правило, воспринимается через личность. Не любят не предмет, а преподавателя. Особенно это касается первокурсников, так как вчерашние школьники ещё не адаптировались к вузовской системе обучения. Общеобразовательные кафедры, также как и выпускающие, в качестве средства воспитания используют научно-практические конференции. К сожалению, в нашем обществе и в студенческой среде как части этого общества, существует деление профессий на престижные и непрестижные. Несмотря на все попытки поднять престиж инженерных специальностей, молодые люди часто выбирают будущую специальность по громкому и красивому названию, слабо представляя в чём она заключается. Лет 10-20 назад было модным получить диплом юриста или экономиста, сегодня – аййтишника. Но чем, например, хороший инженер-механик или инженер горняк хуже посредственного программиста? Поэтому студент должен осознать, что самое главное – это быть высококвалифицированным специалистом в своей области. Поэтому кафедра физики нашего университета в 2023 году посвятила студенческую научную конференцию выдающимся инженерам – выпускникам ДонНТУ. Это позволило ознакомить сегодняшних студентов с достижениями тех, кто когда-то тоже сидел за теми же партами, вызвать чувство гордости за выбранную специальность, показать её значимость и ценность для общества. Рассматривая организацию воспитательной работы на кафедрах, нельзя обойти стороной возникающие проблемы.

1. Обучение и воспитание тесно переплетены между собой, и каждый преподаватель вольно или невольно занимается воспитанием. Поэтому необходимо чётко определиться с назначением воспитания. Существует три подхода к назначению воспитания:

- целенаправленное формирование личности в соответствии с заданным общественным идеалом. Так, например, советское общество ставило задачу формирование строителя коммунизма, личность которого должна была соответствовать «моральному кодексу строителя коммунизма»;

- студент – сформировавшаяся личность, поэтому не нуждается в воспитании. Действительно, процесс воспитания ребёнка начинается практически с момента его рождения. Воспитанием занимаются семья, детский сад, школа, средства массовой информации, а также социальная среда, в которой вращается ребёнок. В вуз поступают 17-18-летние юноши и девушки. У большинства из них сформирована система личностных ценностей ориентации. Но некоторые вышеперечисленные факторы могут оказывать негативное влияние, поэтому вуз не должен полностью отменить воспитательный процесс. Он нужен как для корректировки отрицательных качеств, так и для дальнейшего формирования личности;

- воспитание – средство, направленное на создание условий для саморазвития и самовоспитания личности. На наш взгляд на первом месте должен стоять процесс обучения, а вуз должен создать студентам условия для саморазвития.

2. Результаты обучения можно оценить количественно с помощью тестирования или по результатам сдачи экзаменов, а также на основе выполненной выпускной квалификационной работы. Для воспитательного процесса критерии оценивания не разработаны. Количество проведённых мероприятий, направленных на воспитание, не

может быть критерием сформированности воспитанной, культурной личности. Таким образом, оценка «воспитанности» субъективна.

3. Радикально изменилась система ценностей. Студенчество переориентировалось с общественных на индивидуальные ценности, выросла самооценка личности, упал престиж патриотизма, коллективного труда. Вместе с тем стоит отметить положительное влияние волонтерского движения, которое активно начало развиваться в последнее время. Деятельность Штаба, созданного в ДонНТУ, «МЫ ВМЕСТЕ» направлена на популяризацию и развитие волонтерского движения, повышение социальной активности обучающихся, оказание помощи военнослужащим и мобилизованным гражданам их семьям, взаимодействие с общественными и военно-патриотическими организациями, формирование гражданского самосознания в молодежной среде.

4. Роль учебной группы, как средства сплочения коллектива, уменьшается. Можно назвать несколько причин:

- рост тенденций индивидуализма,
- влияние компьютеризации, - уменьшение потребности в совместной трудовой деятельности.

Всё большее количество студентов предпочитает общение в неформальных группах вне университета, так как там принимают таким, какой ты есть. Учебная группа – это более жёсткая структура, лидерство в неё нужно завоёвывать.

5. К сожалению в вузы поступает довольно много случайных, немотивированных на учёбу студентов. Это приводит к проблемам с дисциплиной, пропусками занятий, невыполнением домашних заданий и т. д. Всё это снижает эффективность воспитательной работы.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод, что воспитание – это процесс, на который влияет множество факторов. Это среда, средства массовой информации, повседневная деятельность, семья. Влияние этих факторов может быть как положительным, так и отрицательным. Воспитательная работа должна стать приоритетным направлением государственной политики, а не отдаваться на откуп отдельным вузам.

Список литературы: 1. Куликова, С. В. Воспитательная работа вуза в современной образовательной системе / С. В. Куликова, Н. Н. Мальчукова, И. Е. Шемякина // Интернет журнал «Мир науки. Педагогика и психология». – 2018, №5, том 6 <https://mir-nauki.com/PDF/66PDMN518.pdf> (доступ свободный). 2. Лумпиева, Т. П. Из школьников в студенты: проблемы и пути решения / Т. П. Лумпиева, А. Ф. Волков // Инженер настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании : материалы XVI Международной научно-практической конференции, г. Донецк, 1-2 июня 2021 г. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2021. – С. 98-103. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47132467>. 3. Лумпиева, Т. П. Гуманитаризация курса физики в техническом вузе / Т. П. Лумпиева, А. Ф. Волков // Модернизация содержания педагогического образования: проблема и пути решения. Материалы педагогических, психологических, социологических исследований международной научно-практической конференции. Сборник статей / под общей редакцией д. пед. наук, профессора Р. К. Серёжниковой. – Калуга : ФБГОУ ВПО «Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского», 2017. – С. 152-164. END ZFXHJZ <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29972852>.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЕНСОРА 3D СИЛ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФРЕЗЕРНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ

Горобец И. А., Колесников В. М. (ФГБОУ ВО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР, РФ)

E-mail: igor.gorobets2022@yandex.ru

The further development of adaptive CNC machine control systems and the digitalization of production management necessitate equipping process equipment with 3D force sensors. This article proposes a structural diagram of a mechatronic fixture with 3D force sensors. Calculation results for the sensor's deformations and dynamic characteristics are presented. The location of the sensor's strain gauges is substantiated. The feasibility of using a 3D force sensor in a mechatronic fixture of an adaptive CNC machine control system is demonstrated.

Keywords: sensor, fixture, control, equipment, deformations, dynamics.

Возобновление проектирования и производства собственных металлорежущих станков с ЧПУ и обрабатывающих комплексов, входящих в состав гибких автоматизированных производств, вновь становится важнейшей задачей развития промышленности в России, поскольку является шагом к достижению полнейшего технологического суверенитета страны. С утратой исследовательского, инжинирингового производственного потенциала в середине 90-х годов прошлого столетия, дезинтеграцией оставшихся немногочисленных участников отрасли произошла, по сути, ликвидация отечественного станкостроения [1,2]. Для оснащения производств механообрабатывающим оборудованием стала характерна сверхвысокая импортная зависимость. Потребности машиностроительной отрасли в современном оборудовании с ЧПУ обусловлены высокой производительностью, точностью и технологическими возможностями станков. Для развития собственного станкостроения правительство утвердило национальный проект «Средства производства и автоматизации» с показателями — достичь 95% к 2030 году технологической независимости и удвоить объем производства станков по сравнению с 2022 годом [3,4,5].

Использование адаптивных систем управления в металлообрабатывающем оборудовании обеспечивает повышение точности обработки в 2-5 раз и одновременно производительности в 1,25 - 2 раза, системы гарантируют прекращение обработки при поломках инструмента [6]. Оснащение существующих устройств металлообработки с ЧПУ гибких автоматизированных линий и производств дополнительными устройствами адаптивного управления с сенсорами для измерения 3D сил резания, позволяющих снизить себестоимость изготовления продукции, является в настоящее время актуальной задачей машиностроительной отрасли.

В настоящее время станки с ЧПУ становятся частью единой информационной среды предприятия, обмениваясь данными с другими системами и устройствами. Например, станки подключаются к сетям IoT (интернет вещей), что позволяет собирать и обрабатывать большие объёмы данных об их работе, оснащаются системами искусственного интеллекта позволяющими использовать оптимальные параметры режимов обработки заготовок благодаря данным о реализуемых усилиях резания, твердости материала заготовки, стойкости инструмента; осуществлять автоматическую коррекцию управляющей программы по фактическим данным при измерении геометрических параметров обрабатываемой детали и 3D-моделью изделия с учетом износа оборудования и режущего инструмента, реальных деформаций в зоне резания.

Для реализации поступательного развития адаптивных систем управления станками с ЧПУ, и цифровизации управления производством необходимо оснащение технологического оборудования сенсорами 3D сил. Авторами разработана структурная схема сенсорного стола для адаптивного управления работой фрезерного станка как важного технологического устройства гибкой автоматической линии современного гибкого автоматизированного производства.

Рассмотрена возможность установки сенсора 3D сил для фиксации реальных сил фрезерования адаптивной системы управления станком с ЧПУ. Поскольку современные фрезерные станки с ЧПУ имеют некоторые специфические особенности компоновки, то возможно предположение расположения сенсора в следующих частях технологического оборудования: стол фрезерного станка, шпиндельная головка станка. Вопросы расположения, компоновки и конструктивные особенности сенсоров шпиндельной головки фрезерных станков подробно рассмотрены в работах [7,8,9], поэтому такая компоновка сенсора 3D сил в настоящих исследованиях авторов не рассматривается. Однако, рациональным вариантом расположения сенсора 3D сил является рабочий стол станка. Для этого потребуется использование специального мехатронного зажимного приспособления, обладающего функциями защиты от обильного использования при фрезеровании смазывающе-охлаждающей жидкости [10].

Структурная схема специального мехатронного зажимного приспособления фрезерного станка с ЧПУ должна содержать жесткое основание 1, закрепляемое на столе станка и плиту 2, для размещения на ней обрабатываемой заготовки, рис.1. При этом плита 2 соединена с основанием 1 сенсорами 3 с тремя степенями свободы, имеющими возможность перемещения вдоль трёх осей координат, позволяющие микродвижения плиты 2 в пределах упругости системы. Для сенсорного стола прямоугольной формы целесообразно расположение сенсоров сил по углам плиты.

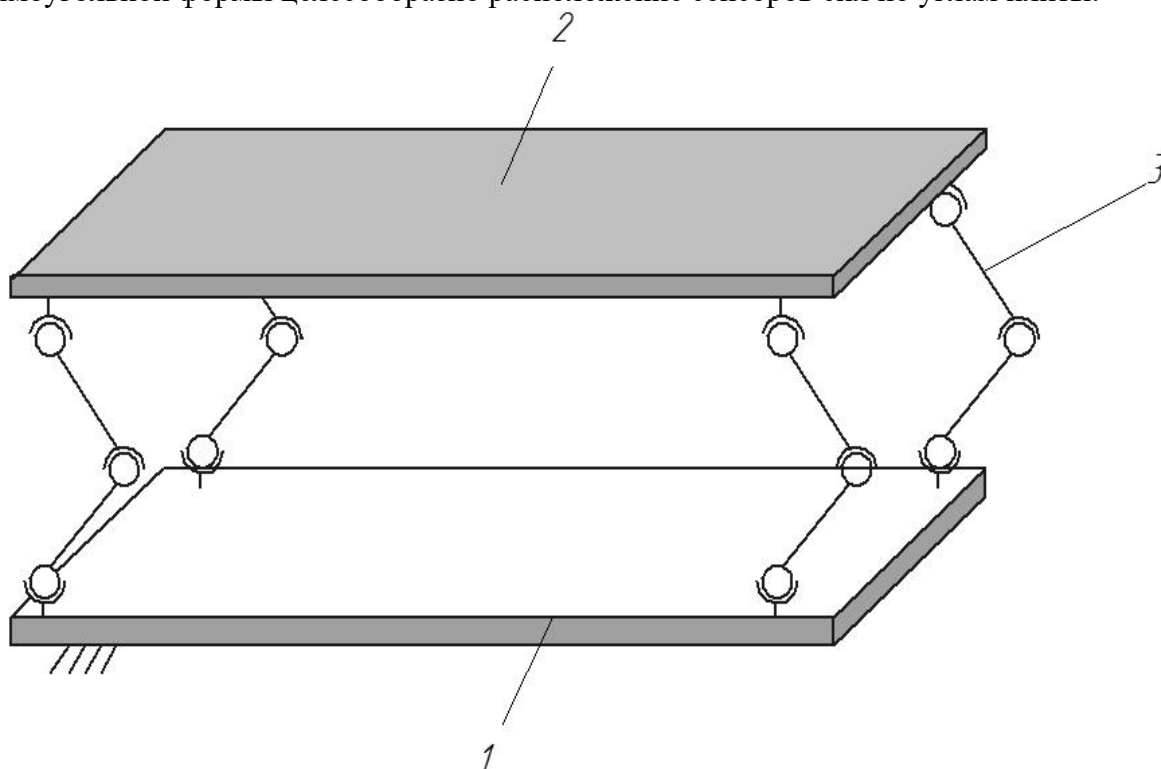


Рис. 1. Структурная схема специального мехатронного зажимного приспособления адаптивной системы управления фрезерным станком с ЧПУ

В качестве конструкции сенсоров 3D сил воспользуемся техническим решением [11], рис.2, оснащенным тензорезисторами.

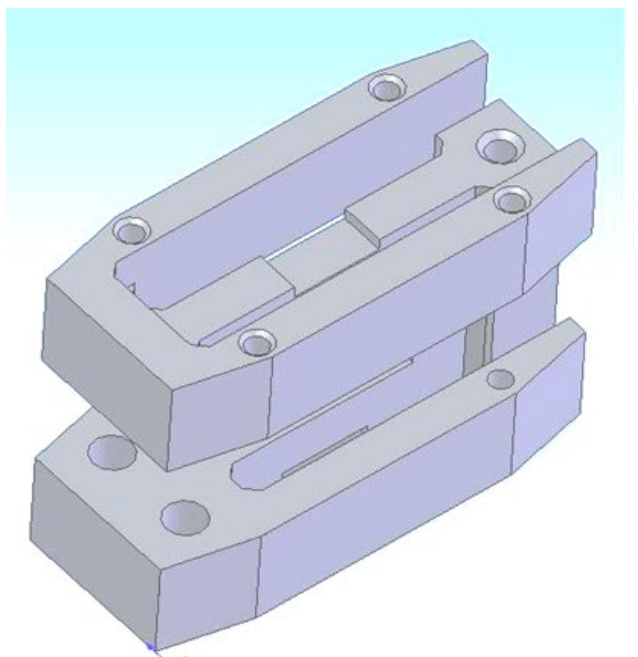


Рис. 2. Модель сенсора 3D сил

Проверку корректности расположения тензорезисторов в конструкции сенсора проведем в программной среде «ANSYS» [12], используя метод конечных элементов, рис.3.

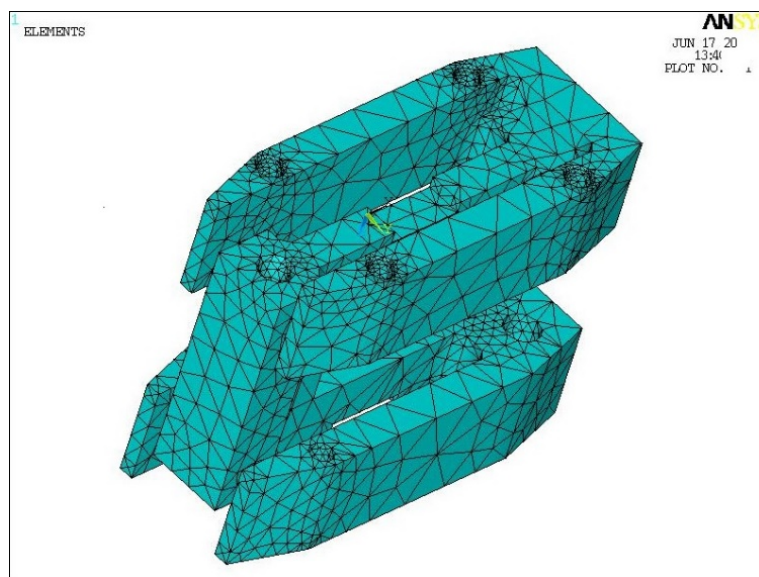


Рис. 3. Вид разбивки модели датчика на конечные элементы

В результате моделирования нагруженности и деформаций упругого элемента сенсора, рис.4, 5, можно сделать вывод о правильности идеи расположения тензорезисторов по сторонам П-образной рамы устройства.

Теоретическими исследованиями установлен линейный характер деформаций поверхностей с чувствительными элементами сенсора от прилагаемых усилий.

Анализируя полученные результаты моделирования напряженно-деформированного состояния сенсора 3D сил, можно сделать выводы и о достаточной прочности конструкции устройства.

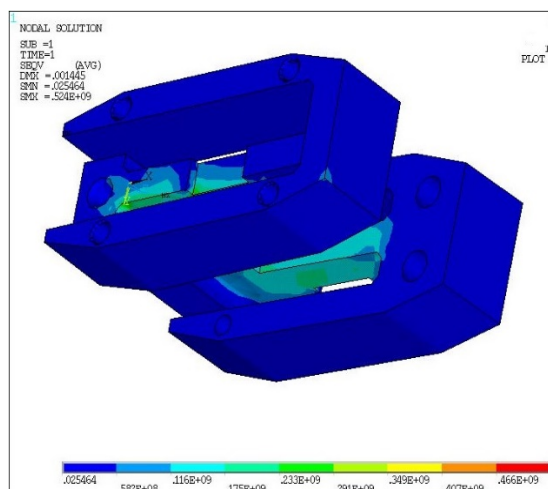


Рис. 4. Эквивалентные напряжения, возникающие в теле упругого элемента сенсора под действием силы P_x

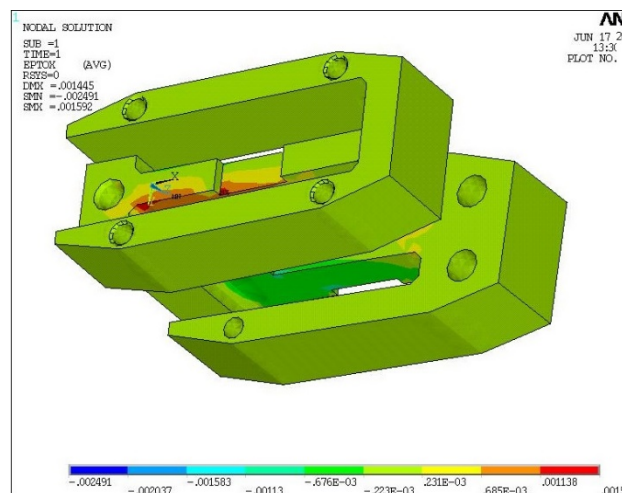


Рис. 5. Относительные деформации в направлении оси X, возникающие в упругом элементе сенсора под действием усилия P_x

Влияние любой составляющей, действующей на сенсор силы, на деформации в других осевых направлениях теоретически равно нулю. Следовательно, точность измерения будет приемлемой для выполнения инженерных задач. Схема расположения тензорезисторов является наиболее рациональной для проведения измерений.

В результате моделирования динамических характеристик сенсора сил в среде «ANSYS» установлен ряд собственных частот устройства в интервале 208 -550 Гц. Из анализа результатов моделирования можно сделать вывод о целесообразности использования конструкции измерительного устройства до частот колебаний внешней нагрузки в 200 Гц, поскольку дальнейшее увеличение частоты изменений измеряемых величин внешних усилий может привести к значительным ошибкам.

Заключение. Выявлена концептуальная структурная схема конструкции адаптивного приспособления и сенсора 3D сил для измерения усилий резания, состоящая из набора П-образных рам. Разработана 3D модель упругого элемента сенсора 3D сил. Исследованы варианты и сделан выбор рационального размещения тензорезисторов по сторонам конструкции упругого элемента сенсора 3D сил. Произведены расчеты деформаций упругого элемента сенсора под воздействием усилий резания в программной среде «ANSYS», подтверждающие результаты выбора рационального размещения тензорезисторов на поверхностях конструкции. Выполнены расчеты динамических характеристик сенсора в программной среде «ANSYS». Определены значения собственных частот колебаний сенсора сил, находящихся в пределах 208 – 550 Гц. Исследованы параметры напряженно-деформированного состояния конструкции сенсора силы, позволяющие сделать вывод о достаточной прочности устройства. Моделирование внешнего воздействия на сенсор трех взаимно-перпендикулярными усилиями резания доказало отсутствие взаимного влияния составляющих сил резания на измерения. Таким образом, выбранная конструкция упругого элемента сенсора, места расположений тензорезисторов и динамические параметры, позволяют использовать сенсор в качестве измерительного средства специального мехатронного зажимного приспособления фрезерного станка с адаптивной системой управления.

Список литературы: 1. Серебрянный, В.В. Состояние дел в станкостроении России // Вестник Российской академии наук. – 2023. – № 1. – с. 3-8. 2. Малкова, Т.Б. Стратегический контекст развития станкостроения в Российской Федерации/ Т.Б. Малкова, К.С.Еленев // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – № 9. – с. 3329-3346.. 3. Афанасьев, А. А. Политика развития станкостроения в современной России: этапы, итоги и перспективы / А. А. Афанасьев // Вопросы инновационной экономики. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 2039-2058. 4. Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности РФ до 2024 года и на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 6 июня 2020 г. № 1512-р [электронный ресурс] режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/Qw77Aau6I0SEluQqYnvR4tGMCy6rv6Qm.pdf> Интернет-ресурс Правительства РФ. 5. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2023 г. № 603 Об утверждении приоритетных направлений проектов технологического суверенитета и проектов структурной адаптации экономики РФ [электронный ресурс] режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/8JsiO5kSIJA1g5IHhGd5qiQVACelECn.pdf> Интернет-ресурс Правительства РФ. 6. Развитие ЧПУ станков. Интернет-ресурс компании Станотекс [электронный ресурс] режим доступа: - <https://www.stanotex.ru> 7. Горобец, И.А. Сенсоры и измерительная техника / И.А.Горобец, И.В. Лапаева – Донецк, ДонНТУ, 2009 [электронный ресурс]. 8. Горобец, И.А. Выбор типа сенсорного устройства и места его расположения в технологическом оборудовании с ЧПУ / И.А. Горобец, Э.Г. Мелешко, В.М. Колесников / «ИНЖЕНЕР» студенческий научно-технический журнал. – Донецк, ДонНТУ, 2024. - № 2(38). С. 9-11. 9. Горобец, И.А. Разработка конструкции мехатронных систем фрезерных станков/ И.А.Горобец, Н.В.Голубов, О.А.Борель –Сб.трудов междунар. науч.-техн.конференции «Современные технологии, качество, реструктуризация» ТМСР-2001 в г.Кишиневе 23-25 мая 2001 – Кишинев, 2001, Вып.1, с.382-386. 10. Чуваков, А.Б. Основы подготовки и эффективной эксплуатации обрабатывающих станков с ЧПУ монография / А.Б. Чуваков, Д.В. Чиненков— Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2014. — 217 с. 11. А.С. СССР №1041886 МКИ³ G01L 1/22. Трехкомпонентное тензометрическое устройство/ Я.И.Альшиц, Н.Г.Бойко, А.К.Семенченко и др.-№3224800/18-10 Заявл. 25.12.1980; опубл. 15.09.1983. Бюл.№34.- С.148. 12. Федорова, Н.Н. Основы работы в ANSYS / Н.Н.Федорова, С.А.Вальгер, М.Н.Данилов, Ю.В.Захарова – М.: ДМК Пресс, 2017 – 210 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СЕТЕВЫХ СВЯЗЕЙ ШКОЛА-ВУЗ-ПРЕДПРИЯТИЕ

Горобец И. А., Лазебная Л. А.¹, Лапаева И. В.² (1 - ФГБОУ ВО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР, РФ; 2 - ГБОУ «Гимназия № 33 г.о. Донецк», ДНР, РФ)

E-mail: igor.gorobets2022@yandex.ru

The shortage of engineering personnel in the industry studied. A forecast of the demand for engineering personnel until 2032 has been provided. The important competencies of in-demand engineers in industrial enterprises described. The collaboration between universities, schools, and enterprises has been proposed. The enhancement of motivation for learning described.

Key words: *engineer, education, school, university, motivation.*

Вопросы подготовки инженерных кадров имеют системное значение для экономики и промышленности России, поскольку связаны с развитием кадрового и научно-технологического потенциала, обеспечением конкурентоспособности страны и достижением технологического лидерства в ключевых областях [1].

Начиная с 2018 года фиксируется уменьшение трудовых ресурсов, по оценкам Минтруда, дефицит квалифицированных кадров составляет около 1,5 млн человек. В январе 2026 года нехватка инженеров технических специальностей в России оценивалась примерно в 600 тысяч человек [2]. По данным Минпромторга, не хватает около 229 тыс. инженеров-конструкторов и специалистов по автоматизации. Высокий дефицит инженеров и технических специалистов отметили 45% промышленных предприятий в 2026 году. Нехватка инженеров ощущается также в 60% организаций промышленно-производственной сферы машиностроения.

В настоящее время можно выделить важные и высоко востребованные навыки в сфере машиностроения – это работа с цифровыми моделями и автоматизацией управления технологическими процессами; программирование технологического оборудования с числовым программным управлением и роботизированными технологическими комплексами.

Около 70% обследованных организаций машиностроения, помимо нехватки инженерно-технических кадров, сообщили о недостатке IT-специалистов в области искусственного интеллекта; инженеров данных (Data Science); информационной безопасности. Приоритетом также являются такие навыки, как промышленный интернет вещей, компьютерное зрение, цифровые двойники [3]. При этом, работодателям нужны не просто «айтишники», а те, кто умеет обучать нейросети и интегрировать искусственный интеллект (ИИ) в бизнес-процессы [4], рис.1.

По мнению HR-специалистов, дефицит инженерных кадров будет преодолен не ранее 2030 года даже при оптимистичных темпах переориентации образования. В настоящее время средний возраст работающих инженеров в промышленности примерно 35 - 50 лет. Некоторые предприятия вынуждены привлекать категорию специалистов в возрасте 70 лет и старше. По прогнозам до 2032 г. рынку труда потребуется около 12 млн. новых работников для замещения выбывающих [5].

При этом тенденций роста мотиваций стать инженером у выпускников школ и колледжей не наблюдается. К сожалению, у молодежи сложился социальный стереотип: «завод — вариант для неудачников».

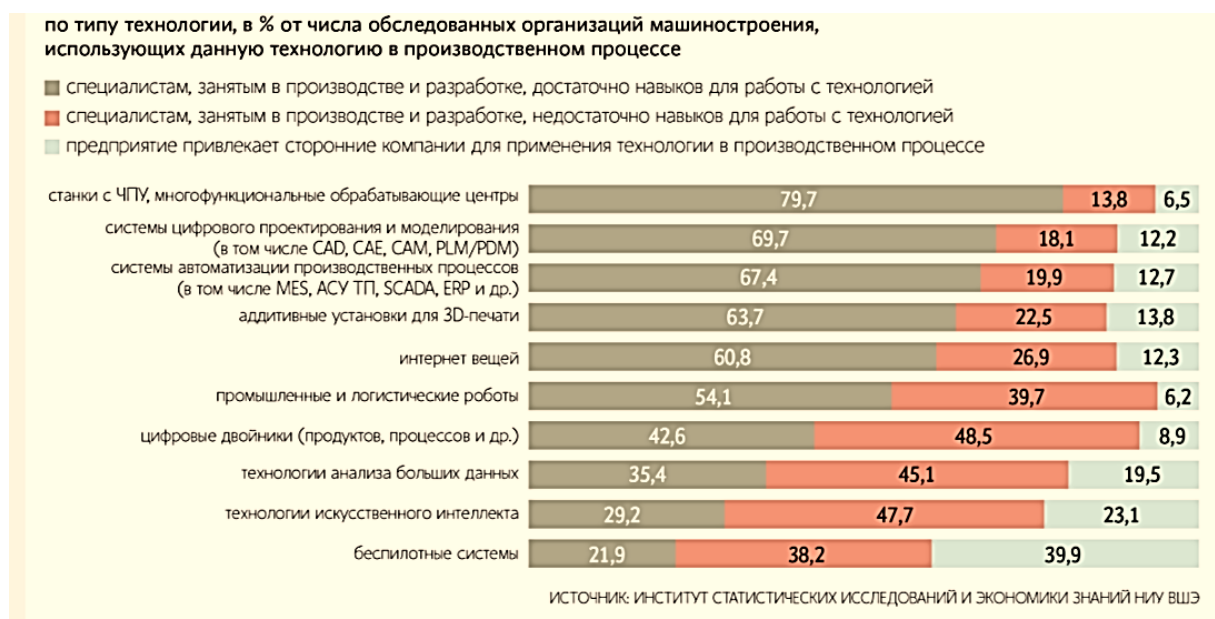


Рис.1. Выборка дефицитных компетенций инженеров

Родители также транслируют детям образ успеха через офис и ноутбук. Отчасти это верно, поскольку современный инструментарий инженера - это компьютер со специализированным программным обеспечением. Кроме этого, поколение Z выросло в мире готовых гаджетов и к сожалению, лишено «инженерного воображения». Культура старшего поколения «сделай сам» — паяние, моделирование, технические кружки — практически исчезла как массовое явление. В результате молодежь не видит смысла идти в производство, не понимая, как оно устроено, как функционирует. У многих детей отсутствует мотивация созидательной активности!

Усугубляет ситуацию полное отсутствие даже начальных инженерных знаний у учителей школ, что транслируется ученикам на уроках «Труд» (технологии). А между тем, как считает вице-премьер Дмитрий Чернышенко, подводя итоги стратегической сессии, «...воспитание будущих инженеров должно начинаться со школьной скамьи» [6]. И для реализации этого в школах расширены с 2026 года профили обучения, при этом, школы сами определяют какие открывать профили из перечня, закреплённого федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС СОО). К таким перечням профилей относятся:

- **Естественно-научный.** Ориентирован на медицину, биотехнологии, химическую промышленность. На углублённом уровне изучаются, как правило, химия и биология либо химия и физика.
- **Гуманитарный.** Подходит для педагогики, психологии, культурологии, работы в сфере общественных отношений. Основной предмет — русский язык. Школа может предлагать разные связки: обществознание и история, иностранный язык и литература, иностранный язык и обществознание.
- **Социально-экономический.** Нацелен на профессии в социальной сфере, финансах, управлении, предпринимательстве. На углублённом уровне изучаются профильная математика и обществознание.
- **Технологический.** Возможны варианты: инженерный (математика и физика), информационно-технологический (математика и информатика). Иногда включает все три предмета. Подходит для технических специальностей.
- **Универсальный.** Даёт возможность гибко подбирать предметы для углублённого изучения под конкретные вузы и специальности. Например,

биология с обществознанием (психология), история с литературой (искусствоведение), химия с математикой (нефтяная промышленность).

- **Агротехнологический.** Специализируется на подготовке к профессиям в агропромышленном комплексе (инженерные или сельскохозяйственные специальности). Углубляются математика, физика, информатика, химия, биология.

В связи с необходимостью дальнейшего развития и выполнения поставленных задач, Правительством разработана Концепция технологического развития на период до 2030 года (Распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года» (вместе с «Концепцией технологического развития на период до 2030 года»). [7].

В настоящее время, по мнению авторов, созрела необходимость включения школ в систему формирования кадрового инженерно-технического и научного потенциала страны. В связи с этим, считаем, что именно ВУЗ должен выступить инициатором сотрудничества со школами и помочь администрациям школ организовать:

- совместную подготовку подрастающего поколения;
- курсы внеурочной деятельности;
- научно-практические конференции для студентов и школьников;
- конкурсы школьных разработок;
- участие в подготовке индивидуального проекта и проведении исследовательской деятельности на уровне среднего общего образования в 10-11 классах;
- профориентационную работу (в том числе и экскурсии) на базе промышленных предприятий, университетских лабораторий с целью ознакомления подростков с производственными процессами;
- реализацию сетевых программ обучения по узкопрофильным темам с участием преподавателей вузов, освоение которых позволит обучающимся получить более глубокие знания по профильным предметам и успешно участвовать в олимпиадах (например: Всероссийской олимпиаде школьников; Национальной технологической олимпиаде; Всероссийской интернет-олимпиаде «Нанотехнологии – прорыв в будущее»; Международной Менделеевской олимпиаде и др.);
- серии лекций (в том числе в дистанционном формате), проводимых вузом (например, по опыту ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»; ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и др.) [8];
- основы проектной деятельности школьников под руководством наставников из вузов и предприятий с представлением работ на конкурсах по направлениям инженерии, информатики.

Вывод. Взаимодействие «школа – ВУЗ – предприятие» на уровне школы способствует углубленному изучению школьниками отдельных предметов, формированию у них интереса к инженерной, научно-исследовательской и проектной деятельности, успешному завершению среднего общего образования, а также мотивации к осознанному выбору образовательной траектории и будущей профессиональной деятельности.

На уровне ВУЗа взаимодействие «школа – ВУЗ – предприятие» позволяет увеличить количество мотивированных абитуриентов, целенаправленно поступающих на определенные направления профессиональной подготовки, осуществить отбор наилучших абитуриентов и сформировать контингент студентов, подготовленных к освоению программ высшего профессионального образования. Привлечение студентов вузов к совместной с работодателями деятельности по научно-техническим программам и проектам способствует развитию креативных навыков в научно-исследовательской и проектной деятельности. Прохождение студентами производственных практик сокращает период адаптации выпускников на предприятии.

На уровне предприятия реализация взаимодействия «школа – ВУЗ – предприятие» позволит удовлетворять потребности предприятий в необходимых квалифицированных кадрах, организовывать повышение квалификации сотрудников предприятия на базе ВУЗа, осуществлять трансфер знаний и технологий, что будет способствовать инновационному развитию производства.

Список литературы: 1. Правительство выработает меры для устранения дефицита инженерных кадров / РИА Новости [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://ria.ru/20260512/rossiya-2091996512.html> (дата обращения: 06.07.2026). 2. Вести.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.vesti.ru/article/4892095> (дата обращения: 06.07.2026). 3. Дорофеева, Е. Большинство машиностроителей испытывают дефицит инженерных и IT-кадров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.vedomosti.ru/society/articles/2026/05/25/1199588-bolshinstvo-mashinostroitelei-ispitivayut-defitsit-inzhenernih-i-it-kadrov?from=copy_text (дата обращения: 06.07.2026). 4. Кадры решают всё: какие специалисты нужны рынку труда в 2026 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://secrets.tbank.ru/blogi-kompanij/kadry-reshayut-vsyo-2026/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F&internal_source=copypaste&internal_source=copypaste (дата обращения: 06.07.2026). 5. Бовт, Г Поиск работы в 2026 году. Рынок труда остыл, но не для инженеров и сварщиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aif.ru/money/business/poisk-raboty-v-2026-godu-rynok-truda-ostyl-no-nedlya-inzhenerov-i-svarshchikov> (дата обращения: 08.04.2026). 6. Михаил Мишустин призвал оперативно устранить дефицит инженерных кадров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rg.ru/2026/05/12/tehnari-so-shkoly.html> (дата обращения: 12.05.2026). 7. Распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 N 1315-р (ред. от 21.10.2024) <Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года> (вместе с "Концепцией технологического развития на период до 2030 года") [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_447895 (дата обращения: 08.04.2026). 8. Организация взаимодействия «школа – вуз – предприятие» : методические рекомендации / Н.И. Волынчук, Л.И. Асанова : под ред. Н.И. Волынчук. – Москва : ФГБНУ «Институт содержания и методов обучения им. В.С. Леднева», 2025 – 40 с.

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИОННЫХ МЕТОДОВ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ,
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ**

^{1,2}Гусев Е. Л., ¹Федоров Ю. Ю., ¹Черных В. Д. (¹ИПНГ ФИЦ «ЯНЦ СО РАН»,
г. Якутск, Россия; ²ИМИ СВФУ, г. Якутск, Россия)

E-mail: elgusev@mail.ru

В работе на базе разработки и усовершенствования методов математического моделирования, анализа сложных данных, сформулированы вариационные постановки задач прогноза срока службы перспективных композитов типа стеклопластиков при влиянии критических компонентов внешней среды.

Ключевые слова: композиционные материалы, вариационные методы, оптимальное прогнозирование, стеклопластики, обобщенные модели долговечности.

Based on the development and improvement of mathematical modeling methods and the analysis of complex data, variational formulations of problems for predicting the service life of advanced fiberglass composites under the influence of critical environmental components have been formulated.

Keywords: composite materials, variational methods, optimal forecasting, fiberglass plastics, generalized durability models.

Введение. В различных областях строительства, техники и др. в последние десятилетия наблюдается значительный рост использования в конструкциях полимерных композитов. Это объясняется широким кругом причин ассоциированных с тем, что высокие механические, технологические и экономические показатели композиционных материалов, полимерных композиционных материалов стимулируют постоянное повышение объемов их производства и применения.

Постоянный контакт с окружающей средой, с течением времени приводит к постепенному ухудшению свойств материала. Поэтому при разработке новых современных композиционных материалов, современных полимерных композиционных материалов необходимо учитывать влияние этих факторов.

Современные требования к свойствам композиционных материалов при воздействии экстремальных факторов внешней среды. При воздействии предельных факторов на композит, в экстремальных условиях внешней среды характер и скорость реструктуризаций, прогрессирующих в материале, будут также связаны с их мощностью. Компоненты, оказывающие воздействие на уменьшение срока службы композита, могут быть разделены на внешние и внутренние.

При этом центральным при формировании вывода о применении композита является комплекс необходимых критериев с учетом способности материала сопротивляться процессу старения. При этом важной проблемой является создание новых материалов, обладающих способностью сохранять свою работоспособность в течение 20-30 и более лет [4, 5].

Разработка и применение современных перспективных композиционных материалов типа стеклопластиков в экстремальных условиях внешней среды.

В последние периоды времени композиционные материалы типа конструкционных стеклопластиков в наибольшей степени по сравнению с другими видами композиционных материалов используются в различных современных областях, определяющих научно-технический прогресс. Стеклопластики являются пластическими материалами в состав которых входит стекловолокнистый наполнитель и связующие вещества. В роли стекловолокнистого наполнителя может быть применено стеклянное волокно, либо волокно из кварца и др. В роли связующего вещества могут быть применены термореактивные и термопластичные полимеры. Также в роли связующего вещества могут использоваться эпоксидные модифицированные смолы. Широкая область использования композиционных материалов типа стеклопластиков связана с тем, что они имеют малый удельный вес, а также имеют заданные свойства.

В США конструкционные композиты типа стеклопластиков начали применяться с 1950-х годов. Массовое использование такого рода композитов начато в связи с реализацией проекта «Поларис». Композиты на основе стеклопластиков массово применяются в строительстве, при разработке конструктивных компонентов, труб, корпусов судов и в других областях. При этом стекловолокно, входящее в стеклопластик как составляющая, используется в качестве армирующей функции. Стекловолокно гарантирует высокие физико-механические характеристики данного композита. Для объединения наполнителей в монолитную систему применяются полимерные смолы, которые придают ей стабильность.

Математические методы прогнозирования остаточного ресурса, долговечности современных перспективных КМ типа стеклопластиков в экстремальных условиях. Проведено исследование влияния экстремальных климатических факторов резкоконтинентального климата Арктической и Субарктической зоны на свойства современных перспективных КМ типа стеклопластиков. Было выявлено ухудшение механических характеристик стеклопластиков в процессе старения. Было установлено, что в условиях резкоконтинентального климата Арктической и Субарктической зоны полимерные материалы и композиции на их основе стареют гораздо интенсивнее, чем в зоне умеренного климата [4]. На основе разработанной методологии построены оптимальные обобщенные модели долговечности [6–15]. Разработка методологии оптимального прогнозирования проводилась в предположении, что различные физические факторы оказывают на полимерный композит воздействие, независимое от воздействия других факторов, и изменения, вызванные воздействием различных физических факторов на композит, суммируются.

При введенных предположениях было принято, что обобщенная модель долговечности, описывающая одновременное воздействие нескольких факторов может быть представлена в виде:

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

В этих обозначениях: R – прогнозируемая определяющая характеристика композита, R_0 – первоначальное значение определяющей характеристики; $u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}$ – параметры, описывающие характер воздействия j -го фактора на композит, t – время.

Постановка задачи. В рамках сформулированных вариационных постановок на основе кратковременных испытаний, проведенных на временном интервале ретроспек-

ции $[0, T_{\min}]$ требовалось найти оптимальные параметры обобщенной модели прогнозирования $u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*$, которые доставляют глобальный минимум критерию эффективности (2) на множестве многопараметрических обобщенных моделей прогнозирования $\{R(u; t)\}$ (2):

$$S(u_1, u_2, \dots, u_n) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [R(u_1, u_2, \dots, u_n; t_i) - \tilde{R}_i]^2 \Rightarrow \min_{u \in U} \quad (2)$$

В этих обозначениях: $\tilde{R}_i$ - экспериментально измеренные значения определяющего свойства R в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_m$, U - допустимое множество параметров обобщенной модели долговечности. Вектор неопределенных параметров $u^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$ доставляет глобальный минимум суммарной среднеквадратической ошибке $\tilde{S} = S(u)$ (2):

$$S(u^*) = \min_{u \in U} S(u) \quad (3)$$

В рамках разработанной методологии прогнозирования для современных перспективных композиционных материалов типа стеклопластиков разработаны оптимальные модели долговечности для композиционных материалов типа стеклопластиков, позволяющие осуществлять прогноз остаточного ресурса стеклопластиков в условиях резко-континентального климата Арктической и Субарктической зоны на длительный период. Реализованы соразмерные численные исследования.

В рамках построенной оптимальной итоговой математической модели долгосрочности в условиях влияния критических компонентов реализованы согласованные натурные эксперименты в условиях холодного арктического климата. На базе произведенных натурных испытаний реализованы компьютерные исследования по прогностике остаточного ресурса стеклопластика. Проведенные вычислительные эксперименты продемонстрировали, что на интервале ретроспекции в 2,5 года разработанная оптимальная модель долговечности в рамках вариационных постановок дает возможность реализовывать эффективную высокоточную долговременную прогностику на период упреждения прогноза во много раз превосходящий величину отрезка ретроспекции длительностью в 2,5 года.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ ИПНГ ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», Якутск, Россия (рег. № 1025031200006-0-2.5.1;1.4.4) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы: 1. Lamm M. The Fiberglass Story // Invention & Technology. 2007. Vol. 22, Issue 4. P. 8–16. 2. Бернацкий А.Ф. Казарновский В.С., Устинов В.П. и др. Применение композитных полимерных материалов в строительных конструкциях и мостах в Сибири // Транспорт РФ. 2006. № 5. С. 45–48. 3. Преображенский А.И.

Стеклопластики – свойства, применение, технологии // Главный механик. 2010. № 5. С. 27–36. **4.** Филатов И.С. Климатическая устойчивость полимерных материалов. М.: Наука, 1983. 213 с. **5.** Коррейя Х.Р., Кабрал-Фонсека С., Бранко Ф.А., Феррейра Х.Г., Эйсебио М.И., Родригес М.П. Долговечность пултрузионных профилей из полиэфирного стеклопластика для строительных конструкций // Механика композитных материалов. 2006. Т. 42, № 4. С. 463–482. **6.** Gusev E.L., Bakulin V.N. Mathematical methods for optimal synthesis of physical and mechanical structure of composites with required set of properties at extreme conditions // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1925. P. 012072. **7.** Gusev E.L., Bakulin V.N., Chernykh V.D. Promising methods for predicting the residual life of polymer composites in refined variational statements under extreme environmental influences // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1191. P. 012022. **8.** Gusev E.L., Bakulin V.N. Accounting for errors in measuring the characteristics of composites to improve the accuracy of forecasting when using optimal durability models // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2528. P. 020023. **9.** Gusev E.L., Bakulin V.N. Mathematical methods of predicting determining factors characteristics of composites based on generalized durability models // MATEC Web of Conferences. 2022. Vol. 362. P. 01008. **10.** Gusev E.L., Bakulin V.N., Chernykh V.D. Mathematical methods for predicting the durability of polymer composites under extreme conditions // MATEC Web of Conferences. 2022. Vol. 362. P. 01009. **11.** Gusev E.L., Bakulin V.N. Variation formulations of inverse problems in forecasting the residual life of composites // Doklady Physics. 2018. Vol. 63, No 9. P. 388–392. **12.** Gusev E.L., Bakulin V.N. Optimal control under a decrease in the thermal-field intensity based on selection of the heterogeneous – construction structure in the variational formulation // Doklady Physics. 2018. Vol. 63, No 5. P. 213–217. **13.** Gusev E.L., Bakulin V.N. Variational Methods of Solving Problems on Control of the Intensity of a Temperature Field // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021, Vol. 94, No 5. P. 1117–1123. **14.** Gusev E.L., Bakulin V.N. Generalized Durability Models and their Application to Solving Problems on Predicting the Defining Characteristics of Composites // Mechanics of Composites Materials. 2022. Vol. 58, No 3. P. 355–364. **15.** Gusev E.L., Bakulin V.N., Chernykh V.D. Development of combined search methods for efficiency indicator extreme in variation statement of forecasting tasks for determine characteristics of composite materials // Journal of Physics: Conference Series. Supercomputer Technologies in Mathematical Modelling. 2019. Vol. 1392. P. 012008.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА SMATH STUDIO ПРИ ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ-МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

Гутаревич В. О., Калугина С. В. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, Россия)

Тел. +7(856)3010787; E-mail: gzt1@fimm.donntu.ru

В представленной статье рассмотрены проблемы использования пакета SMath Studio в машиностроении. Указана специфика отрасли, которая требует точных инженерных расчетов, моделирования и визуализации сложных систем. Предложено использовать SMath Studio как доступную альтернативу с возможностью интеграции в учебный и производственный процесс, дополняя при необходимости другими специализированными пакетами для решения узкоспециализированных задач.

Ключевые слова: машиностроение, моделирование сложных систем, графическая визуализация.

The presented article discusses the problems of using the SMath Studio package in mechanical engineering. It highlights the specifics of the industry, which requires precise engineering calculations, modeling, and visualization of complex systems. It is proposed to use SMath Studio as an affordable alternative with the possibility of integration into the educational and production processes, supplemented, if necessary, by other specialized packages to solve niche tasks.

Keywords: machine-building, complex systems modeling, graphical visualization.

Введение. В настоящее время машиностроение требует точных инженерных расчетов, моделирования и визуализации сложных систем. Современные инженеры не могут обойтись без специализированного программного обеспечения, которое обеспечивает надежность и скорость вычислений. Программы с графическим интерфейсом и поддержкой единиц измерения стали стандартом в отрасли, позволяя визуализировать результаты и избегать ошибок в расчетах.

Анализ последних публикаций по теме работы. В последнее время разработано много прикладных пакетов для математического моделирования. В статьях [1, 2] рассмотрена методология математического моделирования и целесообразность применения отечественного программного пакета SMath Studio для освоения студентами-специалитета методов и приемов математического моделирования и научно-исследовательской работы, проведен сравнительный анализ PTC MathCad Prime 3.1 и SMath Studio на примере решения задачи интерполяции. Исследованы возможности графического отображения результатов моделирования и экспериментальных данных в процессе решения некоторых категорий инженерных задач.

Направления современной методики преподавания физики изучены в работе [3]. Автором рассмотрена возможность применения на уроках физики свободного программного обеспечения отечественного производства. На примере раздела «Механика» показано, что использование математического пакета SMath Studio позволяет визуализировать физико-математические модели и улучшить качественное восприятие явлений.

В статьях [4, 5] проведен анализ возможностей и приемов решения систем линейных алгебраических уравнений и систем нелинейных уравнений средствами SMath Studio, рассмотрены особенности применения математического пакета SMath Studio для решения уравнений при обучении студентов инженерных специальностей. Среди достоинств SMath Studio отмечены следующие возможности: решение уравнений различных типов; осуществление поиска как действительных, так и комплексных корней; за-

дание точности ответа; нахождение корней в определенном диапазоне; возможности графического отображения данных.

В работе [6] выполнена оценка возможностей построения графиков математических функций таких систем компьютерной алгебры, как SMath Studio и Mathcad. Для выполнения поставленных в работе задач использовался стандартный метод, в котором сравнивался базовый функционал приложений. Автором указано, что система компьютерной алгебры SMath Studio не является полным аналогом Mathcad и имеет отличия в функционале.

В статье [7] представлен сравнительный анализ двух программ для математических и инженерных вычислений – Mathcad и SMath Studio. Основанием служит разработанное учебно-методическое пособие по использованию Mathcad и SMath Studio, которое включает теоретическую и практическую части с интерактивной составляющей. Представлен интерфейс программ, их функциональные возможности, а также особенности применения в образовательных и профессиональных целях.

В работе [8] изучен подход к автоматизации силовых расчетов станочных приспособлений на основе формирования исполняемых программ с помощью математического пакета SMath Studio.

Сравнительный анализ возможностей инженерного программного обеспечения PTC MathCad Prime 3.1 и математического пакета SMath Studio для решения обыкновенных дифференциальных уравнений проанализирован в статье [9]. Особенности моделирования электрических цепей в Smath Studio изучены в работе [10].

Настоящая статья является продолжением указанных работ.

Цель работы – оценить возможности SMath Studio и сравнить его с признанными лидерами рынка: Mathcad, Wolfram Mathematica и MATLAB.

Для достижения указанной цели необходимо решить ряд задач:

- 1) установить преимущества и ограничения каждого пакета;
- 2) выбрать сравнительные ключевые характеристики рассматриваемых пакетов;
- 3) разработать рекомендации по выбору инструмента для машиностроения и решения узкоспециализированных задач.

Основное содержание работы. SMath Studio это бесплатная кроссплатформенная программа с поддержкой около 40 языков, включая русский. Инструмент обладает интуитивным графическим редактором формул и полной поддержкой единиц измерения, что делает его идеальным выбором для инженерных расчетов. Пакет имеет облачную версию и позволяет производить запуск без установки. Кроме того, встроенный математический справочник и активное сообщество пользователей делают SMath Studio привлекательным выбором для инженеров и студентов по всему миру.

Анализ использования SMath Studio доказывает возможность решения инженерных задач с визуализацией, позволяет производить символьные вычисления и программирование, обеспечивает работу с матрицами и интегрирование, анимацию графиков для динамических процессов, а также интеграцию специализированных плагинов. Многие пользователи отмечают удобство работы с единицами измерения и возможность создания интерактивных расчетных документов.

Если сравнивать SMath Studio с Mathcad, то последний является коммерческим продуктом с мощным интерфейсом и поддержкой сложных инженерных расчетов. Программа обеспечивает глубокую интеграцию с CAD-системами, что делает ее незаменимой в корпоративной среде. Пакет предлагает поддержку как символьных, так и численных методов, позволяя инженерам решать широкий спектр задач от расчета прочности до термодинамического анализа. Однако высокая стоимость лицензии и ограниченная кроссплатформенность могут стать барьером для студентов. Кроме того, многие

пользователи отмечают сложность освоения и менее гибкую работу с плагинами по сравнению с SMath Studio.

Другой программный продукт – Wolfram Mathematica является универсальным пакетом для научных и инженерных расчетов с продвинутыми алгоритмами во всех областях математики. Этот пакет имеет широкую функциональность, обеспечивает поддержку программирования, символьных вычислений, визуализации и машинного обучения. Однако имеет ряд ограничений, сложный интерфейс, высокую цену и избыточность для типичных машиностроительных задач. На основании этого, Wolfram Mathematica используется преимущественно в исследовательских и академических кругах, где требуется максимальная вычислительная мощность. Для повседневного инженерного проектирования в машиностроении система может быть избыточной и экономически нецелесообразной.

MATLAB предлагает широкий набор инструментов для численных расчетов, моделирования и оптимизации сложных систем. Система обеспечивает интеграцию с Simulink для динамического моделирования систем машиностроения, что делает её незаменимой для анализа динамических процессов и управления. MATLAB имеет мощные инструменты для численных методов и решения дифференциальных уравнений, а также хорошую интеграцию с Simulink для визуального программирования и моделирования. Однако для этого пакета характерна ограниченная поддержка символьных вычислений, которая доступна только через отдельный пакет Symbolic Math Toolbox. Следует отметить, что MATLAB менее удобен для интерактивных инженерных расчетов с единицами измерения. Его коммерческая лицензия требует значительных финансовых затрат.

Сведем ключевые характеристики рассматриваемых пакетов в таблицу 1. Из этой таблицы видно, что каждый пакет имеет свои преимущества и недостатки. SMath Studio не требует лицензии на использование и прост в освоении, что делает его доступным для широкого круга пользователей. Пакет имеет полностью бесплатное решение с открытым кодом, простой интерфейс и довольно легкое освоение. Встроенная поддержка единиц измерения, мобильность, облачные и портативные версии способствуют его широкому распространению.

Таблица 1. Сравнительные характеристики пакетов

Характеристики пакетов	Mathcad	Wolfram Mathematica	MATLAB	SMath Studio
Наличие лицензии	Требуется оплата			Бесплатно
Тип интерфейса	Графический	Программный		Графический, интуитивный
Используемые платформы	Windows	Мультиплатформенный		Windows, iOS, Linux
Единицы измерения	Встроенная поддержка	Через пакеты		Встроенная поддержка
Символьные вычисления	Продвинутые	Максимальные	Ограниченные	Базовые
Возможность расширения	Ограниченная	Собственная экосистема	Toolbox система	Менеджер плагинов, открытый API

По сравнению с Wolfram Mathematica пакет SMath Studio обеспечивает меньшую мощность для сложных символьных вычислений, а в сравнении с MATLAB имеет ограниченный функционал для динамического моделирования. При этом требуется установка дополнительных плагинов для расширенных функций. Как недостаток можно выделить меньшее количество готовых библиотек для специализированных задач.

Несмотря на ограничения, SMath Studio обеспечивает достаточный функционал для решения большинства типовых инженерных задач в машиностроении.

Заключение. В общем случае SMath Studio представляет собой оптимальный выбор для студентов, преподавателей и инженеров с ограниченным бюджетом, поскольку имеет удобный и функциональный инструмент для инженерных расчетов. Mathcad представляет собой стандарт для корпоративного использования с глубокими интеграциями и проверенной надежностью в промышленных условиях. Платформы Mathematica и MATLAB целесообразно применять для исследовательских и специализированных задач, требующих максимальных вычислительных возможностей.

При этом следует использовать SMath Studio как доступную альтернативу с возможностью интеграции в учебный и производственный процесс, дополняя при необходимости другими специализированными пакетами для решения узкоспециализированных задач.

Список литературы: 1. Голубева, Н. В. Математическое моделирование в техническом университете: особенности применения математического пакета Smath Studio / Н. В. Голубева // Актуальные проблемы современного инженерного образования : Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, Омск, 11 ноября 2022 года. – Омск: Омский автобронетанковый инженерный институт, 2022. – С. 133-140. 2. Голубева, Н. В. Особенности применения отечественного программного пакета Smath Studio в аспекте графического отображения результатов математического моделирования / Н. В. Голубева // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов : Сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции, Москва, 15 августа 2022 года. – Москва: Печатный цех, 2022. – С. 31-36. 3. Долгошеева, С. О. Использование математического пакета Smath Studio при обучении физике / С. О. Долгошеева, В. В. Филиппов // Проблемы естественных, математических и технических наук в контексте современного образования : материалы Международной научно-практической конференции, Липецк, 26–27 октября 2023 года. – Липецк: Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, 2023. – С. 113-117. 4. Макова, Н. Е. Решение систем уравнений в Smath Studio / Н. Е. Макова, Н. В. Картечина // Наука и Образование. – 2024. – Т. 7, № 2. 5. Макова, Н. Е. Решение уравнений средствами Smath Studio / Н. Е. Макова // Наука и Образование. – 2024. – Т. 7, № 1. 6. Назарова, И. Л. Сравнительный анализ систем компьютерной алгебры SMath Studio и Mathcad / И. Л. Назарова // Перспективы науки. – 2023. – № 6(165). – С. 26-29. 7. Панов, М. В. Сравнительный анализ Mathcad и Smath Studio: возможности, функциональность и практическое применение / М. В. Панов, С. Ю. Кириллова // Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых : сборник материалов научно-практических конференций, Владимир, 17 марта – 04 апреля 2025 года. – Владимир: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2025. – С. 471-477. 8. Пипкин, Ю. В. Автоматизация типовых силовых расчетов станочных приспособлений на базе комплекса Smath Studio / Ю. В. Пипкин, А. М. Зинченко, С. Ю. Стародубов // Инновационные перспективы Донбасса : Сборник научных трудов 11-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 27–29 мая 2025 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 70-74. 9. Плащенко, С. М. Сравнительный анализ возможностей решения обыкновенных дифференциальных уравнений инженерного приложения PTC Mathcad Prime 3.1 и математического пакета Smath Studio / С. М. Плащенко // Студент: наука, профессия, жизнь : Материалы XI всероссийской студенческой научной конференции с международным участием. В 5-ти частях, Омск, 22–26 апреля 2024 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 151-157. 10. Ушакова, Н. Ю. Особенности моделирования электрических цепей в Smath Studio / Н. Ю. Ушакова, Л. В. Быковская // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 15–17 октября 2024 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2024. – С. 266-270.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЕРМОУПРОЧНЕННОЙ СТАЛИ ПРИ ЗАКАЛКЕ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ В ПРЕССЕ И РОЛИКОВОЙ ЗАКАЛОЧНОЙ МАШИНЕ

Егоров Н. Т. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, Россия)
E-mail: ent1945@mail.ru

Приведены результаты сравнительного исследования структуры и свойств низколегированной стали 10XCND при закалке толстых листов в прессе и роликовой закалочной машине. Показано, что роликовая закалочная машина обеспечивает более высокое качество закалки толстых листов по сравнению с прессами и позволяет производить термоупрочненный толстолистовой прокат повышенной и высокой прочности.

Ключевые слова: закалка, толстый лист, пресс, роликовая закалочная машина.

The results of a comparative study of the structure and properties of low-alloy 10XCND steel during quenching of thick sheets in a press and a roller quenching machine are presented. It is shown that the roller quenching machine provides a higher quality of quenching of thick sheets compared to presses and allows the production of heat-strengthened thick-sheet rolled products of increased and high strength.

Keywords: quenching, thick sheet, press, roller quenching machine.

Развитие металлопотребляющих отраслей промышленности требует постоянного увеличения объемов производства толстолистового проката. Наиболее востребованными на рынке черных металлов являются крупногабаритные листы из малоуглеродистых низколегированных сталей повышенной и высокой прочности, подвергаемые закалке с отпуском.

Закалка толстых листов на металлургических комбинатах осуществляется в закалочных прессах и роликовых закалочных машинах [1, 2].

Имеющиеся закалочные пресса одностипны и предусматривают закалку листов в неподвижном (закатом) состоянии, в то время как охлаждение листов в роликовых закалочных машинах осуществляется при их непрерывном или возвратно-поступательном (колебательном) перемещении между верхними и нижними роликами, установленными в одной вертикальной плоскости с зазором равным толщине листа или на 1-3 мм выше.

В работе проведено сравнительное исследование качества закалки листов стали 10XCND при их охлаждении в закалочном прессе стана 2800 Алчевского металлургического комбината (АМК) и роликовой закалочной машине (РЗМ) стана 3600 комбината «Азовсталь».

Химический состав толстолистовой низколегированной стали 10XCND производства указанных комбинатов приведен в таблице 1.

Листы толщиной 16-30 мм после горячей прокатки на станах 2800 (АМК) и 3600 («Азовсталь») нагревали в проходных роликовых печах до температур 920-930°C с удельным временем нагрева 2 мин на 1 мм их толщины, а затем охлаждали водой в закалочном прессе и роликовой закалочной машине. Общий расход воды в закалочном прессе составлял 1900 м³/ч, в РЗМ — 1200 или 2400 м³/ч соответственно при работе одного или двух насосов. Средняя скорость охлаждения листов в интервале 900 — 600°C при указанных расходах воды изменялась от 18 до 48°C/с.

Таблица 1. Химический состав толстолистовой низколегированной стали 10ХСНД производства АМК и комбината «Азовсталь»

Металлургический комбинат	Массовая доля элементов (не более), %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
АМК	0,10	0,93	0,70	0,78	0,55	0,47	0,029	0,024
«Азовсталь»	0,10	0,91	0,65	0,88	0,61	0,45	0,027	0,018

Технологические режимы закалки толстых листов стали 10ХСНД приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технологические режимы закалки листов стали 10ХСНД при охлаждении в прессе (АМК) и РЗМ («Азовсталь»)

Оборудование для закалки	Толщина листа, мм	Общий расход воды, м ³ /ч	Давление воды, кПа	Удельный расход воды, м ³ /м ² *ч	Скорость охлаждения, °С/с
РЗМ	16	1200	382	29	35
	16	2400	678	42	48
РЗМ	30	1200	382	29	20
	30	2400	678	42	32
Закалочный пресс	18	1900	294	25,5	18

Примечание. В таблице приведена средняя скорость охлаждения листов в интервале 900-600 °С.

От закаленных листов вырезали образцы для исследования структуры и механических свойств. Часть образцов после закалки подвергали отпуску в лабораторной печи при температуре 670-690°С с удельным временем нагрева 3 мин/мм и последующим охлаждением на воздухе, что соответствует реальным режимам термообработки толстых листов в промышленных условиях.

Механические свойства стали определяли при испытании цилиндрических образцов диаметром 6 мм и расчетной длиной 30 мм. Испытания на ударный изгиб проводили на стандартных образцах 1-го типа при температуре минус 40 °С.

Микроструктуру стали исследовали на микроскопе «Neophot-21». Количество продуктов распада аустенита, образующегося при закалке стали, определяли методом секущих с погрешностью, не превышающей 3%.

В таблице 3 приведены механические свойства стали 10ХСНД после закалки и высокого отпуска при охлаждении листов в закалочном прессе и роликовой закалочной машине.

Результаты исследований и анализ диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 10ХСНД показывают, что практические режимы закалки толстых листов с использованием существующего на металлургических комбинатах закалочного оборудования далеки от классических представлений о закалке с образованием мартенсита [3].

Таблица 3. Механические свойства стали 10ХСНД после закалки (числитель) и последующего отпуска 680 °С (знаменатель) при охлаждении листов в закалочном прессе и роликовой закалочной машине

Оборудование для закалки	Толщина листа, мм	Расход воды при закалке, м³/ч	Количество феррита в структуре, %	σ_b , Н/мм²	σ_t , Н/мм²	δ , %	KCU ^{-40 °С} , Мдж/м²
РЗМ	16	1200	18	$\frac{875}{570}$	$\frac{707}{467}$	$\frac{417}{24}$	$\frac{-}{0,87}$
	16	2400	7	$\frac{914}{537}$	$\frac{756}{480}$	$\frac{16}{25}$	$\frac{-}{0,93}$
РЗМ	30	1200	33	$\frac{834}{537}$	$\frac{682}{428}$	$\frac{26}{24}$	$\frac{-}{0,82}$
	30	2400	13	$\frac{864}{554}$	$\frac{785}{526}$	$\frac{18}{26}$	$\frac{-}{1,11}$
Закалочный пресс	18	1900	49	$\frac{672}{506}$	$\frac{461}{332}$	$\frac{24}{28}$	$\frac{-}{0,76}$

Критическая скорость закалки данной стали для получения мартенсита должна быть не ниже 130°С/с, что значительно выше расчетных скоростей охлаждения листов в закалочном прессе и роликовой закалочной машине. В структуре закаленных листов, наряду с продуктами закалки (бейнитом, мартенситом), присутствует полигональный феррит, количество которого изменяется от 7 до 49%.

С увеличением количества полигонального феррита в структуре закаленной стали прочностные характеристики снижаются, а пластические свойства увеличиваются. Следует отметить, что отрицательное влияние феррита, выделяющегося при закалке, проявляется не только в снижении прочности стали, но и ее ударной вязкости.

Установлено, что при производстве толстолистового проката повышенной и высокой прочности с пределом текучести не менее 450 Н/мм² содержание полигонального феррита в структуре термоупрочненной стали 10ХСНД не должно превышать 30% (рисунок 1).

Листы после закалки в прессе характеризуется более высоким содержания феррита в структуре закаленной стали и низкими значениями прочностных свойств по сравнению с охлаждением в роликовой закалочной машине. К тому же, исследования показывают, что содержание феррита в пробах, вырезанных из различных участков одного и того же листа, колеблется в достаточно широких пределах и может изменяться от 30 до 75%. Это свидетельствует о значительной неравномерности и низкой скорости охлаждения листов в прессе, что приводит к повышенному разбросу механических свойств и к короблению толстолистового проката.

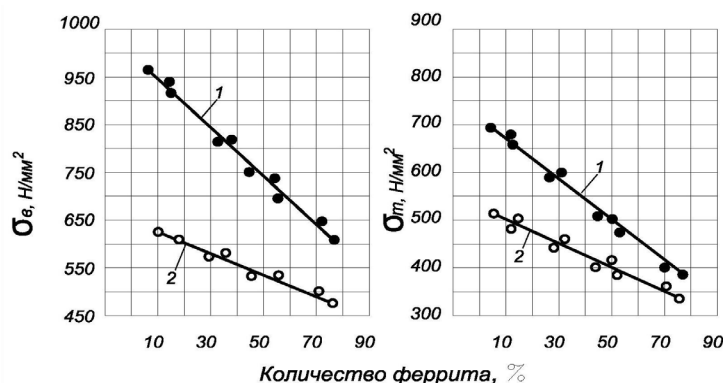


Рис.1. Влияние количества феррита на прочностные свойства стали 10XCHD после закалки (1) и отпуска при 680⁰С (2)

Статистическая обработка первичных сдаточных испытаний термоупрочненных листов толщиной 16-32 мм стали 10XCHD указывает на высокое качество их закалки в роликовой закалочной машине. Отсортировка листов из-за неудовлетворительных значений механических свойств после закалки в прессе достигала 18%, а в роликовой закалочной машине - не превышала 2%. При этом листы после закалки в РЗМ характеризовались высокой плоскостностью, что, в ряде случаев, практически исключало необходимость их дальнейшей правки.

Проведенные исследования показали, что роликовая закалочная машина комбината «Азовсталь» обеспечивает получение более высокого уровня свойств термоупрочненной толстолистовой стали 10XCHD по сравнению с закалкой в прессе. Вместе с тем из-за одностадийного охлаждения листов с плотностью орошения (удельный расход воды) во всех зонах машины равной 42 м³/м²*ч не обеспечивается получение в закаленной стали бейнито-мартенситной структуры без избыточного феррита. Современные роликовые закалочные машины отечественного и зарубежного производства, работающие в режиме двухстадийного охлаждения, характеризуются более высокими плотностями орошения в зоне интенсивного охлаждения, достигающими 200-250 м³/м²*ч, что исключает появление избыточного феррита в структуре термоупрочненной стали [4, 5].

Таким образом, роликовая закалочная машина в настоящее время является единственным промышленным агрегатом, отвечающим требованиям технологии закалки толстых листов при производстве высокопрочных толстолистовых сталей.

Список литературы: 1. Долженков Ф. Е. Повышение качества толстых листов / Ф. Е. Долженков, Ю. В. Коновалов, В. Г. Носов и др. – М.: Металлургия, 1984. – 247 с. 2. Плеханов Г. П. Улучшение качества закалки листов в прессе / Г. П. Плеханов, Н. Ф. Тюрин, Т. Ф. Паюченко и др. // Сталь, 1984, №1. – С. 64-66. 3. Егоров Н. Т. Термическое упрочнение толстых листов в роликовых закалочных машинах / Н. Т. Егоров, Л. И. Розумова // Термическая и термомеханическая обработка стали: темат. отрасл. сб. – М.: Металлургия, 1984. – С. 59-62 4. Егоров Н. Т. Разработка технологии и освоение производства термоупрочненных листов на металлургическом заводе Huta Stalowa Wola, Польша / Н. Т. Егоров, А. Л. Остапенко, С. А. Гриценко // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. Тр.: вып. 68. – Днепропетровск, ПГАСА, 2012. – С. 167-172. 5. Белобров Ю. Н. Создание современного комплекса термообработки толстолистового проката на металлургическом заводе HSW-HUTA STALL, Польша / Ю. Н. Белобров, С. А. Гриценко, В. И. Елецких и др. // «Черметинформация». Бюл. «Черная металлургия», 2008, №8. – С. 36-39.

КАНАТ МНОГОКАНАТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ КАК ЕСТЕСТВЕННО-ЗАКРУЧЕННЫЙ СТЕРЖЕНЬ ПРИ ПЕРЕМОТКЕ ЧЕРЕЗ ШКИВ ТРЕНИЯ

Жабровец А. И., Малеев В. Б., Сидоренко В. А., Шамрай Ю. А. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, Россия)
E-mail: teor.mex@mail.ru

Получены дифференциальные уравнения упругодеформированного состояния каната многоканатной подъемной машины, позволяющие определить распределение нагрузок в набегающей и сбегающей ветвях канатов.

Ключевые слова: многоканатный подъем, канатоведущий шкив, упругая деформация канатов, футеровка, желоб, стержень.

Differential equations of the elastic-deformed state of the rope of a multi-rope lifting machine have been obtained, which allow determining the distribution of loads in the incoming and outgoing branches of the ropes.

Keywords: multi-rope lifting, rope-driving pulley, elastic deformation of ropes, lining, trough, rod.

Введение.

Безаварийная работа шахтной многоканатной подземной машины при непрерывно возрастающих технических показателях может быть обеспечена лишь при гармоничном сочетании всех ее параметров на основе учета периодически изменяющихся силовых факторов.

Одновременно с широким распространением многоканатных подземных установок возникла проблема определения возможных перегрузок головных канатов при фактических коэффициентах трения канатов о футеровку приводного шкива и фактических усилий в головных канатах в случае проскальзывания одного из них. Недостаточная изученность данных вопросов имеет прямое отношение к крупным авариям на шахтах, связанным с обрывом одного или нескольких головных канатов и сопровождающимся значительным материальным ущербом.

Установлено, что аварии с обрывами головных канатов происходят в основном по причине недопустимого перегруза одного из канатов с последующим скольжением его по желобу футеровки приводного шкива, сопровождающимся явлением динамического срыва каната.

Поэтому вопросы обеспечения постоянного равномерного самораспределения усилий между подземными канатами, снижения возможных перегрузок канатов, а также исключения случаев перехода кратковременных проскальзываний в длительное неуправляемое скольжение являются актуальными.

Основное содержание и результаты работы.

Исследуя влияние упругих свойств подземных канатов на распределение усилий между ними и оценивая динамику многоканатного подъема, авторы исходят из условия, что канат представляет собой линейно деформируемое тело, подчиняющееся закону Гука. Однако, как показали многочисленные исследования и результаты замеров фактических усилий в подъемных канатах, такой подход к решению ряда задач является идеализированным. В этих работах рассматриваются квазистатические процессы рас-

пределения усилий в канатах за счет различия радиусов навивки канатов на приводной шкив, упругости футеровки и различия упругости канатов и их длин.

Точнее было бы рассматривать основные вопросы теории многоканатного подъема с учетом того, что подъемные канаты представляют собой перематывающиеся через приводной шкив трения естественно закрученные стержни в упругодеформированном состоянии.

Постановка задачи.

Целью является разработка математической модели упруго деформированного состояния каната подъемной машины как естественно закругленного стержня при перематке через шкив трения и определение характера распределения усилий в набегающей и сбегавшей ветвях каната.

Изложение материала и результаты.

Для математического описания процессов перематки упруго-деформированного каната через шкив трения рассмотрим некоторое текущее положение подъемных сосудов в стволе шахты при отсутствии скольжения канатов по канатоведущему шкиву и введем следующие обозначения:

L_{ir} ($i=1,2, \dots, n$; $k=1,2$) - текущие длины канатов в недеформированном состоянии; i -число канатов; k - номер сосуда; Δ_{ir} - упругие деформации канатов, вызванные силами P_{ir} в точках крепления канатов к сосуду и силами их собственного веса; H_r - текущее расстояние от оси канатоведущего шкива до прицепных устройств на сосуде; Q_r - вес k -ого сосуда; $H_0 = const$ - расстояние от оси канатоведущего шкива до нижней точки петли уравнивающего каната, следует геометрическое соотношение:

$$L_{ir} + \Delta_{ir} = H_r \quad (i=1,2, \dots, n; k=1,2), \quad (1)$$

Запишем условия статического равновесия подъемных сосудов в форме:

$$\sum_{i=1}^n P_{ir} = Q_r + q(H_0 - H_r) \quad (k=1,2), \quad (2)$$

где q — суммарный линейный вес уравнивающих канатов.

Из теории гибких растяжимых нитей [1] известно, что при перематке каната с помощью шкива трения имеют место уравнения:

$$\frac{dL_{i1}}{d\varphi} = -1 \frac{R_i}{1+\varepsilon_{i1}} \quad (i=1,2, \dots, n), \quad (3)$$

где φ - текущий угол поворота шкива трения;

ε_{i1} - максимальное значение относительного удлинения каната,

вычисляемое в точке набегающего его на шкив трения

(предполагается, что сосуд I поднимается);

R_i - эффективный радиус навивки каната.

Для определения ε_{i1} и Δ_{i1} воспользуемся уравнениями статического равновесия любого из канатов с номером I (рис.1), которые согласно [2] записываются в форме:

$$\begin{aligned} A_i \frac{\partial^2 U_{i1}}{\partial S^2} + C_i \frac{\partial^2 \Theta_{i1}}{\partial S^2} &= P_i \\ C_i \frac{\partial^2 U_{i1}}{\partial S^2} + B_i \frac{\partial^2 \Theta_{i1}}{\partial S^2} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$A_i \frac{d^2 U_{i1}}{dS^2} = \frac{1}{A_i} (P_{i1} + p_i S) - \frac{C_i}{A_i} \Theta_{i1}, \quad \frac{d\Theta_{i1}}{dS} = \frac{1}{B_i} M_i - \frac{C_i}{B_i} U_{i1}$$

где A_i , B_i , C_i - агрегатные коэффициенты жесткости каната как естественно закрученного стержня;

U_{i1} , и θ_{i1} - соответственно продольная деформация и угол поворота сечений каната с координатой S , отсчитываемой, например, от поднимающегося сосуда;

P_i - вес единицы длины каната.

Система уравнений (4) интегрируется следующим образом:

$$\begin{aligned} A_i \frac{\partial U_{i1}}{\partial S} + C_i \frac{\partial \theta_{i1}}{\partial S} &= p_i S + F, \\ C_i \frac{\partial U_{i1}}{\partial S} + B \frac{\partial \theta_{i1}}{\partial S} &= M. \end{aligned} \quad (5)$$

Вторичное интегрирование дает:

$$A_i U_{i1} + C_i \theta_{i1} = \frac{P_i S^2}{2} + FS + a, \quad (6)$$

Здесь F , M , a и b – постоянные интегрирования, для нахождения которых воспользуемся следующими граничными условиями. При $S=0$ (в точке крепления каната к сосуду) усилие в канате, определяемое выражением

$$P_{i1} = \left[A_i \frac{\partial U_{i1}}{\partial S} + C_i \frac{\partial \theta_{i1}}{\partial S} \right] S = 0 \quad (7)$$

Принимаем также, что в этой точке угол поворота сечения каната равен нулю

$$|\theta_{i1}|_{S=0} = 0. \quad (8)$$

Далее, при $S = L_{i1}$, очевидно, деформация каната равна нулю, т.е.

$$U_{i1} |_{S=L_{i1}} = 0, \quad (9)$$

А угол поворота сечения каната относительно сечения в точке $S=0$, будет составлять некоторую величину φ_{i1} :

$$\theta_{i1} |_{S=L_{i1}} = \varphi_{i1} \quad (10)$$

Граничное условие (7) дает возможность из первого уравнения системы (5) найти: $F=P_{i1}$.

Из первого уравнения системы (6) и с использованием граничных условий (9) и (10) найдем:

$$a = - \left\{ \frac{P_i L_{i1}^2}{2} + L_{i1} P_{i1} \right\} + C_i \varphi_{i1}.$$

В то же время из системы (6) при условии (8) имеем:

$$b = \frac{C_i a}{A_i} = \frac{C_i}{A_i} \left[C_i \varphi_{i1} - \left[\frac{P_i L_{i1}^2}{2} + L_{i1} P_{i1} \right] \right]$$

Наконец, из второго уравнения системы (6) находим с помощью граничного условия (10)

$$M = \frac{1}{L_{i1}} \{ B_i \varphi_{i1} - b \} = \frac{1}{L_{i1}} \left\{ \varphi_{i1} B_i - \frac{C_i}{A_i} \left[C_i \varphi_{i1} - \frac{P_i L_{i1}^2}{2} + L_{i1} P_{i1} \right] \right\}$$

Так как $\varepsilon_{i1} = \frac{\partial U_{i1}}{\partial S} |_{S=L_{i1}}$, то из системы (5) определим:

$$\varepsilon_{i1} = \frac{1}{A_i - \frac{C_i^2}{B_i}} \left\{ P_{i1} L_{i1} + P_{i1} - \frac{C_i}{B_i} M \right\}$$

и после преобразования получим:

$$\varepsilon_{i1} = \frac{1}{A_i} \left[P_{i1} + \frac{P_i L_{i1}}{2} \right] + \frac{1}{A_i^*} \frac{P_i L_{i1}}{2} - C_i \frac{\varphi_{i1}}{L_{i1}}, \quad (11)$$

$$\text{где } A_i^* = \frac{B_i}{A_i B_i - C_i^2}.$$

Далее из системы (2.6) определим функцию U_{i1} , которую вычислим при $S=0$.
Очевидно, что $U_{i1}|S=0 = -\Delta_{i1}$

После некоторых преобразований получим:

$$\Delta_{i1} = \frac{L_{i1}}{A_i} \left[P_{i1} + \frac{p_{i1} L_{i1}}{2} \right] - \frac{C_i}{A_i} \varphi_i \theta_{i1}. \quad (12)$$

Эффективный радиус навивки каната R_i на i - том желобе шкива при абсолютно жесткой футеровке, будет:

$$R_i = R_i^* + \frac{d_i}{2},$$

где R_i^* - радиус i - ого желоба;

d_i - диаметр i - ого каната.

При упругой футеровке $R_i = J(P_{ir})$. Эту зависимость в первом приближении можно считать линейной от среднего удельного давления канатов на футеровку q_1 . Таким образом, можно записать:

$$R_i = R + \delta R_i - K_i g_i + \frac{d_i}{2}, \quad (13)$$

где R – среднее арифметическое значение радиусов желобов шкива;

δR_i – отклонения значений радиусов от среднего;

K_i – коэффициент податливости футеровки i - ого ручья.

Среднее значение удельного давления i – ого каната на футеровку определяется выражением:

$$g_i = \frac{P_{i1} + P_{i2} + P_i (L_{i1} + L_{i2})}{2 d_i (R + g R_i)} \quad (14)$$

Будем считать, что длины канатов в навеске различны и определяются некоторыми значениями L_i , т.е.

$$L_i = L_{i1} + L_{i2} \quad (i=1, 2, \dots, n).$$

Запишем теперь с помощью полученных соотношений группу уравнений, описывающих квазистатическое состояние канатов. Так, подстановка (12) в (14) приводит к выражению:

$$L_{iR} + \frac{1}{A_i} \left\{ P_{iR} L_{iR} + \frac{P_i L_{iR}^2 (n-1)x^2}{2} - C_i \varphi_{iR} \right\} = H_R, \quad (15)$$

а подстановка (11-14) в уравнение (3) дает:

$$\frac{dL_{i1}}{d\varphi} = - \frac{R + \delta R_i + \frac{d_i}{2} - K \frac{P_{iR} + P_{i2} + P_i L_i}{2 d_i (R + \delta R_i)}}{1 + \frac{1}{A_i} \left[P_{i1} + \frac{p_{i1} L_{i1}}{2} - C_i \frac{\varphi_{i1}}{L_{i1}} \right] + \frac{1}{A_i^2} \frac{p_{i1} L_{i1}}{2}} \quad (16)$$

В уравнениях (17) φ_{iR} при $k=2$ - это углы закрутки опускающихся ветвей канатов относительно точек их крепления ко второму сосуду. Очевидно, что должно выполняться соотношение

$$\varphi_{i1} + \varphi_{i2} = \varphi_i,$$

где φ_i - относительный угол закрутки крайних сечений канатов.

Величины φ_i будем считать известными. Так, например, если навеска канатов осуществляется без раскрутки концов, то $\varphi_i = 0$ для всех i . Для определения φ_i , кроме уравнения (17), запишем следующее условие. Будем исходить из предположения о том, что при перемотке канат на канатоведущем шкиве не проворачивается вокруг своей оси. Тогда, определяя θ_{i1} , из уравнений получим:

$$\theta_{i1} = \frac{1}{A_i B_i - C_i^2} \left\{ [MS - b] A_i - \left[\frac{p_i S^2}{2} + FS + a \right] C_i \right\}, \quad (17)$$

При $S=L_{il}$ имеем согласно (10) $\Theta_{il}=\varphi_{il}$, однако при изменении значения L_{il} во время движения сосудов это соотношение уже будет нарушаться и, таким образом, согласно принятому допущению об отсутствии прокрутки каната на приводном шкиве

$$\varphi_{i1} = \varphi_{i1}^{\text{нач}} + \frac{C_i}{A_i B_i - C_i^2} \left\{ \frac{p_{i1} L_{i1}}{2} [L_{i1}^{\text{нач}} - L_{i1}] \right\}, \quad (18)$$

где $\varphi_{i1}^{\text{нач}}$ – начальные углы закрутки канатов (приближенно можно считать, что $\varphi_{i1}^{\text{нач}}=0$, тогда из (2.18) следует $\varphi_i=\varphi_{i1}^{\text{нач}}$);

$L_{i1}^{\text{нач}}$ – начальные длины поднимающихся ветвей канатов.

Итак, соотношения (2), (15), (16), (17), (18) и (19) образуют систему (bn+2) уравнений относительно такого же числа неизвестных P_{iR} , L_{iR} , M_R , φ_{iR} .

Полученная система уравнений существенно отличается от аналогичных уравнений, приведенных в работе [4]. Для решения этих уравнений введем следующие обозначения:

$$P_{iR} = P_R + \delta P_{iR}; \quad P_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{iR}; \quad (19)$$

$$L_{iR} = L_R + \delta l_{iR} \quad (20)$$

причем, вначале предполагается, что L_R не равно среднему арифметическому величин L_{iR} по той причине, что в дальнейшем потребуются определение L_R с помощью специального дифференциального уравнения, решение которого не обязательно должно совпадать со средним арифметическим L_{iR} . Таким образом, пусть

$$\sum_{i=1}^n \delta L_{iR} \neq 0, \quad (21)$$

в то время как по определению (20)

$$\sum \delta P_{iR} = 0 \quad (22)$$

Из соотношения (2) с учетом (20) и (23) следует, что

$$P_R = \frac{1}{n} [\theta_R + g[H_0 - H_R]], \quad (23)$$

т.е. значения P определяется положением сосудов в стволе.

Аналогично соотношениям (20), запишем:

$$\begin{aligned} K_i &= K + \delta K_i; & K &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i; \\ A_i &= A + \delta A_i; & A &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i; \\ A_i^* &= A^* + \delta A_i^*; & A^* &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^*; \\ d_i &= d + \delta d_i; & d &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i; \\ p_i &= p + \delta p_i; & p &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i; \\ L_i &= L + \delta L_i; & L &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i; \\ C_i &= C + \delta C_i; & C &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i; \\ \varphi_{iR} &= \varphi_R + \delta \varphi_{iR}; & \varphi_R &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_{iR}; \end{aligned} \quad (24)$$

Путем подстановки (20), (21) и (24) в соотношения (16) и, пренебрегая произведениями типа $\delta P_{iR} \cdot \delta L_{iR}$, $\delta L_{iR} \cdot \delta p_{iR}$, и т.п., как величинами второго порядка малости по сравнению с каждым из сомножителей, получим:

$$\begin{aligned} \delta L_{iR} \left[1 + \frac{1}{A} (P_R + p L_R) \right] + \delta P_{iR} \frac{L_R}{A} - \delta A_i \left[\frac{2 P_R L_R + p L_R^2}{2 A^2} \right] + \delta p_i \frac{L_R^2}{2 A} - \delta C_i \varphi_R - \delta \varphi_{iR} C = \\ = H_R - L_R - \frac{1}{A} \left[P_R L_R - \frac{p L_R^2}{3} - C \varphi_R \right], \end{aligned} \quad (25)$$

То же самое сделаем с уравнениями (17), в результате чего получим:

$$\frac{dL_1}{d\varphi} + \frac{F_1}{F_0} = -\frac{d\delta L_{iR}}{d\varphi} - \frac{1}{F_0} \{ \delta R_i F_2 + \delta d_1 F_3 - \delta K_i F_4 - \delta P_{i1} F_5 - \delta P_{i2} F_6 - \delta p_i F_7 - \delta L_i F_8 - \delta A_i F_9 - \delta A_i^* F_{10} + \delta L_{i1} F_{11} - \delta C_i F_{12} - \delta \varphi_{i1} F_{13} \}, \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} F_0 &= 1 + \frac{1}{A} \left[P_1 + pL_1 - C \frac{\varphi_1}{L_1} \right] + \frac{PL_i}{2} \left[\frac{1}{A^*} - \frac{1}{A} \right]; \\ F_1 &= R + \frac{d}{2} - K \frac{P_1 + P_2 + pL}{2dR}; \quad F_2 = 1 + K \frac{P_1 + P_2 + pL}{2dR^2}; \\ F_3 &= \frac{1}{2} \left[1 + K \frac{P_1 + P_2 + pL}{d^2 R} \right]; \quad F_4 = \frac{P_1 + P_2 + pL}{2dR}; \\ F_5 &= \frac{K}{2dR} + \frac{F}{AF_0}; \quad F_6 = \frac{K}{2dR}; \quad F_7 = \frac{KL}{2dR} + \frac{L_i}{2} \left[\frac{1}{A^*} + \frac{1}{A} \right] \frac{F_1}{F_0}; \\ F_8 &= \frac{p}{2dR}; \quad F_9 = \frac{F_1}{F_0 A^2} \left[P_1 + \frac{pL_1}{2} - \frac{\varphi_1}{L_1} C \right]; \\ F_{10} &= \frac{F_1}{F_0 A^{*2}} \frac{pL_1}{2}; \quad F_{11} = \frac{F_1}{F_0} \left[\frac{p}{2} \left[\frac{1}{A^*} + \frac{1}{A} \right] + \frac{C_1 \varphi_1}{AL^2} \right]; \\ F_{12} &= \frac{F_1}{F_0} \frac{\varphi_1}{AL_1}; \quad F_{13} = \frac{F_1}{F_0} \frac{C_1}{AL_1}. \end{aligned} \quad (27)$$

В связи с тем обстоятельством, что согласно (21) в определении функции L_{i1} имеется некоторая неточность, потребуем, чтобы в (26) выполнялось условие:

$$\frac{dL_1}{d\varphi} + \frac{F_1}{F} = 0 \quad (28)$$

Тогда правые части уравнения (26) будут равны нулю, что определяет основную группу дифференциальных уравнений квазистатического состояния канатов.

Решение дифференциального уравнения (28) формально запишем в виде

$$\varphi = - \int_{L_{10}}^{L_1} \frac{dL_1 F_0}{F_1}.$$

Заметим, что в выражениях (27) для F_1 величина $p_1 + p_2 + pL = const$, и в F_0 величина $P_1 + pL_1 = const$ для полностью уравновешенной системы подъема.

По этой причине имеем

$$\varphi = \frac{2}{F_1 pL \left[\frac{1}{A^*} - \frac{1}{A} \right]} \{ F_0^2 [L_{10}] - F_0^2 [L_1] \}$$

с учетом того, что $F_1 \approx R$, $F_0 \approx L$, то интеграл для φ можно записать в виде

$$\begin{aligned} L_{10} - L_1 &= R\varphi \\ L_2 = L &= L_1 = L - L_{10} + R_4 \end{aligned} \quad (29)$$

Обратимся теперь к системе уравнений (25) и произведем суммирование по всем $i = 1, 2, \dots, n$; тогда, очевидно,

$$H_R - L_R - \frac{1}{A} \left[P_R L_R + \frac{pL_R^2}{2} \right] = \left[1 + \frac{1}{A} [P_R + pL_R] \right] \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta L_{iR}.$$

Подстановка этого выражения в (25) дает

$$\left[1 + \frac{1}{A} (P_R + pL_R) \right] [\delta L_{iR} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta L_{iR} \frac{L_R}{A} - \delta A_i \frac{2P_R L_R + pL_R^2}{2A^2} + \delta p_i \frac{L_R}{2A} - \delta C_i \varphi_R - \delta \varphi_R C] \quad (30)$$

Если здесь еще раз произвести суммирование по всем i и воспользоваться соотношениями, то получим тождество

$$\sum_{i=1}^n \delta L_{iR} = 0 \quad (31)$$

Таким образом, вместо ранее принятого соотношения (22) следует использовать (31), тогда (30) примет вид

$$D_1^{(R)} \delta L_{iR} + D_2^{(R)} \delta P_{iR} - D_3^{(R)} \delta A_1 + D_4^{(R)} \delta p_i - D_5^{(R)} \delta C_i - D_6^{(R)} \delta \varphi_{iR} = 0, \quad (32)$$

где

$$\begin{aligned} D_1^{(R)} &= 1 + \frac{1}{A} [P_R + pL_R]; \quad D_2^{(R)} = \frac{L_R}{A}, \\ D_3^{(R)} &= \frac{2P_R L_R + pL_R^2}{2A^2}; \quad D_4^{(R)} = \frac{L_R^2}{2A}, \\ D_5^{(R)} &= \frac{2P_R L_R + pL_R^2}{2A^2}; \quad D_6^{(R)} = C. \end{aligned} \quad (33)$$

Подстановка (28) в систему (26) дает следующую систему уравнений:

$$\frac{d\delta L_{i1}}{d\varphi} = -\frac{1}{F_0} \left\{ \begin{aligned} &\delta R_i F_2 + \delta d_i F_3 - \delta K_i F_4 - \delta P_{i1} F_5 - \delta P_{i2} F_6 - \delta p_i F_7 - \delta L_i F_8 - \delta A_i F_9 - \delta A_i^* \\ &F_{10} - \delta L_{i1} F_{11} - \delta C_i F_{12} - \delta \varphi_{i1} F_{13} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Решение дифференциальных уравнений (33) позволяет вычислить согласно (32) величины δP_R и определить характер распределения нагрузок в набегающей и сбегающей ветвях канатов. Полное решение полученных уравнений и составит предмет дальнейших исследований.

Решение полученных дифференциальных уравнений позволяет вычислить величины... и определить характер распределения нагрузок в набегающей и сбегающей ветвях канатов шахтной многоканатной подземной машине. Полное решение и составит предмет дальнейших исследований.

Список литературы: 1. Попов, Ю. В. Основные закономерности поведения струны каната при наземном расположении многоканатных подъёмных машин / Ю. В. Попов, В. В. Неволин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 8. – С. 112–125. 2. Смирнов, А. А. Повышение надёжности шахтных подъёмных установок за счёт оптимизации распределения нагрузок в канатах / А. А. Смирнов, Д. Е. Ковалёв // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 4. – С. 45–51. 3. Иванов, П. С. Анализ динамических нагрузок в многоканатных подъёмных установках при проскальзывании канатов / П. С. Иванов, М. В. Петров // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 12. – С. 67–73. 4. Николаев, В. Г. Современные методы расчёта упругодеформированного состояния стальных канатов / В. Г. Николаев // Вестник горного машиностроения. – 2024. – № 2. – С. 33–40.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОСИСТЕМЕ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ ПРИ ПЕРЕДВИЖЕНИИ СЕКЦИЙ

Зензеров В. И. (ДГУЮ, г. Донецк, ДНР, Россия)
Тел. +79493349179; E-mail: mpvik56@mail.ru

В работе рассмотрены теоретические аспекты динамических процессов, возникающих в гидросистемах механизированных крепей очистных забоев. Проанализированы основные факторы, вызывающие нестационарные режимы течения рабочей жидкости при передвижении секций крепи. Представлена математическая модель, описывающая волновые процессы и гидравлические удары в напорных магистралях. Выявлены зависимости между скоростью перемещения гидростоек, инерционностью запорно-распределительной аппаратуры и амплитудой пульсаций давления. Даны рекомендации по демпфированию переходных процессов.

Ключевые слова: механизированная крепь, гидросистема, передвижение секции, динамические процессы, гидравлический удар, переходные режимы, математическое моделирование.

The paper discusses the theoretical aspects of dynamic processes occurring in the hydraulic systems of mechanized roof supports in mine faces. The main factors causing non-stationary flow regimes of the working fluid during the movement of the support sections are analyzed. A mathematical model describing wave processes and hydraulic shocks in pressure lines is presented. The relationships between the speed of movement of the hydraulic supports, the inertia of the shut-off and distribution equipment, and the amplitude of pressure pulsations are identified. Recommendations for damping transient processes are provided.

Key word: mechanized support, hydraulic system, section movement, dynamic processes, hydraulic shock, transient modes, and mathematical modeling.

Актуальность работы: Одним из важнейших теоретических исследований динамических процессов в гидросистеме механизированной крепи при передвижении секций обусловлена острой практической потребностью в создании научно обоснованных методов прогнозирования и демпфирования переходных режимов. В этой связи тема статьи является актуальной.

Цель работы – создание такой модели, позволяющей прогнозировать амплитуды и частоты колебаний давления, выявлять условия резонанса и формулировать конструктивные и режимные рекомендации. В следующих публикациях авторы представят математическую постановку задачи, результаты численного моделирования и сравнение с экспериментальными данными, полученными на шахтах Кузбасса.

Основное содержание работы. Механизированные крепи являются ключевым элементом оборудования очистных забоев угольных шахт. Эффективность и безопасность отработки пластов напрямую зависят от надежности работы гидросистемы крепи, которая обеспечивает распор стоек, передвижку секций и управление кровлей. Наиболее ответственным и динамически нагруженным этапом цикла является передвижение секции крепи вслед за выемочным комбайном. В этот момент происходят резкие переключения потоков рабочей жидкости, закрытие и открытие гидрораспределителей, а также изменение нагрузок на гидростойки.

Динамические процессы в гидросистеме — это быстропротекающие переходные режимы, характеризующиеся значительными колебаниями давления, расхода и скорости движения рабочих органов. При передвижении секции эти процессы могут приводить к нежелательным явлениям: гидравлическим ударам, вибрации рукавов высокой прочности, преждевременному выходу из строя уплотнений и ложным срабатываниям предохранительных клапанов.

До настоящего времени большинство инженерных методик базировались на статическом расчете параметров гидросистемы. Однако динамика процессов при передвижении секции оказывает существенное влияние на цикл работы всей лавы. Целью данной работы является теоретический анализ причин возникновения и закономерностей протекания динамических процессов в гидросистеме механизированной крепи при передвижении секций, а также построение математической модели для оценки амплитудно-частотных характеристик колебаний давления.

Анализ динамических нагрузок при передвижении секции

Процесс передвижения секции механизированной крепи включает несколько последовательных операций: распор-разгрузка стоек (сброс давления в сливную магистраль), подтягивание секции к конвейеру гидродомкратом подачи, восстановление распора. Каждая из этих операций сопровождается резким изменением гидравлического сопротивления в системе.

Основными источниками динамических нагрузок являются:

1. Быстрое закрытие и открытие золотников распределителей. При переключении секционного распределителя за время $\Delta t \approx 0.05 \dots 0.1$ с происходит полное изменение площади проходного сечения. Это вызывает разрыв потока и формирование волны давления.

2. Срабатывание предохранительной и обратной гидроаппаратуры. При разгрузке стоек происходит мгновенный сброс жидкости из полостей стоек в сливной коллектор, что генерирует обратную волну разрежения.

3. Инерционность подвижных масс секции крепи. Масса секции (до 15–20 т) при ее подтягивании создает инерционную нагрузку на гидроцилиндр подачи, которая передается в гидромагистраль.

Особую опасность представляет явление гидравлического удара, когда кинетическая энергия движущейся жидкости преобразуется в энергию сжатия при внезапной остановке потока. По классической теории Н.Е. Жуковского, повышение давления при прямом гидроударе составляет:

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta V \quad (1)$$

где ρ — плотность рабочей жидкости (эмульсии), кг/м³; a — скорость распространения ударной волны, м/с; ΔV — изменение скорости потока, м/с.

В гидросистемах крепей, использующих водомасляную эмульсию с большим содержанием воды ($\rho \approx 1000$ кг/м³), скорость звука a составляет около 1000–1200 м/с (с учетом упругости рукавов высокого давления). Даже при скорости потока 2 м/с и мгновенном перекрытии канала повышение давления может достигать 2–2.4 МПа, что при номинальном давлении насосной станции 20–25 МПа создает дополнительные пиковые нагрузки до 40–50% от рабочего давления.

В реальных условиях передвижения секции гидравлический удар является непрямым, так как запорный элемент перекрывается не мгновенно. Время закрытия золотника $t_{\text{закр}}/t_{\text{закр}}$ сопоставимо с фазой волнового цикла $\tau = 2L/a$, где L — длина питающей магистрали от насосной станции до секции. При длине лавы 250–300 м вре-

мя $\tau \approx 0.5$ с. Поскольку $t_{закр} < \tau$, гидравлический удар приближается к прямому, что требует учета при проектировании.

Математическое моделирование переходных процессов

Для адекватного описания динамики гидросистемы при передвижении секции необходимо рассмотреть систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих неустановившееся течение вязкой сжимаемой жидкости в упругом трубопроводе.

Система уравнений гидравлического удара (уравнения движения и неразрывности) имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\lambda V |V|}{2gD} &= 0 \\ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} &= 0\end{aligned}\quad (2)$$

где H — пьезометрический напор, м; V — средняя скорость потока, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; D — диаметр трубопровода, м; λ — коэффициент гидравлического трения.

Граничные условия для гидросистемы секции при передвижении задаются характеристиками распределителя. Зависимость расхода от перепада давления на золотнике:

$$Q = \mu f(x) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (3)$$

где $f(x)$ — текущая площадь проходного сечения, зависящая от перемещения золотника $x(t)$; μ — коэффициент расхода.

Решение системы проводится методом характеристик. На практике для расчета динамики секции крепи удобно использовать сосредоточенные параметры, аппроксимируя гидромагистраль «звеном инерционно-емкостного сопротивления». В этом случае динамика давления $P(t)$ в напорной линии описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2 P}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{dP}{dt} + \omega_0^2 P = \omega_0^2 P_{\text{нас}} + k \frac{dQ_{\text{потр}}}{dt} \quad (4)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{E_{\text{уп}}}{\rho L^2}}$ — собственная частота системы (зависит от приведенного модуля упругости $E_{\text{уп}}$ рукава и жидкости); ξ — коэффициент демпфирования, определяемый гидравлическими потерями; $Q_{\text{потр}}$ — расход, потребляемый секцией при передвижении.

Анализ полученного уравнения показывает, что при передвижении секции, когда $Q_{\text{потр}}$ изменяется ступенчато (например, включение домкрата подачи), возникает переходный процесс с колебаниями давления. Частота колебаний для магистрали длиной 300 м составляет 3–5 Гц, что подтверждает известные экспериментальные данные о пульсациях давления в лавных трубопроводах. Затухание колебаний определяется демпфирующей способностью рукавов (их податливостью) и наличием не сливных шумоглушителей.

Анализ влияния параметров гидроаппаратуры на динамику.

Теоретические исследования позволили выявить ключевые параметры, определяющие интенсивность динамических процессов при передвижении секции.

Влияние быстродействия распределителя. Чем меньше время переключения золотника, тем выше скорость изменения расхода (производная dQ/dt) и, как следствие, выше амплитуда ударной волны. Для снижения динамических нагрузок целесообразно использовать распределители с регулируемым временем открытия (плавный пуск), однако увеличение времени переключения свыше 0.2 с снижает темп передвижения секции.

Влияние длины и диаметра рукавов. С увеличением длины магистрали LL растет время фазы $\tau\tau$, что при неизменном $t_{закр}/t_{закр}$ приводит к переходу от прямого к непрямоу удару и снижению пикового давления. Однако длинные магистрали увеличивают инерционность системы и могут вызывать низкочастотные автоколебания. Оптимальным является диаметр рукава, обеспечивающий скорость потока $V \leq 3 \text{ м/с}$.

Роль воздуха в рабочей жидкости. Присутствие нерастворенного воздуха (эмульсия может содержать до 5–10% воздуха) резко снижает эффективный модуль упругости смеси $E_{см}$. Это уменьшает скорость звука a и, соответственно, амплитуду гидравлического удара. Однако при повышении давления воздух растворяется, и модуль упругости возрастает, что может вызвать дополнительный резонансный пик. Поэтому для механизированных крепей рекомендуется поддерживать содержание воздуха не более 2%.

Инерционность гидростоек при разгрузке. При передвижении секции сначала происходит разгрузка стоек в сливную линию. Динамика этого процесса описывается уравнением истечения из полости переменного объема. Скорость падения давления в стойке не должна превышать 30–40 МПа/с, иначе возникает кавитационный разрыв потока, приводящий к эрозии золотников.

Заключение. Выполненные теоретические исследования динамических процессов в гидросистеме механизированной крепи при передвижении секций позволяют сделать следующие выводы:

1. Основными источниками динамических нагрузок являются гидравлические удары, вызванные резким перекрытием потока распределителями, и волновые процессы в длинных напорных магистралях.

2. Предложена математическая модель переходных процессов, основанная на уравнениях гидравлического удара Н.Е. Жуковского и дополненная граничными условиями, учитывающими характеристики золотникового распределителя и гидростоек.

3. Установлено, что частота колебаний давления в системе при передвижении секции лежит в диапазоне 3–5 Гц, а амплитуда пиковых давлений может превышать номинальное рабочее давление на 40–50% при времени переключения распределителя менее 0.1 с.

4. Для демпфирования динамических процессов рекомендовано: увеличение времени переключения распределителя до 0.15–0.2 с, применение рукавов с повышенной податливостью (металлорукава с полимерным сердечником) и поддержание оптимального воздуходождения в эмульсии.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание численных моделей с распределенными параметрами для конкретных схем гидрофикации очистных забоев с учетом одновременной работы нескольких секций крепи.

Список литературы: 1. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. — М.: Гостехиздат, 1949. — 104 с. 2. Чугаев Р.Р. Гидравлика. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 672 с. 3. Колесников К.Е. Механизированные крепи очистных забоев. — М.: Недра, 2019. — 320 с. 4. Попов В.П., Шундрин Д.Е. Динамика гидрофицированных систем горных машин // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 4. — С. 28–34. 5. International Journal of Mining Science. Vol. 56. — Elsevier, 2023. — P. 112–125.

ИННОВАЦИОННАЯ СТРАТЕГИЯ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА В ОПАСНЫХ ПО ГАЗУ И ВЗРЫВАМ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Калякин С. А., Мороз О. К., Мороз Т. О. (ДонНТУ, НИИ РЕСПИРАТОР, г. Донецк, Россия)

Тел.: +7 949 4590253

В работе предложена новая стратегия обеспечения безопасности труда в шахтах на основе инновационных научнообоснованных принципов взрывобезопасности, учитывающих чрезвычайную опасность в условиях современного высокопроизводительного горного производства повышенной опасности и человеческий фактор. Приведены результаты натурных исследований процесса разрушения горных пород шпуровыми зарядами невзрывчатых разрушающих веществ в условиях подземных горных выработок при разрушении негабаритных блоков пород и ведении подрывки пород почвы, представленных прочными песчаниками.

Ключевые слова: взрывоопасная среда, взрывозащита, горючие газы, пирофорность наночастиц, угольная пыль, взрывобезопасность. невзрывчатое разрушающее вещество

The new ideology of work safety in mines on base of no explosiveness principles taking into account the emergency danger of mine industry on big depth and human factor, inexplusive destroying matters was proposed in this article.

Key words: explosive surrounding, protection of explosions, combustible gases, pyrophorhness of nanodust, coal dust, particles nonexplosiveness. destruction, mountain making, rock

Введение. За последние годы (в угольной промышленности целого ряда стран и каменноугольных бассейнов (Польша, США, Россия, Казахстан, Китай, Донбасс, Кузбасс, Рур, Силезия) произошли крупные катастрофы в результате взрывов газа метана. Эти аварии сопровождались многочисленными жертвами, а их масштабы вызвали социальные потрясения в угольной отрасли. Состояние и проблемы безопасности труда в угольных шахтах даны в работах [1, 2].

С 2005 по 2014 гг. в угольных шахтах Донбасса произошли 14 взрывов газа и угольной пыли, 139 экзогенных и 46 эндогенных пожаров, 564 газодинамических явления (ГДЯ), 157 завалов и 7 затоплений действующих горных выработок. Общий смертельный травматизм в угольной промышленности Украины составил в среднем около 2,5 чел. на 1 млн. тонн добычи угля. Групповой травматизм шахтеров со смертельным исходом в связи с авариями при взрывах газа и пыли, газодинамических явлениях и пожарах составляет 28,2% от общего числа погибших в угольных шахтах. На рис.1 показана структура травматизма по факторам, приводящим к смерти людей в угольных шахтах.

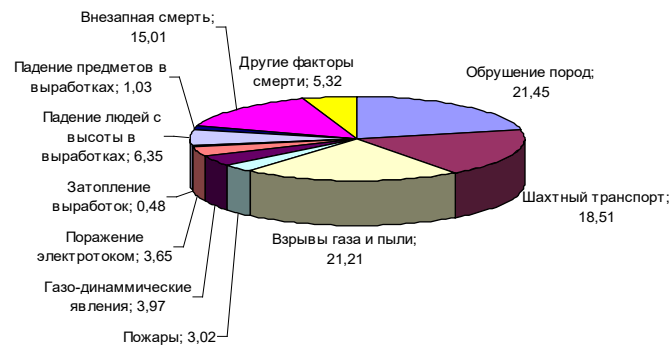


Рис. 1. Структура смертельного травматизма (%) в угольных шахтах

Таким образом, в связи со сложившимся положением на угольных шахтах необходимо максимально эффективное разрешение проблемы взрывобезопасности в горных выработках[1].

Анализ последних исследований показал, что взрывобезопасность производственных процессов в очистных и подготовительных участках угольных шахт не всегда соответствует стандартам по технике безопасности труда. Взрывобезопасность в угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли в настоящее время обеспечивается взрывопреупреждением, взрывозащитой и организационно-техническими мероприятиями. Вместе с тем, возникновение аварий на угольных шахтах, как правило, связано с нарушением целого комплекса защитных мероприятий, в результате чего происходит образование взрывоопасной среды, возникает источник ее воспламенения, а применяемая система взрывозащиты не всегда способна локализовать и предотвратить взрыв. Во многом это связано с производственной деятельностью человека вследствие ошибочных действий, происходящих при высоком ритме работы в сложных условиях труда на большой глубине шахт. Установлено, что при авариях с групповыми несчастными случаями удельный вес ошибочных действий людей, приводящих к катастрофам, составлял более 90% по сравнению с другими факторами. Поэтому человеческий фактор играет ключевую роль в системе обеспечения безопасности работ в угольных шахтах. Принятая сегодня идеология безопасности труда в угольных шахтах, опасных по газу и пыли базируется на администрировании и ужесточении мер воздействия на работающих в шахтах людей, вместо того, чтобы создавать технологии, обеспечивающие предотвращение техническими средствами ошибочных действий рабочих.

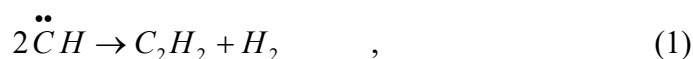
Целью работы является формирование научнообоснованных инновационных подходов в создании стратегии безопасности труда в угольных шахтах, опасных по газу и пыли на основе использования безопасных средств и технологических решений, предотвращающих аварии и, в том числе, взрывы газа и угольной пыли.

Материалы исследований. Изменения в принципиальных подходах к обеспечению безопасности в горном производстве функционально взаимосвязаны с трансформацией производственных отношений в угольной отрасли в силу сложившихся политико-экономических отношений в обществе. Частная форма собственности на средства производства обострила противоречия между интересами собственника шахты и потребностями шахтеров в охране труда. Производственные интересы собственников шахт ориентированы на получение прибыли, а выполнение требований безопасности они прагматично относят к администрированию и предписаниям, налагаемым на горнорабочих. Однако интенсификация горного производства, возрастание угроз природного и техногенного характера практически нивелируют систему организационных, технических и профилактических мероприятий, направленных на безопасность труда.

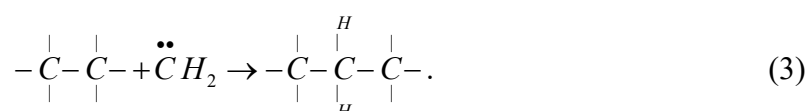
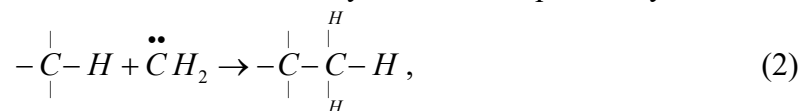
Несоответствие между желаемым и действительным усугубляется, тем что собственники шахт закупают лишь минимально необходимое, и не всегда достаточное, количество оборудования и средств личной защиты, и реальная эффективность этих средств определяется, в основном, организационно-человеческим фактором. Самые крупные катастрофы на угольных шахтах происходят именно на наиболее производительных шахтах им. А.Ф. Засядько, «Ульяновская», «Распадская». Интенсификация горного производства приводит к вынужденным, в условия интенсивного производства, ошибочным и непрофессиональным действиям шахтеров в сложных, иногда не соответствующих нормальному функционированию рабочего условиях труда. Это указывает на то, что администрированием и организационно-техническими мероприятиями всегда проблему безопасности труда в угольных шахтах не решить. Требуются серьезные финансовые вложения в развитие горной науки и разработку технологических средств автоматической взрывозащиты шахт. Это связано с тем, что основные требования безопасности труда в угольных шахтах могут быть выполнены только в случае обязательного применения научно-обоснованных обеспечивающих максимальный уровень безопасности технических средств защиты и современных, перспективных технологий добычи угля, проведения выработок и т.д. Эти решения призваны максимально исключить человеческий фактор из числа влияющих на безопасность производственного процесса. Рассмотрим, на чем должна базироваться идеология, которая поможет решить проблему взрывобезопасности в угольных шахтах.

При ведении горных работ выделение метана в выработки и образование мелко-дисперсной угольной пыли связаны с разрушением газоносных угольных пластов. Последние исследования [1, 2, 3,] показали, что процессы генерации метана и других горючих газов при разрушении угля связаны с механохимическим разложением органического углеводородного угольного вещества, состоящего из макромолекул. Макромолекулы углей, образованных на определенных стадиях метаморфизма, могут легко разрушаться и генерировать предельные и непредельные углеводороды (CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2), водород, оксид углерода и наночастицы углерода. Наночастицы углерода обладают большой поверхностной энергией, легко вызывают в продуктах разложения угольного вещества цепные реакции, в результате которых происходит образование большого числа промежуточных продуктов, из которых наиболее устойчивым является метилен $\ddot{\text{C}}\text{H}_2$. Метилен представляет собой очень активный радикал, легко вступающий в химические реакции. В зонах метастабильного состояния угольного вещества возможно протекание следующих химических реакций с участием метилена:

– образование взрывоопасного ацетилена:



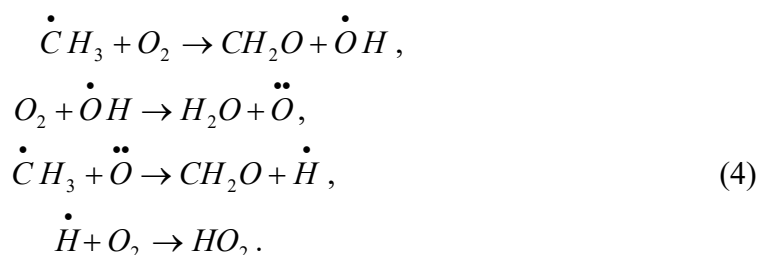
– «реакции внедрения» по связи С – Н и С – С в угольных макромолекулах:



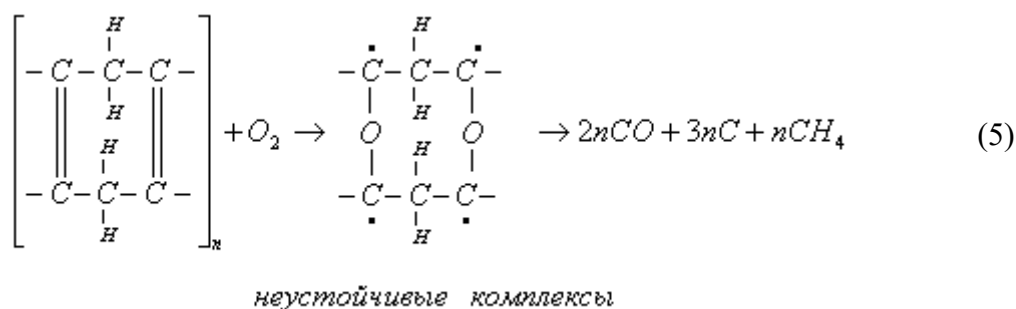
По реакции (1) образуются крайне опасные горючие газы – водород и ацетилен. Водород легко воспламеняется, а его смесь с воздухом детонирует при концентрации водорода 15...63,5%. Ацетилен – одно из самых мощных химических взрывчатых веществ. По удельной энергии взрыва и способности к детонации он превосходит печально известный нитроглицерин. Ацетилен нестабилен, при сравнительно невысоких

температуре (около 330⁰С) и давлении (0,2 МПа) самопроизвольно детонирует. Для его взрывчатого разложения не нужен кислород воздуха. Поэтому в зоне саморазложения угольного вещества при накоплении ацетилен до концентрации 2,1% можно ожидать спонтанный взрыв ацетилен-метан-водородной смеси без участия в этом процессе каких-либо дополнительных источников инициирования детонации.

Реакции (2) и (3), протекающие в угольном веществе при его механоактивации, приводят к образованию «активного» угольного вещества, способного самопроизвольно разлагаться и воспламеняться. Образование в макромолекулах угля метильных групп – CH₃ приводит к тому, что при разрушении угольного вещества происходит генерация в продукты его распада метил-радикала $\dot{C}H_3$. Он легко вступает в цепные реакции с кислородом воздуха:



Далее сложный радикал, распадаясь: $HO_2 \rightarrow \ddot{O} + \dot{O}H$, приводит к разветвлению цепей, которые обеспечивают интенсивное окисление продуктов распада угля в газовой фазе. Это приводит к выделению тепла и интенсивному разогреванию угля, что вызывает его самовоспламенение. Реакция (3) обеспечивает перестройку макромолекул угля в графеновые комплексы, которые образуют газовые клатраты. Они устойчивы только при высоком давлении в зонах напряженного состояния горного массива. При разрушении угля, изменении горного давления и ГДЯ клатраты распадаются, а образующиеся графены химически очень активны. Они могут вступать в реакции с кислородом, находящимся даже в массе угля, образуя метастабильные комплексы, легко распадающиеся с выделением большого количества горючих газов, создающих взрывоопасные смеси с воздухом. Например:



В результате разрушения угольного вещества образуются продукты распада, которые создают с воздухом взрывоопасные смеси. Мелкодисперсная пыль из такого модифицированного угля реакционноспособна по отношению к кислороду и обладает пирофорностью. Наличие ацетилена в продуктах распада угольного вещества и пирофорность мелкодисперсной пыли (нанопыль) снимают вопрос об источниках воспламенения. Становится очевидным, что в определенных условиях горных работ горючие газы, генерируемые углем, могут самовоспламеняться, а наночастицы пыли при движении в потоке воздуха самовозгораться. При такой опасности горных работ трудно требовать от людей, их осуществляющих, каких-либо превентивных мер по борьбе с процессами механохимической активации угольного вещества и обеспечению безопасности работ.

На больших глубинах при высокой температуре и интенсивной технологии работ состояние человека не адекватно его нормальному поведению на поверхности. Создающееся психофизиологическое состояние человека настолько отрицательно, что требовать от него выполнения каких-либо сложных, четко продуманных действий не возможно. Поэтому требуется совершенно новая система обеспечения безопасности труда в угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли. В ее основу необходимо положить обязательное выполнение следующих принципов обеспечения взрывобезопасности угольных шахт:

- постоянный надежный мониторинг взрыво- и пожароопасности ситуации при технологических процессах;
- обеспечение безопасности в шахте как функция предупредительной сигнализации наличия горючих газов и их состава в горной выработке и выработанном пространстве;
- обеспечение безопасности в шахте как функция предупредительной сигнализации наличия источников воспламенения горючих газов и угольной пыли в выработке и выработанном пространстве;
- обеспечение безопасности в шахте как функция контроля напряженного состояния горного массива и предупредительная сигнализация вероятности возникновения ГДЯ.

Анализ причин аварий в угольных шахтах показал, что 80% воспламенений метана происходит в тупиковых подготовительных горных выработках и очистных забоях. На этих технологических участках угольных шахт для разрушения вмещающих горных пород и угля применяют, там, где это возможно, механический способ с помощью угольных и проходческих комбайнов. В остальных случаях буровзрывной способ, использующий для разрушения горных пород и угля энергию взрыва. Механизированный комплекс оборудования для разрушения горных пород и угля состоит из очистных и проходческих комбайнов, механизированной крепи, конвейеров, высоковольтного электрооборудования. Он характеризуется высокой стоимостью и производительностью, потребляет много электроэнергии, требует постоянного обслуживания и поддержания его в соответствующем техническом состоянии. Безопасные во взрывоопасной среде горные машины и электропривод для них создать не удастся.

Для их применений требуются надежные системы взрывозащиты, что не всегда в полной мере обеспечивается по целому ряду причин, из которых необходимо выделить основные:

- система взрывозащиты органически не вписывается в технологию рабочего процесса и не является неотъемлемой частью механизмов;
- не обеспечивается постоянный мониторинг уровня взрывоопасности атмосферы, состояния горного массива в рабочей зоне и превентивные меры борьбы с взрывами горючих газов на стадии их образования и воспламенения (взрывопреупреждение).

В остальных случаях, до последнего времени, используется буровзрывной, более простой способ разрушения (БВР), использующий энергию взрыва, мобильный, менее энергозатратный и дешевый. Опыт разработки безопасных средств и способов взрывания для БВР показал, что можно создать высокопредохранительные взрывчатые вещества и средства взрывания, которые могут применяться в опасных по газу и взрывам пыли условиях угольных шахт.

В практике подземной разработки полезных ископаемых и подземного строительства, в основном как отмечалось выше, применяют буровзрывной способ разрушения горных пород. 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 недостат-

ков разработаны специальные способы мягкого взрывания и различные конструкции шпуровых зарядов. Например способ мягкого взрывания с помощью пластиковых зарядов [4] (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 (1500 кДж/кг) при скорости детонации 1800 м/с. Одним из их главных конкурентов БВР, лишенным многих перечисленных недостатков, является способ разрушения при помощи невзрывчатых разрушающих составов (НРС) типа НРВ-80, НРС-1 (Россия), Bristar (Япония) и др.

Актуальность вопроса определяется необходимостью разрушения горных пород в условиях выработок с насыщенной метаном исходящей струей воздуха. 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. Разработанные авторами параметры технологии невзрывного разрушения обеспечивают минимальное время разрушения горных пород и учитывают особенности работы НРС в условиях подземных горных выработок при относительно высокой температуре пород.

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. После этого в пробуренные шпуры заливают приготовленный раствор невзрывчатого разрушающего состава на глубину равную 0,7-0,9 длины шпура.

В качестве рабочего агента применялся модифицированный НРС содержащий безводный карбонат натрия 4 мас. %, сульфитно-дрожжевую барду 1 мас. %, натриевую соль продукта конденсации нафталинсульфоокислоты 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 [4] 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} , $P(t^*)$:

$$L_{mp} = \frac{P^2(t^*) r_0^2 E_m}{2(k_{lc})^2 E_{НРС}} \quad (6)$$

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, $(\sqrt{м})$.

Шахтные исследования и приемочные испытания предлагаемых рекомендаций осуществлялись в 3 западном конвейерном штреке пл. к8 шахты «Щегловская-Глубокая». Так для шахты «Щегловская-Глубокая» одним из актуальных вопросов является необходимость ведения подрывки пород почвы, представленной прочным пес-

чаником 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 в условиях исходящей вентиляционной струи. Для этих условий авторами статьи были разработаны рекомендации по проведению подрывки прочных пород почвы способом ее невзрывного разрушения при помощи НРС. Почва пласта на экспериментальном участке была представлена песчаником крепостью $f = 6-10$ по шкале проф. М.М. Протодяконова.

На втором этапе предлагаемый способ разрушения был испытан для и при подрывке пород почвы, когда породы имели только две свободные плоскости температура пород составляла 26°C .

После прекращения разрушения пород, через 6 часов после начала эксперимента, массив был расслоен пластинками песчаника, после чего была возможна уборка разрушенной породы вручную.

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать вывод о работоспособности предложенного способа невзрывного разрушения горных пород. При этом время разрушения монолитных блоков составляет 4-8 часов. 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 на шахтах опасных по взрывам метана и угольной пыли.

Основываясь на представленных результатах исследований факторов в основном определяющих уровень взрыво и пожаро опасности в подземных горных выработках необходима реализация следующих факторов:

- взрывопреупреждение взрывов горючих газов, борьба с самовозгоранием угля и пирофорностью наночастиц угольной пыли;
 - создание многофункциональной ингибиторной среды в горных выработках;
 - принудительные инертизация и флегматизация выработанного пространства;
 - расширение области применения абсолютно взрывобезопасного беспламенного невзрывчатого способа разрушения (НРС)
 - предварительная дегазация угольных пластов;
 - по данным телеметрического контроля автоматическое превентивное создание предохранительной среды в сети горных выработок и выработанном пространстве;
 - предварительное гидронасыщение угольных пластов перед их выемкой.
- А также в сочетании с взрывозащита технологических процессов:
- гидровзрывание и применение высокопредохранительных ВВ при взрывных работах для разрушения горных пород;
 - утилизация угольной пыли в выработках, ее смыв и перевод в невзрывчатое состояние;
 - автоматические взрывопреградительные заслоны в рабочих зонах при добыче угля и проведении выработок;
 - ингибирование процесса самовоспламенения угля в пластах, целиках, выработанном пространстве.

4. Локализация поражающего действия взрыва и горения угля:

- ловушки для ударных и детонационных волн в выработках;
- противопожарное экранирование выработок и участков выработанного пространства;
- противовыбросными экранами при ГДЯ.

Новый уровень принципов обеспечения взрыво- и пожаробезопасности в выработках угольных шахт состоит в том, что они должны формировать систему, в которой средства взаимосвязаны и действие их строго синхронизировано во времени и про-

странстве. Это необходимо по двум важным причинам. Первая – необходимо создать полноценный рабочий процесс, который бы прерывался только в случае реальной опасности взрыва или пожара. Вторая – эффективность предотвращения взрыва, пожара и спасения людей на опасном участке шахты. Для выполнения безопасности работ необходимо, чтобы мониторинг взрыво- и пожароопасности был взаимосвязан с взрывопредупреждением при технологическом процессе работ. Это достигается обработкой телеметрических данных датчиков и при необходимости выдачей сигнала на включение систем, обеспечивающих ингибирование и флегматизацию среды в выработках и выработанном пространстве. Аналогично должны быть связаны взрывозащита в выработках и локализация в них действия опасных факторов взрыва и пожара. Очевидно, что погасить пожар и предотвратить распространение взрыва горючих газов – это только часть ликвидации опасной ситуации, другая часть заключается в необходимости спасения людей, их защиты от действия ударных волн, высокой температуры и токсичных газов продуктов взрыва.

Заключение:

1. Установлено, что при авариях с групповыми несчастными случаями (взрывы, пожары, выбросы газа) основным фактором, приводящим к катастрофе, является человеческий фактор в силу крайне неблагоприятного психофизиологического состояния человека при интенсивном труде на большой глубине шахт.

2. Разрушение угольного вещества приводит к генерации опасных горючих газов и образованию мелкодисперсной угольной пыли (наночастицы). Наличие в продуктах разложения угля ацетилена и образование активного угля в виде наночастиц делают возможным самовоспламенение взрывоопасной смеси метана и пыли с воздухом.

3. Опасность горного производства на большой глубине угольных шахт можно ликвидировать только применением безопасных средств и способов разрушения угля и пород при проведении выработок и добыче угля.

4. Предложена новая стратегия безопасности труда в угольных шахтах на основе инновационных принципов взрывобезопасности, которые формируют средства мониторинга взрывоопасной ситуации, взрывопредупреждения, взрывозащиты и локализации действия опасных факторов взрыва и пожара.

5. Достижение взрывобезопасности угольных шахт требует взаимосвязи средств мониторинга взрыво- и пожароопасности и систем взрывопредупреждения, а взрывозащита в выработке должна сочетаться с локализацией действия опасных факторов взрыва и пожара на людей.

Список литература: 1. Кашуба О.И. Анализ причин травматизма на шахтах Украины / О.И. Кашуба, Н.Б. Левкин, Е.А. Спиридонов, М.С. Ковчужный // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2008. – С. 172-177. 2. Калякин С.А. Механизм образования взрывоопасной среды и ее детонации в зонах метастабильного состояния угольного вещества / Калякин С.А. // Вести Донецкого горного института. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – Ч. 2. – С. 27-34. 3. Prof.Kaliakin S.A., prof. Moroz O.K., prof. Bulgakov J.F. Nebezpeci vzniku vybuchu a požaru uhli a vrstev nanocastic uhelneho prachu v sachtach/ Kaliakin S.A. // Zbornik prednasek mezinarodne conference «Ryzika nebezpeci vybuchu, požaru a prevence» - Malenovice: VVUU-Radvanice, 2018.- С.68-80. 4. Мороз О. К. Исследование механизма разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими составами как средства повышения безопасности подземных горных работ/ О.К. Мороз, Сахно И. Н., Мороз Т.О. // Научный вестник НИИ «Респиратор». – Донецк, 2023. – № 2(60). – 122 с. (стр.66-75), Россия.

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Кардаполова М. А., Косякова И. М., Криуша С. М., Кавальчук О. Н. (БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)
Тел./Факс: +375 (17) 3573058; E-mail: scvdmed@bntu.by

В статье рассмотрен анализ возможностей формирования наноструктурированных поверхностных слоев на конструкционных сталях методом лазерного легирования из обмазок. Технология позволяет использовать недорогие конструкционные стали для изготовления и восстановления деталей, работающих в условиях абразивного износа и циклических нагрузок, что экономически целесообразно в машиностроении и смежных отраслях.

The article discusses the analysis of the possibilities of forming nanostructured surface layers on structural steels by laser alloying from coatings. This technology allows the use of inexpensive structural steels for the production and restoration of parts that operate under conditions of abrasive wear and cyclic loads, which is economically feasible in mechanical engineering and related industries.

Технологии получения наноструктурированного покрытий с варьируемыми физико-механическими свойствами и заданными эксплуатационными характеристиками является востребованными, но в то же время наименее изученными. Наноструктурированное покрытие характеризуется наличием структурных элементов (зерён, волокон, фаз) размером от 1 до 100 нанометров. Именно этот размерный диапазон оказывает значительное влияние на механические и физические свойства покрытия. Благодаря квантовым и межфазным эффектам наноструктуры обеспечивают повышенную твёрдость, износостойкость, коррозионную устойчивость, что делает их важными для различных отраслей машиностроения [1]. Наноструктурированные покрытия используются для защиты поверхностей от коррозии и износа, а также для повышения долговечности изделий [2].

К существующим типам наноструктурированного покрытия, различающихся по составу, структуре и способам формирования можно отнести металлические нанопокртия. В таких покрытиях тонкие слои металлов с нанокристаллической структурой, обеспечивающие высокую прочность и электропроводность. Выбор конкретного типа покрытия определяется требованиями к эксплуатации, материалу основы и условиям окружающей среды [3].

Принцип действия наноструктурированных покрытий основан на нескольких ключевых моментах:

- уменьшение размера зерен: увеличение границ зерен способствует замедлению движения дислокаций, что повышает прочность покрытия.
- изменение микроструктуры: внедрение наноструктурированных фаз улучшает связность материала и препятствует развитию дефектов.
- композиционные эффекты: многокомпонентные покрытия могут сочетать в себе лучшие свойства всех составляющих элементов.

В результате наносимые нанопокрyтия формируют твердый и износостойкий барьер, который значительно увеличивает долговечность изделия.

Формирование наноструктурированного слоя может осуществляться различными методами. Рассмотрим возможности создания наноструктурированных покрытий методом лазерного легирования из обмазок.

К существенным преимуществам лазерного легирования можно отнести следующее:

- минимальные потери легирующих элементов, так как весь материал обмазки вовлекается в процесс формирования ванны расплава, в отличие от газопорошковой подачи, где значительная часть порошка может отражаться от поверхности либо уноситься потоком газа;
- легирующая обмазка обеспечивает строго дозированное количество элементов на единицу площади, что гарантирует однородность химического состава по длине шва;
- отпадает необходимость использования газотермического напыления;
- возможность введения в обмазку трудно дисперсируемых порошков из-за формы и плотности;

Создание современных перспективных материалов конструкционного назначения путем обработки концентрированными потоками энергии, позволяющие формировать оптимальные структурно-фазовые состояния в поверхностных слоях. Получение высоких эксплуатационных свойств изделий достигается путём образования многофазных поверхностных слоёв с нано- и субмикрoкристаллической структурой при облучении ее импульсным интенсивным электронным пучком. Результаты исследований поверхностного слоя стали, демонстрируют формирование нанофазной структуры в ходе комплексной обработки [4].

Применение легирующих обмазок в сочетании с лазерной обработкой является экономически выгодным способом упрочнения. Такое покрытие по физико-механическим и эксплуатационным характеристикам не уступает использованию дорогих порошковых материалов.

При выборе составов легирующих компонентов учитывают влияние этих компонентов на образование высокотвердых соединений, на смачиваемость, на способность препятствовать трещинообразованию и пористости, метастабильности твердого раствора.

Применение различных составов обмазок позволяет целенаправленно менять свойства поверхности конструкционных сталей:

-наиболее значимый эффект от легирования карбидообразующими элементами (W, Cr, V, B) позволяет повысить микротвердость поверхности в 2–4 раза (до 800–1200 HV). Износостойкость при абразивном изнашивании возрастает в 5–10 раз по сравнению с незакаленной сталью и в 2–3 раза по сравнению с традиционно закаленной.

-введение хрома (более 12%) и никеля в поверхностный слой позволяет перевести обычную углеродистую сталь в класс нержавеющей непосредственно в зоне обработки. Это экономически выгодно для восстановления деталей, работающих в агрессивных средах.

Правильно подобранный режим легирования может увеличить предел выносливости детали на 20–30%.

-легирование алюминием и кремнием создает на поверхности оксидные пленки, устойчивые к высокотемпературному окислению, что актуально для деталей двигателей и печного оборудования.

Рассмотрим применение уже известных составов обмазок для комплексного лазерного легирования деталей из конструкционной стали.

В работе (5) на сталь 20 напыляли самофлюсующийся сплав ПГ-СЗ-3, наносили обмазку В, Cr_2O_3 , Si с последующей лазерной обработкой. В процессе легирования образующийся хром реагировал с бором, образуя в присутствии кремния легированные бориды Cr (B_xSi_y), Cr_2 (B_xSi_y), обладающие по сравнению с простыми боридами повышенной прочностью, что привело к повышению износостойкости сплава в 1,5...1,7 раза и снижение шероховатости оплавленной поверхности в 1,5...1,8 раза за счет получения мелкодисперсной наноструктурированной поверхности.

В работе (6) для испытания на износостойкость деталей из стали 45 с защитным покрытием из самофлюсующегося сплава ПН70Х17СЗРЗ (В, W) была взята обмазка из аморфного бора 30-35% и вольфрама 65-70% с последующим лазерной обработкой. Использование такого состава обмазки было выбрано с целью повышения износостойкости покрытия за счет легирования γ -раствора никеля вольфрама. Рентгеноструктурный анализ показал, что изменились параметры решетки. Таким образом можно предположить, что в твердый раствор γ -Ni входит 3% (ат.) вольфрама, что увеличивает микротвердость γ -Ni от 5,0 до 8,3 ГПа. Уменьшение трещинообразования может происходить за счет образования дополнительного количества эвтектики γ -Ni + Ni_3B . Легкоплавкая эвтектика, свободно перемещаясь между дендритами никеля, убирает зарождающиеся трещины, которые возникают в связи с низкой теплопроводностью. Уменьшение количества бора ниже предложенного приводит к образованию только дополнительного количества эвтектики γ -Ni + Ni_3B без образования борокарбида. Таким образом, исследования показали, что при увеличении количества бора выше предлагаемого образовывалась эвтектика и большое количество Ni_3B , что снижает эксплуатационные свойства покрытия. При увеличении количества вольфрама в обмазке выше предлагаемого происходило охрупчивание сплава, так как сплав оставался непроплавленным [8].

В работе [7] на сталь 20 для повышения абразивной износостойкости и усталостной прочности перед борированием на поверхность наносили слой абразивного порошка аморфного бора толщиной 0,05-0,12 мм с дальнейшим воздействием лучом непрерывного лазера. После лазерной обработки образцы выдерживали в борлирующей смеси при окалины, 5% фтористого натрия. Таким образом, при высокотемпературной выдержке в результате протекания диффузионных процессов формировался сплошной боридный слой за счет высокой концентрации бора на поверхности.

В работе [8] для лазерного легирования низкоуглеродистых стальных изделий была взята обмазка из карбида бора 25-35% и хромосодержащего вещества (окись хрома) 65-75%. Образовавшийся поверхностный слой, состоял из карбидных и боридных фаз, равномерно расположенных в легированном твердом растворе. Структура легированного слоя после лазерной обработки состояла из α -твердого раствора хрома и бора в железе с включением боридов $(\text{Cr,Fe})_2\text{B}$ и $(\text{Cr,Fe})\text{B}$ и вторичных карбидов. Таким образом, введение хрома и бора необходимо для образования в легированном слое хромов боридов железа. Содержании окиси хрома в обмазке менее 65% не обеспечило получение высокой твердости упрочненного слоя, а при содержании более 75% также не привело к увеличению твердости и оказало отрицательное влияние на формирование легированного слоя в результате выделения свободного кислорода при разложении окиси хрома, появлению пор в легированном слое. Предложенный состав обмазки позволил повысить износостойкость поверхности деталей в 1,1 - 1,4 раза.

В работе [9] было предложено упрочнить поверхность деталей из конструкционных сталей многократным последовательным нанесением на обрабатываемую поверхность легирующей обмазки на основе аморфного бора и хрома, с последующим нагревом луча непрерывного лазера. При каждом последующем проходе

мощность лазерного излучения уменьшали в $n/(n-1)$ раз, где n – общее количество проходов. Данный способ позволил увеличить усталостную прочность обрабатываемого поверхностного слоя. Толщина обмазки составляла 0,08-0,10 мм. Таким образом, полученные результаты показали, что данный способ упрочнения деталей из конструкционных сталей позволяет увеличить усталостную прочность в 1,2-1,5 раза по сравнению с полученными данными способов-прототипов.

В работе [10] для повышения микротвердости и динамической прочности упрочненного поверхностного был предложен состав обмазки, где соотношение компонентов - диоксид титана 55-65%, борный ангидрид 34-42% и углерод 1-3%. Предложенный состав обмазки в такой комбинации в условиях лазерной обработки обеспечивает мгновенное расплавление и разложение окислов до атомарного титана и бора, соединение их в бориды титана и внедрение в стальную матрицу. Введение в предлагаемый состав дополнительно небольшого количества углерода способствовало восстановлению активных атомов титана и бора и синтезу карбоборидов титана, которые в смеси с боридами титана обеспечили высокие эксплуатационные свойства поверхностному слою.

Предложен состав для лазерного легирования стальных изделий в работе [11] состоящий из окиси хрома (Cr_2O_3), карбидов бора (B_4C) и ферросилиция (FeSi). Введение данного состава обеспечило высокую степень упрочнения обработанной поверхности за счет повышения поверхностной микротвердости и глубины модифицированного слоя. Однако было выявлено неравномерность изменения микротвердости упрочненного слоя по глубине и неоднородность слоя по площади обрабатываемой поверхности. Такие недостатки приводят к невысоким показателям износостойкости упрочненной поверхности в условиях много циклового контактного нагружения.

В работе [12] для упрочнения деталей из конструкционной стали был предложен состав обмазки из следующих компонентов: углерода (C) 8-16%, окись хрома (Cr_2O_3) 25-35%, в качестве борсодержащего вещества борный ангидрид (B_2O_3) – остальное. В данном составе основным упрочняющим компонентом является борный ангидрид, который в условиях лазерной обработки взаимодействует с железом и хромом, образуя бориды, обладающие высокой объемной прочностью и твердостью. Было отмечено, что окись хрома взаимодействуя при высокой температуре с бором, образует прочные и твердые бориды которые значительно повышают трещиностойкость. При содержании в обмазке окиси хрома менее 25 % приводило к интенсивному трещинообразованию. Это объясняется образованием большой доли хрупких боридов. Увеличении массовой доли в обмазке окиси хрома более 35% приводило к значительному снижению степени упрочнения в связи с существенным уменьшением борного ангидрида. Авторами было отмечено на слабое влияние углерода на эффект упрочнения содержанием в составе менее 8% . Такая концентрация углерода в зоне лазерного воздействия не достаточна для активизации процесса образования карбидов хрома. При увеличении содержания углерода свыше 16 % приводило к интенсивному выгоранию обмазки и неравномерному изменению глубины упрочненного слоя.

Для лазерного легирования стальных изделий в работе [13] был предложен состав обмазки окись хрома 30-40%, марганец 5-15%, молибден 15-25%, кремний 5-15%, карбид бора 20-30%. После лазерной обработки в легированном твердом растворе были равномерно распределены бориды железа, легированных хромом и молибденом. Введение в покрытие марганца и кремния способствовало восстановлению хрома из окисла и обеспечило упрочнению твердого раствора покрытия. Молибден в упрочненном слое обеспечил образование вторичных карбидных фаз после легирования.

Технология плазменного напыления с последующей лазерной обработкой применяется для широкого спектра материалов на основе карбидов и боридов. Наиболее изученными системами являются композиции на основе карбида вольфрама (WC-Co) [14, 15], карбида хрома ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) [16] и карбида титана (TiC) [17]. Исследования проводятся для покрытий из карбида бора (B_4C) [18] и кубического нитрида бора (c-BN), который, несмотря на наличие азота, по своим свойствам близок к тугоплавким соединениям и часто рассматривается в одном ряду с ними [19].

Анализ проведенных исследований показывает, что высокие температуры в зоне лазерного воздействия инициируют фазовые превращения, морфологические изменения и перераспределение упрочняющих фаз в материале покрытия. Метастабильные фазы, образовавшиеся при плазменном напылении, трансформируются в более стабильные равновесные фазы. Например, в покрытиях $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ после лазерного оплавления исходный карбид Cr_3C_2 преобразуется в более твердый равновесный карбид Cr_7C_3 [16]. В процессе оплавления и последующей кристаллизации могут образовываться новые твердые фазы. В покрытиях WC-Co были зафиксированы такие фазы, как $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ и $\text{Co}_3\text{W}_9\text{C}_4$, которые способствуют увеличению твердости [15]. Лазерная обработка может стимулировать синтез нанокристаллических фаз, таких как кубический нитрид бора (c-BN), из соответствующих прекурсоров [19].

Использование импульсных лазеров может ускорять конвективные потоки Марагонни в расплавленной ванне. Эти потоки способствуют перемешиванию расплава и обеспечивают более равномерное (гомогенное) распределение карбидных частиц по объему. Частицы карбидов после оплавления и повторной кристаллизации могут приобретать более регулярную, равноосную форму вместо исходной осколочной или неправильной [16]. В некоторых случаях возможно растворение исходных карбидов в металлической матрице с последующим их выделением в виде дендритов или мелких зерен [20].

Лазерное легирование конструкционных сталей из обмазок и лазерная обработка с напылением карбидов и боридов представляет собой мощный инструмент инженерии поверхности. Оно позволяет трансформировать дешевые и доступные марки сталей в материалы с эксклюзивными эксплуатационными характеристиками прямо в зоне контакта с рабочей средой.

Сочетание экономической эффективности (за счет экономии дорогих легирующих элементов и отсутствия необходимости в объемной термообработке) и высоких технических показателей делает эту технологию ключевой для задач импортозамещения, ремонта и восстановления ответственных узлов машин, а также для создания новых поколений износостойких деталей. Внедрение данного метода в промышленность способствует продлению ресурса оборудования и снижению материалоёмкости производств.

Обзор источников показал, что выбранные составы (В 30–35 % + W 65–70 % или Cr_2O_3 65–75 % + B_4C 25–35 %) при плотности мощности 400–500 Вт/мм² оптимально обеспечивают формирование поверхностного слоя толщиной 0,4–0,65 мм с размером зерна 20–80 нм. Значение микротвёрдости достигает 800–1200 HV, износостойкость повышается в 5–10 раз.

Данная технология формирования наноструктурированных поверхностных слоев является ресурсосберегающим решением и позволяет упрочнить ответственные детали машин из ст. 20, ст. 45 и получить характеристики как у высоколегированных аналогов.

Работа закладывает прочную основу для дальнейших исследований в области гибридных методов поверхностной модификации.

Список литературы: 1. Белова, С. А. Формирование структуры поверхностных слоев сталей при лазерном легировании / С. А. Белова, М. С. Калашникова, В. С. Постников // Вестник

ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – №2. – С. 93–104. **2.** Нанотехнологии. Часть 11. Нанослой, нанопокрывтие, нанопленка. Термины и определения : ГОСТР 58039 - 2017/ ISO/TS 80004-11:2017. – Введ. 26.12.2017. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 12 с.

3. Наноструктурированные покрытия для повышения прочности и долговечности материалов // Greenline-tools.ru. – 22.01.2025. – URL: <https://greenline-tools.ru/nanostrukturirovannye-pokrytiya-dlya-povysheniya-prochnosti-i-dolgovechnosti-materialov/> (дата обращения: 25.03.2026).

4. Филимонов, С. Ю. Наноструктурирование поверхностного слоя стали: комплексный подход / С. Ю. Филимонов // Echemistry. Электрохимический портал. – 2010. – URL: <https://echemistry.ru/literatura/stati/nanostrukturirovanie-poverhnostnogo-sloya-stali-kompleksnyj-podhod.html/> (дата обращения: 27.03.2026)

5. Авторское свидетельство SU 1436531, МПК4 C23 C12/02. Состав обмазки для комплексного лазерного легирования стальных деталей : заявлено 05.01.1987 : опубл. 08.07.1988 / Чачин В. Н., Кардаполова М. А., Девойно О. Г., Головаченко А. Ф., Кардаполова Г. В. – 3 с. **6.** Авторское свидетельство SU 1616013, МПК4 C23 C8/04. Способ восстановления изношенных поверхностей : заявлено 23.05.1989 : опубл. 22.08.1990 / Кардаполова М. А., Девойно О. Г., Спиридонов Н. В., Головаченко А. Ф. – 3 с. **7.** Авторское свидетельство SU 1351158, МПК4 C23 C8/70. Способ восстановления изношенных поверхностей : заявлено 28.10.1988 : опубл. 08.07.1987 / Девойно О. Г., Кардаполова М. А., Траймак Н. С., Спиридонов Н. В. – 4 с. **8.** Авторское свидетельство SU 1598485, МПК4 C23 C26/00. Порошковый состав для лазерного легирования стальных изделий : заявлено 26.12.1988 : опубл. 08.06.1990 / Девойно О. Г., Чачин В. Н., Головаченко А. Ф., Кардаполова М. А. – 3 с. **9.** Авторское свидетельство SU 1600376, МПК4 C23 C12/00. Способ лазерной химико-термической обработки стальных изделий : заявлено 17.1.1988 : опубл. 15.06.1990 / Девойно О. Г., Кардаполова М. А., Головаченко А. Ф. – 3 с. **10.** Авторское свидетельство SU 1468962, МПК4 C23 C8/52. Состав для лазерного легирования : заявлено 12.05.1987 : опубл. 30.03.1989 / Колесников Ю. В., Инютин В. П. – 5 с. **11.** Авторское свидетельство 1607433 СССР, МКИ C23C 12/02. Состав для борохромирования стальных деталей при лазерном нагреве / Говоров И. В., Колесников Ю. В., Жостик Ю.В. – 4 с. **12.** Патент RU 2345174, МПК C23 C12/00. Состав для поверхностного лазерного упрочнения деталей из конструкционных сталей: заявлено 12.07.2007 : опубл. 27.01.2009 / Говоров И. В., Семенцев А. М., Чемодуров А. Н. – 5 с. **13.** Авторское свидетельство SU 1405353, МПК4 C23 C10/52. Состав для лазерного легирования : заявлено 18.08.1986 : опубл. 22.02.1988 / Чачин В. Н., Головаченко А. Ф., Траймак Н. С., Девойно О. Г. – 4 с. **14.** Radek N., Konstanty J., Pietraszek J., Orman Ł.J., Szczepaniak M., Przestacki D. The Effect of Laser Beam Processing on the Properties of WC-Co Coatings Deposited on Steel // Materials. 2021. Vol. 14, № 3. 538. DOI: 10.3390/ma14030538. **15.** Afzal M., Rafiq M.A., Anwar M.S., et al. Effect of laser melting on plasma sprayed WC-12 wt.%Co coatings // Wear. – 2015. – Vol. 330–331. – P. 448–455. – DOI: 10.1016/j.wear.2014.12.037. **16.** Chong K., Zou Y., Wu D., Tang Y., Zhang Y. Pulsed laser remelting supersonic plasma sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings for regulating microstructure, hardness and corrosion properties // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 418. 127258. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127258. **17.** Трифонов Г.И., Пеньков Н.А., Дерканосова А.А., Краснова М.Н. Упрочнение покрытия плазменного напыления дисперсной дополнительной фазой карбида титана // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 3. С. 191–197. doi:10.20914/2310-1202-2022-3-191-197. **18.** Салимиджази, Х. Р. Микроструктура карбида бора, полученного вакуумным плазменным напылением [Текст] / Х. Р. Салимиджази, Т. В. Койл, Дж. Мостахими, Л. Леблан // Journal of Thermal Spray Technology. — 2005. — Т. 14, № 3. — С. 367–374. — DOI: 10.1361/10599630524458. **19.** Madhav Reddy, K. Observations of nanocrystalline cubic boron nitride formed with plasma spraying / K. Madhav Reddy, C. Hwang, M. Ornek, S. L. Miller, W. E. Mayo, A. Burgess, R. A. Haber, K. J. Hemker // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 116. – P. 155-165. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.06.038. **20.** Наноструктурное покрытие : патент № 2515733 / Трегубов Илья Михайлович, Калинин Юрий Егорович, Ситников Александр Викторович, Стогней Олег Владимирович ; заявитель и патенто-обладатель Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – Текст : электронный // Федеральный институт промышленной собственности. – 2014. – № 14 (1038).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЗАУРУСА ДЛЯ СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА В ДОКУМЕНТАЦИИ ПО ПРОГРАММИРОВАНИЮ В КОНТЕКСТЕ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Коломойцева И. А., Щедрин С. В. (ДонНТУ, г. Донецк,
ДНР, Россия)

Тел./Факс: +7 (856) 3010856; E-mail: bolatiger@mail.ru

Цель работы – повышение эффективности поиска в технической документации по программированию в инженерном образовании. Предложен двухэтапный метод, сочетающий лексический поиск BM25 и семантическое переранжирование на основе тезауруса и SBERT. Эксперименты показали прирост F-меры на 24,7% и сокращение времени поиска вдвое. Система поддерживает курсовое проектирование и самостоятельную работу студентов.

Ключевые слова: информационный поиск, тезаурус, расширение запросов, переранжирование, BM25.

The goal of this work is to improve the efficiency of searching in technical documentation on programming in engineering education. A two-step method is proposed that combines lexical search BM25 and semantic re-ranking based on thesaurus and SBERT. Experiments showed an increase in F-measure by 24.7% and a reduction in search time by half. The system supports course design and independent work of students

Key words: information search, thesaurus, query expansion, re-ranking, BM25.

Введение. Для любого учебного заведения, в том числе и для его структурного подразделения, например, кафедры, поиск учебных и научных материалов является актуальной задачей [2]. При поиске в коллекциях текстовых документов возникает проблема лексического разрыва, т.е. ситуации, когда пользователь в запросе использует не те слова, которые есть в нужном ему документе [6]. Истоками проблемы лексического разрыва являются синонимия и полисемия. В области программирования синонимия и полисемия терминов представлены очень широко. Это вызвано вариантами перевода и транслитерации (framework → фреймворк, каркас), наличием большого количества терминов, относящихся к профессиональному сленгу (баг, мерджить, костыль), присутствием в текстах исторически изменяющихся терминов (ECMAScript 6 / ES6 / ES2015), общезыковых слов со специфическим значением (класс в ООП или в CSS) и т.п. Всё это приводит к тому, что классические модели поиска могут не дать требуемый пользователем информационно-поисковой системы результат.

Однако в инженерном образовании проблема стоит ещё острее. Работа с технической документацией — стандартами, спецификациями, руководствами по API, описаниями библиотек, другой технической документацией — занимает до 40% учебного времени студента инженерных специальностей. Существующие системы поиска во внутренних репозиториях кафедр, в среде Moodle или корпоративных вики-ресурсах ориентированы на точное совпадение лексем, что критически снижает эффективность самостоятельной работы. Например, студент ищет «блок try-catch», а в методическом пособии используется термин «метод обработки исключений» — и нужный ресурс теряется из виду. Это ведёт к увеличению когнитивной нагрузки, фрагментации знаний и противоречит принципам формирования системного инженерного мышления, которое требует

умения видеть связи между разными уровнями абстракции и инструментальными средствами.

Ставится задача организовать информационный поиск в текстовой коллекции документов таким образом, чтобы учесть семантику, и при этом обеспечить достаточно высокую скорость поиска, адаптированную под нужды инженерной подготовки.

1. Тезаурус как средство семантической навигации в инженерном знании.

Одним из вариантов реализации семантического поиска является использование тезауруса. Тезаурус участвует в трёх аспектах функционирования информационно-поисковой системы, названной авторами CodeLex. С его помощью модифицируется (расширяется или уточняется) запрос пользователя. Тезаурус используется и при построении инвертированного индекса, а также в алгоритме ранжирования документов. Благодаря тезаурусу, более высокий ранг имеют документы, включающие термины, связанные отношениями с терминами из запроса [2].

В контексте инженерного образования тезаурус должен отражать не только лингвистические, но и прагматические и структурные связи между понятиями. Помимо традиционных синонимических и полисемических отношений, в тезаурус были включены следующие типы связей, значимые для инженерной деятельности:

- «часть – целое» (например, микроконтроллер → порты ввода-вывода → таймеры);
- «причина – следствие» (высокая загрузка процессора → фрагментация памяти);
- «инструмент – задача» (отладчик → поиск утечек памяти; профилировщик → оптимизация производительности);
- «уровень абстракции» (ассемблер → C → Python → высокоуровневый фреймворк).

Такой подход позволяет студенту, который помнит не точное название инструмента, а решаемую им задачу, получать релевантные результаты, что снижает порог вхождения в новую предметную область и ускоряет формирование профессиональных компетенций.

2. Архитектура поискового движка с учётом образовательных сценариев. Поисковый движок работает в два этапа:

- этап 1 – быстрый лексический поиск;
- этап 2 – семантическое переранжирование.

На первом этапе поиск выполняется с помощью классической модели BM25, в основе которой лежит вероятностная функция ранжирования документов по запросу. Она оценивает релевантность документа на основе частоты встречаемости терминов запроса в нём с учётом редкости слова в коллекции (IDF) и нормирования по длине документа [5].

На втором этапе выполняется семантическое переранжирование отобранных кандидатов с использованием информации из тезауруса и векторных представлений.

Двухэтапная модель используется для обеспечения компромисса между качеством и производительностью. BM25 обеспечивает высокую скорость и приемлемую полноту. А более ресурсоёмкое, но обеспечивающее лучшую полноту поиска семантическое переранжирование применяется только к малому количеству документов.

Поисковый движок состоит из следующих элементов:

- индексатор;
- менеджер тезауруса;
- модификатор запроса;
- поисковик;
- переранжировщик;
- API и интерфейс.

Задача индексатора – выполнить предобработку документов, построить обратный индекс и вычислить векторные представления. Менеджер тезауруса загружает его в память и обеспечивает быстрый доступ к элементам. Модификатор запроса выполняет предобработку запроса, т.е. выполняет токенизацию, лемматизацию, приводит русскоязычные слова к нижнему регистру. Затем извлекает термины из запроса и для них выполняет расширение.

Расширение запроса является одним из механизмов преодоления проблемы лексического разрыва между языком пользователя и языком документов. Традиционные методы расширения запроса на основе статистических словарей или псевдорелевантной обратной связи могут приводить к снижению точности, так как не учитывают семантику запроса [3]. Учесть семантику можно, модифицируя запрос с использованием тезауруса [1].

Алгоритм расширения запроса работает по следующему принципу:

- для каждого исходного термина q_i из тезауруса извлекаются семантически связанные термины;
- каждому добавленному термину присваивается вес на основе типа связи (например, для отношения «инструмент–задача» вес выше, чем для простой синонимии);
- исходные термины сохраняют наивысший вес;
- расширенный запрос передаётся в поисковый движок.

Модуль поиска выполняет поиск в коллекции документов по расширенному запросу с помощью модели BM25. Первые k найденных документов отправляются в модуль переранжирования. Опытным путём установлено, что оптимальное число документов, которое можно взять без потери полноты, равно 300.

3. Сценарии использования системы в учебном процессе. Разработанная система CodeLex позволяет реализовать три ключевых образовательных сценария, которые ранее были затруднительны при использовании классических поисковых моделей.

Сценарий 1 – «Курсовое проектирование».

Студент вводит запрос «разработать модуль авторизации». Система выдаёт не только готовые статьи и методички, но и ссылки на смежные темы: безопасность хранения паролей, хеширование, работа с сессиями, интеграция с базой данных. За счёт тезаурусных отношений «инструмент–задача» и «часть–целое» формируется междисциплинарная карта знаний, которая помогает студенту увидеть проект в целостности, а не как набор изолированных фрагментов.

Сценарий 2 – «Подготовка к экзаменам и зачётам».

По запросу «ООП» система ранжирует документы не только по релевантности, но и по уровню сложности, используя веса связей из тезауруса (например, отношение «уровень абстракции» позволяет отделить введение от продвинутых тем). Это даёт возможность адаптировать выдачу под текущий уровень подготовки студента, что особенно важно при разнородной аудитории в инженерных группах.

Сценарий 3 – «Научно-исследовательская работа магистрантов».

Система помогает найти неочевидные пересечения между темой исследования и более ранними работами кафедры, снижая риск дублирования и способствуя преемственности научных направлений. Благодаря учёту семантических связей, магистрант может обнаружить работы, в которых используются иные термины, но описываются сходные технические решения.

Таким образом, поиск перестаёт быть пассивным действием и становится активным элементом проектного обучения, поддерживая принципы CDIO (Conceive — Design — Implement — Operate) [4] и способствуя развитию инженерного мышления.

4. Экспериментальная оценка и педагогические метрики. Оценка эффективности модуля поиска выполнялась с помощью метрик полноты ($R@10$), точности ($P@10$)

и F-меры ($F_1@10$), рассчитанных для первых десяти найденных документов. Сравнительный анализ проводился на конфигурациях систем:

- базовая система (BM25);
- базовая система + расширение запросов (BM25+QE);
- базовая система + переранжирование (BM25+RR);
- полная система с тезаурусом (Full).

Тестирование проводилось на 2072 текстовых документах, содержащих информацию о программировании. Общий объём коллекции – около 4 МБ. Оценка качества поисковой системы выполнялась на 20 запросах, для которых была сделана экспертная оценка релевантности документов. Результаты оценки по метрикам точности, полноты и F-меры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Метрика	Baseline (BM25)	BM25+QE	BM25+ RR	Full (предлагаемый метод)	Прирост (Full к Baseline)
P@10	0,487	0,541	0,559	0,589	+20,9%
R@10	0,312	0,361	0,372	0,398	+27,6%
$F_1@10$	0,381	0,433	0,447	0,475	+24,7%

Дополнительно, для оценки влияния системы на образовательный процесс, были введены педагогические метрики. Проведён пилотный опрос 45 студентов инженерных специальностей (направления «Программная инженерия» и «Информационные системы»). Измерялись:

- среднее время нахождения релевантного документа;
- количество уточняющих запросов (последовательных итераций поиска);
- субъективная удовлетворённость по шкале SUS (System Usability Scale).

Результаты показали, что среднее время поиска нужного фрагмента сократилось с 4,2 до 2,1 минуты ($p < 0,05$ по критерию Вилкоксона). Количество последовательных уточняющих запросов снизилось на 37%. Средний балл по SUS составил 82,4, что соответствует оценке «отлично» (против 61,2 для базовой системы). Это подтверждает, что улучшение технических метрик коррелирует со снижением когнитивной нагрузки на обучающегося и повышением эффективности самостоятельной работы.

Заключение. Результаты экспериментов показали, что предлагаемый метод организации информационного поиска в коллекциях текстовых документов в области программирования с использованием тезауруса улучшает меры точности, полноты и F-меры на 20% по отношению к классическому методу BM25.

Однако, что более важно для инженерного образования, разработанная система не только повышает эффективность поиска, но и трансформирует работу с документацией из вспомогательной задачи в инструмент формирования системного инженерного мышления. Благодаря семантическому расширению запросов и учёту иерархических и инструментальных связей, студент начинает воспринимать знания не как изолированные факты, а как взаимосвязанную структуру, что является ядром инженерной компетенции. Снижение времени на поиск и уменьшение числа уточнений позволяет высвободить ресурс для более глубокого анализа и творческого проектирования.

Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию системы с интеллектуальными тьюторскими агентами, адаптивную настройку весов связей под индивидуальный профиль студента, а также на расширение тезауруса за счёт автоматического извлечения отношений из корпусов инженерной документации.

Список литературы: 1. Атаева О. М., Серебряков В.А., Тучкова Н.П. Формирование расширенных поисковых запросов на основе тезауруса предметной области в онтологии знаний семантической библиотеки // Электронные библиотеки. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 271-291. 2. Коломойцева И. А, Федяев О.И. Автоматическое построение тезауруса: оценка методов кластеризации и векторного представления слов // XXII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2025) : Труды конференции, Санкт-Петербург, 06–10 октября 2025 года. – СПб: Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, 2025. – С. 85-94. – DOI 10.15622/rcai.2025.071. 3. Маннинг К.Д., Рагхаван П., Шютце Х. Введение в информационный поиск. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020. – 528 с. 4. Crawley E.F., Malmqvist J., Östlund S., Brodeur D.R. Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach. – Springer, 2014. – 286 p. 5. Robertson S., Zaragoza H. The Probabilistic Relevance Framework: BM25 and Beyond. Foundations and Trends in Information Retrieval, 2009, 3 (4): pp. 333–389. 6. Zakharova A. A. Syntactic disambiguation in constructions with attachment ambiguity with adjuncts by means of ontological semantics // Компьютерная лингвистика и вычислительные онтологии. – 2020. – No. 4. – P. 73-82.

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РЫБНОГО ФИЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Костенко А. В., Игнаткина Е. Л. (КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)

Тел.: +7 984 163 74 36; E-mail: andr13kost@list.ru

В работе рассмотрена проблема автоматизации контроля качества рыбного филе на ленточном конвейере. Показана необходимость снижения влияния человеческого фактора, улучшения условий труда и повышения производительности. Обоснован выбор сверточной нейронной сети с остаточными связями (ResNet) для задачи обнаружения дефектов в реальном времени. Приведены преимущества и недостатки выбранного подхода.

Ключевые слова: машинное зрение, контроль качества, рыбное филе, сверточные нейронные сети, ResNet, АСУТП.

This paper examines the problem of automating the quality control of fish fillets on a conveyor belt. The need to reduce human error, improve working conditions, and increase productivity is demonstrated. The choice of a convolutional neural network with residual connections (ResNet) for real-time defect detection is justified. The advantages and disadvantages of the chosen approach are presented.

Keywords: machine vision, quality control, fish fillet, convolutional neural networks, ResNet, process control systems.

Введение. На рыбоперерабатывающих предприятиях одной из наиболее трудоёмких и ответственных операций является визуальный контроль качества рыбного филе. Операторы в течение смены вынуждены в условиях невысоких температур, высокой влажности и монотонности труда выявлять дефекты: остатки костей, кровоподтёки, разрывы мышечной ткани, посторонние включения, нехарактерный цвет или текстуру [1, 2]. Классические системы автоматизации (АСУТП) не решают задач распознавания сложных визуальных образов. Поэтому необходимо решать проблему с привлечением нейросетевых технологий и машинного зрения.

Основная часть. В технологическом процессе производства рыбного филе этап контроля качества — один из самых ответственных и тяжёлых для человеческого труда. Дефекты могут быть как поверхностными (цвет, кровоподтёки), так и структурными (разрывы, посторонние включения). Решение проблемы повышения производительности с обеспечением требуемого качества продукции связано, прежде всего, с применением машинного зрения с использованием нейросетевых технологий. Выбор нейросетевой архитектуры зависит от особенностей процесса выбраковки рыбного филе, осуществляемого на ленточном конвейере: более высокий темп движения, вариативность формы и размера филе, изменчивость освещения, необходимость работы в реальном времени.

В современной практике анализа изображений и видео применяются несколько классов нейросетей:

– сверточные нейронные сети (CNN) – наиболее распространены для задач классификации, обнаружения объектов и сегментации. Они используют операцию свёртки для выделения локальных признаков (края, текстуры, цветовые переходы). Примеры: ResNet, EfficientNet, MobileNet;

– рекуррентные сети (RNN, LSTM) – предназначены для обработки последовательностей (например, временных рядов). На этапе контроля качества филе они могут использоваться для анализа видео-потока и отслеживания динамики дефектов, но не являются основными для статической классификации;

– сети семантической сегментации (U-Net, Mask R-CNN) – позволяют попиксельно определить область дефекта, что важно, когда необходимо измерить площадь повреждения или отделить кость от мышечной ткани;

– гибридные архитектуры (CNN+LSTM) – применяются, если дефект может проявляться во времени (например, изменение цвета при разморозке).

Анализ особенностей задачи выбраковки рыбного филе позволяет выделить основные требования: высокая точность распознавания мелких дефектов (остатки костей размером 1–3 мм); нечувствительность к повороту и частичному перекрытию; возможность работы в реальном времени; устойчивость к шумам и изменениям освещения.

С учётом указанных требований одним из вариантов использования нейросетей является применение ResNet, отличающуюся наличием остаточных связей, которые решают проблему затухания градиента при глубине сети более 50 слоёв [3].

Преимуществом использования нейросетей в комплексе с машинным зрением является: снижение влияния человеческого фактора (усталость, субъективность), высокая производительность, возможность переобучения сети на новый вид сырья; интеграция с существующими АСУТП через SCADA-систему.

Недостатки: необходимость в размеченных данных (датасет), трудность интерпретации решения в случае ложного срабатывания; требования к стабильности освещения; периодическое дообучение при изменении вида сырья или появлении новых типов дефектов.

Наиболее целесообразно встраивать нейросетевой модуль на верхний уровень АСУТП (сервер SCADA), где имеются достаточные вычислительные мощности. При этом камеры устанавливаются над ленточным конвейером после этапа филетирования.

Заключение. Для повышения производительности с обеспечением качества продукции необходимы современные технологии, основанные на использовании машинного зрения и нейросетей. Для автоматизации процесса контроля качества рыбного филе возможно использовать сверточную нейронную сеть с остаточными связями (ResNet). Такое решение позволяет работать в реальном времени при движении конвейера, обладает устойчивостью к вариативности формы филе и может быть интегрировано в существующие АСУТП.

Список литературы: 1. Технология рыбы и рыбных продуктов / Под редакцией д.т.н., проф. А.М. Ершова. — Санкт-Петербург: Гиорд, 2006. — 941 с. 2. ГОСТ 3948-2016. Филе рыбы мороженое. Технические условия: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 27 июля 2016 г., № 89-П), введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 сентября 2016 г. № 1068-ст. — Дата введения 2018-01-01 [Электронный документ]. — URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/62868> (дата обращения 06.06.2026). 3. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — 2016. — P. 770-778. — DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАШИННОГО ЗРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЫБОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

Костенко А. В., Каврук А. К. (КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия)
Тел.: +7 984 163 74 36; E-mail: andr13kost@list.ru

Рассмотрены особенности применения нейросетевых технологий и машинного зрения в рыбопереработке. Показана интеграция нейросетей в структуру АСУТП через цифровой уровень «AI/ML Layer». Проанализировано использование CNN и LSTM на всех этапах производства рыбного филе. Обоснована необходимость внедрения интеллектуальных систем для сортирования, филетирования и контроля качества.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическим процессом, нейронная сеть, машинное зрение, технологический процесс изготовления рыбного филе.

The application of neural network technologies and machine vision in fish processing is examined. The integration of neural networks into the automated process control system (APCS) via the digital AI/ML layer is demonstrated. The use of CNN and LSTM at all stages of fish fillet production is analyzed. The need for implementing intelligent systems for sorting, filleting, and quality control is substantiated.

Keywords: automated process control system, neural network, machine vision, technological process of making fish fillets.

Введение. Внедрение информационных технологий и повышение уровня автоматизации технологических процессов является необходимым условием для устойчивого развития рыбопромышленного комплекса. Современный этап развития автоматизации пищевых производств, и, в частности рыбоперерабатывающей отрасли, характеризуется переходом от жестко детерминированных алгоритмов управления к интеллектуальным системам, способным функционировать в условиях высокой неопределенности и стохастической природы технологических объектов.

Особое место среди перспективных направлений занимают нейросетевые технологии и системы машинного зрения. Их применение позволяет решать широкий круг задач: от мониторинга кормления рыб и подсчета сырья до роботизации процессов разделки и контроля качества готовой продукции. Сложность формализации таких процессов, как сортирование и выбраковка рыбного филе, обусловлена нелинейным характером взаимодействия биообъектов с транспортирующими поверхностями, вариативностью оптико-физических свойств сырья. В этих условиях нейросетевые технологии выступают не просто как инструмент автоматизации, а как основа для создания адаптивных и прогностических систем управления.

Развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами неразрывно связано с совершенствованием информационно-измерительных систем (ИИС), в том числе с использованием машинного зрения. В классической структуре АСУТП информация от датчиков поступает на программируемые логические контроллеры (ПЛК), которые, в свою очередь, управляют исполнительными механизмами. Однако нейросетевые технологии не являются заменой классическим АСУТП. Напротив, нейросеть органично встраивается в существующую структуру, выступая в роли надстройки, оптимизирующей процесс.

Сравнительный анализ классических систем и нейросетевых технологий показывает их принципиальные различия [1-3]. Если традиционные АСУТП основаны на реактивном управлении по четко заданным правилам и требуют точной математической модели объекта, то нейросети позволяют реализовать прогнозное (предиктивное) и адаптивное управление, извлекая модель непосредственно из исторических и текущих данных. Это особенно ценно для рыбопереработки, где объекты управления (рыбное сырье) характеризуются высокой вариабельностью свойств.

Для практической реализации предлагается создание параллельного цифрового уровня «AI/ML Layer», который взаимодействует с верхним уровнем АСУТП (SCADA). В этой схеме нейросеть получает данные от контроллеров, обрабатывает их и возвращает рекомендации по корректировке уставок или прогнозы изменения параметров. Возможна также реализация простых нейросетевых моделей на уровне ПЛК (например, с использованием специализированных нейропроцессорных модулей) или на нижнем уровне – в составе интеллектуальных датчиков для локальной диагностики и распознавания брака.

Фундаментальной особенностью использования машинного зрения в рыбопереработке является необходимость синтеза многоуровневых математических моделей. Это включает в себя пространственно-временное описание перемещения филе, учитывающего микро-проскальзывания на ленте конвейера, а также оптико-геометрическую формализацию сцены с использованием модифицированной отражательной функции, позволяющей учитывать влияние влажности и микрорельефа поверхности. Для компенсации временных задержек в контуре «техническое зрение – нейросетевой вывод – исполнительный механизм» возможно применение аппарата фильтрации Калмана, который обеспечивает робастность системы к динамическим возмущениям.

Анализ технологического процесса изготовления филе мороженого рыбного показывает, что нейросетевые технологии могут быть эффективно применены на каждом этапе [4, 5].

На этапе приемки и сортировки сырья сверточные нейронные сети (CNN) в сочетании с гиперспектральным анализом позволяют объективно оценить свежесть рыбы, выявить дефекты и паразитарные поражения, что исключает субъективизм человеческой оценки. В процессах мойки, охлаждения и замораживания рекуррентные сети (LSTM) анализируют временные ряды данных (температура, расход воды, загрузка) и прогнозируют оптимальные режимы для достижения целевых параметров при минимизации энергозатрат и усушки.

Наиболее перспективным с точки зрения автоматизации является этап филетирования и контроля качества. Здесь CNN с функциями семантической сегментации и многоклассовой классификации позволяют в реальном времени идентифицировать остатки костей, кожи, пленки и корректировать траекторию режущего инструмента. На этапах упаковки и маркировки нейросети обеспечивают проверку целостности упаковки, распознавание текста (OCR) и формирование оптимальной комплектации блоков с учетом однородности категории и заданного веса. На этапе хранения и отгрузки системы на основе LSTM и рекомендательных алгоритмов прогнозируют риски нарушения температурного режима и оптимизируют складскую логистику по принципу FIFO.

Заключение. Использование нейросетевых технологий и машинного зрения в АСУТП рыбоперерабатывающих производств является не просто перспективным, а необходимым направлением дальнейшего развития отрасли. Данные технологии

обладают высокой адаптивностью и способностью работать со сложными, трудно формализуемыми объектами, что полностью соответствует специфике рыбного сырья. Интеграция нейросетей в виде отдельного цифрового уровня позволяет усилить классические системы управления, добавив им свойств прогнозирования и оптимизации в реальном времени.

Наиболее востребованным и технологически обоснованным является внедрение машинного зрения и нейросетевых классификаторов на этапах сортирования, филетирования и контроля качества, где традиционно преобладает ручной труд в тяжелых условиях. Дальнейшие исследования целесообразно направить на углубленную проработку конкретных архитектур нейросетей для задачи сортирования рыбного филе, а также на вопросы валидации и сертификации таких интеллектуальных систем для промышленной эксплуатации.

Список литературы. 1. Коновалов Т. О., Макаров А.А. Анализ использования нейросетей в сфере АСУ ТП // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина : Сборник статей. – Москва : Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2025. – С. 55-58. **2.** Иванько А.Ф., Иванько М.А., Сизова Ю.А. Нейронные сети: общие технологические характеристики // Научное обозрение. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 17-23. – [Электронный документ] – URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1236> (дата обращения: 31.05.2026). **3.** Сопина Н. В., Маккаева С. А. Перспективы внедрения нейросетей и искусственного интеллекта на промышленном производстве // Журнал монетарной экономики и менеджмента. – 2023. – № 3. – С. 222-227. – DOI 10.26118/2782-4586.2023.78.70.032. **4.** Костенко А.В. Перспективы использования машинного зрения в рыбной отрасли // А.В. Костенко, Д.К. Кузьмичев // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование : материалы XIV Национальной (всероссийской) научно-практической конференции (18-19 марта 2025 г.) [Электронный ресурс]. - Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2025. – С. 45-49. **5.** Костенко А. В. Информационные измерительные системы в рыбной отрасли //А.В. Костенко, М. Н. Кряквин // Сборник трудов XXXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15-21 сентября 2025 г. – Донецк: ДонНТУ, 2025. – С. 197.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ С ПОВЕРХНОСТИ

Лазебная Л. А. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)
Тел. +38 (062) 3010391; E-mail: l_lazebnaya@mail.ru

В статье рассматривается актуальная проблема повышения эффективности дегазации угольных пластов через поверхностные скважины. Проведен анализ существующих методов гидропневматического воздействия, выявлены недостатки математических моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние массива при циклическом нагружении. Предложены усовершенствованные математические модели, учитывающие анизотропию фильтрационно-емкостных свойств угля и релаксационные процессы в трещиновато-пористой среде. Разработаны новые алгоритмы автоматического управления параметрами воздействия (давление, частота, скважность импульсов), позволяющие минимизировать энергозатраты при максимизации газоотдачи. Представлены результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенных решений для условий глубоких горизонтов.

Ключевые слова: гидропневматическое воздействие, угольный пласт, математическая модель, алгоритм управления, дегазация, поверхностная скважина, метан угольных пластов.

The article discusses the current problem of increasing the efficiency of coal seams degassing through surface wells. The analysis of the existing methods of hydro-pneumatic impact is carried out, the shortcomings of mathematical models describing the stress-strain state of the array under cyclic loading are revealed. Improved mathematical models are proposed, taking into account the anisotropy of the coal filtration and capacity properties and the relaxation processes in the fractured-porous medium. New algorithms for automatic control of the impact parameters (pressure, frequency, and pulse duty cycle) have been developed to minimize energy consumption while maximizing gas recovery. The presented simulation results confirm the effectiveness of the proposed solutions for deep-horizon conditions.

Key words: hydro-pneumatic effect, coal seam, mathematical model, control algorithm, degassing, surface well, methane of coal seams

Актуальность работы. Основным фактором, определяющим актуальность исследований в области дегазации угольных пластов, является необходимость обеспечения безопасности шахтеров. Накопление метана в подземных выработках исторически является одной из основных причин тяжелых аварий в угольной промышленности по всему миру [2, с. 1]. Поиск более эффективных технологий контроля за газом остается приоритетной задачей для обеспечения промышленной безопасности. Существующие методы дегазации демонстрируют различную эффективность. Традиционные технологии позволяют достичь эффективности дегазации на уровне 20% [1, с. 1]. В то же время современные инновационные подходы, включающие гидравлический разрыв пласта, способны повысить этот показатель до 70%, что существенно снижает риски взрывов и загазовывания выработок [1, с. 1].

Гидрорасчленение угольного пласта (ГРП) признается одной из наиболее перспективных технологий обеспечения безопасности горных работ в зонах проявления опасных геодинамических явлений [5, с. 2]. В этой связи работа является актуальной.

Цель работы – является повышение эффективности дегазации угольного пласта и снижение удельных энергозатрат при гидропневматическом воздействии с поверхности за счет совершенствования математических моделей фильтрационно-деформационных процессов и разработки адаптивных алгоритмов автоматического

управления параметрами воздействия (давлением, частотой, скважностью импульсов) на основе данных текущего газодинамического отклика пласта.

Основное содержание. С увеличением глубины разработки угольных месторождений остро встает проблема низкой проницаемости угольных пластов и высокого газовыделения [3]. Традиционные методы дегазации становятся малоэффективными при коэффициенте проницаемости менее $0,1 \text{ м}^2/(\text{МПа}^2 \cdot \text{сут})$ [3]. В связи с этим все большее внимание уделяется технологиям гидропневматического воздействия на пласт, реализуемым как через подземные выработки, так и с поверхности [5, 7].

Принцип метода заключается в комбинированном воздействии гидравлической (высоконапорная жидкость) и пневматической (сжатый газ или вакуумирование) составляющих, что приводит к развитию сети трещин, снижению эффективных напряжений и интенсификации фильтрации метана. Однако недостаточная изученность реологических свойств угля при циклическом нагружении затрудняет создание адекватных моделей управления процессом [1, 6].

1. Анализ существующих моделей гидропневматического воздействия

В работах В.Н. Павлыша и С.С. Гребенкина заложены основы математического описания процессов гидро- и пневмовоздействия на угольный пласт [1]. Предложенные модели базируются на представлении угля как упругопористой среды с постоянными фильтрационными параметрами. Однако, как показали дальнейшие исследования, в процессе циклических нагружений происходит необратимое изменение структуры порового пространства, что требует учета параметра поврежденности.

Современные разработки в области гидротранспорта полезных ископаемых и управления состоянием массива [6] указывают на целесообразность использования систем автоматического управления с обратной связью по параметрам газодинамического отклика пласта. Анализ работ по применению кавитационных режимов [4] показывает, что эффективность воздействия существенно зависит от частоты и амплитуды пульсаций давления.

Основными недостатками существующих математических моделей являются:

1. Допущение об изотропии фильтрационных свойств угля, в то время как реальный пласт характеризуется развитой анизотропией, обусловленной напластованием.
2. Отсутствие учета релаксационных процессов, приводящих к запаздыванию газовыделения относительно момента воздействия.
3. Статический характер алгоритмов управления, не позволяющих адаптировать параметры под текущее состояние пласта.

2. Усовершенствованные математические модели процесса

Для устранения указанных недостатков предложена новая математическая модель, включающая систему уравнений, описывающих трехкомпонентную среду: твердый скелет (уголь), жидкость (вода с добавками) и газ (метан). Модель базируется на следующих основных соотношениях.

Уравнение сохранения массы для фильтрующегося газа (метана) с учетом десорбции имеет вид:

$$\frac{\partial(m\rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{q}_g) = Q_s(T) \cdot (1 - t/\tau) \quad (1)$$

где m — пористость; ρ_g — плотность газа; $\mathbf{q}_g$ — скорость фильтрации (определяется по закону Дарси с учетом поправки Клинкенберга); Q_s — источник десорбированного газа; t — время; τ — характерное время релаксации [3].

Ключевым отличием является введение в уравнение релаксационного члена $(1-t/\tau)$, описывающего затухание десорбционного потока во времени. Параметр τ зависит от гидростатического давления и свойств угля и определяется экспери-

ментально.

Уравнение состояния деформируемого угольного пласта записывается в приращениях эффективных напряжений по теории упругости для анизотропной среды:

$$\Delta\sigma_{ij} = \lambda_{ijkl}\Delta\varepsilon_{kl} - \beta_{ij}\Delta p \quad (2)$$

где λ_{ijkl} — тензор модулей упругости (учитывает анизотропию); β_{ij} — тензор коэффициентов Био; Δp — изменение порового давления.

В отличие от традиционных моделей, модули упругости λ_{ijkl} полагаются зависящими от циклической повреждаемости $D(N)$, где N — число циклов нагружения. Зависимость $D(N)$ аппроксимируется экспоненциальной функцией:

$$D(N) = D_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{N}{N_0}\right) \right] \quad (3)$$

где D_0 — предельная повреждаемость; N_0 — характеристическое число циклов. Это позволяет описывать явление "усталости" угля при гидропневматическом воздействии и объясняет рост проницаемости со временем.

3. Алгоритмы управления процессом воздействия

На базе предложенных математических моделей разработаны усовершенствованные алгоритмы автоматического управления процессом. В отличие от существующих систем, работающих по жесткому циклу [6], новые алгоритмы используют адаптивную стратегию, основанную на текущих показателях дебита метана и давления в скважине [7].

Структура системы автоматического управления (САУ):

- Объект управления: углепородный массив с поверхностной скважиной.
- Управляемые параметры: амплитуда давления гидровоздействия ($Phyd$), частота пульсаций (f), длительность импульса ($timp$), режим работы пневматической системы (нагнетание/вакуумирование).
- Контролируемые параметры: давление газа на устье ($Pwell$), расход метана (Qg), спектральный состав акустической эмиссии.

Основной алгоритм адаптации (алгоритм градиентного поиска): Алгоритм минимизирует удельные энергозатраты E_{spec} на добычу газа:

$$E_{spec} = \frac{W_{hyd} + W_{pneu}}{Q_g} \rightarrow \min \quad (4)$$

где W_{hyd} и W_{pneu} — энергия гидравлического и пневматического воздействия соответственно. Поиск оптимальных параметров ведется методом наискорейшего спуска с адаптивным шагом:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \gamma^{(k)} \nabla E_{spec}(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (5)$$

Здесь $\mathbf{x}$ — вектор управляемых параметров ($Phyd, f, timp$); $\gamma^{(k)}$ — шаг градиентного спуска на k -м шаге, выбираемый из условия обеспечения монотонного уменьшения функционала [6]. Преимуществом алгоритма является его способность работать в условиях неполной информации о параметрах пласта путем прямого измерения выходных переменных Qg .

Для режима "кавитационной обработки" [4] алгоритм модифицируется включением блока анализа частотного спектра акустической эмиссии. Оптимальной считается частота пульсаций, близкая к резонансной частоте угольного пласта, что обеспечивает максимальное развитие трещиноватости.

4. Результаты моделирования и обсуждение

Численное решение системы уравнений, описывающей предложенную модель,

проводилось для условий, характерных для пластов марок «Д» (длиннопламенный) и «Ж» (жирный) на глубинах 600–800 м [7]. Использовалась конечно-разностная схема в пакете COMSOL Multiphysics.

Анализ результатов.

- Влияние анизотропии: Моделирование показало, что отношение горизонтальной проницаемости к вертикальной (k_x/k_z) оказывает существенное влияние на форму зоны дренирования. При $k_x/k_z=5$ и более (характерно для пологопадающих пластов) радиус эффективного воздействия в горизонтальном направлении превышает вертикальный в 2–2,5 раза, что необходимо учитывать при размещении скважин.
- Эффект релаксации: Учет параметра релаксации τt позволил объяснить эффект "последствия" — продолжения газовыделения после прекращения активного воздействия. Согласно расчетам, наиболее значительный прирост газоотдачи (до 30%) наблюдается в интервале $\tau t=0,5\tau\dots1,5\tau$, что определяет оптимальную длительность паузы между циклами воздействия.
- Эффективность алгоритмов управления: Тестирование адаптивного алгоритма на имитационной модели показало, что его применение позволяет снизить удельные энергозатраты E_{spec} в среднем на 18–22% по сравнению с управлением по жесткому циклу. При этом общий объем извлеченного метана возрастает на 12–15% за счет предотвращения кольматации порового пространства и более полного использования энергии десорбции.

Заключение. В результате выполненной работы усовершенствованы математические модели гидропневматического воздействия на угольный пласт с поверхности. В отличие от известных аналогов, предложенные модели учитывают анизотропию фильтрационных свойств угля и релаксационные процессы, что позволяет более точно прогнозировать динамику газовыделения. Разработаны адаптивные алгоритмы управления процессом, основанные на минимизации удельных энергозатрат по градиентному методу.

Практическая значимость работы заключается в создании научной основы для проектирования автоматизированных систем дегазации, способных эффективно работать в изменяющихся горно-геологических условиях. Внедрение разработанных алгоритмов позволит повысить безопасность угледобычи за счет снижения газообильности выработок и получить дополнительный источник углеводородного сырья — метан угольных пластов.

Дальнейшие исследования направлены на разработку нейросетевых алгоритмов управления, использующих методы машинного обучения для прогнозирования состояния пласта на основе анализа больших данных.

Список литературы. 1. Pavlysh V.N., Grebyonkina A.S., Ryabichev V.D., Grebyonkin S.S. Technology planning and calculation of processes parameters of complex hydro-pneumatic impact on coal seams. *Mining of Mineral Deposits*, 2013, 7(2): 147–152. 2. Pavlysh V.N., Grebenkin S.S. Fiziko-tehnicheskie osnovy protsessov gidravlicheskogo vozdeystviya na ugol'nye plasty: monografiya. Donetsk: "VIK", 2006. – 269 s. 3. Semenov M.A. Metody intensifikatsii gazootdachi ugol'nykh plastov pri dobyche metana: diplomnyy proekt. Tomsk: TPU, 2016. 4. Agayev R.A. Pnevmo gidrodinamicheskaya deya na poverkhnevyy degazatsiyniy sverdlovin 1185-D. *Geo-Technical Mechanics*, 2013, (111). 5. Pavlysh V., Lazebnaya L. The mathematical models and function algorithms of automatic control system of dynamic treatment process on underground massive. *Stuc. intel-ekt.*, 2014; 19(4):71–77. 6. Cao, Z., Wang, E., He, X. et al. Effect evaluation of pressure relief and gas drainage of hydraulic punching in short-distance coal seam group. *J. Min. & Saf. Eng.*, 2021.

МЕТОД ОГИБАЮЩЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ КАК СПОСОБ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ И УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ларшин В. В., Осипенко Р. М. (ООО ЛУОК, г. Ташкент, Республика Узбекистан)

Тел.: +998909200681, E-mail: larshinvitaly@mail.ru

Метод огибающей высокочастотной (ВЧ) вибрации является одним из главных методов вибродиагностики подшипников качения и скольжения для насосов, компрессоров, редукторов, электродвигателей и других динамических машин. Метод является основой для обнаружения дефектов на ранней стадии их развития. В случае возникновения дефекта подшипника высокочастотная составляющая вибрации начнет модулироваться низкочастотной вибрацией, возбуждаемой данным дефектом. Если выделить из общего модулированного ВЧ сигнала его огибающую составляющую, то по частотному расположению амплитудных пиков в спектре огибающей и его корреляции с расчетным значением можно судить о месте возникновения дефекта, а по величине амплитуды – о глубине развития дефекта. При анализе и сопоставлении данных значений можно выявлять такие дефекты, как дисбаланс рабочего колеса, несоосность и перекос подшипников, повреждение зубчатых пар, износ зубьев, износ тел качения и сепаратора, раковины на внешнем и внутреннем кольце, срыв масляного клина, износ вкладышей подшипников скольжения и др.

Ключевые слова: Метод огибающей, спектральная вибродиагностика, надежность, насосное и компрессорное оборудование.

The envelope method of high-frequency (HF) vibration is one of the main methods of vibration diagnostics for rolling and sliding bearings in pumps, compressors, gearboxes, electric motors, and other rotating mechanisms and machines. The method serves as a basis for detecting defects at the earliest stage of their development. In the event of a bearing defect, the high-frequency component of the vibration will begin to be modulated by low-frequency vibration caused by this defect. If the low-frequency envelope component is extracted from the overall modulated high-frequency signal, the location of the defect can be determined by the frequency arrangement of the amplitude peaks in the envelope spectrum and its correlation with the calculated value, while the magnitude of the amplitude indicates the extent of defect development. By analyzing and comparing these values, it is possible to identify defects such as impeller imbalance, misalignment and tilting of bearings, damage to gear pairs, tooth wear, wear of rolling elements and separators, pitting on the outer and inner rings, oil wedge failure, wear of plain bearings, and others.

Keywords: envelope high-frequency vibration method, spectral vibration diagnostics, reliability, pump and compressor equipment

Введение. Контроль технического состояния эксплуатируемого насосно-компрессорного оборудования проводится с помощью инструментов вибромониторинга и вибродиагностики. Вибромониторинг проводится через измерения виброскорости (мм/с, СКЗ), виброперемещения (мм, ПИК) и виброускорения (мм/с²) для оценки технического состояния оборудования в данный момент времени.

Виброперемещение характеризует величину деформации объекта, виброскорость отражает степень усталостной прочности, а по виброускорению можно судить о величине колебательных сил, действующих на объект. Механическими источниками возникновения вибрации в динамическом оборудовании являются колебательные силы, которые по природе происхождения подразделяются на:

- центробежные силы, обусловленные дисбалансом вращающихся деталей;
- кинематические силы, вызванные движением тел по неровным поверхностям;
- ударные силы, вызванные упругими соударениями движущихся тел;
- параметрические силы, вызванные скачками во времени жесткости тел в направлении действия постоянной силы;
- силы сухого трения (чаще всего вызванные недостатком смазочных материалов).

Помимо колебательных сил механического происхождения, источниками вибрации роторных машин могут быть силы аэродинамического, гидродинамического и электромагнитного происхождения. Результатом действия отдельно взятых колебательных сил и их комбинаций являются компоненты вибрации с характерными частотными спектрами, которые необходимо распознавать и анализировать при помощи инструментов *вибродиагностики*. Вибродиагностика отличается от вибромониторинга и проводится для предупреждения отказа оборудования в процессе эксплуатации. Вибродиагностика проводится с помощью более глубоких методик и инструментов, целью которых является своевременное распознавание отклонения состояния оборудования от нормального и выполнение корректирующих действий до развития дефекта, ухудшения показателей надежности, сокращения срока службы или отказа. Выполнение данной цели особенно важно в философиях, которые учитывают стратегию предиктивного ТОРО и RCM (Reliability Center Maintenance). В рамках данной работы рассматривается применение метода огибающей высокой частоты в рамках спектральной вибродиагностики.

Актуальность. В большинстве Российских нефтегазовых компаний проводится только вибромониторинг через измерения широкополосной вибрации в мм/с, СКЗ или ПИК, что не позволяет получить достаточную информацию для своевременного предотвращения отказа, а всего лишь фиксируют техническое состояние оборудования в момент измерения. Для прогнозирования отказа необходимо разделить широкополосный сигнал на отдельные частотные составляющие в Гц, характеризующиеся своими амплитудами и фазами, связанные с какой-нибудь деталью оборудования и его дефектом, т.е. проводить вибродиагностику. Изменения частотных составляющих позволяет обнаружить нарушение в работе оборудования или ее начинающееся повреждение на ранней стадии и предупредить более крупный отказ. Каждому дефекту свойственны свои характерные диагностические признаки, которые наблюдаются в распределении сигнала через огибающие характеристики. Большая часть дефектов динамических машин проявляется в спектрах гармониками, пиками или всплесками, кратно связанными с оборотной частотой вращения ротора $f_{вр}$. Другие виды дефектов (например, кавитация, резонансы, дефекты масел и смазок в узле) проявляются в виде изменения общего фона в высокочастотной области. Пример спектра вибрации показан на рисунок 1 и 2. При этом, на рисунке 2 убраны шумовые составляющие и видны амплитуды на характерных частотах. Если пики становятся явными, то необходимо выяснить причину их появления, что позволит устранить ее на ранней стадии, не дожидаясь развития дефекта.

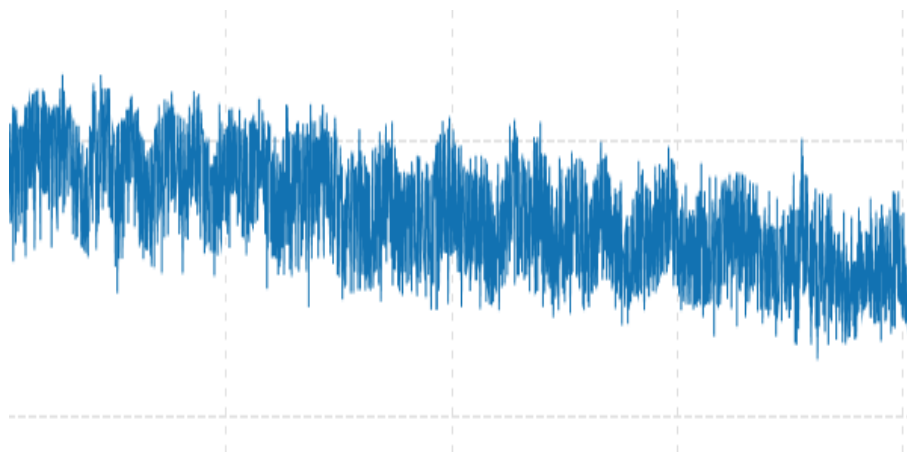


Рис. 1. Спектр виброскорости, полученный путем снятия замеров с работающего оборудования

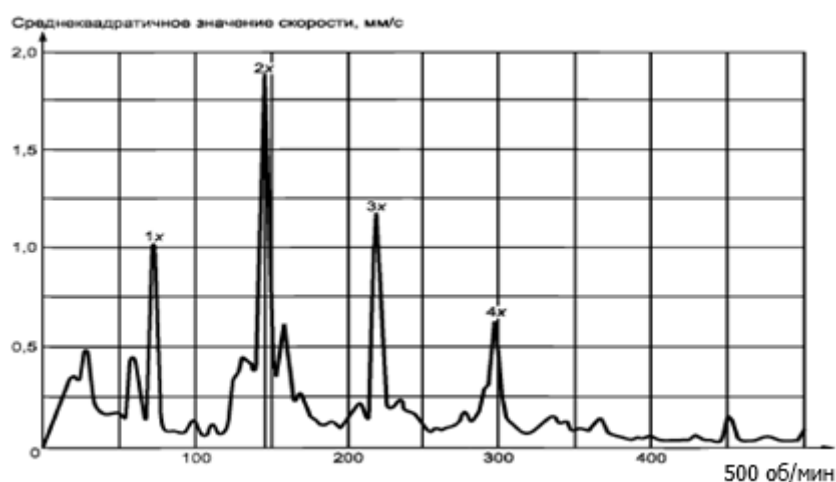


Рис. 2. Спектр виброскорости, очищенный от шумовых эффектов при помощи огибающей

Спектральный анализ – это метод обработки сигналов, который позволяет выявить и проанализировать частотный состав сигнала. Для анализа вибрационного спектра выделяют огибающие составляющие спектрального сигнала, состоящие из следующих диагностических признаков:

- *Оборотная частота* – частота вращения приводного вала механизма или частота рабочего процесса — это первая гармоника. Гармоники – частоты кратные оборотной частоте превышающие оборотную частоту в целое число раз (2, 3, 4, 5, ...). Количество и амплитуда гармоник показывают степень повреждения механизма.
- *Субгармоники* – нецелые части первой гармоники ($1/2$, $1/3$, $1/4$, ...оборотной частоты вращения), их появление в спектре свидетельствует о наличии зазоров.
- *Резонансные частоты* – частоты собственных колебаний деталей механизма. Резонансные частоты остаются неизменными при изменении частоты вращения вала.

- *Зубцовые частоты* – частоты равные произведению частоты вращения вала на число элементов (число зубьев, число лопастей, число пальцев): $f_{повр} = z \times f_{вр}$, где z – число зубьев колеса либо число лопаток рабочего колеса.

- *Боковые полосы* – появляются при повреждениях зубчатых колес, подшипников качения. Причина – это изменение скорости при взаимодействии поврежденных поверхностей. Значение модуляции указывает на источник возбуждения колебаний.

- *Вибрация электрического происхождения* обычно наблюдается на частоте 50 Гц, 100 Гц, 150 Гц и других гармониках. Частота вибрация электромагнитного происхождения исчезает в спектре при отключении электрической энергии.

- *Шумовые составляющие*, возникают при заеданиях, механических контактах или нестабильной частоте вращения. Характеризуются большим числом составляющих различной амплитуды.

Таким образом, диагностические признаки можно классифицировать через пики, кратные оборотной частоте $f_{вр}$ (см рисунок 3).

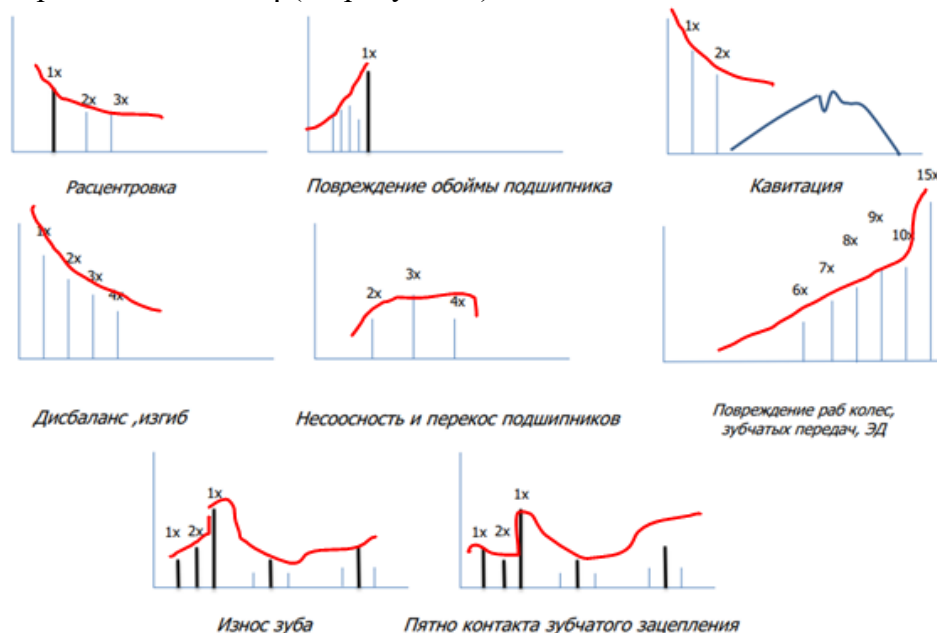


Рис. 3. Дефекты динамических машин, выраженных через огибающие характеристики

Стационарные – неизменные во времени и не зависящими от режима работы машины: сосредоточенный/распределенный дисбаланс ротора, прогиб ротора, некачественное сопряжение роторов в муфтах, ослабления и дефекты фундамента, расцентровка валов.

Квазистационарные – изменяющиеся с изменением режима работы и переходящие в стационарные в установившемся режиме работы: тепловой дисбаланс ротора, электромагнитные возмущения; дефекты подвижных муфт, тепловая расцентровка.

Нестационарные – зависящие от времени:

- скачкообразное и необратимое изменение вибрации: обрыв детали ротора, проскальзывание подшипника или другого элемента опорной системы после заедания

по опорной поверхности, проскальзывание детали ротора, посаженной с натягом, проскальзывание по ротору насадной полумуфты.

-повышенная изменчивость вибрации на переходных режимах: деградация поверхностей скольжения и направляющих шпоночных соединений подшипников скольжения турбин или компрессоров.

-быстрое и монотонное увеличение вибрации: тепловой дисбаланс, задевания ротора о статор, развитая трещина в роторе.

-медленное и монотонное увеличение вибрации: деградация ротора и опорной системы, износ дорожек качения в подшипниках, износ зубьев в зубчатых парах, появление разболтанности.

-скачкообразный и неравномерный рост вибрации: разрыв нескольких болтов на муфте.

-дефекты с двойной оборотной частотой ($2f_{вр}$): эллипсность шеек валов, трещина в роторе, перекося подшипника.

-дефекты с половинной оборотной частотой ($0,5f_{вр}$): износ или нарушение формы расточки вкладыша подшипника скольжения, ослабления опорных элементов.

-дефекты с частотой $0,3f_{вр}$: задевания ротора о статор, дисбаланс при существенной нелинейности опорной системы.

-дефекты с частотой $0,4f_{вр}$: повреждение сепаратора подшипника.

-дефекты с частотой $3, 4f_{вр}$ и более: расслабление муфтовых соединений, ослабление опор, трещина в роторе, задевания ротора о статор.

Рассмотрим типовые дефекты подшипников качения и скольжения. Вращающийся нагруженный подшипник качения может быть источником значительных колебательных сил, среди которых: силы трения; кинематические и ударные (импульсные) силы, обусловленные неровностями поверхностей качения; параметрические силы, обусловленные переменной жесткостью подшипника за счет периодического изменения нагруженных тел качения. Частоты гармонических составляющих вибрации подшипника качения определяются частотами вращения его деталей и комбинацией этих частот. Для определения частот вибраций подшипника необходимо знать частоту вращения машины n (об/мин) и основные параметры подшипника: d_n – наружный диаметр; d_c – внутренний диаметр; d_{mk} – диаметр тел качения; z – число тел качения; α – угол контакта тел качения с дорожкой качения.

- частота вращения внутреннего кольца $f_{об} = n/60$ (Гц);
- частота вращения сепаратора $f_c = 0,5f_{об}(1 - (d_{mk}/d_{cmk}) \cdot \cos \alpha)$, где $d_c = (d_b + d_n)/2$ – диаметр сепаратора;
- частота вращения тел качения $f_{mk} = f_c((d_c/d_{mk}) + \cos \alpha) = 0,5f_{об}(d_c/d_{mk})(1 - (d_{mk}^2/d_{cmk}^2) \cdot \cos^2 \alpha)$;
- частота перекачивания тел качения по наружному кольцу $f_{нар} = f_c z = 0,5zf_{об}(1 - (d_{mk}/d_c) \cdot \cos \alpha)$;
- частота перекачивания тел качения по внутреннему кольцу $f_{вн} = (f_{об} - f_c)z = 0,5zf_{об}(1 + (d_{mk}/d_c) \cdot \cos \alpha)$.

Основные источники вибрации в подшипниках скольжения – силы трения, кинематические и ударные силы. При этом гармонические составляющие вибрации, обусловленные неровностями шейки вала, наблюдаются на гармониках оборотной частоты $f_{об}$. Помимо этого, автоколебания ротора в подшипнике могут вызвать гармоническую вибрацию с частотами, кратными частоте автоколебаний ротора

$\cong 0,5f_{об}$. Силы трения в подшипниках скольжения существенно больше, чем силы трения в подшипниках качения, но мощность возбуждаемой случайной вибрации при этом, существенно меньше, чем в подшипниках качения. Ударные составляющие вибрации возникают при появлении дефектов смазки подшипника скольжения, при этом наибольший скачок мощности вибрации наблюдается при сухих ударах, сопровождающихся разрывом смазочного слоя и задеваниями шейки вала о поверхность вкладышей подшипника.

Цели и задачи работы. Современные математические комплексы и другое программное обеспечение помогают со сбором и интерпретацией данных, полученных по результатам вибродиагностики, но конечное заключение и предотвращение отказа зависит от опыта исследователя. Целью работы являлось создание и адаптация именно практической модели предиктивного ТОРО на основании метода огибающей. На исследуемом объекте данные по спектральной вибродиагностике снимались с помощью переносного виброколлектора, а расчеты совершались в специализированном ПО. Был составлен план-график спектрального вибромониторинга для высокоответственного динамического оборудования, в количестве 77 единиц на трех газоконденсатных месторождениях, находящегося в зоне высокого внимания с точки зрения критичности для технологии исследуемого объекта, при общем фонде динамического оборудования более 800 ед. Ежемесячно, с каждой единицы оборудования снималась спектральная характеристика, выгружалась, интерпретировалась, анализировалась и выдавались рекомендации по предотвращению отказов.

Модели для исследования на практике. Первый пример показан на воздуходувке, пр-во Япония (900 kW, 28140м³/час) сделан предварительный анализ вибромониторинга с помощью стационарного комплекса Bentley Nevada, наблюдалось увеличение уровня вибрации в ПИК на обоих подшипниках качения. Причина данного изменения была неизвестна и понимание данной причины невозможно без проведения т.е. останова, разбора и полной ревизии. Вместо ревизии была проведена вибродиагностика при помощи виброколлектора и интерпретация полученных данных при помощи ПО (см рис 4), выданы параметрические значения с промежуточным результатами, указанными в табл 1.

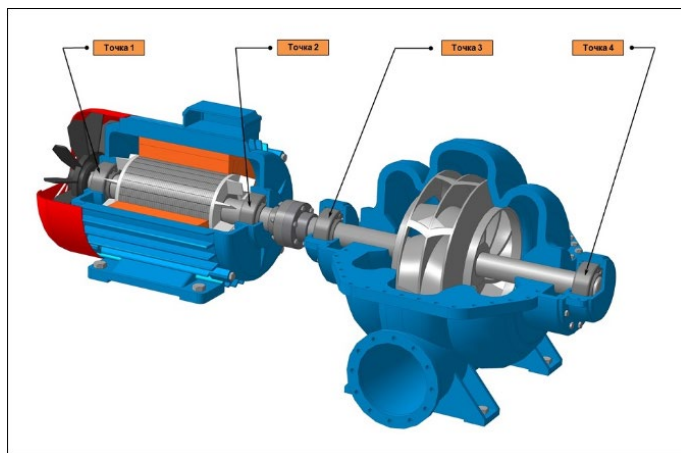


Рис. 4. Условный маршрут измерения для исследуемой воздуходувки, заложенный в ПО

Таблица 1. Снятые спектральные характеристики исследуемой воздуходувки

Параметр	Напр-е	Точка1	Точка2	Точка3	Точка4
П/Ф 5000-10000 (м/с2, ПИК)	В	4,7	62,5	7,67	8,86
	П	4,81	5,5	5,59	12,68
	О	4,27	6,17	5,47	8,18
Эксцесс 5000-10000 (м/с2, ПИК)	В	2,82	71,74	4,37	6,2
	П	2,84	2,98	3,39	16,06
	О	2,88	3,34	3,32	6,71
СпО 10К 10000 Гц, 500 Гц м/с2, ПИК	В	33,68	24,79	41,79	43,28
	П	34,76	27,84	35,51	49,42
	О	27,32	32,93	38,16	47,81
Спектр НЧ 2-200 Гц (мм/с СКЗ)	В	0,31	0,35	-	-
	П	1,11	1,33	-	-
	О	0,36	0,5	-	-

Таблица 2. Вероятности развития дефектов исследуемой воздуходувки

Оборудование	Узел	Дефект	Вероятность	Значения
Воздуходувка	Подшипник 1	Нар кольцо	88	
		удары	71	Точка 3 (В) П/Ф, ударные процессы
	Подшипник 2	Нар кольцо	82	Точка 4 (В), СпО 10К: 244,62, 489,24 Гц
		Вн кольцо	80	Точка 4 (В), СпО 10К: 244,62, 489,24 Гц
		удары	98	Точка 4 (О), П/Ф: ударные процессы. Точка 4 (П), Ф/С-ВЧ: ударные процессы

Как видно из таблицы 2, на приводном и не приводном подшипниках в точке 3 и 4 на пик-факторе видны ударные процессы, а в точке 4В просматриваются признаки развивающихся дефектов наружного/внутреннего кольца подшипников качения на частотах 244,62 Гц, 489,24 Гц. Рекомендация по предотвращению отказа - проведение технического обслуживания подшипников. После замены масла подшипниковых камер виброскорость воздуходувки опустилась до 3,5 мм/с. Подшипники заменять не понадобилось, в том числе не потребовалось проведение ревизии, но они были подготовлены на резерв, если при последующей вибродиагностике вероятности развития дефектов наружного и внутреннего кольца подшипников не уменьшатся.

В качестве другого примера рассмотрим проведение вибродиагностики с помощью спектрального вибромониторинга для насоса пр-во Южная Корея (75kw, 50м3/ч, 17,1 bar, 175 м напор) с виброскоростью 4,1 мм/с, приближающейся к пороговому значению 4,5мм/с.

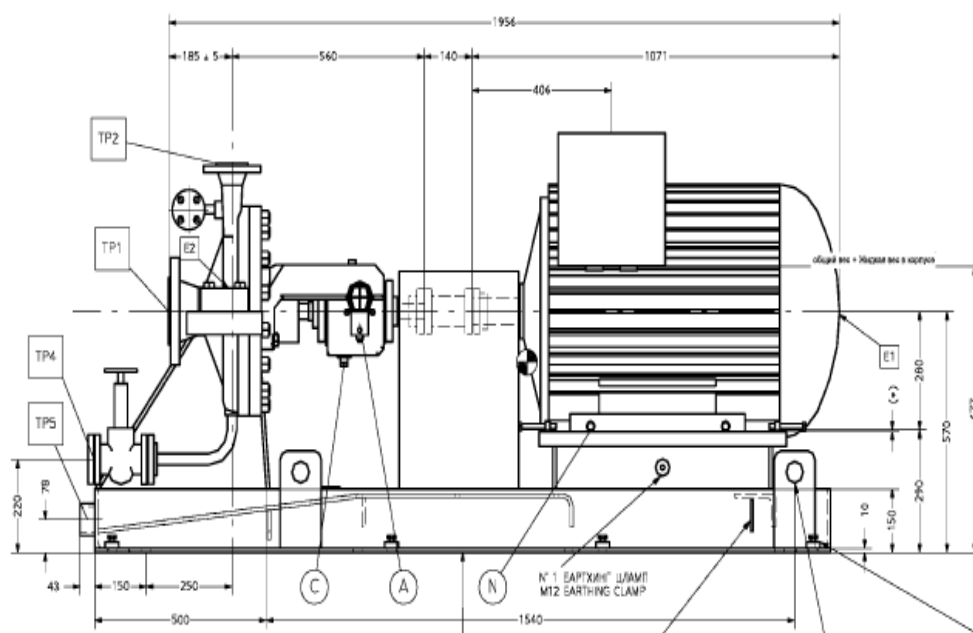


Рис. 5. Общий чертеж центробежного исследуемого центробежного насоса

Таблица 3. Вероятности развития дефектов для исследуемого насоса

Оборудование	Узел	Дефект	Вероятность	Значения
ЭД на ПК	Подшипник 1	Износ	98	Точка 1 (О), СпО 10К, 19,22, 38,47, 57,77
		Удары	72	Точка 1 (О), П/Ф ударные процессы
	Подшипник 2	Износ сепаратора	84	
		Раковины ТК	94	Точка 2 (В), СпО 10К, 204,46 точка 2 (П) СпО 6К: 185,08 204,47 223,69 Гц
		удары	71	Точка 2 (О), ударные процессы
Насос на ПК	Подшипник 1	удары	98	Точка 3 (В), П/Ф ударные процессы

Исходя из результатов спектрального анализа необходимо рассчитана высокая вероятность ударной нагрузки в точке 3 по Пик-Фактору, износа на неприводном подшипнике в точке 1 на частоте 19,22, 38, 47 и 57,77 Гц, и раковин тел качения на приводном подшипнике (точка 2 в спектре огибающей на частоте 185,08 Гц, 204,47 Гц и 223,69 Гц.), выдана рекомендация сделать замену неприводного подшипника электродвигателя и приводного подшипника насоса. На данном примере показано точное прогнозирование планируемых к замене деталей, следовательно увеличивается ремонтпригодность как показателя надежности оборудования. После проведения замены подшипников виброскорость снизилась до 3,1 мм/с. При эксплуатации оборудования до отказа, возможен износ более критичных деталей, таких как отверстия корпуса насоса под подшипник и изгиб вала. Таким образом, предиктивно заменив подшипник качения, защищаются более дорогостоящие детали насоса, увеличивается безотказность, долговечность и уменьшаются затраты на ревизию/ремонт оборудования.

Результаты прикладного исследования. Впервые, на исследуемом объекте, был проведен спектральный вибродиагностический анализ на критичном насосном и компрессорном оборудовании пр-ва США, Япония, Южная Корея, который экспериментально внедрялся через ОПИ. По результатам интерпретации данных, указываются возможные вероятности развивающихся дефекты или их отсутствие в зависимости от изменений в частотном спектре. Полученные данные позволили принимать решение о проведении предиктивного ТОРО, т.е. ремонта или обслуживания на основании полученных данных об оборудовании, а не согласно графика технического обслуживания или технического состояния по факту отказа. Важным и наиболее сложным элементом является анализ частотного спектра при помощи огибающей, при котором можно выявить различные изменения состояния машин без их демонтажа и ревизии и принять меры заранее, до нарушения работоспособности или выхода в отказ узла или всей машины, таким образом значительно снизив операционные затраты на ремонт оборудования, а также уменьшить количество отказов и увеличить надежность оборудования. По результатам выданных заключений и рекомендаций только по время ОПИ данной технологии количество отказов с 2024 г по 2025 г снизилось на 53,13% с 32 до 17 случаев. При этом операционные затраты на ремонт оборудования уменьшились в 9,52 раз (с 377,44 тыс USD в 2024 до 39,64 тыс USD в 2025 г). Для полноценного и качественного анализа данных требуется постоянное совершенствование навыков интерпретации спектрального частотного анализа и практическое применение все новых производных от метода огибающей высокой частоты, для чего требуются обновленные практически применимые математические модели. Таковыми методиками и разрабатываемыми моделями являются: анализ движения поршней и ползунов, винтовых пар, глубокая аналитика подшипников скольжения, круговые диаграммы, нормирование в полосах, снятие контурных характеристик, вычисление и замер резонансных частот, замеры с амплитудно-фазовой частотной характеристикой. Как метод огибающей, так и перечисленные выше перспективные методики спектральной вибродиагностики являются перспективными инструментами при внедрении стратегии предиктивного ТОРО в рамках философий, ориентированных на надежность (RCM).

Заключение. По результатам проведенной работы была разработана и практически опробована методика предиктивного ТОРО на основании спектральной вибродиагностики для критического динамического оборудования, показана возможность предотвращения (уменьшения) отказов динамического оборудования. Применение методов огибающей ВЧ спектральной вибродиагностики сократило количество отказов на исследуемом объекте на 53,13%. Метод успешно применяется в таких компаниях как Северсталь, Фосагро, Уралхим, Уралкалий, а также в крупных зарубежных нефтегазовых компаниях, таких как Shell, Exxon Mobil, Total, Equinor. К сожалению, в крупных нефтегазовых компаниях Российской Федерации метод широко не применяется, но перспектива его внедрения представляет особый интерес ввиду оптимизации затрат на техническое обслуживание и ремонт оборудования из-за внешних политико-экономических факторов и выхода на первое место вопросов надежности и технической целостности критичного дорогостоящего насосно-компрессорного оборудования.

Список литературы: 1. Костюков, В. Н. Современные концепции выбора и технического обслуживания компрессорного оборудования на нефтеперерабатывающих химических предприятиях : материалы семинара / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. — М. : ООО «НТЦ при Совете главных механиков», 2013. — 205 с. 2. Осина, Е. И. Имитационное моделирование вибродиагностики подвижных частей насосно-компрессорного оборудования // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : сб. ст. по мат. LXXVI междунар. студ. науч.-практ. конф. — 2019. — № 4 (75). — С. 31–36. 3. Системы вибромониторинга и диагностики насосных станций : каталог решений / ООО «ТехноСервис». — М., 2022. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). 4. Системы технической диагностики нефтегазового оборудования : монография / под общ. ред. д-ра техн. наук А. С. Волкова. — СПб. : Политехника, 2015. — 345 с. 5. Методические указания по вибродиагностике насосного оборудования / Под ред. [название центра]. — М., 2020. — 45 с. — (Серия: Техническая диагностика). 6. Программное обеспечение для вибродиагностики насосных агрегатов : методические рекомендации / Рос. акад. наук, Ин-т машиноведения. — М., 2018. — 67 с. 7. Смирнов, К. П. Алгоритмы обработки частотных спектров при мониторинге насосно-компрессорного оборудования / К. П. Смирнов. — М. : Машиностроение, 2017. — 156 с. 8. Чирков, Ю. А. Оценка работоспособности промышленного насосно-компрессорного оборудования Оренбургского НГКМ / Ю. А. Чирков, В. М. Кушнаренко, В. Н. Агишев [и др.]. — М. : Недра, 2017. — 120 с. 9. Саубанов, О. М. Разработка комплексного подхода к определению технического состояния насосно-компрессорного оборудования / О. М. Саубанов, А. Р. Валеев, В. И. Акимов [и др.]. — Уфа : УГНТУ, 2019. — 98 с. 10. Иванов, А. В. Применение спектрального анализа и метода огибающей для ранней диагностики дефектов подшипников насосного оборудования / А. В. Иванов, С. Л. Петров // Вестник машиностроения. — 2021. — № 3. — С. 45–51.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АБРАЗИВА В ПРАВЯЩЕЙ СУСПЕНЗИИ НА ПРОЦЕСС ПРАВКИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

Лахин А. М., Байков А. В. (ДонНТУ, г. Донецк, Россия)

Тел. +7(856)3010805 E-mail: tm@fimm.donntu.ru

В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния содержания абразива в правящей суспензии на производительность процесса правки и величину режущей способности алмазного круга. Полученные закономерности позволяют назначать концентрацию абразива в правящей суспензии, обеспечивающей минимальное время правки при достижении наибольшей режущей способности шлифовального круга.

Ключевые слова: алмазный шлифовальный круг, правка свободным абразивом, содержание абразива в суспензии, производительность правки, режущая способность шлифовального круга.

The paper presents the results of experimental studies of the effect of the abrasive content in the ruling suspension on the productivity of the straightening process and the cutting capacity of a diamond wheel. The obtained patterns make it possible to assign the concentration of abrasive in the ruling suspension, which ensures the minimum straightening time while achieving the maximum cutting capacity of the grinding wheel.

Keywords: diamond grinding wheel, straightening with a free abrasive, abrasive content in suspension, straightening performance, cutting ability of the grinding wheel.

Введение. Шлифование является наиболее эффективным методом финишной обработки материалов, обеспечивая высокую производительность обработки и достижение требуемого качества получаемой поверхности. Однако в процессе эксплуатации режущие свойства шлифовальных кругов ухудшаются вследствие износа шлифовальных зерен, их разрушения и вырывания из связки круга. Восстановление режущей способности шлифовальных кругов производится в результате их правки.

В настоящее время разработано множество способов правки, различающихся по способу воздействия на поверхность шлифовального круга (механическое, химическое, электрохимическое, электроэрозионное воздействие), по расположению зоны воздействия (в зону резания или в автономную зону), с непрерывным или периодическим воздействием и т.д. [1, 2]. Каждый способ имеет свою область применения.

Одним из способов правки шлифовальных кругов является правка свободным абразивом [3]. Как было указано ранее [4] достоинствами данного способа правки являются возможность проводить правку непосредственно на станке на рабочей скорости шлифовального круга, не требуется модернизация станка (которая необходима для реализации электроэрозионной и электрохимической правки), возможность правки шлифовальных кругов на любых типах связок: металлических, керамических, а также на основе полимерных материалов. При правке свободным абразивом на эффективность восстановления режущих свойств шлифовального круга влияет большое количество факторов, параметры которых определяются как характеристиками шлифовального круга (в первую очередь материалом связки и её твердостью), так и условиями его эксплуатации.

К настоящему времени в литературе рассмотрено преимущественно влияние зернистости абразивного шлифпорошка на производительность процесса правки, влия-

ние остальных факторов процесса правки на его эффективность изучены недостаточно полно.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния содержания абразива в правящей суспензии на производительность процесса правки и режущую способность алмазных кругов после правки.

Основное содержание и результаты работы. На продолжительность правки алмазных кругов свободным абразивом влияет большое количество факторов: марка правящего абразивного шлифпорошка (a), его зернистость ($\bar{x}$), изометричность (s), содержание в правящей суспензии (концентрация) (k), объем суспензии, подаваемой в зону правки в единицу времени (V), материал притира (m), и длина рабочей части притира (l), скорость подачи притира (v_{np}), скорость алмазного круга ($v_{кр}$). В общем виде функциональная зависимость производительности правки от указанных факторов имеет вид:

$$P = f \{ a, \bar{x}, s, k, V, m, l, v_{np}, v_{кр} \}. \quad (1)$$

Доля влияния указанных в (1) факторов на процесс правки шлифовального круга различна. Одним из наиболее влиятельных факторов является содержания абразива в правящей суспензии. Для получения количественных показателей влияния концентрации абразива в правящей суспензии на производительность правки и уровень режущей способности алмазного шлифовального круга после правки были проведены экспериментальные исследования. Методика проведения эксперимента, а именно, оборудование для проведения исследований, инструмент, используемые материалы, приборы, методы и точность измерения приведены в [4]. Концентрация абразива в составе суспензии оценивалась массовой долей шлифпорошка и варьировалась в диапазоне от 10% до 55%. Нижний предел определялся из условия рационального времени поведения процесса правки, верхний – ограничивается агрегатной устойчивостью дисперсной системы. Притир в процессе правки автоматически перемещался по направлению к шлифовальному кругу с постоянной скоростью 0,36 мм/мин. Объем суспензии с правящим шлифпорошком, подаваемой в зону правки в единицу времени, составил 2,0 см³/с. В процессе эксперимента регистрировались следующие параметры: режущая способность шлифовального круга (k , мм³/с·Н), величина удаленного алмазоносного слоя, развитость профиля рабочей поверхности шлифовального круга до и после правки.

Результаты эксперимента показали, что величина съема алмазоносного слоя при правке шлифовального круга увеличивается практически пропорционально времени правки для всех рассматриваемых концентраций правящей абразивной суспензии (рис. 1) (кривая съема при правке суспензией концентрации 10% представлена в обрзанном виде). Эти соотношения с достаточной точностью можно описать линейной зависимостью вида:

$$h = C \cdot t. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности « C » в выражении (2) характеризует скорость съема ал-

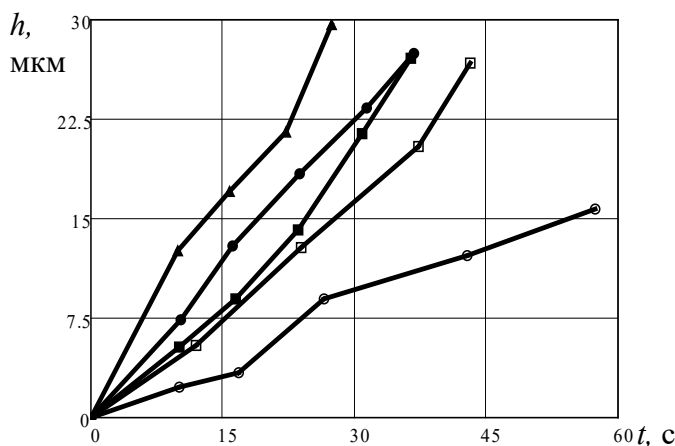


Рис. 1. Зависимость величины съема алмазоносного слоя h от времени правки t при концентрации шлифпорошка в суспензии: $\circ$ – 10%, $\square$ – 20%, $\blacksquare$ – 30%, $\bullet$ – 44%, $\blacktriangle$ – 55%

мазоносного слоя. С увеличением концентрации абразивного шлифпорошка в правящей суспензии скорость съема алмазоносного растет, следовательно, повышается производительность правки. На основании экспериментальных данных, для рассматриваемого диапазона концентрации шлифпорошков, значения коэффициент пропорциональности от концентрации абразива в суспензии представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициента «С» в формуле (2) для различной концентрации абразива

Концентрация абразива	10%	20%	30%	44%	55%
Коэффициент «С»	0,277	0,563	0,656	0,756	1,072

Приведенные в таблице 1 значения хорошо описываются логарифмической зависимостью вида:

$$C = -0,68 + 0,41 \cdot \ln k, \quad (3)$$

где k - концентрация абразивного шлифпорошка в правящей суспензии, %.

Полученные результаты показывают, что с повышением концентрации абразива в подаваемой в зону правки суспензии время правки шлифовального круга сокращается. При концентрации абразива в суспензии менее 20% процесс правки круга протекает медленно и использование суспензий такой концентрации нецелесообразно. Верхний уровень концентрации может быть ограничен на основании экономических обоснований расхода шлифпорошка.

Изменение режущей способности шлифовального круга в процессе правки имеет сложный нелинейный характер (рис. 2). На рис. 2 не представлена кривая изменения режущей способности шлифовального круга при правке суспензией концентрацией 10%, т.к. время правки составляет более 100 с и в пределах представленного на графике диапазона значение режущей способности составляет только 30 мм³/с·Н.

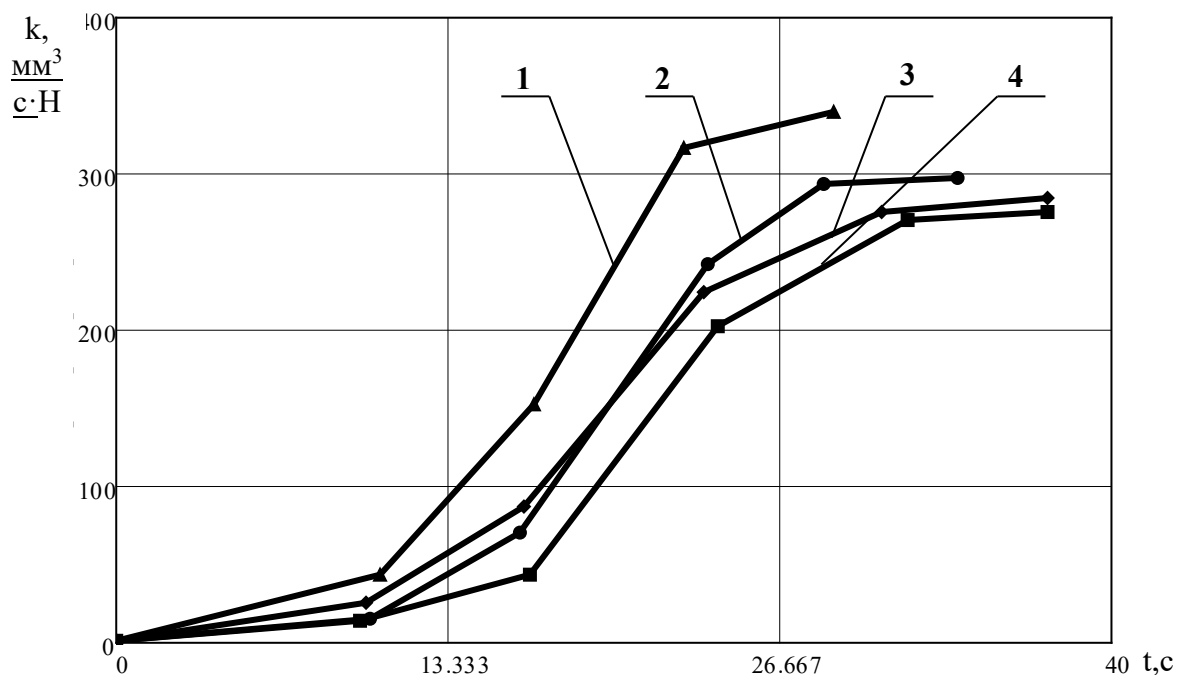


Рис. 2. Зависимость режущей способности шлифовального круга k от времени правки t при различной концентрации абразивного шлифпорошка в суспензии: 1 – 55%, 2 – 44%, 3 – 30%, 4 – 20%

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее значение режущей способности круга после правки и наиболее высокая производительность правки достигаются при использовании суспензии с концентрацией абразива 55%. При применении суспензий с концентрацией абразива от 20% до 44% результаты по достигнутому уровню режущей способности различаются в пределах 5% - 10%. Более высокие значения режущей способности при высокой концентрации абразива в суспензии достигаются вследствие минимизации контакта алмазных зерен шлифовального круга с материалом притира за счет создания в рабочей зоне сплошного слоя свободного абразива.

Производительность правки для указанных значений концентрации абразива в суспензии также достаточно близка по значениям, однако прослеживается тенденция её увеличения с увеличением концентрации. Рост производительности правки обусловлен тем, что при большой концентрации абразивных зерен в зоне правки происходит большее количество актов контакта зерен со связкой шлифовального круга.

Заключение. Проведенные исследования показали существенное влияние концентрации абразивного шлифпорошка в суспензии для правки на производительность правки и режущую способность шлифовального круга после правки.

Применение суспензии с содержанием абразивного шлифпорошка менее 20% нецелесообразно, т.к. в этом случае достигается низкое значение режущей способности шлифовального круга при большой длительности времени правки. С увеличением концентрации абразива в суспензии растут как производительность правки, так и значение режущей способности шлифовального круга. Рост производительности правки с увеличением концентрации абразива описывается логарифмической зависимостью.

Режущая способность алмазного шлифовального круга после правки тем выше, чем выше концентрация абразива в суспензии. В рассматриваемом диапазоне концентраций наибольшее значение режущей способности достигается при использовании суспензии концентрацией 55%. В диапазоне концентрации 20% - 44% режущая способность шлифовального круга различается незначительно. Максимальное значение концентрации абразива в суспензии ограничивается агрегатной устойчивостью дисперсной системы. Наибольшие значения режущей способности шлифовального круга для всех значений концентрации абразива в суспензии достигаются при удалении алмазонаосного слоя в пределах 60 мкм (зернистость алмазного круга 100/80) и достижения развитости профиля 40 мкм.

Список литературы: 1. Азарова, Н. В., Исследование способов правки алмазных кругов на металлической связке / Н. В. Азарова, А. Г. Мамолат, С. А. Поезд, В. П. Цокур // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2024. - Вып. 2 (85). - С. 3-8. 2. Шавва, М. А. Экспериментальная установка для алмазного шлифования с применением непрерывной электрохимической правки шлифовального круга / М. А. Шавва, Е. М. Захаревич // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 3. С. 44-58. DOI: 10.7463/0314.0699920. 3. Гусев, В. В. К определению параметров управления процессом правки свободным абразивом алмазного шлифовального круга при обработке керамики / В. В. Гусев, А. Г. Мамолат, С. А. Поезд // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2024. - Вып. 1 (84). - С. 11-16. 4. Байков, А. В. Выбор размера шлифзерна при правке алмазных шлифовальных кругов свободным абразивом / А. В. Байков, А. М. Лахин // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15-21 сентября 2025 г. – Донецк: ДонНТУ, 2025. – 500 с. – С.11-15.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Михайлов А. Н., Глушко В. Ю. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, Россия)

Тел./Факс: +7(856)3010805 E-mail: tm@fimm.donntu.ru

В статье проведен анализ особенностей эксплуатации и видов износа лопаток турбин газотурбинных двигателей. Рассмотрены основные факторы разрушения: эрозионно-абразивный износ, температурные воздействия, коррозионные процессы, окисление и их комбинированное влияние. Показана актуальность разработки технологий восстановления лопаток с применением функциональных защитных покрытий. Предложена укрупненная структура технологического процесса ремонта, включающая пять основных этапов: диагностику, подготовку поверхности, восстановление геометрии, нанесение защитных покрытий и финишную обработку.

Ключевые слова: лопатки турбин, газотурбинный двигатель, защитные покрытия, восстановление, ремонт.

The article analyzes the features of operation and types of wear of turbine blades of gas turbine engines. The main factors of destruction are considered: erosion and abrasive wear, temperature effects, corrosion processes, oxidation and their combined effect. The relevance of developing technologies for restoring blades using functional protective coatings is shown. An expanded structure of the repair process is proposed, which includes five main stages: diagnostics, surface preparation, restoration of geometry, application of protective coatings and finishing.

Keywords: turbine blades, gas turbine engine, protective coatings, restoration, repair.

Введение. Газотурбинные двигатели (ГТД) представляют собой сложные технические системы, состоящие из множества элементов, однако основными деталями, определяющими их надежность и ресурс, являются лопатки турбин. В процессе эксплуатации лопатки подвергаются интенсивному воздействию комплекса разрушающих факторов, что приводит к их преждевременному выходу из строя [1].

В условиях эксплуатации на лопатки турбин одновременно воздействуют: эрозионно-абразивный износ, высокие температуры, кислотные и солевые коррозионные среды, ударные и механические нагрузки, окисление [1].

Наибольшую опасность представляет комбинированное воздействие этих факторов, приводящее к ускоренному разрушению материала лопаток, образованию эрозионных повреждений, трещин и потере геометрии профиля (рисунки 1, 2).

Лопатки турбин ГТД являются одними из наиболее ответственных и дорогостоящих деталей, на долю которых приходится значительная часть стоимости всего двигателя. Их изготовление требует применения жаропрочных сплавов, высокоточного литья и многоступенчатой механической обработки. Существующий технологический процесс не обеспечивает решение вопроса ремонта и восстановления. В связи с этим полная замена экономически нецелесообразна, что делает задачу их восстановления критически важной для обеспечения рентабельности эксплуатации авиационной техники.

Цель работы – повышение ресурса лопаток турбин ГТД путем разработки рациональной структуры технологического процесса их ремонта и восстановления с применением функциональных ориентированных покрытий.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ особенностей эксплуатации и видов износа лопаток турбин вертолетных ГТД.
2. Разработать и предложить технологическое обеспечение процесса ремонта и восстановления.
3. Рассмотреть оборудование для напыления функционально-ориентированных покрытий.



Рис. 1. Эрозионное разрушение лопатки турбины

1. Анализ особенностей эксплуатации и видов износа лопаток турбин. Особенности эксплуатации лопаток турбин вертолетных ГТД обусловлены спецификой применения. В отличие от стационарных или самолетных двигателей, силовые установки вертолетов часто работают в условиях повышенного пылевого загрязнения, особенно при взлете и посадке на необорудованные площадки. Это приводит к интенсивному эрозионно-абразивному износу проточной части. Твердые частицы грунта, песка и пыли, попадая в тракт двигателя, вызывают микро- и макро-выкрашивание материала, формируя характерные эрозионные язвы и каверны (рисунки 1, 2) [1].

Кроме абразивного воздействия, лопатки испытывают экстремальные термомеханические нагрузки. Высокие температуры газового потока в сочетании с центробежными силами и высокочастотными вибрациями способствуют развитию усталостных процессов, ползучести и термического усталостного растрескивания. Дополнительным разрушающим фактором выступает высокотемпературная коррозия и окисление, ускоряемые наличием в продуктах сгорания топлива агрессивных химических соединений. Комбинация этих воздействий приводит к потере аэродинамического профиля, уменьшению сечения пера лопатки и, как следствие, к снижению КПД двигателя и риску разрушения. Для работы в таких условиях необходимы функциональные защитные покрытия, способные противостоять комплексному износу, однако их нанесение и

последующее восстановление требуют определенного технологического процесса.

2. Технологическое обеспечение процесса ремонта и восстановления. Разработка рациональной структуры технологического процесса ремонта лопаток требует комплексного технического обеспечения, объединяющего методы дефектации, современные технологии наплавки и нанесения покрытий. Предложенный технологический процесс носит итерационный характер и укрупненно состоит из пяти взаимосвязанных этапов (рисунок 3).

Первый этап включает в себя комплексную диагностику и дефектацию поступающих на ремонт лопаток. Проводится визуальный контроль, измерение геометрии профиля, а также дефектоскопия для выявления скрытых трещин и внутренних дефектов, очистка и снятие предыдущих покрытий при наличии. Предполагает удаление остатков отработавших защитных и теплозащитных покрытий, как правило, химическим методом и опорным полированием.



Рис. 2. Забоина на кромке лопатки

Второй этап является одним из ключевых этапов восстановления лопатки – наплавка материала в зоне эксплуатационных повреждений. Основной задачей данной операции является компенсация потерь материала и формирование припуска, необходимого для дальнейшего восстановления номинальной геометрии детали [2].



Рис. 3. Укрупненные этапы ремонта и восстановления лопаток ГТД

Особенностью наплавки лопаток турбин является необходимость работы с жаропрочными сплавами, которые характеризуются высокой чувствительностью к термическим воздействиям. В процессе наплавки возникает локальный нагрев материала, сопровождающийся структурными изменениями и образованием остаточных напряжений.

Для повышения качества восстановления предлагается предварительное формирование специальных канавок в ремонтируемой зоне. Наличие канавок позволяет увеличить площадь контакта между основным и наплавленным материалом, улучшить механическое сцепление и снизить вероятность отслоения восстановленного слоя в процессе эксплуатации.

Кроме того, формирование канавок способствует более равномерному распределению напряжений в переходной зоне между основным и наплавленным металлом. Это особенно важно для деталей, работающих в условиях циклических термомеханических нагрузок.

После выполнения наплавки возникает необходимость восстановления исходной геометрии профиля лопатки. Данная операция является одной из наиболее сложных, поскольку поверхность пера представляет собой пространственную аэродинамическую поверхность переменной кривизны.

Традиционные методы обработки таких поверхностей характеризуются значительной трудоемкостью подготовки управляющих программ и недостаточной гибкостью при работе с деталями, имеющими индивидуальные отклонения формы после ремонта [3]. В связи с этим в работе рассматривается применение метода местного эквидистантного пространственного трассирования. Применение данного метода позволяет учитывать сложную форму поверхности и уменьшать отклонения от

номинальной геометрии.

Сущность подхода заключается в построении траектории движения инструмента на основе локального анализа геометрии поверхности. Для каждой точки обработки определяется эквидистантная поверхность, относительно которой формируется траектория инструмента (рисунок 4). Это позволяет обеспечить постоянство условий резания и более точно воспроизводить требуемый профиль лопатки.

В отличие от традиционных подходов, где используется единая стратегия движения инструмента, предлагаемый метод обеспечивает адаптацию траектории к локальным особенностям поверхности.

После восстановления геометрических параметров лопатки возникает задача повышения ее эксплуатационной стойкости. Для решения данной задачи предлагается использовать функционально-ориентированные покрытия.

В отличие от традиционного подхода, при котором покрытие рассматривается исключительно как защитный слой, в данной работе покрытие является элементом комплексной системы обеспечения требуемых эксплуатационных свойств детали.

Выбор структуры покрытия осуществляется с учетом характера действующих нагрузок. Для лопаток турбин наиболее опасными являются процессы эрозионного износа, высокотемпературного окисления и термоциклического разрушения. Поэтому покрытие должно обеспечивать одновременно высокую износостойкость, жаростойкость и сопротивление воздействию газового потока.

Особое значение имеет возможность варьирования состава и структуры покрытия в зависимости от условий эксплуатации конкретного двигателя. Такой подход позволяет перейти от универсальных решений к специализированным покрытиям, адаптированным к определенным режимам работы [4, 5].

В результате нанесения покрытия формируется поверхностный слой с заранее заданным комплексом свойств, обеспечивающим повышение ресурса восстановленной лопатки.

Заключительным этапом технологического маршрута является окончательная обработка лопатки после нанесения покрытия.

Основная задача данной операции заключается в обеспечении требуемых геометрических параметров, качества поверхности и точности профиля пера. Это особенно важно для турбинных лопаток, поскольку даже незначительные отклонения формы способны привести к ухудшению аэродинамических характеристик и снижению эффективности работы двигателя.

На данном этапе осуществляется удаление избыточного материала покрытия, формирование окончательного профиля и обеспечение требуемых параметров шероховатости поверхности. При этом необходимо учитывать, что толщина защитного слоя ограничена, поэтому обработка должна выполняться с высокой точностью и минимальным съемом материала.

Кроме геометрических параметров производится контроль качества

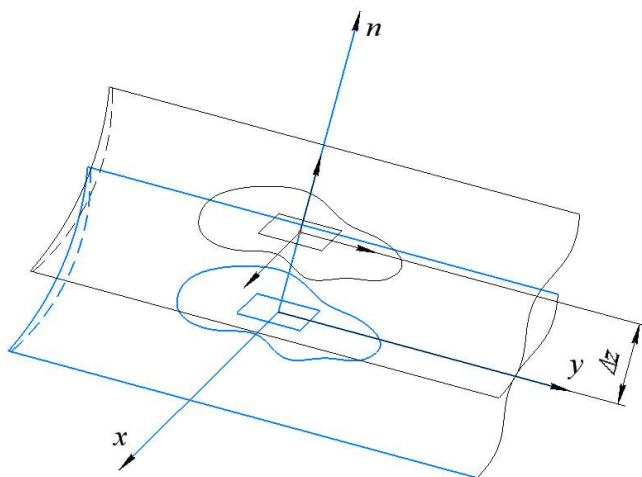


Рис. 4. Эквидистантная поверхность пера лопатки

восстановленной детали. Оценивается соответствие размеров, состояние поверхности и отсутствие дефектов, которые могли возникнуть на предыдущих этапах ремонта.

Таким образом, окончательная обработка завершает процесс восстановления и обеспечивает получение детали, характеристики которой максимально приближены к характеристикам новой лопатки. С точки зрения разработанной технологии именно на этом этапе формируется итоговый результат всех предыдущих операций и подтверждается эффективность предложенного подхода к восстановлению лопаток турбин.

3. Оборудование для напыления ФОП. Способами нанесения ФОП для лопаток турбин могут быть электронно-лучевой метод испарения с последующей конденсацией материалов покрытия в вакууме, плазменное напыление, ионно-плазменное напыление, детонационное напыление и др [1,5].

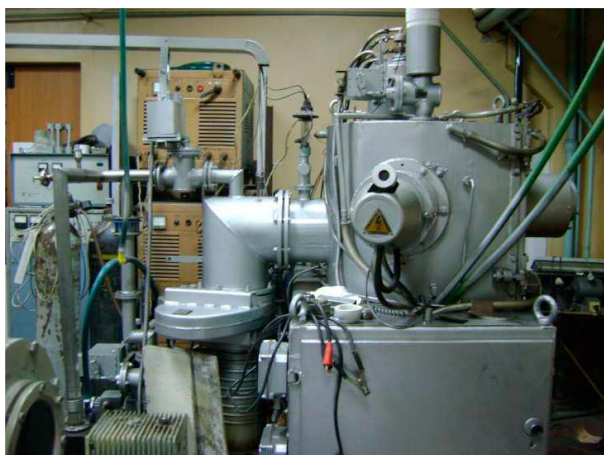


Рис. 5. Установка ННВ 6.6.-И1

В данной работе предлагается рассмотреть в качестве основного метода нанесения защитного покрытия – ионно-плазменное напыление. Данный вид технологии является в настоящее время достаточно перспективным и технологичным, работы по данному направлению велись в [5, 6].

Представленная на рисунке 5 модернизированная установка для нанесения ионно-плазменных ФОП сконструирована и разработана на базе

системы ННВ 6.6.-И1. по методу конденсации материала покрытия из плазменной фазы в вакууме с ионной

бомбардировкой поверхности обрабатываемой детали. Аналогичное название данного метода, это метод КИБ – катодно- ионной бомбардировки. В перечень возможностей данной установки при проектировании и конструировании заложена возможность нанесения покрытий на большой ряд различных видов деталей машиностроения.

Характеристиками ННВ 6.6.- И1 являются:

- размеры камеры установки – 600 x 650 мм (тип камеры - вакуумная);
- скорость нанесения слоя покрытия – от 10 до 40 мкм/ч;
- количество испарителей – 3 шт.;
- время технологического цикла – до 2,5 часа.

Работа данной установки реализуется за счет сформированного плазменного потока, состоящего из микрочастиц и частиц материала (комплексов материалов), используемого в качестве покрытия. Подводимый электрический ток к катодам, изготовленным из специальных материалов, создает дуговой разряд в вакуумной камере установки между анодом, который, по сути, и есть лопатка турбины закрепленная в вспомогательном устройстве, приводимом в движение с помощью электромотора и редуктора. Это позволяет базировать деталь в потоке плазмы без прекращения процесса нанесения покрытия. За счет технической возможности, позволяющей регулировать интенсивность и ширину плазменного потока, осуществляется регуляция равномерности нанесения защитного покрытия [6].

Заключение. В результате выполненного исследования достигнута поставленная цель, заключающаяся в разработке рациональной структуры технологического процесса

ремонта и восстановления лопаток турбин газотурбинных двигателей с применением функционально-ориентированных покрытий для повышения их ресурса.

В ходе работы проведен анализ особенностей эксплуатации лопаток турбин вертолетных ГТД и установлено, что основными причинами снижения их работоспособности являются эрозионно-абразивный износ, высокотемпературное окисление, коррозионные процессы, а также воздействие циклических термомеханических нагрузок. Показано, что наиболее интенсивное разрушение возникает при совместном действии указанных факторов.

Разработана укрупненная структура технологического процесса ремонта и восстановления лопаток, включающая этапы диагностики и дефектации, подготовки поверхности, восстановления геометрии методом наплавки с последующей механической обработкой, нанесения функционально-ориентированных покрытий и финишного контроля качества. Предложенная последовательность операций обеспечивает комплексный подход к восстановлению эксплуатационных характеристик деталей.

Рассмотрены особенности применения функционально-ориентированных покрытий и оборудование для их нанесения. В качестве перспективного технологического решения предложено использование ионно-плазменного метода нанесения покрытий на модернизированной установке ННВ 6.6-И1, обеспечивающей получение равномерных защитных слоев с регулируемыми свойствами.

Список литературы: 1. Богуслаев, В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко - Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. - 335 с. 2. Голубовский Е.Н., Жаткин С.С., Паркин А.А. Исследование и разработка технологии восстановления лопаток газотурбинного двигателя после эксплуатации методом лазерной наплавки // Известия Самарского научного центра РАН. 2021. Т. 23. № 3. С. 29–34. 3. Котляр Д.И., Ломанов А.Н. Метод сканирования тонких поверхностей при выполнении ремонта лопаток газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22. № 4. С. 112–124. 4. Панков В.П., Бабаян А.Л., Куликов М.В., Косой В.А., Варламов Б.С. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 161–172. 5. Александров Д.А., Горлов Д.С., Будиновский С.А. Применение комплекса ионно-плазменных технологий для защиты лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя от эрозионного износа и фреттинга // Труды ВИАМ. 2021. № 2. С. 71–80. 6. Барвинок, В.А. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД / В.А. Барвинок, И.Л. Шитарев, В.И. Богданович, И.А. Докукина, В.М. Карасев // Вестник Самарского Государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). Самара: Издательство "Самарский университет", 2009. – Вып.3(19). - Ч. 1. - С.11-29.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ГТД

Михайлов А. Н., Киселица Д. О., Огренич Д. В., Жарких Д. С., Пичко Н. С.

(ФГБОУ ВО ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, УФ УГТУ г. Усинск РФ)

Тел.: +7 949 410 44 85; E-mail: dmitryogrenich@yandex.ru

В работе рассматриваются особенности ремонта и восстановления лопаток турбины газотурбинных двигателей (ГТД), функционирующих в условиях высоких температурных и механических нагрузок. Выполнен анализ основных видов повреждений лопаток, возникающих в процессе эксплуатации, включая термическую усталость, эрозионный и коррозионный износ, образование трещин и деформаций. Кроме того, рассмотрен технологический процесс восстановления лопаток.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатки турбины, ремонт, восстановление, жаропрочные сплавы, наплавление, ресурс.

The paper discusses the features of repairing and restoring the turbine blades of gas turbine engines (GTEs) that operate under high temperature and mechanical loads. It analyzes the main types of damage to the blades that occur during operation, including thermal fatigue, erosion and corrosion wear, and the formation of cracks and deformations. Additionally, the paper examines the process of restoring the blades.

Keywords: gas turbine engine, turbine blades, repair, restoration, heat-resistant alloys, surfacing, resource.

Введение. Газотурбинные двигатели широко применяются в авиационной отрасли, энергетике и различных областях промышленности. Одними из наиболее ответственных элементов конструкции ГТД являются лопатки турбины, которые в процессе эксплуатации подвергаются воздействию сверхвысоких температур, значительных центробежных сил, вибрационных нагрузок и агрессивной рабочей среды.

Вследствие такого комплексного воздействия на поверхности и в структуре материала лопаток возникают различные дефекты: эрозионный износ, термические повреждения, усталостные трещины, коррозия, деформации и разрушение защитных покрытий. Появление подобных дефектов приводит к ухудшению аэродинамических характеристик, снижению КПД двигателя и уменьшению ресурса.

В связи с этим особое значение приобретают вопросы ремонта и восстановления лопаток турбины. Современные технологии позволяют устранять возникающие повреждения и в ряде случаев восстанавливать эксплуатационные характеристики деталей до уровня, близкого к первоначальному. Вместе с тем ремонт лопаток представляет собой сложный технологический процесс, обусловленный особенностями их конструкции, применением жаропрочных материалов и повышенными требованиями к точности геометрических параметров и качеству поверхности.

Цель работы – синтез принципа повышения ресурса лопаток турбины ГТД за счёт восстановления геометрических размеров и качества поверхностного слоя. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд взаимосвязанных задач.

Задачи:

1. Выполнить анализ особенностей износа и разрушения элементов лопаток турбины ГТД.

2. Определение некоторых факторов, которые можно использовать как граничные условия для реализации синтеза рациональной структуры.

3. Синтез рациональной структуры технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины ГТД.

2. Основное содержание и результаты работы. Газотурбинные двигатели относятся к числу высоконагруженных энергетических установок, эффективность и эксплуатационная надёжность которых во многом определяются состоянием лопаточного аппарата. Рабочие и сопловые лопатки являются наиболее ответственными элементами конструкции, поскольку функционируют в условиях интенсивного теплового и механического воздействия.

Во время работы турбины лопатки постоянно контактируют с потоком продуктов сгорания, характеризующимся высокими значениями температуры, давления и скорости движения газа. При этом температура газового потока перед отдельными ступенями турбины может превышать допустимую температуру используемых материалов на 200–500 °С. Следовательно, обеспечение пролонгирования работы лопаточного аппарата является сложной инженерной задачей, особенно для ступеней турбины высокого давления [1].

На лопатки одновременно воздействует несколько видов нагрузок. Помимо влияния высокотемпературной среды, рабочие лопатки испытывают действие значительных центробежных сил, возникающих при вращении ротора, а также газодинамических нагрузок и вибрационных колебаний. Поэтому допустимые температурные параметры определяются свойствами применяемых жаропрочных материалов, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Материалы, применяемые для изготовления лопаток турбин ГТД [2]

Тип материала	Марка сплава	Применение	Температура, °С
Жаропрочные никелевые сплавы	ХН77ТЮР(ЭИ437Б)	Диски, лопатки и др. нагруженные детали турбин	750 - 800
Жаропрочные никелевые сплавы	ЖС6, ЖС6У	Рабочие и сопловые лопатки турбин	1000 - 1050
Монокристаллические никелевые сплавы	ЖС26, ЖС32	Лопатки турбины высокого давления	1100
Жаропрочные никелевые сплавы	ЧС70У -ВИ	Рабочие лопатки	1050

Длительное воздействие переменных нагрузок приводит к возникновению различных эксплуатационных повреждений. Значительная часть разрушений рабочих лопаток имеет усталостный характер и развивается под воздействием циклических напряжений, возникающих вследствие колебаний конструкции. Причиной появления таких колебаний могут быть неравномерность процессов горения топлива, пульсации газового потока и другие динамические факторы.

Наряду с этим существенное влияние на снижение ресурса оказывает воздействие агрессивной среды продуктов сгорания. Наличие химически активных

компонентов способствует развитию газовой коррозии, а совместное действие температуры, механических напряжений и окислительных процессов вызывает структурные изменения в поверхностных слоях материала. Кроме того, дополнительным фактором ухудшения состояния лопаток является эрозионный износ, возникающий при длительном воздействии высокоскоростного газового потока [1, 3].

Анализ опубликованных исследований показывает эффективность технологий ремонта сопловых лопаток ГТД из жаропрочного никелевого сплава ЖС6У. В частности, применение очистки поверхности, удаления отработанного покрытия, восстановления структуры методом ГИП с последующей термической обработкой, а также ремонта дефектов пайкой и нанесения защитного покрытия обеспечивает восстановление структуры сплава без образования дополнительных дефектов. Полученные результаты подтверждают перспективность применения данной технологии для повышения ресурса лопаток ГТД.

Проведённые исследования свидетельствуют о необходимости дальнейшего изучения длительной прочности и жаростойкости восстановленных деталей, оценки их работоспособности в условиях циклических термомеханических нагрузок, а также оптимизации параметров ГИП, пайки и нанесения покрытий для различных режимов эксплуатации [4].

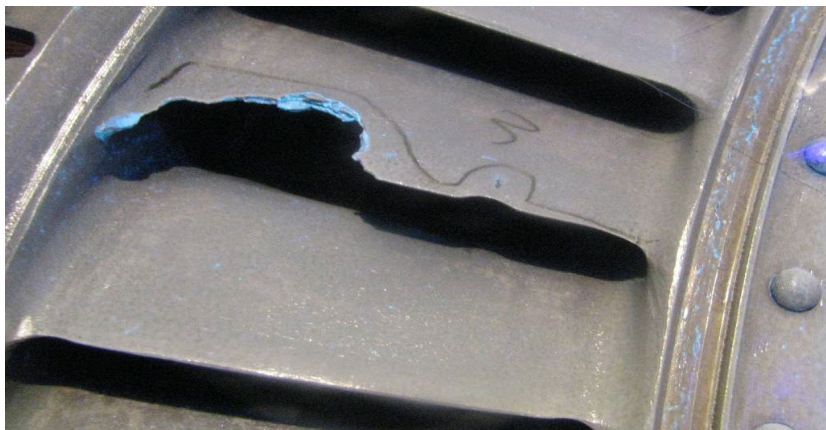


Рис. 1. Вырыв материала на выходной кромке лопатки

Рассматривая вопросы восстановления лопаток турбины, необходимо учитывать влияние остаточных напряжений. В зависимости от масштаба их уравнивания различают остаточные напряжения первого, второго и третьего рода [5].

Наибольшее практическое значение для технологии машиностроения имеют остаточные напряжения первого рода, поскольку именно они оказывают существенное влияние на точность обработки и эксплуатационные характеристики деталей. Напряжения второго и третьего рода относятся преимущественно к области физики материалов и в рамках данной работы подробно не рассматриваются.

Причины возникновения остаточных напряжений могут иметь как конструкционный, так и технологический характер. Технологические напряжения формируются вследствие неравномерного нагрева и охлаждения, фазовых и структурных превращений, диффузионных процессов, а также пластической деформации материала. Поэтому исследование характера их распределения и величины имеет важное значение при разработке технологических процессов восстановления деталей.

Влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства материала определяется условиями его работы. При определённых сочетаниях температуры и ресурса эксплуатации остаточные напряжения оказывают существенное воздействие на

долговечность материала. Однако при повышенных температурах возможна их релаксация, вследствие чего влияние напряжений на ресурс снижается. В этом случае определяющее значение приобретают свойства поверхностного слоя и степень наклёпа материала [6].

На основании проведённого анализа особенностей эксплуатации, механизмов износа и причин разрушения лопаток турбины ГТД можно определить ряд факторов, которые следует использовать в качестве граничных условий при синтезе рациональной структуры технологического процесса восстановления.

К числу основных граничных условий относятся высокие рабочие температуры, достигающие 900–1200 °С, действие значительных центробежных и газодинамических нагрузок, а также наличие циклических термомеханических воздействий, вызывающих развитие усталостных процессов в материале. Кроме того, необходимо учитывать влияние агрессивной газовой среды, приводящей к развитию коррозионных и эрозионных повреждений поверхностного слоя.

Существенным фактором являются свойства применяемых жаропрочных никелевых сплавов, определяющие допустимые температурные режимы восстановления и последующей эксплуатации деталей. При разработке технологического процесса также необходимо учитывать характер распределения остаточных напряжений, возникающих в результате ремонтных операций, поскольку они оказывают влияние на долговечность восстановленных элементов.

Важным граничным условием является обеспечение требуемого состояния поверхностного слоя, включая его геометрические параметры, структурное состояние, уровень остаточных напряжений и наличие защитных покрытий. Совокупность перечисленных факторов определяет требования к выбору технологических методов восстановления и позволяет сформировать рациональную структуру процесса, направленную на повышение ресурса лопаток турбины ГТД.

Основываясь на рассмотренных данных, можно перейти к формированию структуры технологического процесса ремонта и восстановления лопаток турбины ГТД. Предлагаемая структура включает три основных этапа: предварительную подготовку перед наплавлением, выполнение наплавления и окончательную обработку после наплавления.

Одним из перспективных направлений является применение функционально-ориентированных свойств [7] и методов управления состоянием поверхностного слоя, обеспечивающих повышение эксплуатационного ресурса восстановленных деталей. При этом на всех этапах технологического процесса целесообразно использовать функционально-ориентированный подход, позволяющий учитывать эксплуатационные требования к детали и обеспечивать требуемые функциональные свойства поверхности.

Технологический процесс ремонта и восстановления представлен на рис. 2. состоит из множества операций и переходов, где V_i – входные параметры технологического процесса, а W_i – выходные параметры технологического процесса.

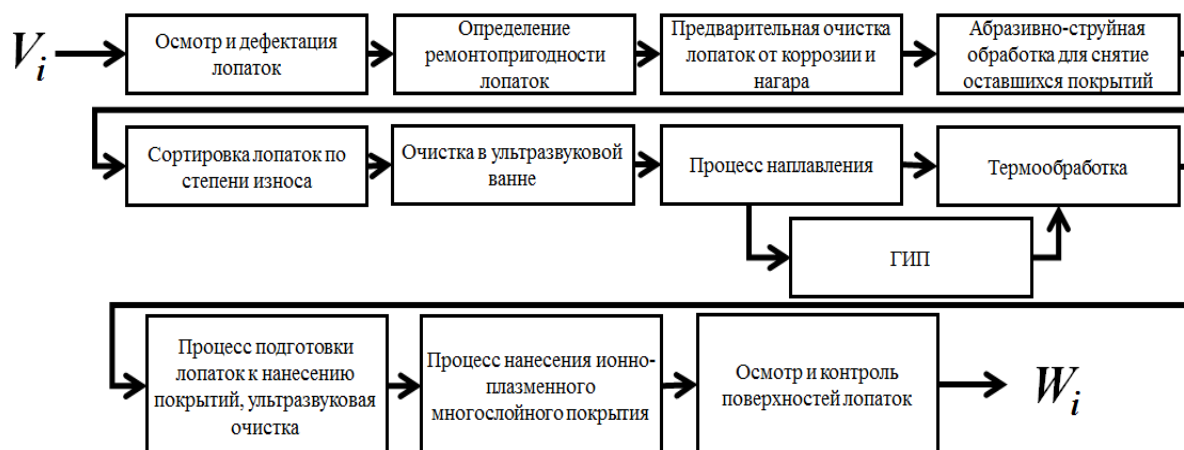


Рис. 2. Один из множества вариантов технологического процесса ремонта и восстановления лопаток турбины ГТД

В самом начале производится осмотр и дефектации, чтобы уточнить насколько произошёл износ в процессе работы далее определяется ремонтпригодность изношенных лопаток. Далее происходит предварительная обработка лопаток от коррозии и нагара после чего лопатки попадают на участок абразивно-струйной обработки [8] для полного снятия частично износившихся покрытий, иногда поверхности лопаток дополнительно подвергают химическому и электрохимическому травлению в растворах сильных кислот, недостатком данного метода является существенная токсичность и агрессивность используемых растворов и электролитов. Далее лопатки сортируются по степени износа и попадают на участок для процесса наплавления, в зависимости от материала лопатки может применяться как сварка, так и пайка. В работе [4] сказано, что для никелевых жаропрочных сплавов лучше применять пайку, потому что при сварке имеется склонность к горячим трещинам. Далее лопатки подвергаются термообработке, которая состоит из отжига, закалки с последующим старением. После термообработки (иногда до) либо же в комбинации может применяться для устранения пористости методы горячего изостатического прессования (ГИП). После лопатки приходят на участок подготовки к нанесению покрытий, процесс подготовки может состоять из различного множества операций как правило — это полирование с последующей ультразвуковой обработкой. Полирование производится для получения необходимой шероховатости поверхностей. Ультразвуковая обработка производится для глубокой очистки поверхностей лопаток, т.к. засаленность поверхности может существенно повлиять на сцепляемость основного материала и покрытий. Затем лопатки попадают на участок ионно-плазменного многослойного покрытия. В данной работе напыление производится покрытием нитрид циркония.

Укрупненно процесс нанесения покрытий состоит из:

1. Насыщения газами поверхности пера лопатки (азотирование).
2. Азотирование в тлеющем разряде.
3. Азотирование с использованием энергии вакуумного-дугового разряда.
4. Ионное травление в газовом разряде.
5. Ионная бомбардировка и прогрев обрабатываемой поверхности.
6. Нанесение защитного покрытия нитрид циркония.



Рис. 3. Лопатки турбины после технологического процесса ремонта (после операции наплавления)

Заключение. В результате проведённого исследования выполнен анализ особенностей эксплуатации и основных механизмов повреждения лопаток турбины ГТД. Установлено, что наибольшее влияние на снижение их ресурса оказывают высокие температуры, циклические нагрузки, а также коррозионные и эрозионные процессы.

Определены основные факторы, которые могут быть использованы в качестве граничных условий при синтезе рациональной структуры технологического процесса восстановления: температурный режим эксплуатации, уровень механических нагрузок, свойства жаропрочных материалов, характер повреждений и состояние поверхностного слоя.

Показано, что повышение ресурса лопаток целесообразно обеспечивать за счёт восстановления геометрических размеров и формирования требуемых функциональных свойств поверхностного слоя на основе функционально-ориентированного подхода. Это создаёт основу для разработки рациональной структуры технологического процесса ремонта и восстановления лопаток турбины ГТД.

Список литературы: 1. Формирование технологических основ изготовления рабочих лопаток турбины ГТД / Р. А. Вдовин. — Самара : Издательство Самарского университета, 2021. — 209 с. 2. Авиационный газотурбинный двигатель / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. — Пермь : ОАО «Авиадвигатель», 2006. — 1204 с. 3. Исследование особенностей эксплуатации лопатки турбины ГТД / А. Н. Михайлов, Д. С. Жарких, Д. О. Киселица, Д. В. Огренич // Машиностроение и техносфера XXI : сб. трудов XXXI Междунар. науч.-техн. конф. (Севастополь, 16–22 сентября 2024 г.). — Донецк : ДонНТУ, 2024. — С. 229–234. 4. Добрынин, Д. А. Ремонт деталей горячего тракта газотурбинного двигателя из жаропрочного никелевого сплава марки ЖС6У / Д. А. Добрынин, М. С. Алексеева, А. Н. Афанасьев-Ходыкин // Труды ВИАМ. — 2021. — № 5 (99). — С. 3–13. 5. Технология машиностроения / В. В. Клепиков, А. Н. Бодров. — 2-е изд. — Москва : ФОРУМ, 2008. — 864 с. — ISBN 978-5-91134-251-7. 6. Основы технологии машиностроения / В. Ф. Безъязычный. — Москва : Машиностроение, 2013. — 568 с. — ISBN 978-5-94275-669-7. 7. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. — Донецк : ДонНТУ, 2009. — 346 с. 8. Михайлов, А. Н. Некоторые особенности технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. В. Огренич // Высокие технологии в машиностроении : Материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 08–10 апреля 2026 года. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2026. — С. 217-222. — EDN XPQYUD.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ НАКАТЫВАЕМЫХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

Михайлов А. Н., Котляров С. Б., Котляров В. Б., Котляров Б. С. (ДонНТУ,
г. Донецк, ДНР, Россия)

Тел: +7(964) 70-45-362; E-mail: velidarkotlarov@mail.ru

В настоящей работе рассмотрен вопрос изготовления оребренных труб для теплообменников различного назначения, отличающихся составом материалов, длиной готовой трубы, и размерами высоты ребер, диаметрами наружных поверхностей ребер и диаметрами внутренних отверстий, а также величины диапазонов размеров указанных параметров, которые можно обрабатывать на одной установке. При этом необходимо заменять только комплекты инструментальных роликов при неизменных параметрах привода, корпуса головки и посадочных размеров подвижных деталей устройства.

Ключевые слова: оребренная труба, накатная головка, кинематическая цепь, инструменты, формализация записи, диапазон размеров, дорн.

This paper examines the issue of manufacturing finned pipes for heat exchangers for various purposes, differing in the composition of materials, the length of the finished pipe, and the dimensions of the height of the fins, the diameters of the outer surfaces of the fins and the diameters of the internal holes, as well as the size ranges of these parameters, which can be processed in one installation. In this case, it is necessary to replace only sets of tool rollers with unchanged parameters of the drive, head housing and mounting dimensions of the moving parts of the device.

Key words: finned tube, knurled head, kinematic chain, tools, formalization of recording, size range, mandrel.

Введение

В связи с большим разнообразием теплообменников различного назначения для предприятия, производящего такие теплообменники, вопрос снижения стоимости изготовления является актуальным в ремонтном производстве узлов и агрегатов тепловозов. Удешевление производства возможно за счет снижения затрат на оребрение труб методом накатки с применением роликовой накатной головки на универсальном оборудовании. При этом в случае необходимости изготовления труб некоего с различными размерами по диаметрам и высоте ребер требуется на каждый типоразмер изготовить свои установки, или обеспечить регулировку наладок. Вариант регулирования типоразмеров накатываемых труб является более предпочтительным и менее затратным.

Цель и задачи.

Целью исследований в настоящей работе является поиск путей снижения затрат на изготовление трубчатых теплообменников тепловозов за счет удешевления оребрения труб ограниченной номенклатуры. Для достижения цели исследований необходимо решить ряд следующих задач.

1. Определить возможный диапазон параметров труб по диаметрам и высоте ребер, подлежащих оребрению методом накатки на имеющемся на предприятии оборудовании.

2. Разработать рекомендации вариантов изготовления дополнительного инструментального обеспечения для накатывания труб разных диаметров с разными высотами ребер охлаждения.

3. Разработать предложения по применению дорнов для использования при оребрении различных вариантов размеров труб.

Основное содержание

Применяемая в производстве в ООО «КОНУС» установка для оребрения медных труб маслоохладителей для тепловозов представлена принципиальной схемой на рис. 1. Установка создана на базе универсального токарного станка 1Б63, и включает в себя собственно станок в качестве станины и привода (а также опоры для установки дорна), накатную роликовую головку с зубчатым приводным механизмом со всеми вспомогательными деталями [1].

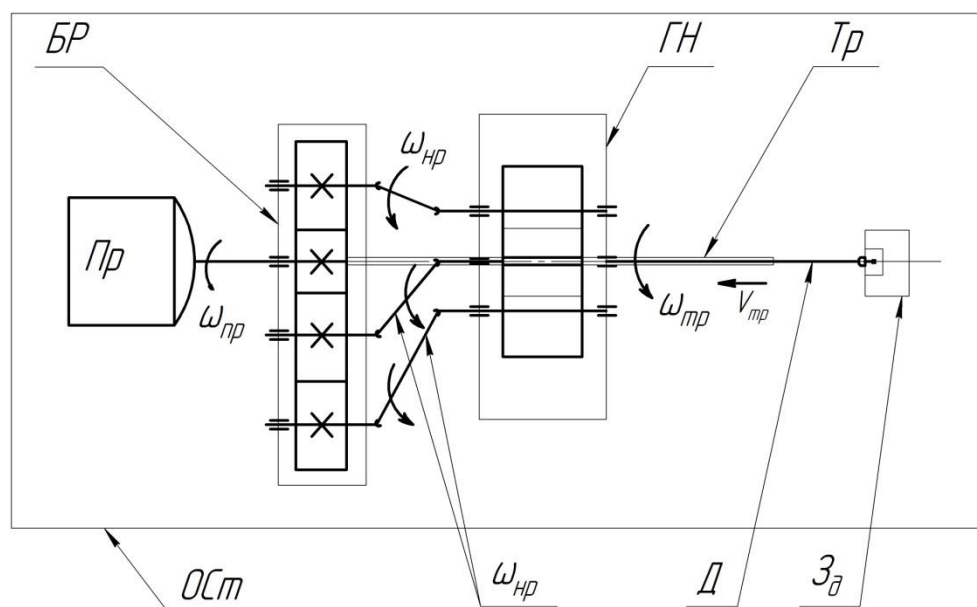


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для оребрения труб накаткой.

Принципиальный эскиз накатываемой трубы приведен на рис. 2 с указанием определяющих размеров в общем виде.

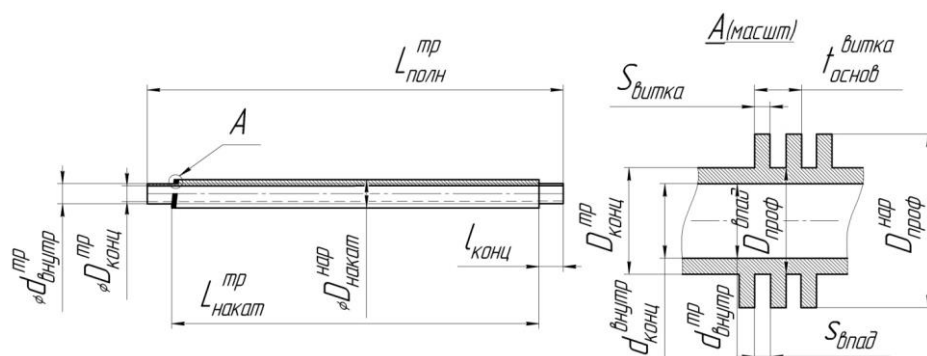


Рис. 2. Эскиз оребренной трубы с указанием исполнительных размеров диаметров и профиля.

Принципиальное кинематическое взаимодействие накатываемой трубы с инструментальными роликами и дорном приведено на рис. 3.

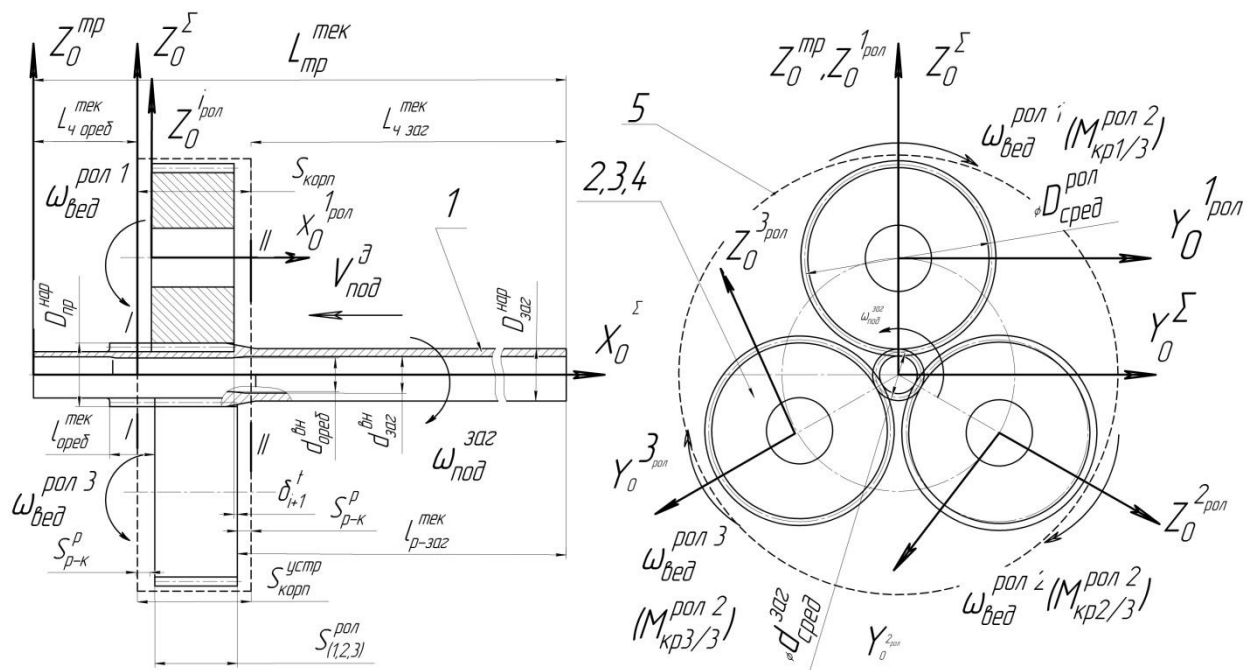


Рис. 3. Принципиальная схема кинематического взаимодействия оребренной трубы с роликами накатными и дорном.

Указано направление относительных движений накатываемой трубы, инструментальных накатных роликов с применением 3-х роликовой головки и дорна с обозначением частных координатных систем элементов и частей установки. При этом максимальный диаметр ролика накатного $D_{тх} - D_{ср} + h_{реб}$, где $D_{ср}$ – средний диаметр формирующей ребра части роликов, а $h_{реб}$ – высота ребер профиля оребренной трубы.

Для расчета ограничительных условий применения установки для труб различных размеров можно использовать схему взаимного расположения элементов устройства на рис. 4, здесь:

$L_{р}^{меж}$ – межосевое расстояние роликов (определяется конструкцией);

$D_h^{max}; D_{нрр}^{ср}; D_p^{вн}$ – диаметры роликов – наружный, средний и впадин роликов;

$D_{тр}^{заг}; D_{тр}^{вн}; D_{тр}^{max}; D_{тр}^{вн}$ – диаметры заготовки, наружный диаметр и диаметры впадин и отверстия трубы;

d – диаметр дорна;

$h_{зр}^{гар}$ – гарантированный зазор между роликами;

$h_p^{проф}$ – высота профиля оребрения;

d_p – посадочный диаметр роликов.

Очевидно, что наименьший диаметр $D_{тр}^{вн(min)}$ профиля оребренной трубы по наружному диаметру в трехроликовой головке ограничивается минимальным размером гарантированного зазора $h_{зр}^{гар}$, исключающего соприкосновение роликов в процессе профилирования ребер.

Наибольший диаметр оребренной трубы ограничивается двумя основными факторами:

- размером посадочного отверстия d_p ролика на оправку;

- диаметром внутреннего отверстия накатной головки и сквозного отверстия приводной центральной шестерни, раздающей вращение на приводы профилирующих роликов и через которую проходит оребренная труба.

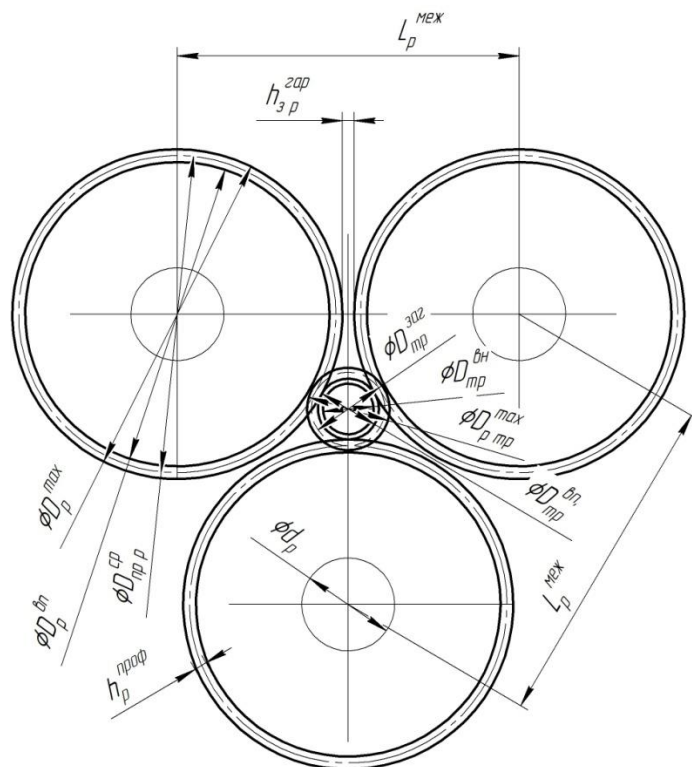


Рис. 4. Расчетная схема ограничительных условий при оребрении труб различных размеров.

Необходимо иметь в виду, что линейное расстояние $L_p^{\text{меж}}$ между осями двух роликов постоянное и равно: $L_p^{\text{меж}} = D_p^{\text{вн}} + h_{зр}^{\text{зап}}$. При установке других комплектов роликов с меньшим диаметром зазор $h_{зр}^{\text{зап}}$ будет увеличиваться и за счет этого возможно увеличение диаметра $D_{\text{труб}}^{\text{макс}}$ обрабатываемой трубы. При этом межосевое расстояние $L_{\text{гол}}$ от оси трубы до оси ролика величина постоянная и определяется элементами ролика и трубы: $L_{\text{гол}} = R_p^{\text{вн}} + R_{\text{труб}}^{\text{вн}} + h_p^{\text{проф}}$. С учетом того, что радиус $R_{\text{труб}}^{\text{вн}}$ ролика является величиной конструктивной, имеет габаритные ограничения и по геометрическим условиям входит в выражение

$$1/2(D_p^{\text{макс}} + h_{зр}^{\text{зап}}) = (R_p^{\text{вн}} + R_{\text{труб}}^{\text{вн}} + h_p^{\text{проф}}) \cos 30^\circ. \quad (1)$$

Из выражения (1) радиус $R_{\text{труб}}^{\text{вн}}$ оребренной трубы определяется в конечном виде и выражается как многофакторная функция:

$$R_{\text{труб}}^{\text{вн}} = \frac{D_p^{\text{макс}} + h_{зр}^{\text{зап}}}{2 \cos 30^\circ} - h_p^{\text{проф}} - R_p^{\text{вн}}. \quad (2)$$

Здесь диапазон изменения радиуса обрабатываемой трубы с переменными величинами можно записать в виде: $\Delta R_{mp} = R_{mp}^{en(max)} - R_{mp}^{ep(min)}$, и учитывая ранее записанные выражения (1) и (2) представим:

$$R_{mp}^{факт} = f(R_p^{en}; h_{mp}^{проф}; h_{зр}^{зар}; \Delta R_{mp}), \quad (3)$$

где параметры правой части выражения (3) - переменные величины.

При запланированной номенклатуре изготовления оребренных труб для теплообменников, наружные диаметры которых попадают в расчетный диапазон изготовления для накатной головки, необходимо спроектировать нужное инструментальное обеспечение. Для минимизации дополнительных затрат на изготовление оснастки необходимо оставлять максимальное число деталей и узлов оснастки без изменений. Конструктивно возможно заменять только комплекты накатных роликов, устанавливаемых на одни и те же валы. Упорные элементы и посадочные места валов, регулировочные и крепежные детали, подшипниковые узлы головки [2, 3] можно использовать без замен. А сами комплекты формообразующих роликов надо унифицировать по внешним параметрам в заданных пределах с учетом рекомендаций [4, 5].

В случае необходимости оребрения труб с различным шагом витков осевые размеры комплектов могут отличаться, и для сохранения наладочных размеров надо применять дополнительные упорные втулки. Комплекты роликов рассчитываются с учетом 2-х или 3-х роликов с уменьшенной кромкой в зоне захода для начала формирования профиля, формирующих и калибрующих роликов на выходе комплекта. При формировании ребер с более высоким профилем количество формирующих и калибрующих роликов может больше, чем для труб с низким профилем, тогда свободное осевое пространство на валах можно компенсировать гадкими втулками с уменьшенным диаметром. Следует иметь в виду, что при меньшем числе формирующих роликов осевые и радиальные силовые нагрузки на ролики могут быть выше, что снижает износостойкость инструментов.

Важным аспектом при оребрении труб методом накатки роликовой головкой с обеспечением высокого качества профиля ребер является применение дорнов [6]. Благодаря дорну в накатном устройстве удастся выдерживать ось вращения трубы при накатке, исключая биение концов трубы, как в начале, так и в конце профилирования. Одновременно дорн предотвращает неравномерность продавливания материала роликами по впадинам профиля, обеспечивая равномерность стенок оребрения. Для труб разного диаметра отверстий дорны должны проектироваться с обеспечением необходимого начального зазора между внутренней поверхности заготовки трубы и дорна, исключаящего обжим дорна в процессе накатки. Величина зазора может быть в пределах 0,5мм, и во многом зависит от точности заготовки, материала трубы и дорна, качества поверхности дорна.

Окончательная величина зазора для трубы и дорна устанавливается после экспериментальной обработки и проверки установочной партии.

Накатка ребер на медной трубе без применения дорна практически невозможна из-за того, что в процессе накатки при вращении трубы даже на невысоких оборотах вследствие действия инерционных сил конец трубы изгибается. Жесткости трубы из меди недостаточно, поэтому исключение изгиба обеспечивается применением специальной струны в виде жесткого стального стержня, диаметр которого меньше диаметра дорна.

Варианты исполнения дорна для труб приведены на рис. 5.

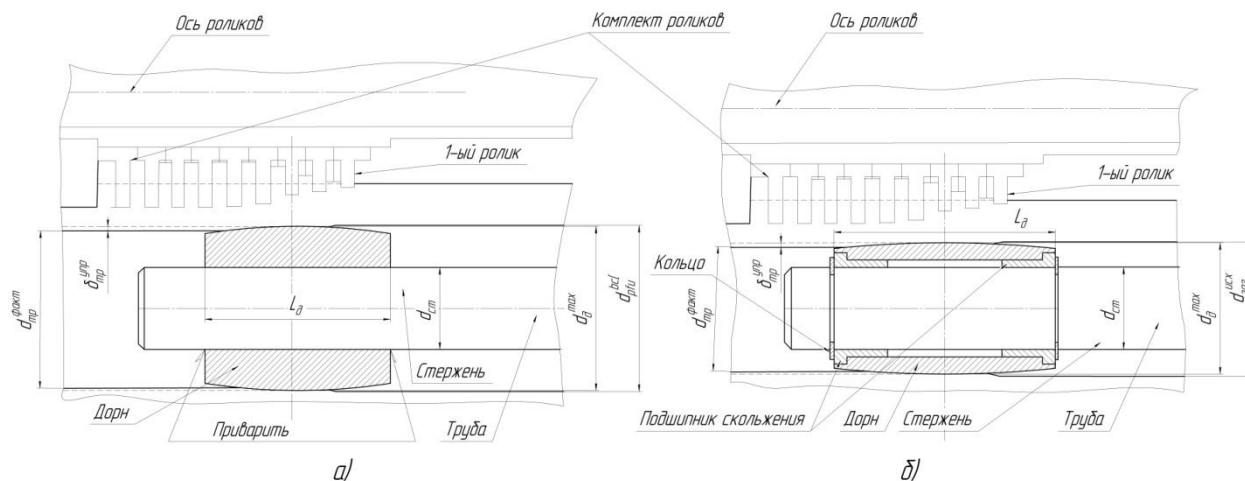


Рис. 5. Эскиз дорна в трубе. а) дорн сварной цельный со стержнем; б) дорн выполнен сборным на подшипниках скольжения на стержне.

На основе практического применения дорнов различных исполнений можно отметить незначительное влияние на обжимаемость тела дорна материалом трубы от дорна цельного, или сборного дорна, исполненного на подшипниках скольжения. Существенно большее значение и влияние на состояние зажимаемости дорна в трубе, что усложняет процесс снятия трубы с дорна после накатки профиля, при обкатке имеет изначальное положение дорна относительно осевого положения роликов накатных. Средняя линия кривизны дорна (максимальный диаметр) должен размещаться напротив 3-го ролика в комплекте, или 4-го ролика, с которого начинается профилирование накатки ребер трубы на полную высоту.

Следует принимать во внимание и такой аспект, что диаметр $d_{тр}^{факт}$ отверстия накатанной трубы становится меньше отверстия заготовки на величину до 0,5 мм, причем предварительно его можно определить условно из выражения: $d_{тр}^{факт} = d_{заг}^{исх} - d_o^{max} + \delta_{тр}^{упр}$, где $\delta_{тр}^{упр}$ отражает возвратную упругую деформацию и является величиной, которая определяется экспериментально и зависит от марки применяемого материала и диаметров заготовки. Другие обозначения ясны из рис. 5.

В любом случае диаметр отверстия трубы после накатки ребер уменьшается на некоторую величину δ , тогда конечный внутренний диаметр $d_{тр}$ отверстия равен $d_{тр} = d_{заг} - \delta$, и тогда условие нормальной работы дорна в процессе накатки можно записать выражением: $d_{заг} - \delta \geq d_{дорн}$. Участок дорна с расчетными значениями выполняется с переменным наружным диаметром на длине, не превышающей длину формообразующего комплекта роликов. Остальной диаметр стержня для дорна принимается в виде прутка на 2-3 мм меньше диаметра отверстия. Материал стержня должен обеспечивать прочность на скручивание при контакте поверхности дорна с внутренней поверхностью трубы, когда для накатки применяется вариант неразъемного соединения стержня с дорном. Для больших диаметров труб возможно исполнение дорна с применением подшипников качения. В этом варианте исключаются крутящие силовые воздействия на стержень дорна, и стержень дорна работает только на разрыв и на сжатие, причем на разрыв нагрузка приходится только в конце процесса накатки.

В результате практического использования способа накатки ребер выяснилось, что при оребрении труб из алюминия и из меди, при одинаковых диаметрах, алюминиевые заготовки трубы являются существенно более прочными и устойчивыми.

Очевидно, что такой результат обусловлен разной величиной допускаемых напряжений на изгиб для применяемых материалов.

Заключение.

Результаты проведенных в настоящей работе исследований и практического позволили получить решение ряда поставленных задач и достичь намеченной цели.

Решен ряд следующих частных задач:

1. Разработан порядок определения диапазона размеров оребренных труб по наружным и внутренним диаметрам труб, подлежащих оребрению методом накатки, по высоте ребер профилей, шагу витков. Исследования выполнены на основе действующей установки с комплектами роликов и дорнов, выполненной на базе токарно-винторезного станка 1Б63.

2. Разработаны рекомендации вариантов изготовления дополнительного инструментального обеспечения для накатывания труб разных диаметров с разными высотами ребер охлаждения, применяемые для накатки с применением 3-х роликовой накатной головки. При этом рекомендации даны для комплектов роликов, которые применяются на головке накатной без доработки валов и подшипниковых узлов.

3. Разработаны предложения по применению дорнов для использования при оребрении различных вариантов размеров труб применительно к тем комплектам инструментального обеспечения, которые разработаны для оребрения труб определенного диапазона размеров.

Список литературы: 1. Михайлов А. Н. Разработка структурной схемы процесса накатки профилей оребренных труб для маслоохладителей тепловозов / Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б., Котляров Б. С. // Механики XXI века. – 2022. – № 21. – С. 118–127. 2. Михайлов А.Н. Методика расчета кинематико-динамического взаимодействия элементов технологического обеспечения накатки оребрения медных труб маслоохладителей / Михайлов А. Н., Котляров С. Б., Котляров В. Б., Котляров Б. С. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2023. – Вып. 3 (82). – С. 34-43. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120. 3. Михайлов А. Н. Локализация функционально-ориентированных свойств по участкам и зонам профиля трубы маслоохладителя / Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – Вып. 3 (78). – С. 46-56. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120. 4. Адакин В. А. // Инструмент для многопроходного холодного накатывания прямоугольных шлицевых профилей на валах - Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Научный руководитель кандидат технических наук, доцент Г. Д. Федотов - Санкт-Петербург. – 2014. 5. Миропольский Ю. А., Луговой Э. П.// Накатывание резьб и профилей. - М.: Машиностроение, 1976. - 175 с. 6. Михайлов А.Н. Некоторые особенности технологического обеспечения при оребрении медных труб маслоохладителей / Михайлов А. Н., Котляров С. Б., Котляров В. Б., Котляров Б. С. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – 439 с. ISBN: 978-5-9967-0446-0

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ РИСКА ВОЗГОРАНИЯ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

Мищенко Т. П., Гутаревич В. О., Рак А. Н. (ДонНТУ, г. Донецк, КамчатГТУ,
г. Петропавловск-Камчатский)

Тел. +7(856)3010787; E-mail: gztl@fimm.donntu.ru

В представленной статье рассмотрена тяжесть последствий подземных пожаров, вызванных возгоранием конвейерной ленты. Указаны технические причины, способствующие сохранению рисков. Установлено, что сочетание тяжелейших последствий, сохранения технических предпосылок к пробуксовке и объективных физико-химических ограничений даже огнестойких материалов делает методику точного теплового расчета одним из главных инструментов в системе предотвращения возгорания конвейерных лент.

Ключевые слова: конвейер, лента, пробуксовка, нагрев, пожар.

The article discusses the severity of the consequences of underground fires caused by conveyor belt ignition. It points out the technical reasons that contribute to the persistence of risks. It is established that the combination of the most severe consequences, the persistence of technical conditions for slippage, and the objective physical and chemical limitations of even fire-resistant materials makes the method of precise thermal calculation one of the main tools in the system for preventing conveyor belt fires.

Keywords: conveyor, belt, slipping, heating, fire.

Введение. Актуальность исследований ленточных конвейеров обусловлена ключевой ролью как основного вида транспорта полезных ископаемых в технологической цепочке горных предприятий и необходимостью решения комплекса производственных, экономических и экологических задач. Современные исследования сфокусированы на нескольких направлениях, напрямую влияющих на эффективность и безопасность горного производства. Однако среди существующих остается еще нерешенной проблема предотвращения возгорания конвейерных лент, приводящей к пожарам в горных выработках шахт.

Анализ исследований и публикаций. За последнее время исследованию возгорания конвейерных лент посвящен ряд работ. В статье [1] приведены особенности обнаружения процесса возгорания на шахтных ленточных конвейерах на ранней стадии. Авторами определены основные информационные параметры начальной стадии возгорания в процессе эксплуатации ленточных конвейеров.

Показатели пожароопасности шахтных конвейерных лент рассмотрены в работе [2]. Авторами дана классификация шахтных конвейерных лент, описаны особенности процесса их термодеструкции. Приведены показатели их пожароопасности, полученные в результате стендовых испытаний, обоснована необходимость обновления нормативной базы по определению пожарной и токсической опасности материала конвейерных лент, применяемых на предприятиях горнодобывающей и перерабатывающей промышленности.

В статьях [3, 4] приведены результаты моделирования пожара в выработке угольной шахты с использованием программного комплекса Fire Dynamic Simulator. Определен наиболее вероятный сценарий протекания пожара, связанный с горением

конвейерной ленты в конвейерной выработке угольной шахты. Выбран подход, основанный на моделировании газофазного горения с учетом внутренних процессов, происходящих в материале путем задания удельной скорости выгорания твердого материала. Сформулированы основные аналитические зависимости для проведения моделирования, на основе которых разработана компьютерная модель.

В работе [5] рассматриваются огнезащитные материалы, повышающие огнестойкость кабелей и металлических конструкций. Описан принцип действия вспучивающихся огнезащитных покрытий, выпускаемых ООО «АКЗ покрытия». Рассказано о других защитных покрытиях марки АКРУС® и услугах, предлагаемых компанией для защиты объектов горных предприятий.

Расчет параметров противопожарных разрывов в горных выработках приведен в статье [6]. Авторами рассмотрены вопросы обустройства противопожарных разрывов в горных выработках. Проанализированы условия снижения температуры пожарных газов при их движении вдоль горной выработки за счет теплоотдачи в окружающие горные породы. Предложены методы расчета параметров противопожарных разрывов. Представлена модель изменения температуры пожарных газов и окружающих горных пород за счет сложного теплообмена (конвекция и лучистый теплообмен).

Проблемы и пути совершенствования применения конвейерных лент в угольной промышленности для предотвращения аварийных ситуаций рассмотрены в работе [7]. Авторами систематизированы источники возгорания конвейерных лент шахтных конвейеров, основные пожароопасные места, методы и способы контроля безопасности работы установок. Проведен анализ защитных устройств, обеспечивающих предотвращение аварийных ситуаций.

Настоящая статья является продолжением указанных работ.

Цель работы заключается в разработке методов для снижения рисков возгораний конвейерных лент во время эксплуатации конвейеров в подземных условиях шахт.

Для достижения указанной цели необходимо решить ряд задач: установить технические причины, способствующие возгоранию конвейерных лент; определить пределы огнестойкости современных лент; разработать рекомендации для предотвращения возгорания конвейерных лент.

Основное содержание работы. Подземные пожары на угольных и рудных шахтах, вызванные возгоранием ленты, характеризуются особенно тяжелыми последствиями. В отличие от пожара на поверхности, здесь добавляются факторы замкнутого пространства и ограниченной вентиляции. При горении резинотканевой ленты выделяются высокотоксичные продукты, включая цианистый водород, хлороводород, монооксид углерода и большое количество плотного черного дыма. Это приводит к быстрой потере видимости и невозможности эвакуации персонала из разветвленной сети горных выработок. Помимо человеческих жертв, всегда существует высокая вероятность перехода пожара на угольный пласт (эндогенный пожар) или метановоздушную смесь, что грозит взрывами. Экономический ущерб складывается из полной потери самого конвейера (стоимость ленты может составлять до 40% от стоимости всего комплекса), длительной остановки добычного забоя и затрат на восстановление инфраструктуры. По данным исследований аварий, например, в Кузбассе и Воркуте, именно конвейерные ленты часто фигурируют как первоисточник крупных подземных пожаров.

Основными причинами возгорания являются фрикционный нагрев при пробуксовке приводного барабана и воспламенение от заклинивших вращающихся элементов (роликов), температура на которых может достигать 400...600°C. Пробуксовка

же почти всегда является не первопричиной, а следствием нарушения нормального режима эксплуатации из-за перегруза конвейера, его заштыбовки, снижения натяжения ленты или износа футеровки. Этому способствует, с одной стороны, общая тенденция к увеличению мощности и длины конвейеров (что увеличивает запасенную кинетическую энергию и потенциальную мощность нагрева), а с другой – широкое применение лент с полимерными тяговыми прокладками, которые, в отличие от стальных тросов, являются горючим материалом и могут распространять пламя по всей длине выработки. Даже применение трудногорючих лент по ГОСТ 20-85 не решает проблему полностью, так как при определенной температуре и длительном нагреве они все равно теряют свои свойства, обугливаются и воспламеняются.

Одним из факторов снижения риска является совершенствование методик расчета возгорания конвейерных лент. В этом контексте приобретает особую значимость точный расчет тепловых параметров. Современная методика отошла от простых эмпирических таблиц и строится на точном решении нестационарных уравнений теплопроводности. Для предотвращения пожара критически важно рассчитать время, за которое температура поверхности ленты в зоне трения достигнет критической (обычно 300...325°C для трудногорючих лент). Это время напрямую определяет уставки срабатывания защитной автоматики (реле скорости, датчиков пробуксовки, термодатчиков на барабане). Актуальность таких расчетов подчеркивается тем, что нормативное время отключения привода при пробуксовке в разных системах варьируется от 3 до 15 секунд, и без точного теплофизического расчета для конкретного конвейера (с его мощностью, типом ленты и скоростью) невозможно гарантировать, что автоматика успеет предотвратить необратимый нагрев.

Разработка и применение трудногорючих (ТГ) и особотрудногорючих (ОТГ) лент является ключевым направлением пассивной защиты. Их рецептура включает антипирены, которые при нагреве выделяют вещества, препятствующие горению. Однако у этого подхода есть физические ограничения. Длительное воздействие высокой температуры (даже ниже порога открытого пламени) приводит к термодеструкции материала: сначала выгорают антипирены, затем начинается пиролиз основного полимера с выделением горючих газов. Поэтому даже самая совершенная лента воспламенится при определенном сочетании температуры и времени. Расчеты, которые мы обсуждали, как раз и позволяют не допустить достижения этого порога. Кроме того, сами антипирены со временем могут мигрировать из резины, и пожаробезопасные свойства старой ленты зачастую значительно ниже паспортных.

Следует отметить, что часто актуальность проблемы поддерживается человеческим фактором. Анализ показывает, что даже при наличии исправной механической защиты (реле скорости, датчики схода ленты) персонал иногда отключает или шунтирует их для продолжения работы в условиях постоянно срабатывающей аппаратуры защиты. Поэтому современным вектором развития является не только точный расчет и быстрые защиты, но и автоматические системы профилактики, которые не дают персоналу возможности принять опасное решение, а также внедрение систем раннего обнаружения пожара на основе тепловизоров, непрерывно сканирующих футеровку барабана и ролики.

Заключение. На основании вышеизложенного следует, что сочетание тяжелейших последствий, сохранения технических предпосылок к пробуксовке и объективных физико-химических ограничений даже огнестойких материалов делает методику точного теплового расчета одним из главных инструментов в системе предотвращения возгорания конвейерных лент.

Список литературы: 1. Малашкина, В. А. Анализ факторов, определяющих возгорание на шахтных ленточных конвейерах на ранней стадии / В. А. Малашкина, С. С. Перекатов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 11. – С. 184-189. 2. Уварова, В. А. Показатели пожароопасности шахтных конвейерных лент / В. А. Уварова, С. И. Голоскоков, Н. М. Недосекина // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 2. – С. 54-58. 3. Компьютерное моделирование пожара в конвейерной выработке угольной шахты / А. И. Кин, С. А. Лисаков, А. Ю. Сидоренко [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 4-2(28). – С. 83-94. 4. Моделирование пожара в выработке угольной шахты с использованием программного комплекса Fire Dynamics Simulator / А. И. Кин, С. А. Лисаков, А. Ю. Сидоренко [и др.] // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2019) : Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Бийск, 14–15 ноября 2019 года. – Бийск: Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова", 2019. – С. 88-96. 5. Фурсов, Р. В. Огнезащитные покрытия для объектов горнодобывающей промышленности / Р. В. Фурсов // Рациональное освоение недр. – 2023. – № 3(71). – С. 52-59. 6. Гребенкин, С. С. Расчет параметров противопожарных разрывов в горных выработках. Постановка задачи / С. С. Гребенкин, И. Ф. Дикенштейн, А. А. Диденко // Вестник Института гражданской защиты Донбасса. – 2015. – № 3(3). – С. 36-41. 7. Мищенко, Т. П. Проблемы и пути совершенствования применения конвейерных лент в угольной промышленности для предотвращения аварийных ситуаций / Т. П. Мищенко, А. Я. Грудачев // Горная энергомеханика и автоматика : материалы XXII Международной научно-технической конференции, Донецк, 25–27 октября 2022 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2022. – С. 54-61.

ВОПРОСЫ БАЛАНСИРОВКИ ШПИНДЕЛЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА

Мозоленко В. А., Хандожко А. В. (ФГБОУ ВО «БГТУ», г. Брянск, Россия)
Тел: (4832) 58-82-89, chandosh@yandex.ru

Рассмотрены вопросы балансировки шпиндельных узлов современных металлорежущих станков, методики выполнения этой операции, подходы к техническому обеспечению процесса.

The issues of balancing spindle assemblies of modern metal-cutting machines, methods of performing this operation, and approaches to the technical support of the process are considered.

Современное станочное оборудование в значительной мере ориентировано на высокие скорости обработки и, соответственно, на высокие частоты вращения шпинделя (ЧВШ). В связи с этим при расчете, изготовлении, обслуживании, ремонте необходимо больше внимания уделять вибрационным характеристикам шпиндельных узлов. Вибрации имеют большое число причин. Одной из важнейших причин является несбалансированность вращающихся частей шпиндельного узла.

Балансировка деталей и сборок этих механизмов станка, конечно, и ранее выполнялась для большинства моделей. Однако, для традиционного диапазона ЧВШ с верхней границей 2000-3000 мин⁻¹ эта процедура не была критичной. В ряде случаев предполагалось проведение только статической балансировки, для части деталей шпинделя балансировку не выполняли [1]. Для наиболее точных быстроходных шпиндельных узлов выполнялась раздельная динамическая балансировка основных вращающихся деталей, что было достаточно для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик станка.

Повышение быстроходности станочного оборудования, рост ЧВШ станков для лезвийной обработки до 10000-25000 мин⁻¹ [4, 5] изменили ситуацию. При таких характеристиках шпиндельного узла резко возрастают требования к точности балансировки. Абсолютные значения допустимого дисбаланса для таких ЧВШ должны быть существенно меньше. Проблематично игнорировать при этом технологические дисбалансы. Поэтому общая методика балансировки шпиндельного узла сложнее. Безусловно, все вращающиеся детали необходимо балансировать динамически. Протяженные детали следует балансировать в двух (при необходимости и более) плоскостях. Для учета технологических дисбалансов желательно проводить кроме раздельной балансировки дополнительную динамическую балансировку шпиндельного узла в сборе. К сожалению, достаточно полных и обоснованных рекомендаций по регламенту балансировки такого типа шпинделей нет. Имеющийся практический опыт промышленных предприятий носит эмпирический характер и в большинстве случаев крайне ограниченно отражен в доступных источниках информации. Это делает актуальной задачу более тщательной разработки общего регламента и обоснованных методик балансировки шпиндельных узлов. Кроме того остро стоит вопрос технического оснащения этих работ, которые становятся полноценной технологической операцией процесса изготовления станка. В данной статье рассмотрены некоторые аспекты выполнения операций балансировки шпиндельных узлов при их изготовлении и ремонте.

Собственная несбалансированность вала шпинделя, как правило, мала. Его стараются проектировать так, чтобы соблюдалась симметрия относительно оси, а закладываемая точность поверхностей и их взаимного расположения снижает возможные дисбалансы до пренебрежительно малых величин. Однако полностью выдержать такую симметрию крайне сложно. На валу могут быть поверхности, провоцирующие дисбаланс – шпоночные пазы, системы отверстий на фланцах и т.п. Кроме того, на валу монтируются другие детали. Одни из них с минимальными дисбалансами, например, подшипники качения, дистанционные втулки и т.п. Другие конструктивно несут в себе дисбаланс – насадные детали со шпоночными пазами (зубчатые колеса, шкивы, полумуфты и т.п.). Часть деталей с потенциальным дисбалансом могут занимать на валу шпинделя достаточно произвольное угловое положение – регулировочные или фиксирующие гайки, в том числе со стопорящими винтами и вставками.

Дополнительные проблемы могут создавать так называемые технологические дисбалансы, возникающими при монтаже – зазоры, перекосы и др. Поэтому шпиндельный узел в общем случае будет иметь несбалансированность, в том числе возможно, и выходящую за границы норм и требований. Поэтому методика проведения балансировки узла должна быть корректной и практически реализуемой, а техническое обеспечение этой операции должно соответствовать этой методике в плане точности и возможности технической реализации.

В принципе, теоретически точно балансировка шпиндельного узла может быть выполнена только при её выполнении на месте в собственных опорах, желательно после установки его на станок [2]. Но, с практической точки зрения, такая балансировка, выполняемая на готовом изделии, имеет смысл только как окончательная контрольная операция, которая может подтвердить соответствие/несоответствие его сбалансированности нормативным документам. Немного хуже с точки зрения корректности динамическая балансировка в собственных опорах на специальных стендах. Такую балансировку удобно выполнять для шпиндельных модулей, которые монтируются на несущих частях станка как единое целое. Такие модули обычно имеют специальные детали или поверхности, предназначенные для динамической балансировки на месте. Как правило, это диски имеющие систему резьбовых отверстий на торцах, установленные на вал шпинделя в плоскостях корректировки. К этим отверстиям имеется доступ у шпиндельного узла в сборе. Выявленный дисбаланс может быть исправлен путем монтажа установочных винтов, играющих роль корректирующих грузов, в эти отверстия. После проверочной балансировки винты стопорятся силовым замыканием на резьбу или иными способом.

Но если дисбалансы отдельных деталей будут чрезмерно велики, то такой подход не позволит выйти на регламентируемые параметры неуравновешенности узла в целом. Поэтому балансировку ведут по более сложной схеме: сначала балансируют отдельные детали, затем вал шпинделя с надетыми на него деталями и только после этого производится балансировка в собственных опорах [1, 2].

Выполнение каждой из операций балансировки по такой схеме формально одинаково. Но на практике возникают вопросы по их техническому (метрологическому) оснащению. Отдельные детали удобнее балансировать на балансировочных машинах (рисунки 1).

Это в первую очередь относится к валу шпинделя. Важным достоинством балансировки на специальных современных балансировочных машинах (стендах) является наличие штатного программного обеспечения. Это существенно снижает трудоемкость процесса балансировки. Как правило, перед балансировкой задается геометрическая схема балансируемого ротора, расположение опор, расположение

плоскостей коррекции и диаметров (радиусов) на которых производится коррекция, а также класс точности балансировки. Опоры при испытании должны подводиться под ротор в тех же местах, в каких расположены подшипники в реальной конструкции (рисунок 2).



Рис. 1. Внешний вид балансировочной машины

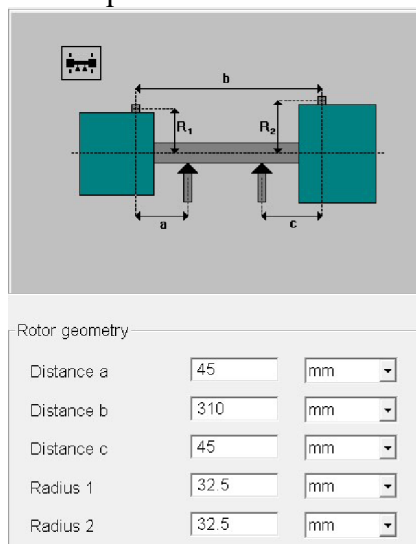


Рис. 2. Интерфейс для задания схемы расположения плоскостей опор и коррекции

После этого запускается испытательный цикл. Изделию придается вращение с заданной частотой. Частота вращения при балансировке может существенно отличаться от ЧВШ на станке. Балансировку рекомендуют проводить при минимальных частотах вращения, обеспечиваемых чувствительностью датчиков. Поэтому частоту для балансировки иногда подбирают эмпирически, по результатам проводимых замеров. Согласно рекомендациям производителей балансировочных машин, следует избегать частот вращения близких к резонансным. Недопустимо работать на частотах близких к синхронной частоте вращения электродвигателя, частотам питающего тока, что отражено в инструкциях по эксплуатации балансировочных машин и литературе [2].

Длительность испытательного цикла программно установлена таким образом, чтобы были завершены переходные процессы и измерения вибрационных характеристик были проведены в при установившемся режиме. В зависимости от используемых датчиков величину несбалансированности измеряют либо датчиками сил, либо датчиками вибраций, чаще акселерометрами. Одновременно с помощью лазерного указателя и или другого датчика угла контролируется угловой параметр

(фаза). Снятые сигналы передаются в систему управления, программное обеспечение пересчитывает величину виброскорости (виброамплитуды, виброускорения) в единицы неуравновешенности выполняется расчет главного вектора дисбаланса и главного момента дисбалансов. Дополнительно рассчитываются величины корректирующих грузов и место их расположения в плоскостях коррекции.

Результаты испытаний выводятся на два информационных окна. На одно выводятся данные по дополнительным усилиям, воздействующим опоры в контрольных плоскостях. На другое окно выводятся величины и угловое положение корректирующих масс в плоскостях коррекции.

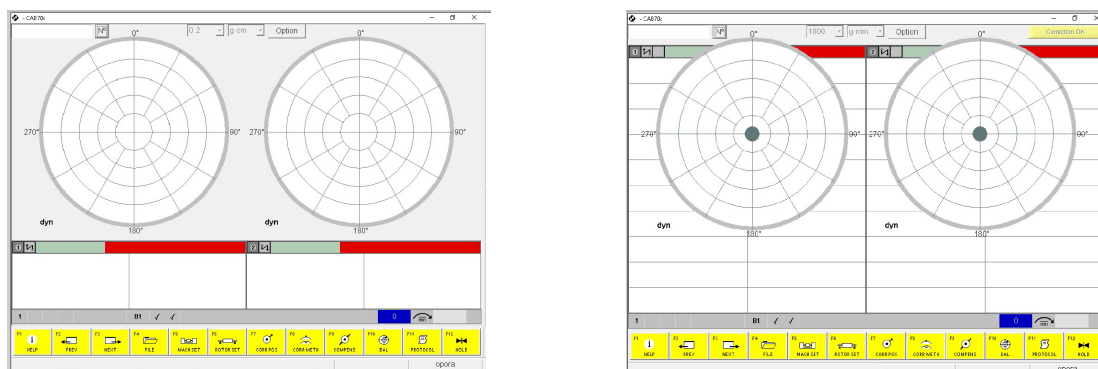


Рис. 3. Информационные окна системы управления балансировочной машины, а) окно отображения реакций в плоскостях контроля; б) окно отображения величин масс в плоскостях коррекции

Детали, устанавливаемые на вал шпинделя, балансируют на специальных оправках. Оправки являются очень точным вспомогательным инструментом. Возможны различные конструктивные решения таких оправок: конусные, цанговые, гидропластовые и т.п. Существуют рекомендации по назначению требований к таким оправкам, согласно которым [1] точность монтажа на них должна быть в 2 раза выше, чем в шпиндельном узле. В номинальных значениях допускаемые биения монтажа не должны превышать 2-5 мкм. Оправки должны быть отбалансированы и конструктивно должны обеспечивать повторяемость точного расположения контрольных плоскостей и плоскостей коррекции.

На втором этапе балансировку целесообразно проводить с установленными на вал шпинделя деталями. Положение этих тел на валу необходимо наметить и последующую сборку выполнять по созданным меткам. Наибольшую сложность создает балансировка деталей устанавливаемых в неопределенном положении. Характерный пример – гайки для фиксации подшипников. Их конфигурация предполагает наличие несбалансированных масс. Эксперименты показали, что такие детали следует балансировать в положении, в котором возникают наибольшие дисбалансы.

Окончательную балансировку выполняют в собственных опорах на универсальных балансировочных машинах выполнять не всегда возможно из-за особенностей их конструкции. Существуют модели, пригодных для решения такого рода задач, но они существенно сложнее и дороже, а также менее универсальны.

При отсутствии такого оборудования балансировка может быть выполнена с применением виброметров, имеющих соответствующие функции. Испытания выполняют на специальном стенде, обеспечивающем вращение шпинделя в характерном диапазоне ЧВШ. Шпиндельный модуль устанавливается на стенде по схеме максимально приближенной к схеме монтажа этого узла на станке. Виброметры оснащены такими же датчиками, что и балансировочные машины. Это, как правило,

акселерометры, которые закрепляются на корпусе шпиндельного модуля вблизи подшипниковых опор. Однако основное программное обеспечение этих приборов ориентировано на оценку виброхарактеристик изделия – виброскорости (виброускорения или виброперемещения) в достаточно широком диапазоне частот. Методики и зависимости обработки, используемые при обработке сигналов датчиков, в основном регламентированы рекомендациями стандартов [2, 6]. В зависимости от модели виброметра используются несколько подходов и, соответственно, алгоритмов и программного обеспечения. Для балансировки такие приборы имеют дополнительное программное обеспечение, обеспечивающее частотный анализ сигналов и пересчет характеристик вибрации в параметры балансировки. Взаимосвязь между виброскоростью и величиной дисбаланса относительно сложна и для пересчета используют численные методы. Широко используется достаточно простое решение, которое сводится к экспериментальному определению так называемой «балансировочной чувствительности», коэффициенту перевода виброхарактеристики в величину дисбаланса. На контрольный сбалансированный ротор устанавливается пробный(е) груз(ы) в определенные углы и радиусами точки. Для повышения точности измерений рекомендуется устанавливать пробный груз в плоскостях измерения или коррекции. По результатам балансировки рассчитывается балансировочная чувствительность системы, по которой, в свою очередь, определяются массы и места расположения корректирующих грузов. Расчетные методики базируются на системе зависимостей механики [7].

Эксперименты показали, что использование виброметров для балансировки в собственных опорах определение балансировочной чувствительности по приведенным зависимостям дает приемлемые результаты, пригодные для инженерной деятельности. Для повышения точности процедура балансировки повторяется. Двух-трех итераций достаточно для достижения результатов балансировки, пригодной для точности балансировки, соответствующих требованиям к металлорежущим станкам (G6.3, G4).

Заключение. С учетом объема станочного оборудования, ориентированного на скоростную и высокоскоростную обработку, вопросы его обслуживания и ремонта являются крайне актуальными. Следует ожидать рост востребованности в ремонтных работах, особенно по шпиндельным узлам станков. При этом растут также объемы специфических операций – комплектование подшипников, их испытание, балансировочные работы, вибродиагностика деталей и узлов. Требуется научно-техническое наполнение этих инженерных задач, включая создание унифицированных методик и технологической оснастки.

Список литературы: 1. Балансировка шпиндельных узлов. Методические рекомендации / Барке В.Н. – М. :ЭНИМС, 1983, 20 с. 2. ГОСТ 1940-1-2007 Вибрация. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ БАЛАНСИРОВКИ. ЖЕСТКИХ РОТОРОВ. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса – 22 с. 3. Фигатнер А.М. Фискин Е.А., Бондарь С.Е. Конструкция, расчет и методы проверки шпиндельных узлов с опорами качения. Методические указания. – М. ЭНИМС, 1970, 82 с. 4. Алферов, А. И. Основные направления совершенствования шпиндельных подшипников / А. И. Алферов, Д. П. Чиркин // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 8. – С. 14-19. 5. Зверев, И. Современное состояние и перспективы развития высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков / И. Зверев // Станкоинструмент. – 2016. – № 4(5). – С. 62-69. 6. ГОСТ Р ИСО 13373-1 — 2009. Контроль состояния и диагностика машин. ВИБРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ. СОСТОЯНИЯ МАШИН. Часть 1. Общие методы. 7. Левит, М.Е. Балансировка деталей и узлов / М.Е. Левит, В.М. Рыженков – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.

РАЗРАБОТКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ СИНТЕЗА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПО НЕСКОЛЬКИМ КОМПЛЕКСНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Муховатый А. А. (ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР, Россия)

Тел./Факс: +7 (959) 1401466; E-mail: mukhovatyy@mail.ru

В представленной статье выведены дифференциальные уравнения для ряда комплексных критериев, дающие возможность провести синтез геометрии зубьев зубчатых передач, обеспечивающие прочность, износостойкость, теплостойкость и энергетические затраты в зацеплении. К этим комплексным показателям отнесены: критерий контактной прочности, износа, потерь на трение в зацеплении, толщины масляного слоя, заедания, а также удельной работы сил трения.

Ключевые слова: критерии работоспособности, исходный контур, цилиндрическая передача.

The paper derives differential equations for several complex criteria that enable the synthesis of gear tooth geometry characterizing the strength, wear resistance, heat resistance, and energy intensity of the meshing. These complex criteria include the following: contact strength criterion, wear criterion, friction loss in meshing criterion, oil film thickness criterion, scuffing criterion, and specific work of friction forces criterion.

Key words: criteria of working capacity, an initial contour, cylindrical transfer.

Введение. Обеспечение высоконагруженных передач зацеплением неразрывно связано с поиском такой геометрии рабочих поверхностей, которая позволяет достичь максимальных значений показателей работоспособности [1...7] и является важной задачей для машиностроения. В настоящее время ведутся активные исследования, направленные на определение оптимальной геометрии зубьев с использованием разнообразных методик [1,2,4,6,7]. Значительное количество научных трудов посвящено синтезу рациональной геометрии зубьев на основе геометро-кинематических и комплексных критериев [1,2,3]. Альтернативный подход к созданию высокоэффективных зубчатых зацеплений предполагает формирование геометрии зубьев по заданной линии зацепления [6,7]. Следует заметить, что создание высоконагруженных передач возможно путём применения метода, базирующегося на решении дифференциального уравнения, полученного из геометрических условий сопряженности поверхностей [7]. Однако комплексные критерии работоспособности при проектировании используются недостаточно из-за отсутствия соответствующих уравнений., при синтезе высоконагруженных передач недостаточно применяются комплексные критерии работоспособности из-за отсутствия необходимых дифференциальных уравнений.

Из вышесказанного следует, что необходимость использования при синтезе таких параметров и позволяет спроектировать высоконагруженные передачи.

Цель исследования. Разработать математическую модель, обеспечивающую синтез зубчатых передач согласно следующим комплексным критериям: контактная выносливость поверхностей зубьев, их износ, толщина смазочного слоя между контактирующими поверхностями, заедание, потери в зацеплении, удельная работа трения.

Материалы и методика исследований.

1. Комплексные показатели работоспособности цилиндрических зубчатых колёс

Допустим, что нарезание зубьев цилиндрических колёс осуществляется реечным инструментом, исходный контур которого имеет профиль, описываемый произвольной кривой (рис. 1)

$$f_2 = f_0(f_1) \text{ или } f_1 = f_1(f_2) \quad (1)$$

где f_1 - переменный параметр профиля зуба. Ось Of_2 совпадает с начальной прямой (НП) исходного контура.

В этом случае комплексные критерии для прямозубых цилиндрических передач определяются выражениями [8, 9, 10, 11]:

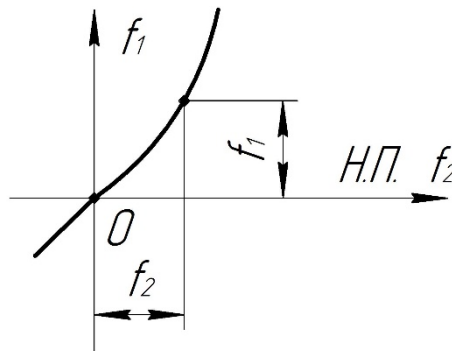


Рис. 1. Схема исходного контура

- контактная прочность рабочих поверхностей зубьев

$$\theta = \frac{1}{x \cdot n}; \quad (2)$$

- износ рабочих поверхностей зубьев

$$h_{ui} = \Omega_u f_{\eta_i}^{t_y} \cdot \sqrt{\frac{q_n}{x}}; \quad (3)$$

- потери на трение в зацеплении

$$\Delta P = q_w \cdot f \cdot V_{ck}; \quad (4)$$

- толщины масляного слоя между рабочими поверхностями зубьев

$$h_{mc} = \Omega_{mc} \frac{V_{\Sigma}^{0,75}}{x^{0,4} \cdot q_n^{0,15}}; \quad (5)$$

- температурный критерий заедания рабочих поверхностей зубьев

$$K_3 = \Omega_3 \frac{f \cdot q_n^{0,75} \cdot V_{ck} \cdot x^{0,25}}{\sqrt{V_1} + \sqrt{V_2}}; \quad (6)$$

- удельная работа сил трения в зацеплении

$$dA_i = q_n \cdot f \cdot \eta_i. \quad (7)$$

Здесь индекс $i = 1$ относится к шестерне, $i = 2$ - к колесу. Приняты следующие обозначения: $\Omega_u, \Omega_{mc}, \Omega_3$ - величины, не зависящие от геометрии зубьев; x - приведенная кривизна контактирующих поверхностей; η_i - удельные скольжения; q_n - погонная нагрузка вдоль линии контакта (по нормали); V_{ck} - скорость скольжения зубьев; V_Σ - суммарная скорость качения рабочих поверхностей зубьев; V_1, V_2 - скорости качения поверхностей зубьев шестерни и колеса; f - коэффициент трения скольжения, вычисляемый по формуле [9]

$$f = 0,09 \cdot q_n^{0,1} \left[10 + \lg \left(\frac{HB \cdot R_a \cdot x}{E_{np}} \right) \right] \cdot x^{0,25} \cdot v_1^{-0,07} \cdot V_\Sigma^{-0,1} \cdot V_{ck}^{-0,35}, \quad (8)$$

где HB - твёрдость более мягкого из контактирующих зубьев;

R_a - шероховатость более твёрдого зуба;

E_{np} - приведённый модуль упругости материалов;

v_1 - вязкость масла;

n - модуль нормали к профилю исходного контура, вычисляемый как

$$n = \sqrt{(f_1')^2 + (f_2')^2},$$

f_2' - производная функции f_2 по f_1 .

Погонная нагрузка q_n :

$$q_n = q_t \cdot n,$$

q_t - окружная сила на единицу длины мгновенной контактной линии.

2. Геометро-кинематические критерии

Из соотношений (2)...(7) видно, что комплексные показатели зависят от геометро-кинематических параметров: $x, V_{ck}, V_1, V_2, V_\Sigma$ и η_i . Их значения определяются по формулам [8]:

- скорость скольжения (при угловой скорости шестерни $\omega_1 = 1 \frac{1}{c}$)

$$V_{ck} = \frac{u+1}{u} \cdot f_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{f_1'}{f_2'} \right)^2 + 1}; \quad (9)$$

- скорость качения рабочих поверхностей зубьев (при $\omega_1 = 1 \frac{1}{c}$)

$$V_1 = \frac{n}{\Omega_2'} \left(R_1 + \frac{f_1 \Omega_2'}{f_2'} \right),$$

$$V_2 = \frac{n}{u \cdot \Omega_2'} \left(R_2 - \frac{f_1 \Omega_2'}{f_2'} \right);$$
(10)

- суммарная скорость качения рабочих поверхностей зубьев (при $\omega_1 = 1 \frac{1}{c}$)

$$V_\Sigma = \frac{n}{\Omega_2'} \left[2R_1 + \frac{f_1}{f_1'} \Omega_2' \left(1 - \frac{1}{u} \right) \right];$$
(11)

- приведенная кривизна рабочих поверхностей зубьев

$$x = \frac{(R_1 + R_2) \cdot f_2' \cdot (\Omega_2')^2}{n^3 \cdot \left(R_1 + \frac{f_1 \cdot \Omega_2'}{f_2'} \right) \cdot \left(R_2 - \frac{f_1 \cdot \Omega_2'}{f_2'} \right)};$$
(12)

- удельные скольжения зубьев шестерни и колеса

$$\eta_1 = \frac{u+1}{u} \cdot \frac{f_1 \Omega_2'}{f_2' \cdot \left(R_1 + \frac{f_1 \cdot \Omega_2'}{f_2'} \right)},$$

$$\eta_1 = -\frac{u+1}{u} \cdot \frac{f_1 \Omega_2'}{f_2' \cdot \left(R_2 - \frac{f_1 \cdot \Omega_2'}{f_2'} \right)}.$$
(13)

В (9)...(13): u - передаточное число зубчатой передачи; R_1, R_2 - радиусы начальных цилиндров; Ω_2' - производная функции Ω_2 по f_1 .

Функция Ω_2 и её производная определяются как [2]

$$\Omega_2 = \frac{f_1}{f_2'} + f_2,$$

$$\Omega_2^1 = \frac{f_2' - f_1 f_2''}{(f_2')^2} + f_2',$$
(14)

f_2'' - вторая производная функции f_2 по f_1 .

Если $f_1 = f_1(f_2')$, значения Ω_2 и Ω_2' равны

$$\Omega_2 = f_1 \cdot f_1' + f_2,$$

$$\Omega_2' = (f_1')^2 + f_1 \cdot f_1'' + 1.$$
(15)

3. Показатели работоспособности эвольвентных зубчатых передач

Оценку синтезируемых передач будем проводить в сравнении с эвольвентными, как наиболее изученными и распространенными. Инструментальный исходный контур для них очерчен прямой

$$f_2 = f_1 \operatorname{tg} \alpha_o,$$
(16)

где α_3 - угол профиля исходного контура зуба.

Из (14) и (15) следует

$$\begin{aligned}\Omega_{23} &= \frac{f_1}{\sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3}, \\ \Omega'_{23} &= \frac{1}{\sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3}.\end{aligned}\quad (17)$$

Используя приведённые выражения, получаем

$$\begin{aligned}n_3 &= \frac{1}{\cos \alpha_3}, \\ f_{23} &= \operatorname{tg} \alpha_3, \\ f_{13} &= 1.\end{aligned}\quad (18)$$

Тогда геометро-кинематические критерии для эвольвентного зацепления:

$$V_{13} = \frac{(u+1) \cdot f_1}{u \cdot \sin \alpha_3}, \quad (19)$$

$$V_{13} = \left(R_1 + \frac{f_1}{\sin^2 \alpha_3} \right) \cdot \sin \alpha_3, \quad (20)$$

$$V_{23} = \left(R_2 - \frac{f_1}{\sin^2 \alpha_3} \right) \cdot \frac{\sin \alpha_3}{u}, \quad (21)$$

$$V_{23} = \left[2R_1 + \frac{f_1}{\sin^2 \alpha_3} \left(1 - \frac{1}{u} \right) \right] \cdot \sin \alpha_3, \quad (22)$$

$$x_3 = \frac{(R_1 + R_2)}{\left(R_1 + \frac{f_1}{\sin^2 \alpha_3} \right) \cdot \left(R_1 - \frac{f_1}{\sin^2 \alpha_3} \right) \cdot \sin \alpha_3}, \quad (23)$$

$$\eta_{13} = \frac{u+1}{u} \cdot \frac{f_1}{\left(R_1 + \frac{f_1}{\sin^2 \alpha_3} \right) \cdot \sin^2 \alpha_3}, \quad (24)$$

$$\eta_{23} = -\frac{u+1}{u} \cdot \frac{f_1}{\left(R_2 - \frac{f_1}{\sin^2 \alpha_3} \right) \cdot \sin^2 \alpha_3}. \quad (25)$$

Комплексные критерии для эвольвентной передачи вычисляются по (2)...(7) с подстановкой (19)...(25).

4. Вывод дифференциальных уравнений

Синтез геометрии исходного контура выполняется на основе отношений комплексного показателя синтезируемой передачи к аналогичному показателю эвольвенты. Принимаем, что габаритные размеры передач одинаковы и соблюдаются неравенства

$$R_1 \geq \frac{f_1 \Omega_2'}{f_2'}, \quad R_2 \geq \frac{f_1 \Omega_2'}{f_2'},$$

$$R_1 \geq \frac{f_1}{\sin^2 \alpha_3}, \quad R_2 \geq \frac{f_1}{\sin^2 \alpha_3}.$$
(26)

Тогда значения отношений геометро-кинематических критериев синтезированной и эвольвентной передач запишутся как:

$$\frac{V_{CK}}{V_{CK'}} = \frac{\sqrt{(f_1')^2 + (f_2')^2} \cdot \sin \alpha_3}{f_2'},$$
(27)

$$\frac{V_{\Sigma}}{V_{\Sigma 3}} = \frac{V_2}{V_{23}} = \frac{V_1}{V_{13}} = \frac{n}{\Omega_2' \cdot \sin \alpha_3},$$
(28)

$$\frac{x}{x_3} = \frac{f_2' (\Omega_2')^2 \cdot \sin \alpha_3}{n^3},$$
(29)

$$\frac{\eta_1}{\eta_{e1}} = \frac{\eta_2}{\eta_{e2}} = \frac{\Omega_2' \cdot \sin \alpha_3}{f_2'}.$$
(30)

Уравнения (27)...(30) представляют собой дифференциальные соотношения, решения которых определяют функцию $f_2(f_1)$ или $f_1(f_2)$ при заданных значениях относительных геометро-кинематических показателей вдоль поля зацепления.

Далее определим отношения комплексных критериев. С учётом (8)...(26) и (27)...(29) принимая, что отношение выражения в квадратных скобках (8) для сравниваемых передач близко к единице, получаем

$$\frac{f}{f_3} = \frac{(f_2')^{1,35} \cdot (\Omega_2')^{0,6} \cdot \cos \alpha_3}{n^{1,1}}.$$
(31)

Из (2)...(7) и (27)...(30) вытекает:

$$\frac{\theta}{\theta_3} = \frac{(f_2')^{1,35} \cdot (\Omega_2')^{0,6} \cdot \cos \alpha_3 n}{f_2' \cdot (\Omega_2')^2 \cdot \sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3},$$
(32)

$$\frac{h_{ui}}{h_{ui3}} = \frac{(\Omega_2')^{1,2} \cdot (f_2')^{1,2}}{n^{0,2}} \cdot (\sin \alpha_3)^{1,5} \cdot (\cos \alpha_3)^{2,5},$$
(33)

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_3} = n^{0,9} \cdot (f_2')^{0,35} \cdot (\Omega_2')^{0,6} \cdot \cos \alpha_3 \cdot \sin \alpha_3,$$
(34)

$$\frac{h_{mc}}{h_{mc3}} = \frac{n^{1,8}}{(\Omega_2')^{1,55} \cdot (f_2')^{0,4} \cdot (\sin \alpha_3)^{1,15} \cdot (\cos \alpha_3)^{0,15}},$$
(35)

$$\frac{K_3}{K_{33}} = \frac{(f_2')^{0,6} \cdot (\Omega_2')^{1,6} \cdot (\cos \alpha_3)^{1,75} \cdot (\sin \alpha_3)^{1,75}}{2^{0,5} \cdot n^{0,6}},$$
(35)

$$\frac{dA_i}{dA_3} = \frac{(f_2')^{0,35} \cdot (\Omega_2')^{1,6} \cdot \cos^2 \alpha_3 \cdot \sin^2 \alpha_3}{n^{0,1}}. \quad (36)$$

Из (31)...(36) получаем дифференциальные уравнения для синтеза исходного контура по каждому комплексному критерию:

- контактная прочность

$$\Omega_2' = \sqrt{\frac{n^2}{f_2' \cdot \theta_0}}, \quad (37)$$

где $\theta_0 = \frac{\theta}{\theta_3} \sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3$;

- износ

$$\Omega_2' = h_{uo}^{0,83} \frac{n^{0,17}}{f_2'}, \quad (38)$$

где $h_{uo} = \frac{h_{ui}}{h_{ui3} \cdot (\sin \alpha_3)^{1,5} \cdot (\cos \alpha_3)^{2,5}}$;

- потери на трение

$$\Omega_2' = \frac{P_o^{1,67}}{n^{1,5} \cdot (f')^{0,58}}, \quad (39)$$

где $P_o = \frac{\Delta P}{\Delta P_3 \cdot \cos^2 \alpha_3 \cdot \sin^2 \alpha_3}$;

- толщина масляного слоя

$$\Omega_2' = \frac{n^{1,16}}{h_o^{0,645} \cdot (f_2')^{0,258}}, \quad (40)$$

где $h_o = \frac{h_{mc} \cdot (\sin \alpha_3)^{1,15} \cdot (\cos \alpha_3)^{0,15}}{h_{mc3}}$;

- заедание

$$\Omega_2' = \frac{K_o^{0,625} \cdot n^{0,375}}{(f_2')^{0,375}}, \quad (41)$$

где $K_o = \frac{\sqrt{2K_3}}{K_{33} \cdot (\cos \alpha_3 \cdot \sin \alpha_3)^{1,75}}$;

- удельная работа сил трения

$$\Omega_2' = \frac{A_o^{0,625} \cdot n^{0,0625}}{(f_2')^{0,219}}, \quad (42)$$

где $A_o = \frac{dA_i}{dA_{i3} \cdot (\cos \alpha_3 \cdot \sin \alpha_3)^2}$.

В уравнениях (37)...(42) Ω_2' задаётся выражениями (14) или (15). Задавая в пределах поля зацепления параметров $\alpha_o, \theta_o, h_{\text{нл}}, K_o, A_o$ и решая полученные дифференциальные уравнения, находим кривые профиля зуба исходного контура. При соблюдении (26) такие передачи обеспечивают заданный уровень комплексного критерия работоспособности, причём этот уровень сохраняется с достаточной точностью при любых R_1 и R_2 .

Заключение. Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель синтеза зубчатых передач по различным комплексным критериям работоспособности.
2. Выведены дифференциальные уравнения для синтеза исходного контура цилиндрических зубчатых передач на основе заданных комплексных показателей.
3. Практическое использование полученных результатов предполагает определение рациональных геометрических параметров синтезированного исходного контура и проведение экспериментальных исследований.

Список литературы: 1. Шишов В.П., Носко П.Л., Филь П.В. Теоретические основы синтеза передач зацеплением. – Луганськ. Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2006. – 408с. 2. Шишов В.П., Носко П.Л., Ревякина О.А. Цилиндрические передачи с арочными зубьями. – Луганськ. Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2004. – 336с. 3. Ленский М.Ф. Синтез плоских зубчатых механизмов по некоторым качественным показателям // Зубчатые и червячные передачи. – М.: Изд. Машиностроение. 1968. – С. 35-46. 4. Шабанов И.Р. О зубчатой передаче с конхoidalной линией зацепления // Надёжность и качество зубчатых передач. НИИ Информтяжмаш. – 18 – 67 – 106, 1967. – С. 1 – 8. 5. Носко П.Л., Шишов В.П., Ткач П.М., Муховатий О.А. Основы синтезу вихідного контуру циліндричних зубчастих передач із зменшенням питомої роботи сил тертя в зацепленні // Вісник національного технічного університету «ХПІ», Харків. НТУ «ХПІ». – 2010, №27. – С. 128 – 133. 6. Tokoly P., Bosancky M., Vanya A. The effect of gear geometry on the thickness of tooth face hardened eayer // Вісник національного технічного університету «ХПІ», Харків. НТУ «ХПІ». – 2010, №27. – С. 10 – 19. 7. Павлов А.И. Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ. – 2005. – 100с. 8. Шишов В.П., Панкратов Д.А., Муховатий А.А. Критерии оценки работоспособности передач зацеплением // Вісник національного технічного університету «ХПІ», Харків. НТУ «ХПІ». – 2001, №12. – С. 27 – 33. 9. Трение, изнашивание, смазка. Справочник в 2-х кн. // Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Аликина. – М.: Машиностроение, - 1978. – Кн. 1 – 400с., 1979. – Кн. 2 – 338с. 10. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304с. 11. Кудрявцев В.Н. Детали машин. – Л.: Машиностроение, 1980. – 464с.

РАСШИРЕНИЕ ПАКЕТА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Перинская Е. В. (ДОННТУ, г. Донецк, ДНР, Россия)
Тел. +38 (062) 301 03 91; E-mail: elenaperinskaya1@mail.ru

В статье рассматривается проблема недостаточной полноты математических моделей технологических процессов при проектировании промышленного оборудования. Предложен подход к расширению пакета моделей за счёт включения распределённых, динамических и гибридных описаний. Обоснована модульная структура интегрированной системы автоматизированного проектирования (САПР), объединяющей технологический, конструкторский и прочностной анализ. Приведён пример реализации для кожухотрубного теплообменника.

Ключевые слова: математическое моделирование, САПР, технологическое оборудование, расширение пакета моделей, структура САПР, кожухотрубный теплообменник.

The article discusses the problem of insufficient completeness of mathematical models of technological processes in the design of industrial equipment. An approach to expanding the model package by including distributed, dynamic, and hybrid descriptions is proposed. The modular structure of an integrated automated design system (CAD) that combines technological, design, and strength analysis is substantiated. An example of implementation for a shell-and-tube heat exchanger is provided.

Key words: mathematical modeling, CAD, technological equipment, model package expansion, CAD structure, shell-and-tube heat exchanger.

Актуальность работы: Современное проектирование технологического оборудования (реакторов, теплообменников, колонн, сепараторов) требует многовариантных расчётов, учитывающих сложную гидродинамику, тепломассообмен, кинетику химических превращений и механическую прочность. Существующие коммерческие системы (Aspen Plus, ANSYS, SolidWorks) либо специализируются на технологическом моделировании, либо на конструкторско-прочностном анализе, но не обеспечивают их глубокую интеграцию. Кроме того, встроенные библиотеки моделей процессов часто ограничены идеализированными режимами (идеальное смешение, поршневой поток), что снижает достоверность при проектировании оборудования для новых процессов (водородная энергетика, улавливание CO₂, микрореакторы). В этой связи тема работы является актуальной.

Цель работы – обосновать состав расширенного пакета моделей и предложить структуру САПР, позволяющую гибко добавлять новые модели и сокращать время проектирования оборудования.

Основное содержание работы. Основные задачи исследования:

1.1. Классификация добавляемых моделей

- Статические – базовые равновесные (теплообмен, ректификация).
- Динамические – пуск/останов, управление, запаздывание.
- Распределённые (2D/3D) – поля температур, скоростей, концентраций.
- Гибридные – феноменология + нейросети / регрессия для сложной кинетики.

1.2. Пример: распределённая модель теплообменника

Приведены два дифференциальных уравнения (в частных производных) для температур теплоносителей с учётом продольной теплопроводности. Указаны граничные условия.

1.3. Пример: динамическая модель реактора смешения

Уравнение материального баланса для нестационарного режима с функцией распределения времени пребывания (RTD).

1.4. Верификация

- Стендовые испытания: погрешность 5–7% для теплообменников.
- Промышленные данные реактора: отклонение по температуре $\leq 5\%$.

Объект исследования. процесс автоматизированного проектирования технологического оборудования, включающий этапы технологического расчёта, конструирования, прочностного анализа и оптимизации..

Предмет исследования. методы расширения пакета математических моделей процесса и архитектурные решения интегрированной САПР, обеспечивающие сквозное проектирование.

1. Расширение пакета математических моделей процесса

1.1. Классификация добавляемых моделей

Традиционные пакеты моделей (например, в Aspen Plus) содержат в основном статические 0D- и 1D-модели. Для повышения адекватности проектирования оборудования необходимо расширение по трём направлениям:

1. Динамические модели — описывают пуск, останов, нестационарные режимы, управление. Необходимы для проектирования аппаратов с циклической работой (регенераторы, адсорберы).
2. Модели с распределёнными параметрами (2D/3D) — поля температур, скоростей, концентраций. Критичны для масштабирования реакторов и теплообменников.
3. Гибридные модели — комбинация феноменологических уравнений с нейросетевыми или регрессионными аппроксимациями экспериментальных данных (например, для сложной кинетики).

1.2. Математическое описание на примере теплообменника

Расширенная модель кожухотрубного теплообменника включает одномерное по длине уравнение теплопередачи с учётом продольного перемешивания в трубном и межтрубном пространствах:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} &= a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + \frac{k \cdot \pi d}{\rho_1 c_{p1} S_1} (T_2 - T_1) \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} &= a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \frac{k \cdot \pi d}{\rho_2 c_{p2} S_2} (T_1 - T_2)\end{aligned}\tag{1}$$

где a_1, a_2 — коэффициенты продольной теплопроводности (возникают при нарушении поршневого режима), k — коэффициент теплопередачи, зависящий от скорости потока и загрязнений.

Для реактора идеального смешения добавлена модель с функцией распределения времени пребывания (RTD), описываемая уравнением диффузии в замкнутом объёме.

1.3. Верификация

Предложенные модели верифицированы на лабораторном стенде теплообменника (погрешность $\pm 7\%$ в диапазоне $Re=2000\dots 50000$) и на промышленных данных реактора гидроочистки (отклонение по температуре в зоне реакции не более 5%).

2. Обоснование структуры САПР

2.1. Требования к системе

На основе анализа типовых процессов проектирования сформулированы следующие требования:

- Поддержка сквозного цикла «технологическая схема → выбор типоразмера → 3D-модель → прочность → рабочая документация».

- Модульная архитектура с возможностью добавления новых математических моделей без перекомпиляции ядра.
- Открытые интерфейсы обмена с CAD/CAE-системами (STEP, IGES, XML-описатели).
- Многокритериальная оптимизация (стоимость, масса, энергоэффективность, надёжность).

2.2. Предлагаемая структура

Представлена структура, состоящая из следующих уровней:

1. Пользовательский интерфейс — графический редактор технологической схемы, ввод параметров сырья и ограничений.
2. Библиотека математических моделей процесса — расширенный пакет (статич./динамич./распред./гибридные модели). Каждая модель реализована как независимый объект с унифицированным интерфейсом (входы: параметры среды, геометрия; выходы: поля температур, составов, гидравлические потери).
3. Вычислительное ядро — решатели ОДУ (Рунге—Кутта 4-5 порядка), УРЧП (метод конечных разностей с адаптивной сеткой), оптимизаторы (генетический алгоритм, градиентные методы).
4. Модуль параметрической геометрии — генерация CAD-модели на основе расчётных размеров (толщины, диаметры, расположение труб).
5. Блок прочностного анализа — интерфейс к расчётам по нормативным документам (ПБ 03-576, ГОСТ Р 52857) или вызов внешнего CAE-решателя (ANSYS, Abaqus).
6. База данных — теплофизические свойства веществ, коэффициенты теплоотдачи, допустимые напряжения, сортаменты труб и листов.
7. Подсистема оптимизации — итерационное изменение геометрии и режимов для достижения целевых показателей.

2.3. Обоснование выбора структуры

- Разделение модели и решателя позволяет использовать одни и те же модели в статическом, динамическом и оптимизационном режимах.
- Независимость от CAD достигается через параметрический обмен в формате XML (описание геометрии как набора примитивов со связями), что даёт возможность интеграции с любыми CAD-системами, поддерживающими API.
- Иерархическая организация библиотеки (базовые модели → специализированные) упрощает добавление новых моделей: достаточно реализовать интерфейс и указать зависимости.

Сравнение с аналогами (табл. 1) показывает, что предлагаемая структура закрывает «разрыв» между технологическим и конструкторским проектированием.

3. Пример реализации

Для кожухотрубного теплообменника реализован прототип на языке Python с использованием библиотек NumPy/SciPy для численного решения и OpenCASCADE (через PythonOCC) для генерации 3D-модели.

Исходные данные:

- Горячий поток: вода, 120→60 °С, 50 т/ч.
- Холодный поток: вода, 30→80 °С, 60 т/ч.
- Допустимый перепад давления: 0.5 бар.

Процесс:

1. Расчёт теплового баланса и среднелогарифмической разности температур.
2. Выбор начальной геометрии (диаметр кожуха 600 мм, трубы 25×2 мм, длина 4 м).
3. Уточнённый расчёт с распределённой моделью (уравнения выше) — определена неравномерность температур по длине, скорректирован запас поверхности.

4. Генерация CAD-модели и прочностная проверка обечаек при давлении 10 бар.
5. Оптимизация: уменьшен межтрубный шаг (экономия 12% металла) при сохранении гидравлического сопротивления.

Результат: время проектирования сокращено с 3 рабочих дней до 6 часов. Расхождение расчётной площади теплопередачи с экспериментальными данными на стенде — 4%.

Таблица 1. Сравнение функциональности

Система	Технологич. модели	Констр. геометрия	Прочность	Расширяемость моделей
Aspen Plus	+++	+	–	±
ANSYS	–	++	+++	–
Предлагаемая САПР	+++ (расшир.)	++	++	+++

Заключение

В работе предложен подход к расширению пакета математических моделей технологических процессов за счёт включения динамических, распределённых и гибридных описаний, что повышает точность проектирования оборудования для неидеальных режимов. Обоснована модульная структура интегрированной САПР, обеспечивающая сквозной цикл «процесс → конструкция → прочность» и открытость для добавления новых моделей.

Научная новизна:

- Разработана классификация расширяемых моделей с учётом требований к оборудованию.
- Предложена архитектура САПР с унифицированным интерфейсом модели процесса и независимостью от CAD.

Практическая значимость:

- Сокращение времени проектирования типовых аппаратов на 30–40%.
- Возможность быстрого перепроектирования при изменении сырья или регламента.

Дальнейшие исследования направлены на интеграцию с системами управления жизненным циклом (PLM) и разработку веб-интерфейса для многопользовательской работы.

Список литературы: 1. Борисов Г.В., Иванов В.А. Математическое моделирование химико-технологических процессов. — М.: Химия, 2018. — 352 с. 2. Шапиро В.Г., Смирнов А.Н. Автоматизация проектирования теплообменного оборудования // Вестник машиностроения. – 2022. – № 4. – С. 45-51. 3. Патент на полезную модель № 2023123456 РФ. Система автоматизированного проектирования кожухотрубных аппаратов / Петров И.И. – Оpubл. 10.03.2024. 4. ГОСТ 2.051-2020. Электронные модели изделий. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2020. 5. Lee J., Park S. Hybrid modeling for heat exchanger design under fouling conditions // Chemical Engineering Science. – 2023. – Vol. 268. – P. 118-129.

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА

Плохов И. В., Савраев И. Е., Козырева О. И. (ПсковГУ, г. Псков, Россия)

Тел./Факс: +7(8112) 201699; E-mail: i.plokhov@pskgu.ru

В представленной статье представлено описание высокоточного способа измерения неустойчивости скользящего контакта и устройства для его осуществления.

Ключевые слова: *скользящий контакт, коэффициент относительной неустойчивости, прибор для его оперативного измерения, высокая точность.*

This article describes a high-precision method for measuring the instability of a sliding contact and a device for implementing it.

Key words: *sliding contact, coefficient of relative instability, device for its operational measurement, high accuracy.*

Введение. Работа узлов скользящего токосъёма (УСТ) сопровождается механическими колебаниями щёток, возникающими в результате их взаимодействия с контактной поверхностью. Наличие неровностей на поверхности вызывает динамические усилия, достигающие величин, при которых наблюдаются нарушения контакта с кратковременными бестоковыми паузами [1, 2, 10–12, 6–9].

Традиционно качество контактирования оценивают путем измерения коэффициента относительной неустойчивости (КОН) [11, 13, 6].

$$K = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_i$ – длительность i -го нарушения контакта; T – общее время измерения.

$$T = \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i + \sum_{j=1}^m \Delta t_j, \quad (2)$$

Δt_j – длительность j -го интервала наличия устойчивого контакта.

Введём в рассмотрение случайное событие **A**, заключающееся в нарушении контакта с бесконечно малым интервалом времени dt , тогда

$$K = \frac{n}{N}, \quad (3)$$

где n – количество элементарных нарушений контакта;

$N = n + m$ – общее количество элементарных актов контактирования;

m – количество актов успешного контактирования.

Таким образом, коэффициент относительной неустойчивости представим как **вероятность нарушения контакта** в процессе ЭФВ.

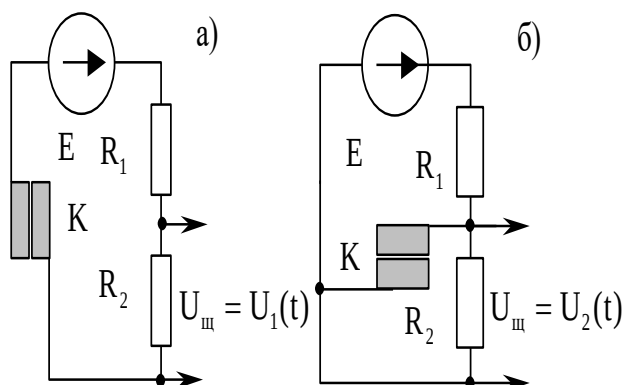
$$K = P(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{N} \right), \quad (4)$$

При анализе динамики скользящего контакта различают относительно устойчивый контакт, пульсирующий с колебаниями контактного давления от

Прибор для измерения КОН электрощеток «ПИКОН» испытан и внедрен на нескольких электростанциях и металлургических предприятиях. Конструкция защищена [3, 4, 13, 14] (см. рис. 1).



Входное устройство может быть собрано по двум взаимноинверсным схемам (см. рис.2). Они содержат скользящий контакт К, источник э.д.с. Е и делитель R_1, R_2 . Процедура преобразования сигнала, объясняющая способ измерения неустойчивости скользящего контакта, поясняется рис. 3.



Принцип действия аналоговой конструкции заключается в интегрировании напряжения $U_2(t)$ за период времени T , при этом определяем суммарную площадь импульсов

$$S = \int_0^T U_2(t)dt = TU - \int_0^T U_1(t)dt, \quad (5)$$

187

$$K = \frac{1}{TU} \int_0^T U_2(t) dt = 1 - \frac{1}{TU} \int_0^T U_1(t) dt . \quad (6)$$

Испытания показали, что точность измерения КОН аналоговой схемой недостаточно высока. Поэтому была разработана цифровая модификация прибора, принцип действия которой заключается в следующем (рис. 3).

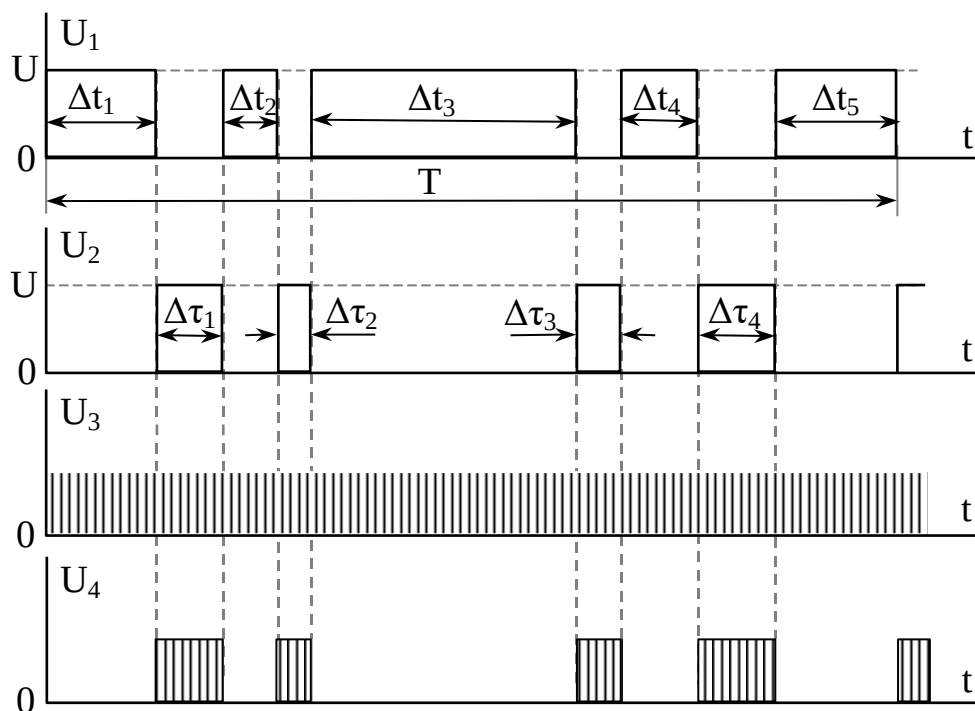


Рис 3. Временные диаграммы напряжений цифрового прибора «ПИКОН».

Напряжение входного устройства компарируем с заданным смещением. Затем с полученным напряжением U_1 или U_2 и напряжением тактового генератора импульсов U_{Γ} производим операцию конъюнкции и получаем булеву функцию $U_{\text{Л}} = U_1 * U_{\Gamma}$ или $U_{\text{Л}} = \bar{U}_1 * U_{\Gamma}$. Затем с помощью цифрового счетчика подсчитываем количество m импульсов $U_{\text{Л}}$ за период T .

Период следования импульсов тактового генератора, имеющих частоту f_{Γ} определяем как $T_{\Gamma} = 1/f_{\Gamma}$, а количество импульсов U_{Γ} за время T :

$$M = T / T_{\Gamma} . \quad (7)$$

Количество импульсов $U_{\text{Л}}$ за время T :

$$m = \frac{1}{T_{\Gamma}} \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i = \frac{M}{T} \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i . \quad (8)$$

Представив последнее выражение в процентах, получим:

$$K = \frac{m}{M} \cdot 100 = \frac{m}{T \cdot f_{\Gamma}} \cdot 100 . \quad (9)$$

Выбрав величины T и f_{Γ} так, чтобы $T \cdot f_{\Gamma} = 1$, получим величину КОН в процентах: $K = m \cdot 100$, которая отображается на дисплее прибора.

На рис. 4 изображена блок-схема прибора. Источник напряжения 1 подключён через СК 2, в соответствии со схемой (рис. 2, б), на вход 1 компаратора 3. На второй

вход компаратора от источника 4 подаём напряжение смещения $U_{см}$. Выход компаратора подключён на вход 1 конъюнктора 5, на второй вход которого подключён генератор импульсов высокой частоты 6. Выход блока 5 подключён на вход десятичного счётчика импульсов 7. Дополнительный выход подключаем на внешний счётчик для повышения точности измерения. Выход счётчика 7 подключён через дешифратор 8 к блоку цифровой индикации 9. К генератору 6 подключён импульсный делитель 10 с коэффициентом деления K_d , выход которого подключён на вторые входы счётчика 7 и дешифратора, управляющих сбросом накопленной информации.

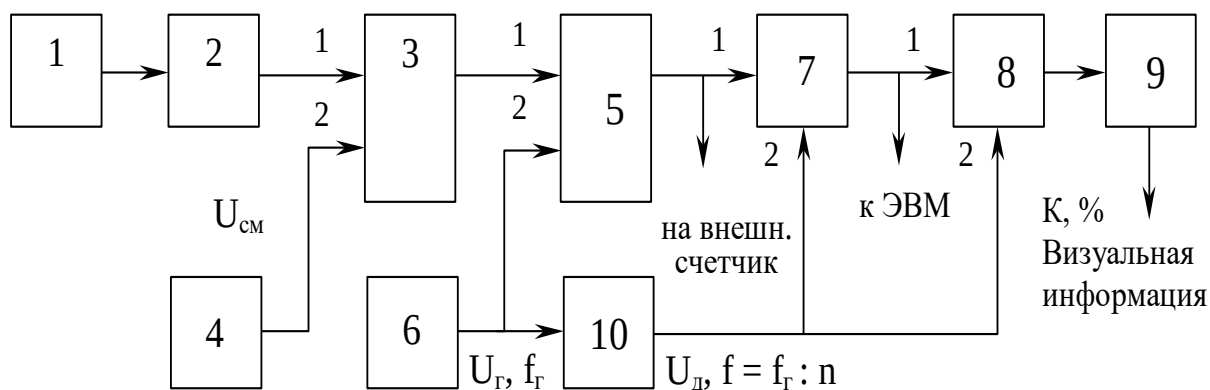


Рис. 4. Блок-схема диагностического прибора ПИКОН.

При замкнутом состоянии контакта напряжение $U_{ш} = 0$, а при разомкнутом – $U_{ш} = U$. Следовательно, в процессе работы щётки, сопровождающемся нарушениями СК, формируется сигнал $U_{ш}(t)$, поступающий на вход 1 компаратора 3. Пики напряжения соответствуют интервалам нарушения СК. Напряжение смещения компаратора $U_{см}$ может регулироваться от нуля до U . Передние фронты импульсов на выходе компаратора формируются в моменты времени t_{1i} , а задние фронты – в моменты t_{2i} . Напряжение $U_{к}$, поступающее на вход конъюнктора 5, разрешает прохождение через данный блок импульсов $U_{Г}$ тактового генератора 6. Таким образом, на выходе логического блока формируются пакеты импульсов $U_{д}(t)$, которые поступают на счётчик 7. Цифровой код, генерируемый счётчиком за период заполнения, подвергается дешифрации блоком 8 и поступает на блок цифровой индикации 9, отображающий на величину КОН в процентах. Импульсный делитель 10 выдаёт на выходе импульсы, синхронизированные с тактовым генератором 6, с частотой в K_d раз меньшей частоты генератора $f_{Г}$. Данные импульсы осуществляют сброс счётчика и дешифратора, обеспечивая начало нового цикла счета и обновление визуальной информации.

В действующих приборах ПИКОН частота тактового генератора составляет 1 МГц, коэффициент импульсного делителя равен 10^6 , напряжение источника 1 $U_{в} = 70...100$ В. Напряжение $U_{в}$ выбрано таким образом, чтобы переходное падение напряжения, возникающее при протекании силового тока через СК, составляло не более 5% от E для выделения составляющих сигнала $U_{ш}(t)$, обусловленных механическими факторами. Частота генератора и период квантования системы выбраны исходя из того, что длительность нарушений СК может составлять величины от нескольких десятых долей миллисекунды до нескольких миллисекунд. Таким образом, число импульсов заполнения на один импульс компаратора – не менее 100, что обеспечивает точность не хуже 2% при минимальной длительности фиксируемых нарушений контакта. Прибор обеспечивает измерение КОН с разрешающей способностью $10^{-4}\%$ при указанных характеристиках функциональных блоков.

На работающем УСТ прибор подключают между параллельными щётками и одной щёткой, отсоединённой от силовой цепи. При экспериментальных исследованиях используют дополнительные профилированные щётки, размещённые сбоку от исследуемого СК [11].

Заключение. Таким образом, разработан способ измерения коэффициента неустойчивости контактирования электрощёток и устройство для его осуществления – прибор «ПИКОН». В отличие от известных ранее способов измерения неустойчивости данный способ отличается высокой точностью и разрешающей способностью: прибор обеспечивает измерение КОН с разрешающей способностью 10^{-4} %.

Список литературы: 1. Механические колебания щётки в имитационной модели скользящего контакта. Ильин А.В., Савраев И.Е., Журавлев Ю.Н., Плохов И.В. В сборнике: Современные инновации в технике и производстве. Сборник материалов II Международной научно-практической конференции. Псков, 2022. С. 34-38. 2. Имитационное моделирование электрофрикционного взаимодействия. Плохов И.В., Козырева О.И. В сборнике: Математическое моделирование систем и процессов. Сборник материалов II Международной научно-практической конференции. Псков, 2024. С. 213-217. 3. Плохов И.В. Диагностика скользящего контакта электрических машин и моделирование его свойств / Proceedings of the 4th international conference on UNCONVENTIONAL ELECTROMECHANICAL AND ELECTRICAL SUSTEMS. St. Petersburg, Russia. 21-24 June 1999. 4. Диагностический комплекс ДИАКОР для контроля за работой щёточного аппарата турбогенераторов / Хуторецкий Г.М., Шабаев Р.К., Плохов И.В. и др. // Электрические станции 1993, №12, с. 29-32. 5. Плохов И.В. Устройство для измерения коэффициента относительной неустойчивости контактирования отдельной щётки щёточно-контактного узла электрической машины / Авторское свидетельство СССР №1702465. Оpubл. 30.12.1991. 6. Механика скользящего контакта / В.И.Нэллин, Н.Я.Богатырев, Л.В.Ложкин и др. – М.:Транспорт. 1966. с. 249-253. 7. Лившиц П.С. Справочник по щёткам электрических машин. М.:Энергоатомиздат. 1983. 8. Дамм Э.К., Зиннер Л.Я., Скороспешкин А.И. Исследование влияния механических факторов на коммутацию коллекторных электрических машин. // Изв. ТПИ. Томск. 1968. Т.190. С.355–363. 9. Зиннер Л.Я., Скороспешкин А.И., Дамм Э.К. Исследование устойчивости работы электрощёток на коллекторных и токосъёмных кольцах // Изв. ТПИ. Томск.1968. Т.190. С.247–256. 10. Плохов И.В., Савраев И.Е. Экспериментальное исследование характера тока в щёточно-контактном аппарате турбогенераторов // Труды Псковского политехнического института. С.-Петербург/ Псков: СПбГТУ, 1997. Вып.1. С.46-49. 11. Плохов И.В. Диагностика динамики узлов скользящего токосъёма коллекторных электрических машин / диссерт. на соиск. степ. канд. техн. наук. С.-Пб.:СПбГТУ.1995. 12. Плохов И.В. Устойчивость контактирования щёток в твердощёточных системах токосъёма / Сб. научн. Трудов Псковского политехнического института СПбГТУ. Псков. ППИ СПбГТУ. №3. 1999. 13. Марков А.М. Диагностика твердощёточных систем токосъёма крупных электрических машин / Автореф. дис. на соиск степ. к.т.н. – С.-Петербург. СПбГТУ. 1998. 14. Плохов И.В., Родионов Ю.А., Савраев И.Е. Промышленные испытания диагностического прибора ПИКОН-Ц / тезисы докл. VII научно-технич. конфер. «Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных машин постоянного тока». Омск, ОМИИТ, 1993.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Полуянович Н. К., Дубяго М. Н., Качелаев О. В. (Южный федеральный
университет, Таганрог, Россия)

Тел: 8-950-860-99-83, e-mail: nik1-58@mail.ru

Рассматривается задача интеллектуального прогнозирования электропотребления в киберфизических системах машиностроительного комплекса. Выполнен синтез и исследование многофакторной модели прогнозирования на основе многослойной нейронной сети. Проведен сравнительный анализ архитектур и методов обучения, позволивший определить конфигурацию, обеспечивающую минимальную погрешность прогноза. Обоснована необходимость экспериментального подбора параметров сети для каждого типа потребителя в силу значительных различий в характере электропотребления. Показано, что методы искусственного интеллекта наиболее эффективны при прогнозировании атипичных (аддитивных) профилей, не обладающих выраженной повторяемостью во времени. Разработанная модель демонстрирует приемлемую точность (среднеквадратическая ошибка MSE не превышает 15%). Установлено, что для дальнейшего повышения точности прогнозирования требуется регулярное обновление модели и учет дополнительных факторов, влияющих на кривую электропотребления.

Ключевые слова: машиностроительный комплекс, киберфизическая система, нейронная сеть, надежность систем энергоснабжения.

The problem of intelligent power consumption forecasting in cyber-physical systems of the machine-building complex is considered. The synthesis and study of a multifactor forecasting model based on a multilayer neural network is carried out. A comparative analysis of architectures and training methods was performed, which made it possible to determine the configuration that ensures minimum forecast error. The necessity of experimental selection of network parameters for each type of consumer is substantiated due to significant differences in the nature of power consumption. It is shown that artificial intelligence methods are most effective in forecasting atypical (additive) profiles that do not have pronounced repeatability over time. The developed model demonstrates acceptable accuracy (mean square error MSE does not exceed 15%). It has been established that to further improve the accuracy of forecasting, regular updating of the model and consideration of additional factors affecting the power consumption curve are required.

Keywords: machine building complex, cyberphysical system, neural network, reliability of energy supply systems.

Введение. В соответствии со стратегическими направлениями развития энергетической инфраструктуры, определенными в документах ОАО «Россети», приоритетной задачей является внедрение технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid), обеспечивающих автоматическое и адаптивное управление распределенными энергетическими комплексами [1]. В контексте машиностроительного производства особую актуальность приобретает развитие киберфизических систем (КФС), рис.1, интегрирующих вычислительные ресурсы и физические процессы в едином контуре управления

ниями при решении задач прогнозирования в условиях реального производства: они не учитывают реактивную составляющую мощности, критически важную для работы электроприводов и технологического оборудования; не используют метеорологические данные, влияющие на микроклимат производственных помещений и режимы работы систем промышленной вентиляции и кондиционирования; не имеют механизмов адаптации к изменяющимся условиям технологического процесса. Указанные недостатки определяют необходимость разработки специализированных интеллектуальных моделей прогнозирования, ориентированных на задачи КФС машиностроительного комплекса. Таким образом встает задача разработки интеллектуального устройства адаптивного прогнозирования режимов ЭП электросети.

Цель прогноза потребления электроэнергии является оценка графика мощности (P , Q) и нагрузки при оптимизации и оперативном управлении ЭП.

Алгоритм обучения НС с распараллеливанием вычислений. Процедура обучения с использованием алгоритма обратного распространения ошибки детально раскрыта на рисунке 2. На старте, после инициализации системы в блоки 1-5, выполняется считывание исходных величин нагрузки $P_1, \dots, P_{24}$. Следующим шагом данные подвергаются нормализации, то есть приводятся к безразмерному виду Y_i , значения которых лежат в интервале от нуля до единицы включительно для каждого i от единицы до двадцати четырех. Далее применяется процедура сглаживания входного ряда путем вычисления скользящего среднего по формуле $P_{\text{сгл}} = \frac{P_n + P_{n+1}}{2}$. Этап, обозначенный как блок 3, отвечает за перенос подготовленных данных в память графического процессора. На этапе, соответствующем блоку 6, производится вычисление сигналов, поступающих на входы и формирующихся на выходах нейронов, принадлежащих как скрытому слою с индексом j , так и выходному слою с индексом k . Для этих расчетов применяются следующие математические выражения:

$$\begin{cases} net_k = \sum_{j=1}^{24} w_{ji} \cdot Y_i, j = 1, 2, \dots, 5; \\ Y_i = \frac{1}{1 + e^{-(net_j + \theta_j)}}; \\ net_k = \sum_{j=1}^5 w_{kj} \cdot Y_j, k = 1; \\ Y_k = \frac{1}{1 + e^{-(net_k + \theta_k)}}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь w_{ji} и w_{kj} – весовые коэффициенты соответственно между нейронами j -го и i -го слоя и k -го и j -го слоя, θ – смещение. Для ограничения пространства поиска при обучении минимизируется целевая функция ошибки, которая находится по методу наименьших квадратов [5]:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{KN} (d_k - Y_k)^2, \quad (2)$$

где d_k – желаемое значение нагрузки на выходе, Y_k – расчетное значение, KN – число нейронов в выходном слое. Поскольку в выходном слое один нейрон, то ошибка

$$E_p = \frac{1}{2} (d_k - Y_k)^2 \text{ для каждого обучаемого образца } p.$$

Далее рассчитываются градиентные спуски в пространстве весов w_{ji} и w_{kj} и на их основании производится корректировка весов по следующим формулам [7]:

$$\begin{cases} \Delta w_{kj}(p) = \eta \delta_k Y_j + \alpha \Delta w_{kj}(p-1); \\ \Delta w_{ji}(p) = \eta \delta_k Y_i + \alpha \Delta w_{ji}(p-1); \\ \delta_k = (d_k - Y_k) Y_k (1 - Y_k); \\ \delta_j = Y_j (1 - Y_j) \sum_k \delta_k w_{kj}; \\ w_{ji}^{\text{нов}} = w_{ji}^{\text{стар}} + \Delta w_{ji}(p); \\ w_{kj}^{\text{нов}} = w_{kj}^{\text{стар}} + \Delta w_{kj}(p). \end{cases} \quad (3)$$

где p – номер обучающего примера; α – момент ускорения обучения; η – скорость обучения. Здесь, значения α и η выбраны согласно определенному критерию повышению точности прогноза 0.3 и 0.7 соответственно.

На рисунке 2, приведен алгоритм обучения многофакторной НС при распараллеливании вычислений. В ходе работы, оператор сравнения (блок 7) определяет полноту использования обучающих примеров. Если выход блока 7 «да» – выполняется расчет суммарной ошибки по всем примерам (блок 9), затем извлекаются данные из памяти графического процессора (блок 13). Если выход блока 7 «нет» выполняется изменение весов в блоке 12 согласно размеру ошибки, затем цикл начинается заново.

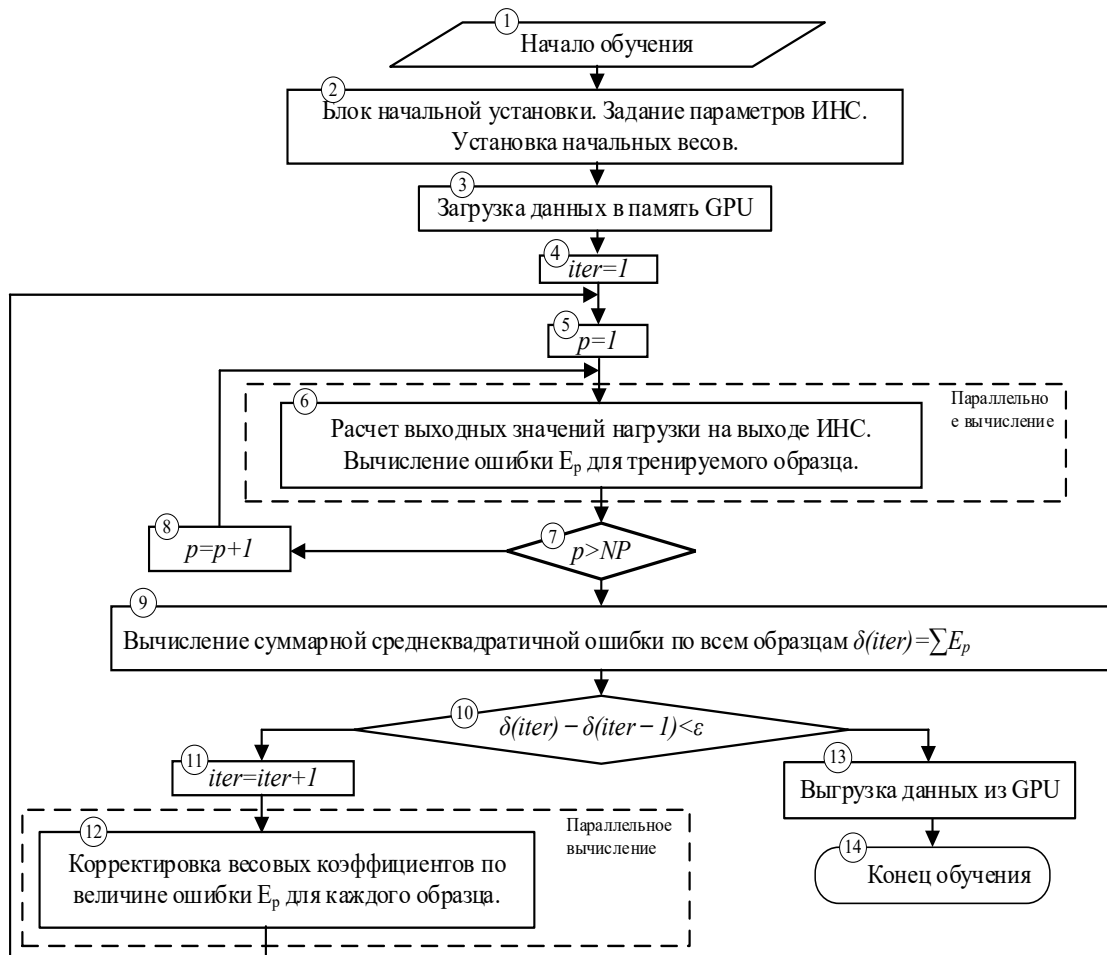


Рис. 2. Алгоритм обучения многофакторной НС распараллеливанием вычислений

Таким образом, в ходе экспериментов замечено, что применение технологии CUDA для распараллеливания вычислений при обучении НС позволяет значительно сократить время, необходимое НС для подбора весовых значений (до 20%) и снизить нагрузку на ЦП компьютера.

Экспериментальные исследования. Формирование исчерпывающего перечня предикторов, как отмечается в источнике [5], представляет собой нетривиальную задачу, итоги которой далеко не всегда очевидны заранее. Для обучения и последующего тестирования многослойного персептрона с обратным распространением ошибки использовался комплекс исходных показателей. Социально-экономический блок включал такие переменные как момент времени t с градацией от часа до месяца, календарную дату с разделением на день, месяц и год, а также тип дня S , где единица соответствовала рабочим суткам, а ноль — выходным или праздничным. Метеорологический блок состоял из температуры окружающей среды T , наличия осадков R (бинарный индикатор) и скорости ветра W . Вектор выходных параметров представлял собой прогнозируемые величины потребленной активной мощности P . Визуальное сопоставление расчетных и реальных показателей энергопотребления вынесено на рисунок. Сводные данные о конфигурациях и гиперпараметрах разных типов архитектур, задействованных в процессе обучения, и сравнительный анализ работы сетей приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнения работы НС различной структуры

№ комбинации параметров	Тип сети Срок прогноза	ЕВР – Элмана обратного распространения		CFBP - каскадная обратного распространения		FFBP - прямой связи с обратным распространением	
		ТП-466	АР-204	ТП-466	АР-204	ТП-466	АР-204
1	День	0.089	0.14	0.088	0.130	0.081	0.064
2		0.12	0.11	0.125	0.152	0.071	0.107
3		0.085	0.13	0.095	0.077	0.059	0.113
1	Неделя	0.10	0.16	0.101	0.17	0.113	0.118
2		0.13	0.17	0.108	0.199	0.083	0.115
3		0.11	0.16	0.109	0.156	0.084	0.12
1	Месяц	0.098	0.14	0.104	0.139	0.106	0.111
2		0.12	0.15	0.109	0.204	0.09	0.112
3		0.11	0.14	0.108	0.136	0.091	0.113

Заключение. В ходе исследования выполнен выбор оптимальной архитектуры и метода обучения НС для решения задачи краткосрочного прогнозирования ЭП в КФС машиностроительного производства. Установлено, что конфигурация нейросетевой модели определяется характером ЭП конкретного типа производственного оборудования или технологического участка:

- для потребителей с устойчивым, циклическим характером ЭП (например, основное технологическое оборудование с постоянным режимом работы) достаточную точность обеспечивает НС с одним скрытым слоем, содержащим до 20 нейронов;
- для потребителей с атипичным, слабо предсказуемым характером ЭП (оборудование с переменной загрузкой, сварочные комплексы, термические установки, пусконаладочные режимы) требуется расширенный поиск параметров: количество нейронов в скрытых слоях целесообразно варьировать в диапазоне от 10 до 50, а в ряде случаев – вводить второй скрытый слой для учета нелинейностей технологического процесса.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что в силу значительных различий в характере ЭП различных типов производственного оборудования и технологиче-

ских участков машиностроительного предприятия необходим индивидуальный подбор параметров НС-модели, обеспечивающий достижение минимальной погрешности прогнозирования для каждого конкретного объекта управления.

Список литературы: 1. Постановление Правительства РФ от 9 сентября 2023 г. N 1473 "Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности" // размещен в СПС "Консультант Плюс" <https://base.garant.ru/407632842/>. 2. Киберфизические системы Cyber-Physical System, CPS к чему приведет слияние интернета людей, вещей и сервисов// TADVISER Государство. Бизнес. Технологии. URL: <https://www.tadviser.ru/a/374827> Дата публикации – 17.08.2017. 3. Нейросетевые технологии прогнозирования и управления электропотреблением в энергетических системах с использованием генетического метода / Н.К. Полуянович, О.В. Качелаев, М.Н. Дубяго, Т. Фалькон // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 1. – С. 29–36. 4. Устройство мониторинга и прогнозирования электропотребления в электроэнергетических системах на основе нейронных структур / Качелаев О.В., Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Патент на полезную модель RU 222420, 25 декабря 2023. Заявка от 12 октября 2023. 5. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Оценка воздействующих факторов и прогнозирование электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режима ее эксплуатации. ж. Известия ЮФУ. Технические науки. "Izvestiya SFedU. Engineering sciences" №2(226) 2022. С.180-194С.31-46.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ

Прилуцкий М. И. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, Россия)

Тел.: +7 949 3708803; E-mail: makc921@xmail.ru

Приведены описание конструкций и результаты лабораторных испытаний системы автоматизированного управления установкой для подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок.

Ключевые слова: шлакообразующая смесь, кристаллизатор, система управления, шнековый дозатор, механизм перемещения носка.

The paper describes the design and results of laboratory tests of an automated control system for a slag-forming mixture supply to the crystallizer of a continuous casting machine.

Keywords: slag-forming mixture, crystallizer, control system, screw doser, toe movement mechanism

Введение. Совершенствования технологии непрерывной разливки стали и оборудования современных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) направлены на повышение их производительности и улучшение качества отливаемых заготовок. Качество формирующейся поверхности заготовки и прилегающей к ней зоны зависит от поддержания постоянства уровня жидкой стали в кристаллизаторе, режимов его качания, оптимального состава подаваемой в него шлакообразующей смеси (ШОС) и степени равномерности ее распределения на зеркале металла [1].

Современные автоматические системы поддержания уровня металла в кристаллизаторе при непрерывном литье блюмовых и слябовых заготовок позволяют удерживать его отклонение от заданной отметки, не превышающее 2 мм [2]. Это достигается за счет применения систем контроля с использованием радиоактивных элементов, инерционность которых находится в пределах 0,9 – 1,2 с [3]. Наряду с этим в последнее время для этих целей начато внедрение электромагнитных и токовых систем. Нашли использование также системы, базирующиеся на установке термопар двумя рядами по высоте и расположенных по широкой стенке кристаллизатора с определенным шагом [4].

Стабильность подачи ШОС оценивается обеспечиваемым постоянством общей толщины образующихся трех слоев введенного мелкодисперсного материала, которая для кристаллизаторов большого поперечного сечения должна составлять 25 – 30 мм. Скорость образования шлакового расплава определяют по массе смеси, расплавленной на единице поверхности жидкого металла в единицу времени $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Зная скорость плавления шлакообразующей смеси, можно прогнозировать ее расход. Экспериментально установлено, что скорость плавления ШОС, в зависимости от ее состава, может находиться в пределах 0,04 – 0,16 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Например, для сляба сечением 200 x 1800 мм при скорости его вытягивания 0,8 м/мин рекомендуемый удельный расход смеси 0,6 кг/т, а удельная скорость плавления 0,06 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [2]. Как показала практика, отмеченные значения параметров процесса подачи шлакообразующей смеси могут обеспечиваться только при ее механизированном вводе в кристаллизатор с помощью специальных установок, снабженных системами автоматизированного управления работой структурных механизмов [5].

Содержание и результаты выполненной работы. На кафедре «Механическое

оборудование заводов черной металлургии имени В.Я. Седуша» Донецкого национального технического университета для обслуживания МНЛЗ при производстве блюмовых заготовок круглого сечения диаметром до 800 мм разработана установка, конструктивная схема которой приведена на рис.1 а. Она включает бункер 8 с расходуемой шлакообразующей смесью 6, жестко закрепленный на металлической конструкции 23 и снабженный в нижней своей части камерой 2, которая связана гибким металлическим рукавом 17 с наклонным направляющим носком 20. Внутри бункера 8 в подшипниковых опорах 4 и 15 размещен вертикальный полый трансмиссионный вал 5 со шнеком 3, нижняя цилиндрическая часть которого соосно расположена в камере 2, а верхняя коническая часть находится в полости бункера. Сверху на бункере установлен электродвигатель 13, посредством муфты 12 сообщаящий вращение быстроходному валу коническо-цилиндрического редуктора 11. Тихоходный вал этого редуктора с помощью муфты 10 и зубчатой пары 9 связан с полым вертикальным трансмиссионным валом 5. В полости данного вала коаксиально размещен второй вал 7, верхний хвостовик которого муфтой 14 соединен с промежуточным валом редуктора 11. К нижнему хвостовику вала 7 прикреплен гибкий спиральный шнек 1, размещенный с возможностью относительного вращения внутри гибкого металлического рукава 16 по всей его длине. Направляющий носок 19, связанный с металлическим рукавом, жестко закреплен на каретке 20 механизма 21, размещенного на конце консоли 22 и обеспечивающего траекторию движения носка в горизонтальной Плоскости над зеркалом жидкого металла в кристаллизаторе 18 круглого сечения, в центре которого находится погружной стакан 17, экранирующий струю стали при ее истечении из промежуточного ковша 15 МНЛЗ. Консоль 22 имеет возможность поворота в горизонтальной плоскости на угол 90° с помощью кривошипно-рычажного механизма 24, приводимого в действие мотор-редуктором 23, чем достигается необходимый перевод подвижной части системы в рабочую позицию и последующий возврат в положение парковки. Равномерное распределение ШОС по свободной поверхности жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ обеспечивается автоматически управляемым механизмом. Данный механизм (рис. 1 б) включает размещенные на сварной раме 1 устройства перемещения направляющего носка вдоль двух взаимно-перпендикулярных осей. Сам носок закреплен на подвижной каретке 6, смонтированной на траверсе 2 и имеющей возможность реверсируемого поперечного перемещения по двум направляющим 7, 8 с помощью ходового винта 9, вращаемого шаговым электродвигателем 10. В свою очередь траверса может перемещаться в реверсном режиме в продольном направлении по стержням 4, 12 с помощью двух ходовых винтов 3, 13 синхронно вращаемых шаговыми двигателями 5, 11 [6, 7].

Для эффективного функционирования предложенной установки ее снабдили автоматизированной системой управления (АСУ) работой структурных механизмов, обеспечивающих регулируемую подачу шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ и равномерное ее распределение по свободной поверхности жидкой стали. В состав системы входят два блока, согласующих функционирование указанных механизмов в соответствии с разработанными программами.

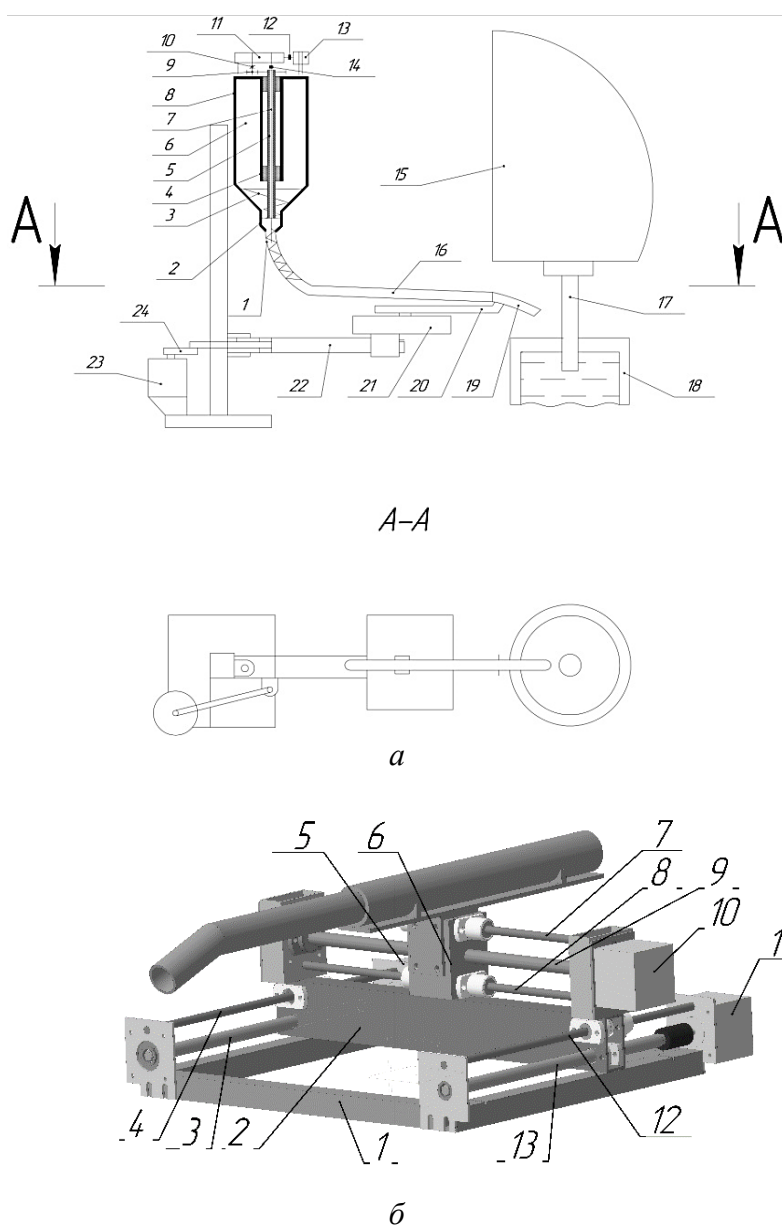
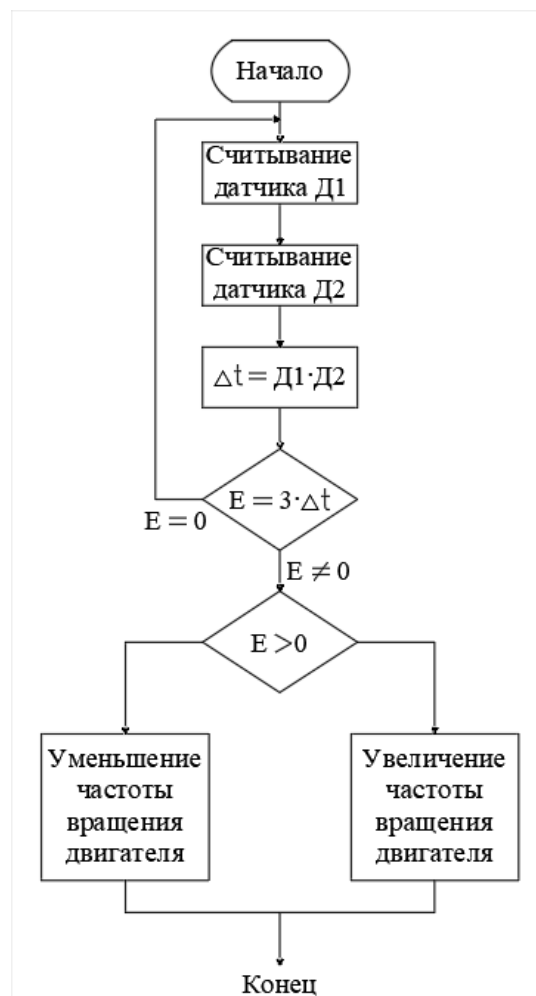
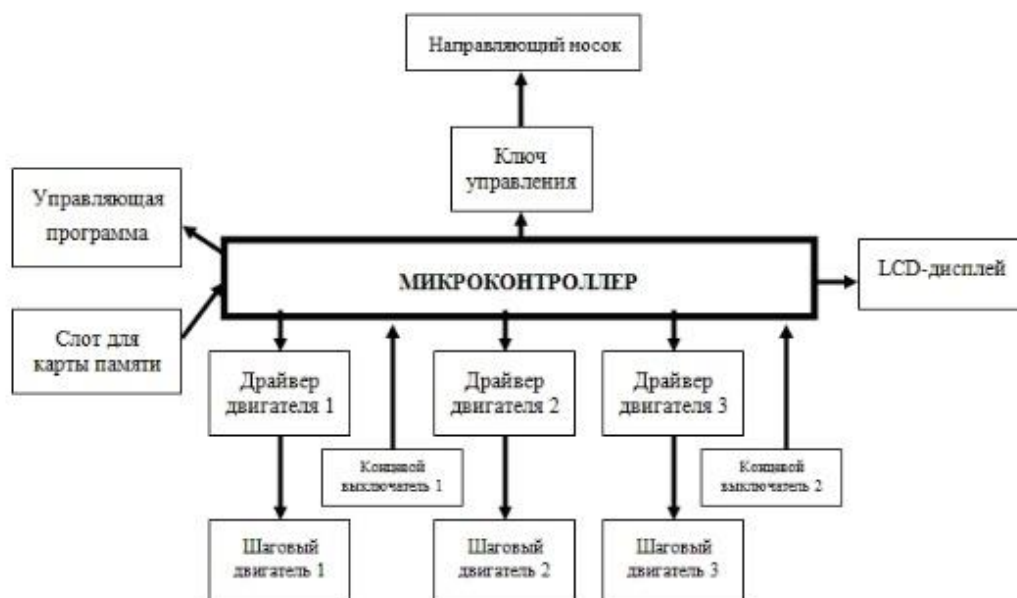


Рис. 1. Конструктивная схема разработанной установки механизированной подачи ШОС в кристаллизатор МНЛЗ (а) и 3-D модель ее механизма перемещения направляющего носка (б) при литье заготовок круглого сечения

Реализация программы оптимального расхода шлакообразующей смеси осуществляется на основе алгоритма, схематично представленного на рис. 2 а. В контроллере блока выполняется сравнение значений двух величин: температуры металла на свободной поверхности непосредственно возле стенки погружного стакана t_m и слоя шлака $t_{ш}$ на некотором удалении от огнеупорного изделия, фиксируемых с помощью стационарно размещенных тепловизоров. Разность указанных температур Δt сопоставляется с заданным оптимальным значением, в результате чего генерируется сигнал ошибки, преобразуемый в управляющие команды, подаваемые для повышения или снижения производительности шнекового дозатора. Увеличение разности температур в указанных контрольных точках свидетельствует о росте толщины слоя шлакообразующей смеси и необходимости снижения ее расхода и, наоборот, при уменьшении разности температур следует увеличить производительность шнекового питателя.



a



б

Рис. 2. Алгоритм автоматизации регулирования расхода шлакообразующей смеси (*a*) и функциональная схема регулирования траекторий движения подающего носка над поверхностью жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ (*б*)

Автоматизированное управление работой исполнительного механизма, реализующего требуемую траекторию движения направляющего носка над поверхностью жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ, обеспечивается с помощью функциональной схемы, показанной на рис. 2 б. Для того, чтобы механизированная подача ШОС осуществлялась по заданной траектории, необходимо в компьютере при помощи программного обеспечения КОМПАС 3D создать необходимый вектор требуемой траектории движения направляющего носка и преобразовать ее в G код с целью дальнейшей трансляции через программу управления на микроконтроллер ATmega328, подающий команды на драйверы, которые преобразуют управляющие сигналы и приводят в действие шаговые двигатели в нужном направлении.

С целью экспериментальной проверки работоспособности принятых технических решений, спроектировали и изготовили действующий натурный образец предложенной установки механизированной подачи ШОС (фото на рис. 3 а), а также собрали программный блок управления ее структурными механизмами, установленный на поворотной консоли (фото на рис. 3 б).

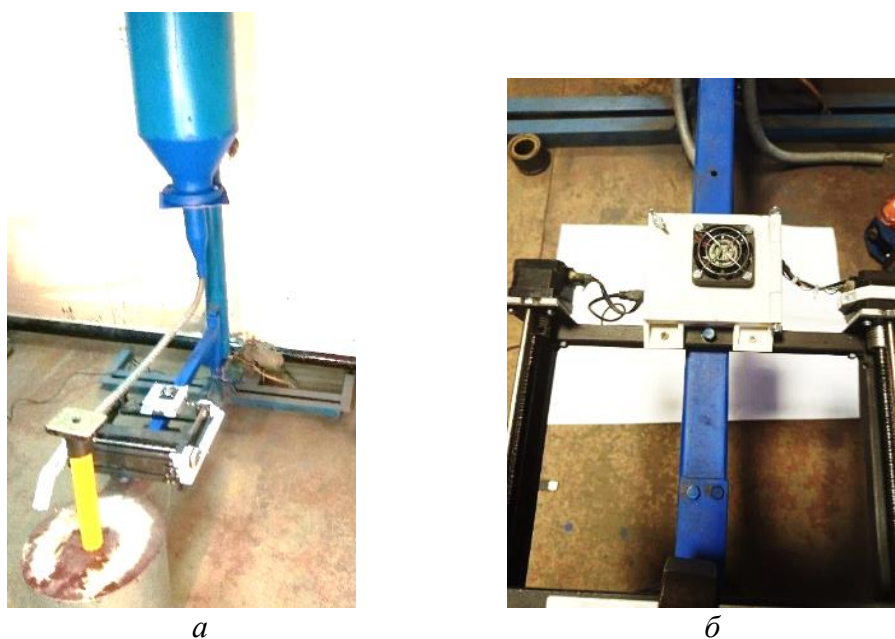


Рис. 3. Действующий натурный образец разработанной установки механизированной подачи ШОС (а) и место размещения программного блока управления ее структурными механизмами (б)

Данный образец предназначался для физического моделирования процесса регулируемой подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ при литье круглых блюмовых заготовок крупного сечения. В соответствии с положениями данного метода экспериментального исследования процесса механического взаимодействия ШОС с жидким металлом в момент их контакта, необходимо соблюдение геометрического, кинематического и динамического подобия. Для этого, прежде всего, следует подобрать их имитаторы, соотношение плотностей которых были бы такими же, как у расплава стали и ШОС. Плотность стали в жидком состоянии, как известно, равна 7000 кг/м^3 . По данным работы [1], насыпная плотность гранулированных смесей ориентировочно может составлять 600 кг/м^3 , а порошкообразных – в пределах $800 - 1000 \text{ кг/м}^3$. При этом соотношение плотностей

металлического расплава и ШОС в первом случае равно 11,7, а во втором 7 – 8,8.

В ходе физического моделирования гидродинамических процессов, протекающих во время разливки стали, в качестве ее имитатора рекомендуется использовать воду, имеющую одинаковую с нею кинематическую вязкость при соответствующих температурах. Так значения кинематической вязкости воды при температуре 20 °С и жидкой стали при температуре 1600 °С практически одинаковы и составляют около $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

С учетом того, что плотность воды равна 1000 кг/м^3 , для обеспечения идентичных соотношений плотностей при модельных экспериментах в качестве имитатора гранулированной смеси выбрали мелко перетертые сухие сосновые опилки с насыпной плотностью 90 кг/м^3 , а для имитации порошкообразной смеси использовали еловые опилки, насыпная плотность которых составляла 120 кг/м^3 .

Проведенные модельные исследования подтвердили правильность технических решений, принятых при создании новой системы механизированной подачи шлакообразующих смесей, которая позволяет не только повысить эффективность использования дорогостоящих ШОС, но и улучшить условия труда разлильщиков стали, освободив их от выполнения вручную изнуряющей вспомогательной операции по сталкиванию в полость кристаллизатора с помощью деревянного гребка порошкообразного материала.

Заключение. Результаты выполненных исследований использованы при разработке перспективных образцов систем механизированной подачи шлакообразующих смесей, предназначенных для обслуживания новых машин непрерывного литья заготовок особо крупного круглого сечения, недавно введенных в эксплуатацию на металлургических предприятиях Китая, а также запланированных к внедрению в ближайшем будущем на двух заводах Российской Федерации [8].

Список литературы: 1. Вдовин, К.Н. Непрерывная разливка стали: монография / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, И.М. Ячиков.- Магнитогорск: Изд. Маг. Гос. Техн. ун-та, 2012.- 540 с. 2. Куклев, А.В. Практика непрерывной разливки стали / А.В. Куклев, А.В. Лейтес.- М.: Металлургиздат, 2011.- 432 с. 3. Системы для измерения уровня металла и ШОС на заводах Италии.- М.: Черметинформация.- 2004.- № 8.- С. 37. 4. Лицин, К.В. Разработка системы автоматизированного электропривода для подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор МНЛЗ-2 АО «Уральская сталь» / К.В. Лицин [и др.] // Наука и производство Урала.- 2018.- Вып. 14.- С. 56 – 58. 5. Разработка автоматической системы подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ – 2 ОАО «Уральская сталь» / К.В. Лицин [и др.] // Электротехника: сетевой электронный научный журнал.- 2018.- Т.5. № 1.- С. 11 – 16]. 6. Система механизированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ при отливке заготовок особо крупного круглого сечения / С.П. Еронько [и др.] // Металлург.- 2025.- № 3.- С. 124 - 128. 7. Система механизированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор блюмовой МНЛЗ нового типа / С.П. Еронько [и др.] // Сталь.- 2025.- № 7.- С. 9 - 13. 8. Совершенствование систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С.П. Еронько [и др.] // Черные металлы.- 2026.- № 4.- С. 21 - 28.

ПРИНЦИП АВТОМАТИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ И КАК ЭТО РАБОТАЕТ ДЛЯ СОТРУДНИКОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ИТР

Репневская М. С., Лахин А. М. (ФГБОУ ВО ДонНТУ, г. Донецк, Россия)

Тел. +7(949)3952190; E-mail: mayarepnev@gmail.com

Важно для сотрудников ИТР на предприятии развитие основных физических качеств, для выполнения производственных и механизированных задач, на работе со станками, подъемными кранами и электрокарами различных габаритов. К основным физическим качествам относятся сила, выносливость, быстрота, гибкость и координация. Эти пять компонентов определяют двигательные возможности человека и развиваются в комплексе. Для сотрудников ИТР крайне необходима физическая подготовка, которая позволит не только улучшить производственный процесс, но и улучшить «качество жизни» сотрудника ИТР.

Ключевые слова: Инженерно-технические работники (ИТР), формирование основных физических качеств, Общая физическая подготовка (ОФП), Специальная физическая подготовка (СФП), виды физической подготовки, компоненты физической подготовки, физическая подготовленность.

It is important for IT specialists at the enterprise to develop their basic physical qualities in order to perform production and mechanized tasks, such as working with machines, cranes, and electric forklifts of various sizes. The basic physical qualities include strength, endurance, speed, flexibility, and coordination. These five components determine a person's motor abilities and are developed in a comprehensive manner. IT specialists require physical training to not only improve their work performance but also enhance their overall quality of life.

Key words: Engineering and technical personnel (ETP), development of basic physical qualities, general physical training (GFT), special physical training (SPT), types of physical training, components of physical training, and physical fitness.

Введение.

Почему мы берем за основу физические упражнения, потому что это основа ОФП и СФП. Используя физические упражнения, мы реализуем поставленные цели и решаем задачи, требуемые инженерно-техническим работникам (ИТР).

Невозможно представить разминку без ОФП (Рис.1) и СФП. Что такое ОФП для инженерных работников и служащих?

Общая физическая подготовка — является основополагающим занятием для спортивной деятельности позволяет формировать здоровый образ жизни для работников.

Данная подготовка содержит в себе развитие физических способностей а также освоение базовых движений. В данном случае выделим два основных направления.



Рис. 1. Физическая подготовка, как основа ОФП и СФП. Цели и задачи

Общая физическая подготовка (ОФП) — развивает все ключевые физические качества независимо от конкретного вида производственной деятельности инженерно-технических работников.

Специальная физическая подготовка (СФП) — формирует качества, которые нужны для выполнения конкретной задачи. Например, работнику ИТР, занимающегося на высоте поднятием груза на высоту пятнадцатизэтажного дома. Какие необходимы специальные качества? Быстрота реакции, глазомер, ловкость, выносливость и сила для управления механизированным устройством. Все эти качества должна и выработать специальная физическая подготовка, а затем и ППФП.

Актуальность. Физическая подготовка — это результат регулярных тренировок, который выражается в достижении определенного уровня развития физических возможностей. Хорошая физическая форма позволяет человеку:

1. Легко справляться с повседневными обязанностями без чрезмерного утомления.
2. Обладать способностью к быстрому восстановлению после физических нагрузок.
3. Иметь устойчивость к стрессам и различным заболеваниям.
4. Поддерживать высокую работоспособность в течение всего дня.
5. Уметь адаптироваться к меняющимся условиям окружающей среды.

Всё это открывает перспективы для повышения выносливости и повышения общей способности к труду инженерно-технических работников.



Рис. 2. Развитие 5 основных физических качеств сотрудников ИТР

Цели и задачи ОФП. Главной задачей комплексной физической подготовки — формирование гармонично развитого, здорового и функционального организма. Важно, чтобы развитие происходило сбалансированно и охватывало все ключевые системы организма.

Основная цель исследования. Цели, задачи и методы общей физической подготовки представляют собой взаимосвязанную систему. Что представляет собой процесс обучения общей физической подготовке? В первую очередь, это регулярные занятия, организованные по принципу от легкого к сложному. Тренер последовательно увеличивает нагрузку, вводит новые упражнения и усложняет координационные упражнения. Важно поддерживать баланс между различными видами нагрузок: силовыми, аэробными и на гибкость и координацию.

Для специалистов инженерно-технических служб на предприятии крайне важно развивать основные физические качества, чтобы эффективно выполнять производственные и механизированные задачи, связанные с работой на станках, подъемно-транспортном оборудовании и электрокарах различных размеров.

Результаты исследования.

Основные физические качества (рис. 2) включают силу, выносливость, скорость, гибкость и координацию. Все эти пять элементов определяют двигательные способности человека и развиваются в тесной взаимосвязи.

Сила. Это способность преодолевать внешнее сопротивление или противостоять ему с помощью мышечных усилий. Существуют несколько разновидностей силы в зависимости от характера ее проявления: Максимальная (поднятие максимально возможного веса за один раз), скоростная сила (способность быстро отталкиваться в прыжке) и силовая выносливость (способность повторять упражнение много раз). Для младшего поколения все силовые упражнения как правило основаны на работе с собственным весом: отжимания, подтягивания, приседания. Подростки могут использовать упражнения с легким отягощением. Взрослое поколение может выполнять широкий спектр силовых тренировок с гантелями, штангой и тренажерами.

Выносливость. Способность выполнять задачи в течении долгого времени не уменьшая качества работы, является ключевой характеристикой общей выносливости. Выносливость определяется как способность продолжительное время заниматься

физической активностью небольшой интенсивности, используя при этом большое количество мышечных групп. Она развивается в рамках общей физической подготовки (ОФП) через такие виды активности, как бег, плавание, велосипедные прогулки и лыжи. Важно отметить, что выносливость развивается медленнее, чем другие физические качества, но она и дольше сохраняется. Люди, которые в молодости регулярно занимались бегом, могут быстро восстановить свои аэробные способности даже после короткого перерыва.

Быстрота — это умение выполнять действия за минимальное время. Она включает в себя скорость реакции, скорость выполнения отдельных движений и частоту движений. Для её развития используют спринтерские упражнения, прыжки, игры с мячом и эстафеты. Быстрота ограничена генетически, так как соотношение быстрых и медленных мышечных волокон задано с рождения. Тем не менее, тренировки могут максимально использовать имеющийся потенциал.

Гибкость - это способность выполнять движения с широким диапазоном амплитуды. Её уровень зависит от подвижности суставов, эластичности мышц и состояния связок. Примечательно, что гибкость — это единственное физическое качество, которое ухудшается с возрастом, если его не поддерживать, в отличие от других, которые могут улучшаться при регулярных тренировках. У детей развитие гибкости происходит более естественно, что обусловлено высокой эластичности мышечных тканей, тогда как взрослым приходится прилагать больше усилий для её поддержания. Постоянное выполнение упражнений на растяжку помогает предотвратить травмы, улучшить осанку и уменьшить мышечное напряжение.

Координация — это умение гармонично сочетать движения разных частей тела для достижения поставленных целей. Она включает в себя чувство равновесия, ориентацию в пространстве и точность выполнения движений. Координация совершенствуется с помощью гимнастических упражнений, акробатики, танцев и игр. Поэтому студентам технических вузов часто советуют заниматься гимнастикой, акробатикой и единоборствами, которые требуют высокого уровня координации.

Компоненты общей физической подготовки (Рис. 3) включают несколько взаимосвязанных элементов, которые формируют комплексную систему физического совершенствования.

Аэробная подготовка представляет собой основу выносливости и здоровья сердечно-сосудистой системы. Аэробные тренировки, проводимые регулярно, приводят к увеличению объема сердца, уменьшению частоты пульса в состоянии покоя и улучшению кровообращения в мышцах. Это делает человека более устойчивым к физическим нагрузкам и снижает уровень утомляемости в повседневной жизни.

Силовые упражнения направлены на развитие мышечной системы посредством работы с сопротивлением. Для детей это могут быть тренировки с собственным весом или легкими снарядами, такими как медболы и гимнастические палки. Взрослые же выполняют полноценные силовые комплексы с постепенно возрастающей нагрузкой. Сильные мышцы помогают защитить суставы от повреждений, поддерживают правильную осанку и ускоряют метаболизм. После 30 лет, если человек не занимается силовыми тренировками, он теряет примерно 3-5% мышечной массы каждые десять лет.

Скоростная подготовка. Для развития навыков быстрого реагирования и движений используются упражнения, включающие бег на короткие дистанции, прыжки, броски, а также игровые сценарии с частой сменой действий. Эти скоростные качества играют ключевую роль не только в спортивной деятельности, но и в производственных процессах. Быстрая реакция может предотвратить травмы, такие как падения, и обеспечить безопасность на рабочем месте. Кроме того, такие тренировки

способствуют тому, что нервные центры мозга учатся оперативно активироваться и принимать решения в экстренных ситуациях, что особенно важно в промышленности и на производстве.



Рис. 3. Основные компоненты общей физической подготовки сотрудников ИТР.

Заключение. Подведем итоги, для сотрудников ИТР крайне необходима (Рис.4) физическая подготовка, которая позволит не только улучшить выполнение ими профессиональных задач, но и улучшить их «качество жизни». Физическая активность позволит работникам помочь избавиться от вредных привычек и перейти к здоровому образу жизни, но и значительно улучшить здоровое состояние конкретного человека. Теория помогает избежать ошибок и разработать эффективную программу тренировок, но для достижения результатов необходима систематическая работа. Начните с легких упражнений, постепенно увеличивайте интенсивность и следите за реакцией организма — так вы увидите улучшения.

Все виды физической активности имеют свои уникальные черты, однако они опираются на общие принципы физического развития и используют схожие методики и инструменты.

Общая физическая подготовка — это не просто занятия упражнениями для галочки, но и долгосрочное вложение в качество жизни. Крепкое тело, здоровое сердце, гибкие суставы и координированные движения позволяют человеку свободно выбирать активности и защищают от различных заболеваний.

ВИДЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ

Физическая подготовка классифицируется по нескольким признакам, что помогает точнее выстраивать тренировочный процесс.



Рис. 4. Различные виды физической подготовки для сотрудников ИТР.

Список литературы: 1. Генш Н.А. «Справочник по реабилитации» / Н.А. Генш, Т.Ю. Клипина, Ю.Н. Улыбина. - Ростов н /Д: Феникс, 2008.- 348, (1) с : ил.- (Справочник). 2. Головин В.А. «Физическое воспитание»: Учебник / Под ред. Головина В.А., Маслякова В.А., Коробкова В.А. и др. – М.: Высш. шк., 1983.-391с. 3. Козлова Л.В. «Основы реабилитации для медицинских колледжей»: Учеб. пос. \ Л.В. Козлова, С.А. Козлов, Л.А. Семененко; под общ.ред. Б.В. Кабарухина. - Изд.5-е. – Ростов н /Д: Феникс, 2008.- 475с.:ил.. 4. Краснов В.П., Присяжнюк С.И., Раевский Р.Т. «Основы оздоровительной тренировки.» Метод. рекомендации для проведения практических занятий по физическому воспитанию студентов специального учебного отделения. – К.: Аграрна освіта, 2005. – 56с. 5. Виды спорта и физические упражнения для достижения целей ППФП. [Электронный ресурс]. 6. «Основы спортивной тренировки» Л.П. Матвеева — классика спортивной науки о построении тренировочного процесса 7. «Физиология спорта» Дж. Уилмора и Д. Костилла — подробно о том, как организм реагирует на нагрузки.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОЭКСТРУЗИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ МЕДИ

Сенникова Л. Ф., Гангало А. Н., Волкова Г. К., Ткаченко В. М., Токий Н. В.,
Яшарова Е. В., Климова Е. Х. (ФГБНУ ДОНФТИ, г. Донецк, ДНР, Россия)
Тел. +7 949 3339801; Email: ludsennikova@mail.ru

Изучены закономерности формирования структуры и свойств меди, полученной в условиях интенсивной пластической деформации путем формирования наноструктуры и последующей обработки гидроэкструзией с разной степенью разовой деформации. Установлено, что с увеличением степени разовой гидроэкструзии до $\varepsilon = 1, 2$ прочностные свойства меди М0б не повышаются по отношению к значениям прочности после равноканального углового прессования (РКУП), это свидетельствует о начале процессов возврата и динамической рекристаллизации материала, что подтверждают структурные исследования.

Ключевые слова: наноструктура, равноканальное угловое прессование, гидроэкструзия, динамическая рекристаллизация, механические свойства, структура.

The patterns of formation of the structure and properties of copper obtained under conditions of intensive plastic deformation by forming a nanostructure and subsequent hydroextrusion processing with different degrees of single-stage deformation have been studied. It has been established that with an increase in the degree of single-stage hydroextrusion to $\varepsilon = 1.2$, the strength properties of M0b copper do not increase in relation to the strength values after equal-channel angular pressing (ECAP), which indicates the beginning of the return and dynamic recrystallization processes of the material, as confirmed by structural studies.

Keywords: nanostructure, equal-channel angular pressing, hydroextrusion, dynamic recrystallization, mechanical properties, and structure.

Введение. В последние десятилетия ультрамелкозернистые (УМЗ) металлические материалы стали объектом многочисленных исследований. Это связано с тем, что материал с мелким размером зерна обладают целым рядом положительных качеств: рекордно высокая твердость и прочность, сверхпластичность, повышенная усталостная долговечность, коррозионная стойкость [1]. Как известно, измельчения зерна достигается за счет накопления в материале высоких значений деформации. Для этого применяют традиционные методы обработки давлением, например, гидроэкструзию (ГЭ) и интенсивную пластическую деформацию (ИПД). Автором работ [2,3] исследовано влияние нового совмещенного процесса пластической деформации “прокатка-РКУ-прессование” на структуру и механические свойства меди. Деформирование проводилось при комнатной температуре, количество циклов – 3. Показано, что “прокатка-РКУ-прессование” приводит к существенному измельчению структуры технической чистой меди и повышению прочности до 482 МПа. Авторы работы [4] исследовали структуру и механические свойства меди технической чистоты (М1), деформированной по комбинированной схеме. Комбинированная пластическая деформация заключалась в последовательной обработке методами ИПД (ВЭ, РКУП) и методами традиционной обработки металлов давлением (ОМД): прямое прессование, гидроэкструзия, волочение. Анализ структуры и механических свойств меди М1 в процессе деформации образцов по предложенной комбинированной схеме обработки

показал, что твердость меди М1 увеличивается в 2,5 - 3 раза по отношению к отожженному состоянию.

Известно, что в процессе последующей за ИПД пластической деформации происходит изменение исходного субмикrokристаллического (СМК) состояния структуры. Причем, характер этих изменений определяется схемой и условиями деформации [5]. Поэтому исследования влияния деформации ГЭ на структуру и механические свойства меди М06, предварительно деформированной РКУП, являются актуальными.

Цель работы – изучить особенности влияния ГЭ на СМК структуру и механические свойства меди М06, предварительно подвергнутой РКУП.

Основное содержание и результаты работы

В качестве исследуемого материала использовались прутки диаметром 20мм и длиной 120мм из бескислородной меди марки М06. Образцы предварительно отжигались в муфельной печи при температуре 600⁰С с выдержкой 2 часа. После отжига прутки продеформировали с использованием установки для равноканального углового прессования с углом пересечения каналов 90⁰, что обеспечивало накопление эффективной деформации за один проход $\varepsilon \approx 1$. Для перевода материала в нано – или ультрамелкозернистое структурное состояние выполнили 12 циклов РКУП с поворотом заготовки вокруг своей оси на 90⁰, после каждого цикла деформирования (маршрут В_c) при комнатной температуре. Это позволило сформировать однородную равноосную структуру с размером зерна 200-400нм. После чего полученный материал обрабатывался методом гидроэкструзии.

Для осуществления ГЭ использовался пресс силой 1МН на котором была собрана установка для ГЭ с рабочим диаметром контейнера высокого давления 22 мм, в котором размещалась коническая деформирующая матрица с диаметром выходного отверстия 11мм, угол конусности матрицы $2\alpha = 20^0$. Для предотвращения влияния концевых эффектов, свойственных процессу РКУП, у образцов отрезался передний и задний конец по 20 мм. Коэффициент вытяжки варьировался в пределах 1,35-3,3, что обеспечивало эффективную (логарифмическую) деформацию в процессе ГЭ от $\varepsilon = 0,3$ до $\varepsilon = 1,2$. Скорость прессования во всех экспериментах была одинакова и составляла 3мм/с, что соответствовало скорости деформации заготовок $\dot{\varepsilon} = 0,4\text{с}^{-1}$.

Твердость измеряли на поперечных сечениях образцов с использованием твердомера Виккерс HV5 под нагрузкой 5кг в течение 10 с. Испытания механических свойств на растяжение проводили на разрывной машине RM-102, для этого вытачивались галтели по ГОСТ 1497-84 (III тип) с диаметром разрывной части 5 мм и длиной 25мм. Скорость деформации при испытаниях 0,01 с⁻¹.

Термическую обработку медных образцов осуществляли в лабораторной печи СНОЛ- 7,2/1100 при температуре 600⁰С с выдержкой 2 часа.

Структурные исследования проводили с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-200А фирмы “JEOL” при ускоряющем напряжении 200 кВ на тонких фольгах. Для подготовки образцов из исследуемого материала вырезали продольные и поперечные пластины, которые утонялись до толщины 0,1 мм. Из полученных пластин вырезали диски диаметром 4 мм и затем подвергали их электрополировке в электролите на основе ортофосфорной и серной кислот с добавлением хромового ангидрида.

Рентгеноструктурный анализ медных образцов проводили на дифрактометре ДРОН – 3М в $\text{CuK}\alpha_{\beta}$ – излучении. Исследования проводили усовершенствованным методом аппроксимации. Анализировали рефлексы первого и второго порядка (111) (220) и (400). Рассчитывали микродеформацию решетки, плотность дислокаций (ρ),

макронапряжения (напряжения 1-го рода) в деформированных образцах. Расчет указанных характеристик тонкой структуры проводили по формулам, приведенным в [6].

На рис. 1 представлена зависимость механических свойств меди М06 от разовой степени деформации ГЭ. Механические свойства определяли после 12 проходов РКУП и последующей ГЭ с разовой степенью деформации $\varepsilon = 0,3; 0,6; 0,9; 1,2$ после каждого прохода. С увеличением разовой степени деформации ГЭ вначале наблюдается рост предела прочности меди по отношению к значению после 12 РКУП, а затем при увеличении разовой деформации, превышающей $\varepsilon = 0,9$, предел прочности существенно уменьшается, а пластичность, что было ожидаемо, растет. Увеличение разовой деформации ГЭ также ведет к снижению твердости меди ~ на 11% по сравнению со значением твердости после 12 РКУП.

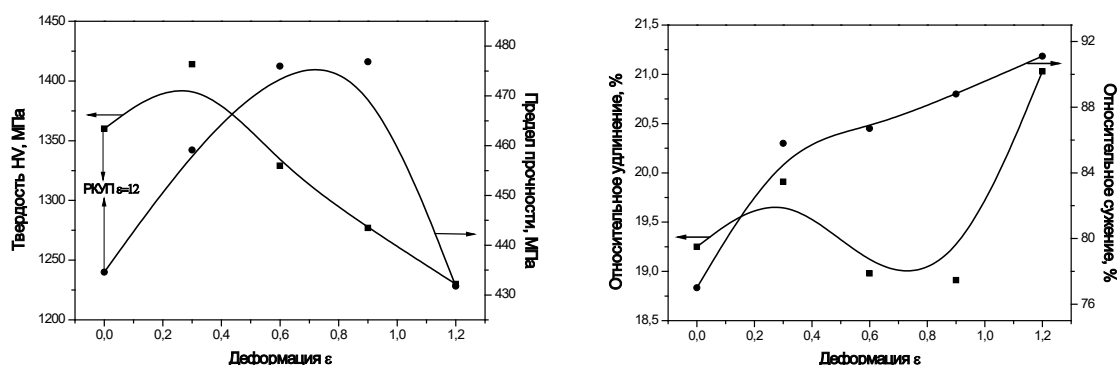


Рис. 1. Механические свойства меди М06 после деформации гидроэкструзией

Рентгеноструктурный анализ тонкой структуры показал (таблица 1.), что напряжения 1-го рода, как после деформации РКУП, так и после ГЭ одного вида – растягивающие (положительные). Величина по модулю ~ 1 ГПа, т.е. они достаточно однородны и их значения не растут с увеличением степени деформации ГЭ, следовательно, степень растяжения материала не возрастает. Плотность дислокаций ρ и связанные с ней неориентированные хаотичные микроискажения решетки имеют максимальные значения после деформации 12РКУП. После деформации 12РКУП + ГЭ ($\varepsilon = 0,3$) оба параметра резко уменьшились и впоследствии, с увеличением степени ГЭ величина их оставалась практически неизменной (в пределах погрешности).

Отсутствие роста микродеформации и плотности дислокаций с увеличением степени деформации при ГЭ может быть объяснено с учетом проходящих в деформированной меди физических процессов.

Таблица 1. Параметры тонкой кристаллической структуры меди М06 после комбинированной деформации

Вид деформации	Микроискажения, $\varepsilon, \cdot 10^{-3}$	Плотность дислокаций, $\rho, \cdot 10^{10}, \text{см}^{-2}$	Макронапряжения, ГПа
12 РКУП	1,23	2,68	+ 1,16
12 РКУП + ГЭ ($\varepsilon = 0,3$)	0,89	1,19	+ 1,19
12 РКУП + ГЭ ($\varepsilon = 0,6$)	0,91	1,60	+ 1,23
12 РКУП + ГЭ ($\varepsilon = 0,9$)	0,96	1,49	+ 1,24
12 РКУП + ГЭ ($\varepsilon = 1,2$)	0,89	1,19	+ 1,21

Экспериментально показано, что при ГЭ с большой степенью деформации образцы меди сильно нагреваются

Это может быть по нескольким причинам: вследствие трения образца в процессе деформации о стенки матрицы, так как затрачиваемая работа на деформацию сопровождается выделением тепла, а также в результате затрат энергии на пластичность в объеме образца.

Кроме того, разогрев меди может зависеть от скорости деформации. При сравнительно не высокой скорости деформации гидроэкструзией (средняя скорость в очаге деформации $0,4 - 0,3 \text{ сек}^{-1}$) разогрев металла составит от нескольких десятков градусов до 100°C [7].

Таким образом, затрачиваемая энергия и выделение тепла в процессе деформации могут быть наиболее вероятными причинами аннигиляции дислокаций и релаксации микроискажений в кристаллической решетке меди при деформации гидроэкструзией. Иными словами, в материале проходят процессы значительного динамического возврата и рекристаллизации. В крупнокристаллическом материале начало рекристаллизации наблюдают при температуре $0,2 - 0,35 T_{\text{пл}}$ [8]. Из литературы известно, что после воздействия интенсивной пластической деформации температура начала динамической рекристаллизации меди изменяется от $T = 270^\circ\text{C}$ для крупного зерна, до $175^\circ - 180^\circ\text{C}$ для УМЗ структуры [9,10]. А так, как у нас после 12 переходов РКУП, последующей деформации подвергается уже СМК структура, то температура начала полигонизации и рекристаллизации может быть еще ниже. По данным авторов работы [7] $\sim 150^\circ\text{C}$.

Электронная микроскопия зеренной структуры показала, что после обработки 12 РКУП наблюдается однородная равноосная структура с размером зерна $200-300 \text{ нм}$, как в поперечном, так и в продольном направлениях сечения образца (рис. 2). После ГЭ со степенью деформации $\varepsilon = 1,2$ средняя величина зерна в поперечном сечении осталась без особых изменений в результате температурных процессов, проходящих в образце в процессе ГЭ, о которых говорилось выше. В продольном сечении наблюдаются вытянутые зерна, микрополосы, ориентированные в направлении, совпадающем с направлением деформации, что характерно для монотонной деформации, так называемая полосовая структура (рис. 3). В микрополосах видна субзеренная структура.

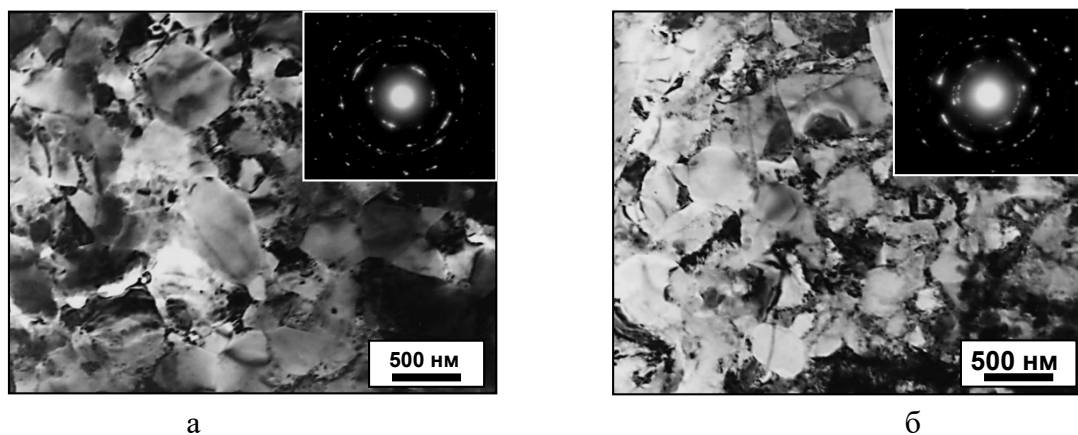


Рис. 2. ПЭМ медного образца после 12РКУП: а – поперечное сечение, б – продольное сечение

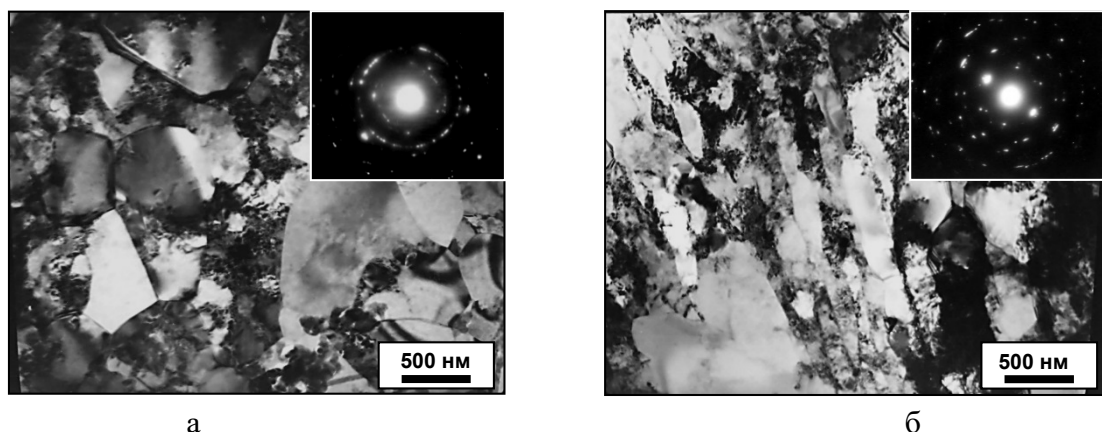


Рис. 3. ПЭМ медного образца после 12РКУП +ГЭ: а – поперечное сечение, б – продольное сечение.

Заключение

Изучено влияние гидроэкструзии на СМК структуру и механические свойства меди М0б, предварительно обработанной РКУП. Полученные результаты говорят о том, что формирование нано и СМК структур методами ИПД оказывает значительное влияние на деформационное поведение и механические свойства материала.

Установлено, что разовая деформация ГЭ, превышающая $\epsilon = 0,9$ приводит к резкому падению предела прочности меди до значений, соответствующих деформации 12 РКУП (~ 430 МПа), соответственно, пластичность повышается.

Наиболее вероятной причиной такого поведения механических свойств, в данном случае, являются процессы возврата и динамической рекристаллизации, происходящие в СМК структуре меди в процессе последующей ГЭ.

Список литературы: 1. Объемные наноструктурные материалы с многофункциональными свойствами / И. Сабилов, Н.А. Еникеев, М.Ю. Мурашкин, Р.З. Валиев; пол ред. Н.А. Еникеева, Р.З. Валиева.-СПб.: Эко-Вектор, 2018. – 135 с. 2. А.М. Иванов. / Вестник Брянского государственного технического университета, № 10, 83, с. 19, 2019. 3. А.М. Иванов. // Вестник машиностроения, № 2, с. 81, 2017. 4. Л.Ф. Сенникова, А.Н. Гангалов, Г.К. Волкова, Е.Х. Климова. Закономерности формирования микроструктуры и механических свойств меди М1 в условиях комбинированной пластической деформации. //Вопросы материаловедения, 2023, №4 (116), С. 50-56. 5. Р.З. Валиев, А.П. Жилиев, Т. Дж. Лэнгдон. / Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы применения. Санкт-Петербург, Эко-Вектор, 2017. - 479 с. 6. А.А. Русаков. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. - 479 с. 7. Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб, В.А. Валитов. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов. Монография. СПб.: Издательство «Наукоемкие технологии». 2020.-185 с. 8. Трефилов В.И. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Киев: Наукова думка. 1989.- 254 с. 9. С.О. Рогачев, Н.В. Землякова. Особенности рекристаллизации меди в процессе интенсивной пластической деформации при комнатной температуре. // Вестник научно-технического развития.2024.-№ 173. 10. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. –М.: МИСиС,2005. – 432 с.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ И НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕФТЕШАХТЫ С ЦЕЛЮ ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Скаженик В. Б., Чернышенко И. В., Шестопапов И. Н., Фомичёв В. И. (ДонНТУ,
НИПП «Яреганефть», г. Донецк, г. Ухта, Россия)
E-mail: geosoftn@mail.ru

Рассмотрены вопросы совместного использования пространственных и нейросетевых моделей для прогноза температуры в горных выработках нефтяной шахты. Обоснована архитектура нейросети, проведено тестирование модели и предложены мероприятия, повышающие качество прогноза.

Ключевые слова: нефтяная шахта, подземная разработка, пространственная модель, нейросетевая модель.

The combined use of spatial and neural network models for predicting temperatures in oil mine workings is examined. The neural network architecture is validated, the model is tested, and measures to improve forecast quality are proposed.

Keywords: oil mine, underground mining, spatial model, neural network model.

Месторождения полезных ископаемых, как правило, разрабатываются в условиях низкой достоверности информации о горно- геологических и горнотехнических условиях разработки. Уникальность условий разработки каждого месторождения, множество изменчивых факторов внешней и внутренней среды, влияющих на функционирование предприятия, усложняют поиск решений, адекватных сложившейся ситуации. В условиях стремительного развития компьютерных технологий создаются предпосылки для обоснования решений по управлению такими сложными системы на основе комплексного моделирования и прогнозирования поведения системы при различных вариантах управляющих воздействий.

Объектом исследования является Ярегское месторождение нефти, разрабатываемое подземным шахтным способом. Нефте содержащий пласт на глубине около двухсот метров разбуривается пологонаклонными добычными скважинами. С целью повышения нефтеотдачи по периметру добычного блока с поверхности пробуриваются паронагнетательные скважины. Нефтеотдача пласта зависит от температуры и объема закачиваемого пара. Данная технология предполагает, что закачиваемый пар будет влиять прежде всего на определенный куст добычных скважин. Однако на практике наблюдается неконтролируемая миграция пара, выход пара в горные выработки с такими негативными последствиями как нарушение температурного режима в горных выработках и нарушение крепления выработок. Для устранения аварийных ситуаций, связанных с выходом пара в горные выработки, персоналу шахты приходится уменьшать или прекращать подачу пара в некоторые паронагнетательные скважины. Однако часто возникают ситуации, когда изменение режима закачки пара не приводит к желаемым результатам. Последнее объясняется неконтролируемой миграцией пара в горном массиве.

Проблемы термощахтной разработки высоковязкой нефти и подходы к управлению тепловым режимом нефтешахты рассматривались рядом отечественных авторов [1–3].

С целью совершенствования системы управления режимом закачки пара разработана пространственная модель нефтешахты. При создании модели использовались авторское программное обеспечение «Шахта 3D» и свободно распространяемое программное обеспечение Blender (<https://www.blender.org/>) [4, 5].

Модель включает: земную поверхность, действующие вскрывающие и подготавливающие горные выработки; погашенные горные выработки ранее применявшейся «ухтинской» системы разработки; действующие добычные и паронагнетательные скважины; добычные скважины «ухтинской» системы разработки; разведочные скважины; нефтесодержащий пласт; глинистые включения нефтесодержащего пласта; разрывные нарушения горного массива, полученные по данным микросейсмического мониторинга (рис.1).

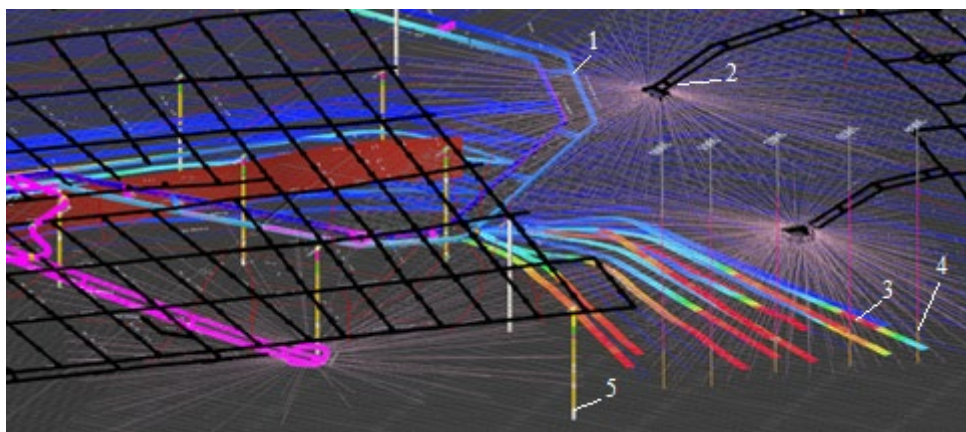


Рис. 1. Фрагмент модели нефтешахты (1 – действующие выработки; 2 – погашенные выработки; 3 – добычные скважины; 4 – паронагнетательные скважины; 5 – разведочные скважины)

При создании пространственной модели нефтешахты предполагалось, что отражение в модели взаимного расположения горных выработок, скважин, геологических нарушений позволит объяснить пути миграции пара и, соответственно, усовершенствовать режимы закачки пара.

После пополнения модели недействующими скважинами уклонных блоков и буровых камер был проведен расчет мест сближения данных скважин с действующими. Таким образом, с одной стороны были поверхностные (паронагнетательные) и подземные (добычные и паронагнетательные скважины), а с другой – недействующие скважины уклонных блоков и буровых камер выработок ранее отработанного туффитового горизонта. В результате анализа сближений скважин установлено: наблюдаются 4223 сближения при расстоянии между скважинами менее 1 метра и 11466 сближений при расстоянии между скважинами менее 2 метров. Такое значительное количество сближений скважин свидетельствует о множестве возможных путей миграции пара.

Как показал анализ данных микросейсмического мониторинга и известных нарушений ранее разработанного туффитового горизонта, даже на расстояниях около 10 метров корреляция выделенных нарушений на туффите и нарушений, выделенных по данным микросейсмического мониторинга, незначительная. Это означает, что внутри пласта в области трасс паронагнетательных и добычных скважин может быть множество неучтенных в модели нарушений.

В результате построения пространственной модели нефтешахты был сделан общий вывод – при таком значительном количестве наблюдаемых сближений скважин

и множестве неучтенных в модели нарушений достоверно определить конкретный путь миграции пара невозможно.

В этой связи предложено использовать нейросетевые модели для поиска взаимосвязей между входными (объем и характеристики теплоносителя; объем и характеристики поступающего в шахту воздуха) и выходными параметрами (температура и объем нефтесодержащей жидкости, температура в горных выработках).

При построении нейросетевой модели предполагалось, что обученная на статистических данных нейросеть позволит установить взаимосвязь между входными и выходными параметрами, что позволит разработать рекомендации по управлению режимами закачки пара. Разработанная пространственная модель позволит учесть геометрические параметры, влияющие на динамику миграции пара.

На первом этапе создания нейросетевой модели цель заключалась в прогнозировании температуры нефтесодержащей жидкости в зависимости от объемов закачиваемого пара в паронагнетательные скважины.

В качестве исходных данных использовались ежедневные сведения об объемах закачиваемого пара в каждую паронагнетательную скважину и данные о температуре нефтесодержащей жидкости на выходе из каждой добычной скважины. Период наблюдений, определяющий объем обучающей выборки, составлял около 500 дней.

При обосновании архитектуры нейросети учитывалось то обстоятельство, что подача пара в скважины оказывает не мгновенное влияние на температуру НСЖ, а имеет определённую степень инерционности. В таких условиях целесообразным является применение рекуррентных моделей нейросетей, в частности, моделей LSTM, ориентированных на запоминание долгосрочного контента.

В данном исследовании было принято решение создавать для каждого варианта нейросетевой модели три подварианта, отличия которых заключаются в количестве временных шагов – 10, 20 и 30 дней.

Архитектура нейросети включает рекуррентный слой LSTM, который содержит 128 ячеек, и полносвязный слой персептронов, состоящий из 128 нейронов. Функция активации принята ReLU. Выходной слой состоит из 48 нейронов, соответствующих 48 рассматриваемым добычным скважинам, с линейной функцией активации.

Оценка потерь в процессе поиска весовых коэффициентов нейронной сети осуществлялась с использованием функции «среднеквадратичная ошибка», которая получила наибольшее распространение при решении задач регрессии. В качестве показателя, который количественно оценивает качество обучения, была принята величина средней абсолютной ошибки.

Тестирование модели заключалось в имитации прогноза температур нефтесодержащей жидкости на 30 дней вперёд. На вход нейросети подаются значения объема пара за последние дни в зависимости от размера временных шагов на входе нейросети (10, 20 или 30 дней), а также прановая подача пара на 30 дней. Далее производится прогноз для каждого дня и показатели сравниваются с фактическими. График фактических и прогнозных значений при тестировании нейросети для одной из добычных скважин показан на рис. 2.

Средняя абсолютная ошибка для всей тестовой выборки составила около 10 градусов. Такая точность прогноза не является отличной, однако в целом предлагаемая архитектура нейросети работоспособна и при условии учета некоторых дополнительных факторов (различная инерционность для скважин, качество обучающей выборки) может дать приемлемый результат.

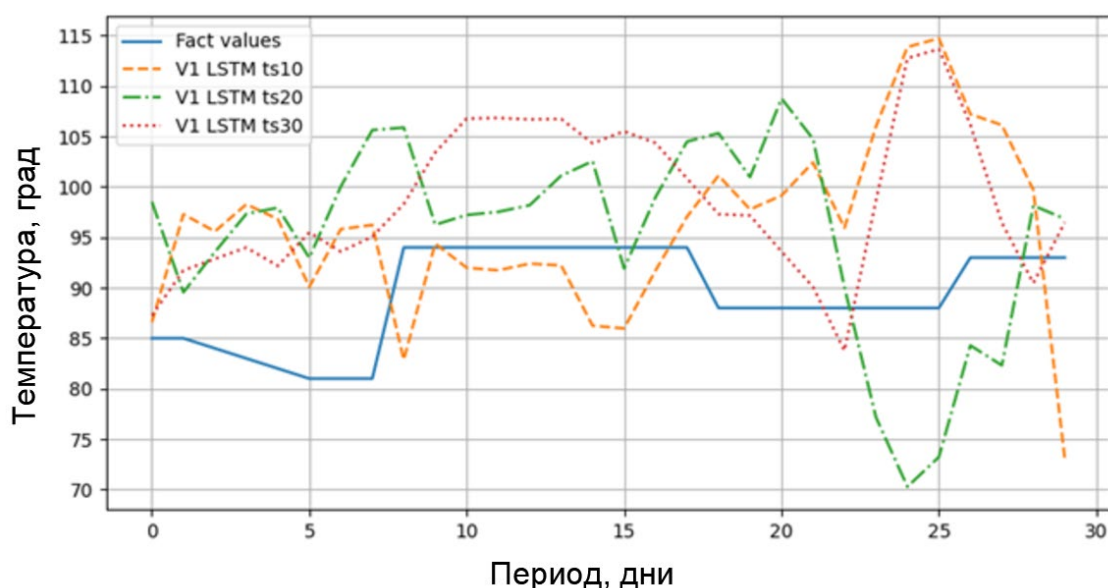


Рис. 2. Прогноз температуры нефтесодержащей жидкости для временных шагов 10, 20 и 30 дней

Заключение. Пространственное моделирование объектов нефтешахты, влияющих на температурный режим в горных выработках, показало принципиальную невозможность однозначного прогноза путей миграции пара из-за множества сближений скважин, старых горных выработок и геологических нарушений.

Совместное использование пространственных моделей и нейросетевых моделей создают предпосылки для адекватного прогноза температурного режима в краткосрочном периоде. Качество прогноза зависит от представительности статистической информации и учитываемой совокупности влияющих факторов.

Список литературы: 1. Гендлер С. Г. Результаты экспериментальных исследований теплового режима нефтяных шахт при термическом способе добычи нефти / С. Г. Гендлер, И. Р. Фазылов, А. Н. Абашин. — ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 6–1, 2022. — С. 248–260. 2. Морозюк О. А. Анализ разработки Ярегского месторождения по термошахтной технологии // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 11. – С. 45–52. 3. Фомин А.И. Особенности разработки Ярегского месторождения тяжелой нефти // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности : научно-технический журнал / Акционерное общество "Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли". – 2019. – № 1. – С. 75-81. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.30.36.007 4. Скаженик В.Б. Проектирование разработки месторождений на основе компьютерного моделирования // Известия Донецкого горного института. - 2011. - № 1. - С. 8-14. 5. Скаженик В.Б., Шестопалов И.Н., Чернышенко И.В. Моделирование системы скважин и подземных горных выработок нефтешахты с целью прогноза путей миграции закачиваемого пара // Инновационные перспективы Донбасса: сборник научных трудов 11-й Международной научно-практической конференции. Донецк, 2025. С. 199–203.

ОСОБЕННОСТИ АМПЛИТУДНОЙ ЗАВИСИМОСТИ И СТРУКТУРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЦИРКОНИЯ

Скворцов А. И. (ВятГУ, г. Киров, Россия)

Тел. +7 (8332) 74-24-90; E-mail: skvorcov@vyatsu.ru

Изучена амплитудная зависимость внутреннего трения циркония. На амплитудной зависимости внутреннего трения выявлены области, обусловленные процессами повышенного рассеяния энергии на границах двойников. Проанализировано влияние двойников и зеренной структуры на особенности амплитудной зависимости внутреннего трения циркония.

Ключевые слова: цирконий, отжиг, внутреннее трение, микроструктура.

The amplitude dependence of the internal friction of zirconium has been studied. On the amplitude dependence of the internal friction, regions caused by processes of enhanced energy dissipation at twin boundaries have been identified. The influence of twins and the grain structure on the features of the amplitude dependence of internal friction of zirconium has been analyzed.

Keywords: zirconium, annealing, internal friction, microstructure.

Введение. Сплавы Zr, в частности, сплавы Zr–Nb, как материалы со специфическими функциональными свойствами, используются в качестве конструкционного материала в машино-, авиа-, ракетостроении, в космической технике. В атомной энергетике цирконий используется благодаря малому поперечному сечению захвата тепловых нейтронов, высоким коррозионным свойствам, хорошим механическим свойствам и высокой жаропрочности [1, 2].

Для динамически нагруженных изделий необходимо знание демпфирующих свойств материалов, из которых они изготовлены. Следует отметить, что характеристики амплитудной зависимости внутреннего трения (АЗВТ) циркония изучены недостаточно полно. В частности, это касается связи его параметров со структурой. Из работ по амплитудной зависимости внутреннего трения, а также по другим свойствам Zr и его сплавов с Nb, следует отметить работы [3–5]. Так как метод амплитудно-зависимого внутреннего трения является структурно-чувствительным, представляет интерес изучение связи структуры циркония, как основного элемента сплавов на его основе, с особенностями его внутреннего трения в зависимости амплитуды.

Настоящая работа является продолжением, развитием упомянутых работ. Ее цели: 1) изучение особенностей амплитудной зависимости внутреннего трения циркония, 2) анализ соответствия выявленных особенностей амплитудной зависимости внутреннего трения циркония его структуре.

Материал и методика исследований. Цирконий в виде слитков получали из йодидного циркония путем переплава в электродуговой печи в атмосфере гелия. Для сравнения использовали чистый ниобий, слитки которого получали таким же способом. Слитки ковали в интервале температур 1150–900 °С на прутки диаметром 12 мм с последующим охлаждением на воздухе, что обеспечивало их поликристаллическую структуру. Из прутков точили образцы. Образцы подвергали отжигу в вакууме при 660 °С. Амплитудную зависимость внутреннего трения определяли методом затухающих колебаний на крутильном маятнике Вятского государственного университета при ис-

питании цилиндрических образцов с размерами рабочей части: диаметр 5 мм, длина 30 мм. За амплитуду колебаний принята амплитуда на поверхности рабочей части образцов. В качестве характеристики внутреннего трения использовали логарифмический декремент $\delta = [\ln(\gamma/\gamma_n)]/n$, где γ – амплитуда начала отсчета циклов колебаний, γ_n – амплитуда конца отсчета циклов колебаний после числа циклов n . Последовательность измерений – от малых амплитуд к большим. Частота колебаний – 13–17 Гц. Микроструктуру выявляли на микроскопе «Neophot 21».

Результаты исследования и их анализ. Из сравнения АЗВТ отожженных циркония и ниобия на рис. 1 видно следующее. Стабильной ОЦК-структуре ниобия соответствует простая по форме АЗВТ, состоящая из двух областей, разделенных пределом упругой циклической деформации γ_y (рис. 1, б). Прямолинейности на АЗВТ с небольшим наклоном области I соответствует процесс колебания дислокаций, амплитуды которого увеличиваются с увеличением амплитуды механических колебаний. Выше γ_y , то есть в области II, АЗВТ обусловлена усиливающимся с увеличением амплитуды колебаний процессом макропластической деформации.

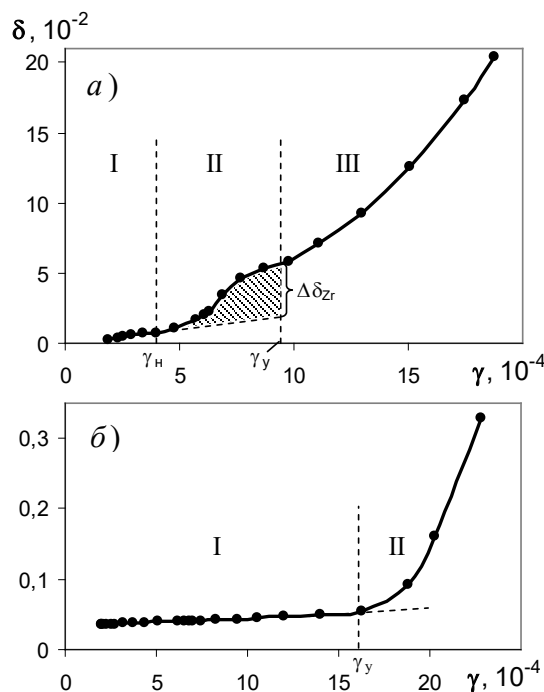


Рис. 1. Амплитудные зависимости внутреннего трения циркония (а) и ниобия (б). Римскими цифрами обозначены области АЗВТ, обусловленные различными механизмами (совокупностью механизмов) внутреннего трения.

АЗВТ циркония, обладающего ГПУ-решеткой, (рис. 1, а) отличается от АЗВТ ниобия наличием непрямолинейных областей – I и II, разделенных амплитудой γ_n . Для выпуклой области I отклонение от прямолинейности – не значительно. Для АЗВТ области II характерна смена вогнутой части выпуклой и более интенсивным увеличением внутреннего трения при увеличении амплитуды колебаний по сравнению с областью I.

Из анализа микроструктуры отожженного циркония (рис. 2) следует, что она характеризуется наличием двойников. Следует отметить, что данные о наличии двойников в цирконии, находящемся в стабильном состоянии, приведены также в работах [2, 6]. Наличие двойников, обладающих, как предполагается, легкоподвижными элементами

ми их структуры, свидетельствует о том, что форма АЗВТ в областях I и II циркония на рис. 1, *a* связана с наличием в его структуре двойников, а именно, обусловлена процессом скольжения вдоль границ двойников, интенсивность которого зависит от амплитуды механических колебаний образца.

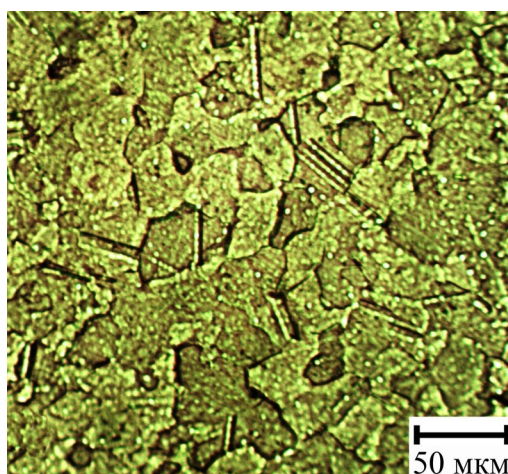


Рис. 2. Структура циркония после отжига при 660 °С

Расположение на рис. 2 двойниковых пластин в пространстве различное и зависит от пространственной ориентации кристаллических решеток зерен. По-видимому, характер областей АЗВТ I и II на рис. 1, *a* является следствием величины, пространственного расположения двойниковых пластин, зависящих, в свою очередь, от пространственной ориентации кристаллических решеток зерен и их величины.

Заключение. Особенности амплитудной зависимости внутреннего трения отожженного циркония обусловлены наличием в его структуре двойниковых пластин, величина и пространственное расположение которых зависит от пространственной ориентации кристаллических решеток зерен и их величины. Механизмом повышенного рассеяния энергии при механических колебаниях является процесс скольжения по границам двойников.

Актуальным является более подробный анализ двойниковой структуры циркония.

Список литературы: 1. Дуглас Д. Металловедение циркония. М.: Атомиздат, 1979. 360 с. 2. Добромислов А. В., Талуц Н. И. Структура циркония и его сплавов. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 228 с. 3. Сковцов А. И., Плюснин Е. С., Сковцов А. А. Параметры амплитудной зависимости внутреннего трения и твердость отожженных сплавов систем Nb–Zr и Al–Zn // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 8. С. 35–39. 4. Сковцов А. И., Сковцов А. А. Влияние температуры старения на параметры амплитудной зависимости внутреннего трения, твердость и структуру сплава Zr–8,1%Nb // Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123, № 11. С. 1175–1181. 5. Сковцов А. И. Амплитудные зависимости внутреннего трения сплавов цирконий – ниобий и их анализ // Машиностроение и техносфера XXI века / Сборник трудов XXXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15–21 сентября 2025 г. – Донецк: ДонНТУ, 2025. С. 379–382. 6. Козлов Е. А., Литвинов Б. В., Абакшин Е. В. Фазовые превращения и изменение структуры циркония при воздействии сферических ударных волн // Физика металлов и металловедение. 1995. Т. 79, № 6. С. 113–127.

О НОВОМ СПОСОБЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ГЛУБОКИХ ШАХТ ДОНБАССА

Соловьев Г. И., Чуяшенко С. В. (ДонНТУ, г. Донецк,
шахта "Комсомолец Донбасса", г. Кировск, ДНР, Россия)
Тел./Факс: +7 (949) 4276189; E-mail: gisoloviev1@mail.ru

В статье представлены результаты исследований эффективности применения кустовой армированной крепи для обеспечения устойчивости подготовительных выработок глубоких шахт. Выполненные лабораторные исследования позволили установить, что применение кустовой армированной крепи позволяет повысить ее несущую способность в среднем в 2,2-2,3 раза.

Ключевые слова: горное давление, куст, армирование, органная крепь, жесткая опора, смещения

The article presents the results of studies on the effectiveness of using bush reinforced roofing to ensure the stability of preparatory workings in deep mines. The laboratory studies conducted have shown that the use of bush reinforced roofing can increase its load-bearing capacity by an average of 2.2-2.3 times.

Key words: rock pressure, bush, reinforcement, organic roofing, rigid support, and displacement

Введение. Обеспечение устойчивости подготовительных выработок является одним из основных факторов успешной работы высокопроизводительной техники добычных участков, осуществляющих угледобычу в условиях больших глубин разработки. Применяемые в настоящее время способы и средства крепления и поддержания интенсивно деформирующихся подготовительных выработок не обеспечивают их устойчивое состояние из-за несоответствия технологических параметров этих способов особенностям проявления горного давления в условиях глубоких шахт. Поэтому в настоящее время рациональными способами обеспечения устойчивости подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ являются использование прочностных свойств породного массива и применение анкерно-рамных и рамно-анкерных конструкций крепи [1-3]. К этим способам также относится разработанная на кафедре РМПИ ДонНТУ технология продольно-поперечной консолидации рам арочной крепи, успешно прошедшая экспериментальную проверку на ряде глубоких шахт Донбасса [3, 4]. Предлагаемый комбинированный способ обеспечения устойчивости подготовительных выработок глубоких шахт основан на сооружении на бровке выработки жесткой охранной полосы из породных полублоков в сочетании с продольно-балочной связью верхняков основной крепи выработки одной или двумя балками из спец профиля СВП-27. Однако, опыт применения жестких охранных полос из породных полублоков показал [3, 4], что на отдельных участках подготовительных выработок из-за недостаточной жесткости оконтуривающей жесткую полосу деревянной органной крепи наблюдался ее разлом и разрушение, что сопровождалось раздавливанием и разваливанием породных полублоков. Из-за этого негативного проявления горного давления на этих участках наблюдалась существенная интенсификация смещения боковых пород и значительные деформации основной крепи выработки.

Целью настоящей работы является разработка способа повышения жесткости и несущей способности деревянной органной крепи, оконтуривающей жесткую охранную полосу из породных полублоков.

Основное содержание работы. Для повышения жесткости органной крепи и сооружаемых на бровке лавы охранных конструкций была предложена кустовая армированная крепь [5], которая представляет собой куст из 3-х (минимальное количество) и более деревянных стоек, соединенных между собой гибкой стяжкой - одной прядью шахтного подъемного каната.

Сооружение кустовой армированной крепи проводится в следующей последовательности (рис. 1).

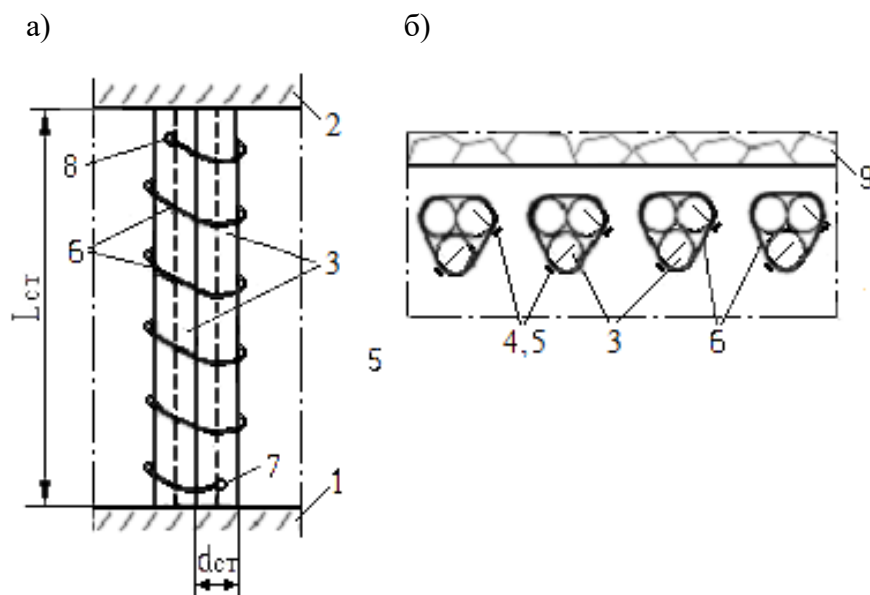


Рис. 1. Схема установки кустовой армированной крепи на бровке лавы: 1 и 2 - соответственно почва и кровля пласта; 3 - деревянные стойки крепи; 4, 5 - гвозди для фиксации стяжек на деревянных стойках; 6 - гибкая стяжка; 7 и 8 - соответственно нижняя и верхняя петли гибкой стяжки; 9 - выработанное пространство лавы

Между почвой (1) и кровлей (2) угольного пласта утанавливаются рядом друг с другом три (и более) деревянные стойки (3). В нижней части одной из стоек забивается металлический гвоздь (4) на 2/3 своей длины. Предварительно по краям гибкой стяжки (5) изготавливаются петли (6, 7) за счет изгиба конца стяжки из пряди шахтного каната и фиксации его отрезком алюминиевой проволоки диаметром 0,003 м. После навески нижней петли гибкой стяжки на гвоздь он загибается ударами молотка в сторону, противоположную направлению намотки стяжки на деревянную стойку. Затем производится оббивка деревянных стоек на всю длину гибкой стяжкой с образованием предварительно рассчитанного количества ее витков. После этого производится крепление второй петли в верхней части деревянной стойки с помощью металлического гвоздя по аналогии с креплением петли в нижней части стойки.

При ввоздействии на деревянную стойку повышенного горного давления в ней формируется напряженно-деформованное состояние, при котором из-за превышения вертикальными нагрузками предела прочности стойки на одноосное сжатие происходит смятие торцевых и боковых поверхностей, а при нарастании горизонтальных

нагрузок и превышения ими предела прочности стойки на изгиб стойка переламывается, как правило в средней ее части.

Количество стоек в одном армированном кусте определяется из выражения:

$$n_{ст} = 1 + \exp \left(k_{\gamma H} \cdot k_{зап} \frac{[\sigma_{изг}]}{[\sigma_{сж}]} \right), \quad (1)$$

где - $k_{\gamma H}$ - коэффициент концентрации вертикальных напряжения в породах кровли;

$k_{зап}$ – параметр запаса прочности гибкой стяжки, $k_{зап} = 0,2 + \frac{l_{ст}}{m_0}$, м;

$[\sigma_{изг}]$ – предел прочности деревянной стойки на изгиб, МПа;

$[\sigma_{сж}]$ – предел прочности деревянной стойки на одноосное сжатие, МПа;

Максимальный размер площади поперечного сечения гибкой стяжки и количество ее витков по высоте стоек определяется выражение в виде :

$$D_{г\text{ибк.ст}} = k_{зап} \cdot l_{ст} \left(\frac{[\sigma_{изг}]}{[\sigma_{сж}]} \right)^2 \quad (2)$$

Необходимое количество витков гибкой стяжки для кустовой армированной крепи определяется из выражения:

$$n_{витк} = n_{ст} m_{ст} d_{ст} / S_{куст}, \quad (3)$$

где $n_{витк}$ – количество витков гибкой стяжки, од;

$n_{ст}$ – количество стоев в одном кусте, шт;

$l_{ст}$ – высота стойки, равная мощности угольного пласта, м;

m_0 – средняя мощность угольного пласта в пределах отрабатываемого выемочного поля, м;

$d_{ст}$ – диаметр деревянной стойки, равный $d_{ст} = (0,12 \div 0,15) (m_{ст})^{0,5}$, м;

$S_{куст}$ – общая площадь поперечного сечения стоек в одном кусте, м².

Предложенная кустовая армированная крепь позволяет значительно повысить несущую способность деревянных опорных конструкций и увеличить срок их службы. Ее конструкция весьма простая в изготовлении и может адаптироваться в зависимости от изменения горно-геологических условий залегания пласта.

Для установления деформационных характеристик кустовой армированной крепи были проведены стендовые испытания прочностных свойств различных сочетаний деревянной крепи на прессе кафедры «строительства шахт и подземных сооружений», который обеспечивал максимальное осевое давление 5,0 т (рис. 2).



Рис. 2. Общая вид пресса для проведения испытаний прочностных свойств деревянной крепи

Для проведения исследований были изготовлены деревянные стойки в масштабе 1:10 из древесины бука, прочностные свойства которого приведены в таблице 1.

Таблица 1. Прочностные свойства древесины

№/№	Параметры	Вид древесины		
		Бук	Дуб	Сосна
1	Плотность, кН/м^3	6,8 при 12% влаги	7,8 при 12% влаги	5,05 (12% W) 4,8 (абс. сух)
2	Предел прочности на сжатие, МПа			
	- параллельно волокнам	52,9	55,9	44,5
	- перпендикулярно волокнам	5,4	5,7	4,54
3	Твердость, Н/м^2			
	- торцевая	65,3	57,31	30,5
	- радиальная	53,2	48,2	23
4	Модуль упругости, ГПа	12,4	7,3	10,55

Для проведения испытаний были изготовлены стойки диаметром 0,008; 0,011; 0,014; 0,017; 0,02 м при соответствующей длине 0,08; 0,11; 0,14; 0,17; 0,2 м, что позволило обеспечить среднее соотношение между диаметром и длиной стойки, применяемое на угольных шахтах, которое в основном составляет 1:10.

Были проведены опыты по определению несущей способности одной деревянной стойки, двух, трех и четырех совместно установленных стоек в виде куста без обвивки стоек гибкой стяжкой, а также опыты при деревянных кустах при использовании двух, трех и четырех стоек в кусте с обвивкой их гибкой стяжкой при количестве витков от 6 до 8 (рис. 5.8). Всего по каждому диаметру стоек были выполнено по 20 испытаний. Данные результатов испытаний заносились в специальный журнал, верхняя часть таблицы которого приведена ниже, а сам журнал с данными результатов замеров приведен в приложении работы.

Характерные примеры деформации стоек при воздействии на них вертикальной нагрузки приведены на рисунках 2 - 8.



Рис. 3. Расположение одной стойки и двух стоек на рабочем столе пресса



Рис. 4. Вид разрушения двух деревянных стоек при согласованном и рассогласованном деформировании



Рис. 5. Вид разрушения двух и четырех деревянных стоек при рассогласованном деформировании и разломе стоек на разной высоте



Рис. 6. Вид разрушения двух стоек без стяжки и четырех стоек со стяжкой при деформации стоек за счет их смятия на концах



Рис. 7. Вид разрушения двух деревянных стоек с гибкими стяжками при различной высоте разлома стоек



Рис. 8. Вид разрушения четырех деревянных стоек с гибкими стяжками при различной высоте разлома стоек



Рис. 9. Вид разрушения четырех деревянных стоек с гибкими стяжками при нарушении крепежа верхнего конца стяжки на стойке

Анализ механизма разрушения деревянных стоек при их осевом нагружении позволяет сделать вывод о том, что в основном разлом вертикальных деревянных стоек происходит в их средней части. При этом установлено, что увеличение диаметра стоек на 30% позволяет повысить несущую способность стоек всего лишь на 8-15% и, поэтому, такой экстенсивный путь повышения несущей способности деревянной крепи приводит к значительному росту расхода лесоматериалов.

На рисунке 10 представлены графики зависимости несущей способности стоек кустовой деревянной крепи от величины действующей на них вертикальной нагрузки без применения и при использовании гибкой стяжки в качестве армирующего элемента.

Из приведенных графиков видно, что применение гибкой стяжки кустовой крепи позволяет повысить ее несущую способность в среднем в 2,2-2,3 раза.

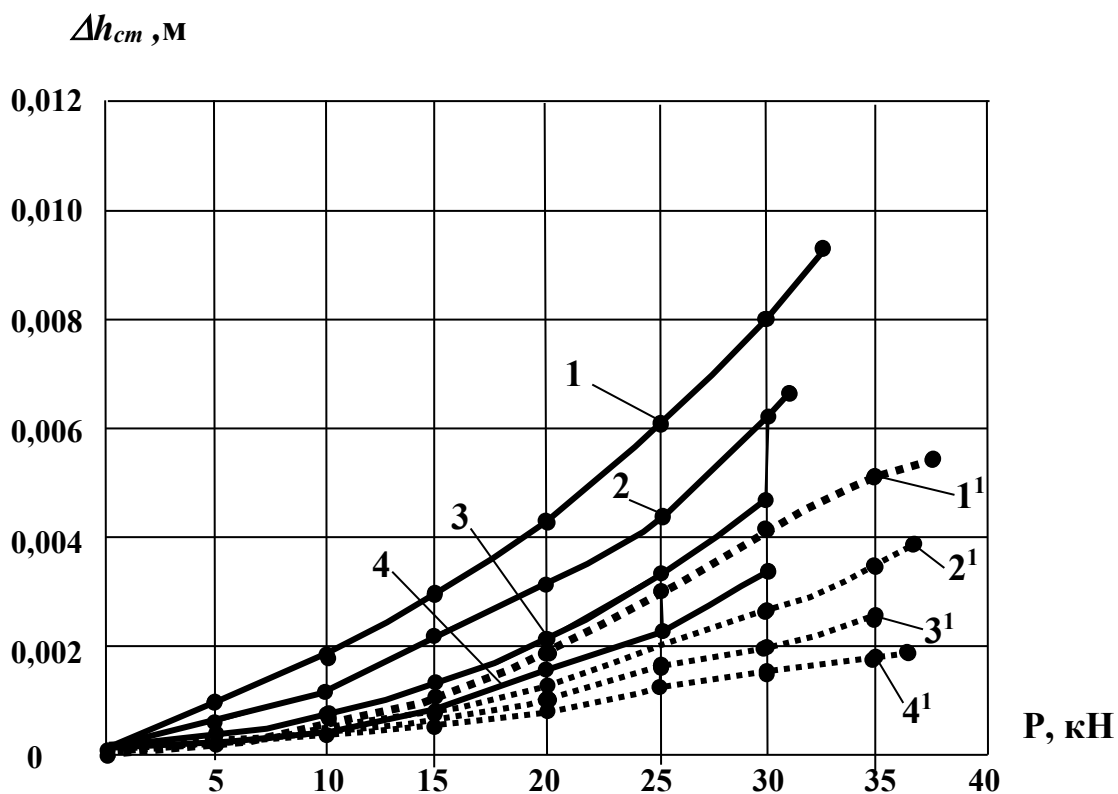


Рис. 10. Зависимость величины деформаций деревянных стоек от величины осевого давления на них без применения (1, 2, 3, 4) и с использованием гибкой стяжки (1¹, 2¹, 3¹, 4¹) соответственно при 4-х; 3-х; 2-х и 1-й стойке

Заключение. Таким образом применение кустовой армированной крепи на бровке лавы в качестве жесткого опорно-ограждающего элемента позволяет обеспечить минимизацию смещений боковых пород на бровке и препятствует преждевременному разрушению жестких полос из породных полублоков. Применение кустовой армированной крепи в комбинации с продольно-балочной крепью усиления и жесткими опорными полосами из породных полублоков позволит обеспечить устойчивость подготовительных выработок при их поддержании в различных зонах проявления горного давления.

Список литературы. 1. Черняк И.Л., Ярунин С.А. Управление состоянием массива горных пород. - М.: Недра, 1995. – 395с. 2. Литвинский Г.Г., Гайко Г.И., Кулдыркаев М.И. Стальные рамные крепи горных выработок– К.: Техника, 1999. – 216 с. 3. Соловьев Г.И. Особенности физической модели самоорганизации боковых пород на контуре выемочной выработки при продольно-жестком усилении арочной крепи. Научный вестник НГУ, Днепропетровск. 2006, №1. С.11-18. 4. Соловьев Г.И. Особенности проявления горного давления в конвейерной выработке при продольно-балочной связи комплектов арочной крепи. Сборник научных трудов РАНИМИ, № 3 (41), Том 1. Донецк: 2024. С. 147-168. 5. Патент. 99059 Украина, МПК8 E21D 11/14. Способ поддержания горной выработки / Г.И. Соловьев, А.Л. Касьяненко; заявитель и собственник Донецкий национальный технический университет. - No. a201106126; заявл. 27.02.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. No. 13, 2012 г.

КИНЕТИКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОТОПЛИВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРЕЛКАХ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ

Сулименко А. С., Сулименко Д. С., Цымбалов Д. С., Яценко О. В. (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

A unified mathematical model purposed at industrial burner optimization is elaborated and tested successfully. It regards modules respected to fuel dispersion, droplets evaporation, as well as its cracking and combustion. The model predicts the smoke toxicity in addition. Its implementation is desirable in air protection decisions and technical solutions.

Экономическая эффективность промышленных горелочных устройств (ГУ) регламентируется все более жесткой конкуренцией производителей и постоянно рассматриваемыми природоохранными нормативами. В этой связи крайне актуальной становится всевозможная активация физико-химических процессов, обобщенно называемых горение [1-2]. Например, разработанное в ДГТУ с участием авторов оригинальное ГУ предусматривает двойную паро-плазменную активацию горючей смеси: перегретый пар одновременно улучшает диспергирование жидкого топлива, ускоряет его испарение и снижает выбросы $\text{CO}/\text{C}_x\text{H}_y$, а постоянно действующий газовый разряд поддерживает в зоне активного горения надлежащую концентрацию высокоактивных частиц (атомов водорода и ионов). Такое комбинированное воздействие на горючую смесь позволяет свести управление мощностью ГУ к практически пропорциональному регулированию в диапазоне 20 – 100 % от номинальной. Однако добиться оптимальных параметров комбинированной термохимической активации горючей смеси можно лишь предварительно рассчитав и строго дозируя их в соответствии с выбранными конструкцией устройства и организацией сжигания (см. рис. 1). Это требует разработки и использования при доводке экспериментального образца ГУ ряда высоко реалистичных моделей физико-химических процессов, составляющих горение. Схема элементарных процессов, составляющих горение, приведена на рис. 2, а ее отработка выбрана целью данного исследования.

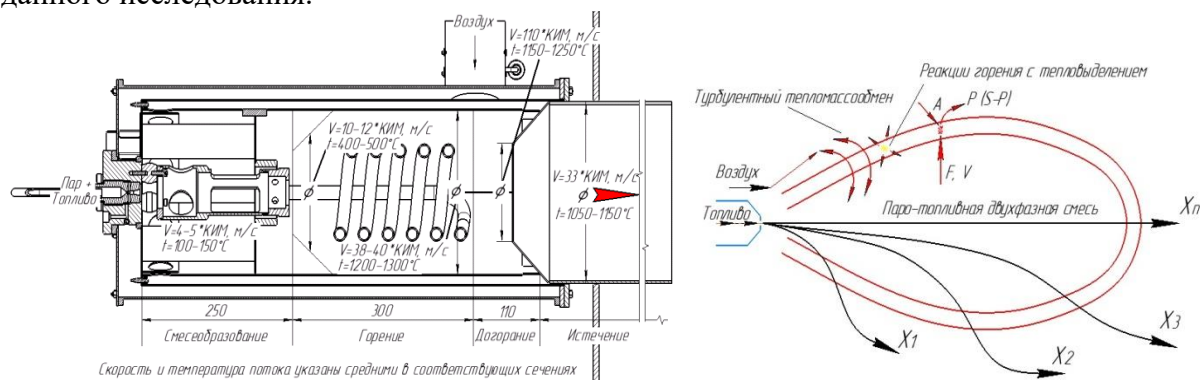


Рис. 1. Конструкция ГУ и организация сжигания жидких топлив

Соответственно разработаны и испытаны математические модели распыливания, испарения, смешения и собственно химического реагирования (превращения). Опишем

их подробнее, акцентируя внимание на прикладной ценности и соответственно полезности для целей доводки и оптимизации конструкции.

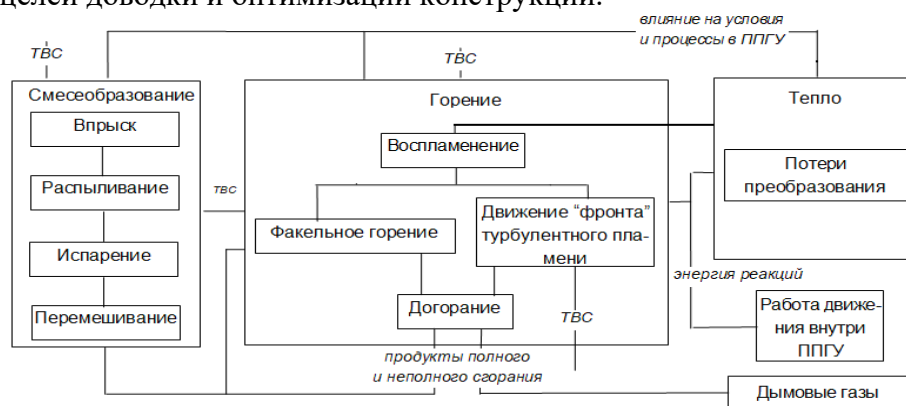


Рис. 2. Схематизация физико-химических процессов в ГУ с паро-плазменной активацией (ППГУ)

Распыливание топлива. Соответствующая математическая модель создавалась с целью выбрать оптимальный диаметр форсунки (имелись полтора десятка различных опытных образцов различного диаметра), который одновременно обеспечит требуемую мелкость распыливания при допустимом давлении топливоподачи. Необходимость этой модели обуславливалась отсутствием у разработчиков дорогостоящей лазерной аппаратуры для измерения мелкости распыливания. Данная задача решалась косвенно: размер капель диспергированного топлива определялся по форме пятна осаждения для различных опытных форсунок на основе следующей математической модели.

Применительно к баллистическому эксперименту, разработанному для определения мелкости распыливания дизельного топлива (ДТ), уравнения динамики отдельных капель холодного топливного факела (для одиночной капли ДТ с начальным диаметром $\varnothing(0) = \varnothing_0$, координатой $X(0) = X_0 = 0$ и скоростью $V(0) = V_0$) описывается уравнениями:

$$dx(t)/dt = v(t), \quad x(0) = x_0 = 0, \quad (1)$$

$$dv(t)/dt = -6/(\rho_f \cdot \varnothing(t)) \cdot [(16,319 \cdot v(t))^4 + (5,127 \cdot v(t)^2)^4]^{1/4}, \quad v(0) = v_0, \quad (2)$$

$$dy(t)/dt = u(t), \quad y(0) = y_0 = 0, \quad (3)$$

$$du(t)/dt = -6/(\rho_f \cdot \varnothing(t)) \cdot [(16,319 \cdot u(t))^4 + (5,127 \cdot u(t)^2)^4]^{1/4}, \quad u(0) = u_0, \quad (4)$$

$$dz(t)/dt = w(t), \quad z(0) = z_0 = 0, \quad (5)$$

$$dw(t)/dt = -6/(\rho_f \cdot \varnothing(t)) \cdot [(16,319 \cdot w(t))^4 + (5,127 \cdot w(t)^2)^4]^{1/4}, \quad w(0) = w_0, \quad (6)$$

Числовые коэффициенты в уравнениях (1)–(6) соответствуют размерностям использованным переменных: координата в метрах, скорость – в м/с, плотность ρ_f – в кг/м³, диаметр капли $\varnothing$ – в мм. Направление полета капли – равновероятно случайное (по тангажу и рысканью) в пределах конуса распыливания. Результаты сопоставления данных компьютерной симуляции согласно (1)–(6) с данными физического эксперимента, показанные на рис. 3, свидетельствуют о правомочности использованного авторами подхода для определения мелкости распыливания.

Из множественных сценарных экспериментов с моделью (1)–(6) следует, что удаленность точки падения капли прямо пропорциональна ее диаметру, пропорциональна модулю начальной скорости в степени $3/4$ и не зависит от угла распыливания. В то же время среднее угловое отклонение капли от оси струи зависит лишь от начального угла конуса распыливания в степени, близкой к $2/3$ [3].

Сопоставление этой модели с результатами испытаний макетного образца ГУ мощностью ~ 1 кВт показало (рис. 4), что при истечении из сопла диаметром 0.3 мм струя ДТ комнатной температуры под давлением 2 атм без распыла преодолевала рас-

стояние порядка 5 м. Подача перегретого пара в зону истечения нормально его направлению приводила к дроблению струи и укорочению зоны оседания. В экспериментах зафиксировано, что осевой размер зоны оседания существенно сокращался с увеличением подачи перегретого пара и его температуры в соответствии с моделью (1)-(6).

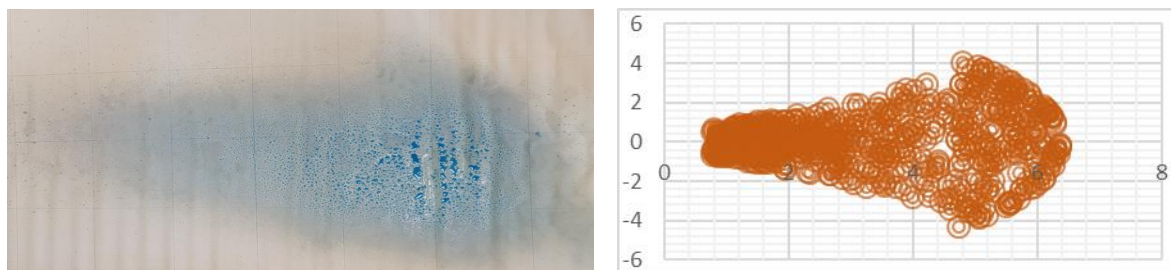


Рис. 3. Пятно осадения подкрашенной воды (результат распыла пульверизатором с высоты 1 м в горизонтальном направлении) – слева и расчет согласно (1)-(6) – справа



Рис. 4. Схема использования перегретого пара (справа) для эффективного распыливания ДТ в условиях предварительных испытаний макетной установки (слева – общий вид)

Испарение многокомпонентных нефтяных топлив. В соответствии с типичной кривой возгонки ДТ, показанной на рис. 5, а также аналогичными кривыми для эталонных углеводородов авторами использовано представление

$$\text{ДТ} = 25 \% \text{C}_{13}\text{H}_{28} (\text{тридекан}) + 50 \% \text{C}_{16}\text{H}_{34} (\text{цетан}) + 25 \% \text{C}_{20}\text{H}_{42} (\text{эйкозан}) . \quad (7)$$

Ему соответствует представление

$$\text{ДТ} = \text{C}_{15.9}\text{H}_{33.8} \approx \text{C}_{16}\text{H}_{34} \quad (8)$$

и рассчитанные в соответствии с законами Срезневского [4] и Антуана [5] времена испарения капель разного размера, сведенные в табл. 1 (жирным – приемлемые значения).

Таблица 1. Время испарения ($\lg \tau_{\text{исп}}$) капель $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ в зависимости от начального диаметра и температуры

$\lg \varnothing, \text{ мм}$ $T, \text{ град. Ц}$	0	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3
-25	12,35	11,82	11,30	10,77	10,24	9,72	9,19
25	8,59	8,06	7,53	7,01	6,48	5,95	5,43
75	5,91	5,38	4,85	4,33	3,80	3,28	2,75
125	3,90	3,38	2,85	2,32	1,80	1,27	0,75
175	2,35	1,82	1,30	0,77	0,24	-0,28	-0,81
225	1,11	0,58	0,05	-0,47	-1,00	-1,53	-2,05
275	0,09	-0,44	-0,96	-1,49	-2,01	-2,54	-3,07
325	-0,75	-1,28	-1,81	-2,33	-2,86	-3,39	-3,91
375	-1,47	-1,99	-2,52	-3,05	-3,57	-4,10	-4,63

Этот теоретический результат и данные компьютерной имитации подтверждаются техническим экспериментом на макетной установке (см. рис. 4), в котором не удалось обеспечить полное безсажное сжигание ДТ (средняя температура кипения 280 град. Ц) при его распыливании перегретым водяным паром. Добавление в состав топлива 50 % этилового спирта (температура кипения 77 град. Ц) или 50 % смеси (75 % изопропиловый спирт + 25 % вода, температура кипения горючего компонента 77 град. Ц, среднесмесевая – 83 град. Ц) обеспечивала высококачественное горение при тех же условиях подачи и распыливания.

Стадии химического реагирования. Понимание механизма реакций требует выделить из огромного множества элементарных реакций несколько определяющих. Получаемые таким образом компактные математические модели крайне ценны для оптимизации и управления горением. Здесь выделяют два этапа: на первом высокомолекулярные соединения фрагментируются (крекинг), на втором – окисляются (собственно горение). Здесь предложены оба типа минимальных моделей и соответствующие наборы кинетических коэффициентов. Соответствующая крекингу химическая схема приведена в табл. 2, а результат ее интегрирования – на рис. 5.

Таблица 2. Ведущие вещества и реакции в предпламенной зоне ГУ

№	Схема реакции: $X + Y + \dots \xrightarrow{k} V + W + \dots$					Параметры в формуле Аррениуса для константы скорости реакции k				
	Реагенты		Продукты			A	B	C	D	E
1	$C_{20}H_{42}$	→	$C_{16}H_{32}$	C_4H_8	H_2	1.5	3	298	0	-2750
2	$C_{16}H_{34}$	→	$C_{16}H_{32}$	H_2		1.5	3	298	0	-2750
3	$C_{13}H_{28}$	→	C_8H_{16}	C_4H_8	CH_4	1.5	3	298	0	-2750
4	$C_{16}H_{32}$	→	C_8H_{16}	C_8H_{16}		1.5	3	298	0	-2750
5	C_8H_{16}	→	C_4H_8	C_4H_8		1.5	3	298	0	-2750
6	C_4H_8	→	C_2H_4	C_2H_4		1.5	3	298	0	-2750
7	C_2H_4	→	CH_2	CH_2		1.5	3	298	0	-2750

Сравнение результатов интегрирования кинетических уравнений на рис. 5 свидетельствует об ускорении крекинга многофракционного ДТ за счет присутствия изначально сравнительно легких компонентов.

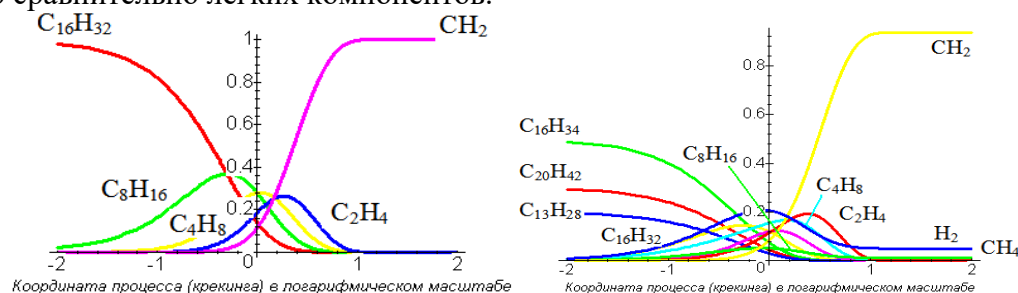
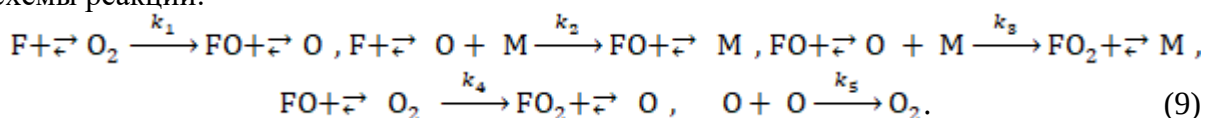


Рис. 5. Кинетика предпламенных процессов в ГУ. Топливо: цетан – слева (реакции 4-7 из табл. 2), реалистичное (20 % тридекана, 50 % цетана и 30 % эйкозана – справа (все реакции табл. 2)

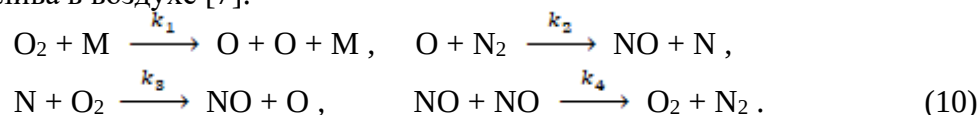
Актуально также упрощение модели последующего окисления углеводородов до схемы реакций:



В этой модели введены некоторые «эффективные» вещества – компоненты топлива и

продукты их крекинга (обобщенно F), исходный (O_2) и «активированный» (O) окислитель, промежуточные (FO) и конечные (FO_2) продукты. Численное решение задачи (9) с реалистичными коэффициентами и начальными условиями показано на рис. 6 (слева).

Для оценки нормируемых экологических характеристик проектируемого ГУ используем модель Я.Б. Зельдовича – схему образования окислов азота при горении углеводородного топлива в воздухе [7]:



Результат численного интегрирования дифференциальных уравнений, соответствующих схеме превращений (10), в условиях ГУ показан на рис. 6 (справа).

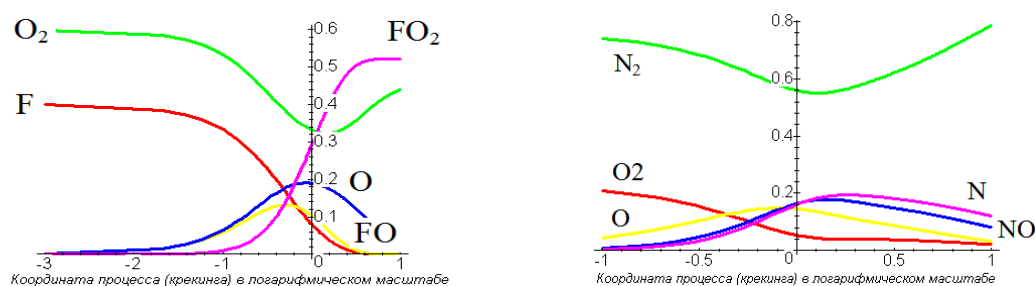


Рис. 6. Имитация окисления (горения) ДТ в рамках модели «эффективных» реагентов (9) – слева и образование оксида азота при горении – справа

Компьютерные эксперименты с упрощенными моделями реакций в проектируемом ГУ показали свою пригодность к использованию в макроописании совокупного процесса. Совместно с адаптированными моделями газификации ДТ, смешения топлива с паром и воздухом позволяют (при использовании экспериментальных данных для коэффициентной адаптации моделей) корректно описывать термогазодинамические параметры факела. В то же время для оценок токсичности дымовых газов ГУ при различных эксплуатационных сценариях, очевидно, потребуется привлекать более подробные модели химического реагирования. Предварительная калибровка этих моделей показала их хорошее согласие имеющимися в литературе данными и результатами предварительных измерений на макетах и прототипах

Заключение. Разработана система разноуровневых моделей химических реакций в ГУ, собрана база соответствующих коэффициентов. Отработана техника упрощения моделей химизма для их агрегации в имитационный комплекс. Проверена принципиальная пригодность разработки для расчета энергетических и экологических характеристики проектируемого ГУ. Для целей оптимизации рабочего процесса предполагается дальнейшее насыщение моделей экспериментальными данными.

Список литературы: 1. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение: Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. М.: Физматлит, 2003. 352 с. 2. Yeoh G.H., Yuen K.K. Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering: Theory, Modelling and Practice. Amsterdam – Tokyo: Elsevier, 2009. 532 p. 3. Астахов И.В. и др. Подача и распыливание топлива в дизелях. М.: Машиностроение, 1971. 359 с. 4. Срезневский Б.И. Об испарении жидкостей // ЖРФХО. 1882. Т. 14, Вып. 8. С. 420-442. 5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия, 1982. 892 с. 6. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я. Франк-Каменецкий Д.А. Москва – Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР. 148 с.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ИМИТАЦИЯ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Сулименко Д. С., Сулименко А. С., Степаницын А. С., Цымбалов Д. С.,
Бедондзе М. В. (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)
Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

To optimize ventilation against hazardous woodworking dust, a multi-level mathematical model and software were developed. The framework simulates asymmetric particle translation and rotation (2D non-linear model) and trajectory dynamics within a vertical aerodynamic diffuser. Simulations for particle diameters of 1–9 mm successfully reproduced autorotation, levitation, and separation mechanisms. The results highly agree with physical experiments, providing a robust tool for predicting dust dynamics in sawmills.

Технологическая пыль деревообрабатывающего производства (ДОП) является основным вредным фактором, негативно влияющим на здоровье персонала: ее длительное вдыхание провоцирует развитие онкологических заболеваний [1, 2]. Для обоснования и проектирования систем коллективной и индивидуальной защиты необходимы надежные инструменты прогнозирования поведения пылевой взвеси.

Поскольку натурные эксперименты не позволяют в полной мере оценить структуру аэродисперсных потоков в цехе, предметом исследований становится математическое моделирование и прямая компьютерная имитация динамики частиц в воздушной среде [3].

Целью работы является установление физико-математических закономерностей пространственной динамики, траекторий движения и характера вращения частиц пыле-стружечных отходов (ПСО) лесопильного производства в воздушных потоках рабочей зоны методами математического моделирования и прямой компьютерной имитации.

Научная и методическая новизна выбранного подхода заключается в сквозной многоуровневой формализации динамики пыле-стружечных отходов (ПСО) — от простых феноменологических моделей до прямого численного моделирования. Авторами реализован последовательный переход от описания неустойчивого вращательного движения эллиптической частицы в среде к моделированию её траектории в восходящем замедляющемся потоке аэродинамической трубы.

Движение частицы неправильной формы в среде. В реальных условиях деревообрабатывающего производства пыле-стружечные отходы (ПСО) обладают выраженной геометрической неоднородностью и далеки от идеальной сферической формы [4]. Натурные наблюдения показывают, что тела сложной формы, попадая в поток газовой среды, помимо поступательного движения неизбежно вовлекаются во вращение.

Для математической формализации этого процесса на начальном этапе принимается допущение о движении объекта в двумерном пространстве (2D-модель). В качестве базового центрально-несимметричного объекта, наиболее близко аппроксимирующего уплощенную форму древесной частицы, выбран эллипс, совершающий падение под действием гравитации в среде с сопротивлением (см. рис. 1) [5].

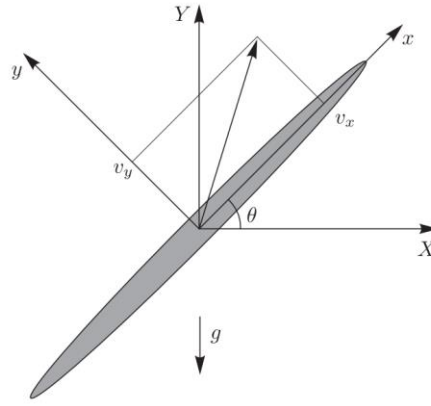


Рис. 1. Система координат для имитационного моделирования пылевой обстановки в рабочей зоне круглопильного станка

Динамика такого тела описывается связанной нелинейной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{pmatrix} A \frac{dv_x}{dt} \\ B \frac{dv_y}{dt} \end{pmatrix} = -|g| \cdot (1 - \rho) \cdot \begin{pmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix} - \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \cdot \begin{pmatrix} \mu_1 v_x \\ \mu_2 v_y \end{pmatrix} + \frac{d\varphi}{dt} \cdot \begin{pmatrix} B v_y \\ -A v_x \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$Q \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{A-B}{a^2} v_x v_y - \mu_3 \frac{d\varphi}{dt} \left| \frac{d\varphi}{dt} \right|, \quad (2)$$

где первое векторное уравнение описывает поступательное движение центра масс, а второе – вращение вокруг этого центра.

Первое слагаемое в правой части (1) отвечает гравитационному воздействию за вычетом архимедовой силы выталкивания в проекциях на горизонтальную и вертикальную компоненты траектории (падения), второе – силу сопротивления поступательному движению, квадратичную по скорости, а третье – в силу взаимодействия потока с поверхностью тела, нарушающую его ориентацию и пропорциональную величине относительной скорости движения. В уравнении (2) первое слагаемое в правой части отвечает воздействию потока на тело, инициирующему вращение, а второе – вязкое сопротивление среды вращению, пропорциональное квадрату угловой скорости. Коэффициенты A и B отвечают эффективным массам в проекциях, а Q и μ_i – соответственно моменту инерции и коэффициентам квадратичной вязкости.

Высокий (шестой) порядок и нелинейность системы (1)-(2) побуждают использовать численное интегрирование методом Эйлера для получения частных решений и исследования их зависимости от параметров модели. Первым этапом этого метода является дискретизация (1)-(2) по времени, результатом которой являются конечно-разностные уравнения:

$$x_i = x_{i-1} + v_{x\,i-1} \cdot \Delta t, \quad (3)$$

$$v_{x\,i} = v_{x\,i-1} - [\mu_1 v_{x\,i-1} \sqrt{v_{x\,i-1}^2 + v_{y\,i-1}^2} - B v_{y\,i-1} \omega_{i-1} + g(1 - \rho) \sin \varphi] \cdot \frac{\Delta t}{A}, \quad (4)$$

$$y_i = y_{i-1} + v_{y\,i-1} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

$$v_{y\,i} = v_{y\,i-1} - [\mu_2 v_{y\,i-1} \sqrt{v_{x\,i-1}^2 + v_{y\,i-1}^2} + A v_{x\,i-1} \omega_{i-1} + g(1 - \rho) \cos \varphi] \cdot \frac{\Delta t}{B}, \quad (6)$$

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + \omega_{i-1} \cdot \Delta t, \quad (7)$$

$$\omega_i = \omega_{i-1} - \left[\mu_3 |\omega_{i-1}| \omega_{i-1} - \frac{A-B}{a^2} v_x v_y \right] \cdot \frac{\Delta t}{B}, \quad (8)$$

где Δt – шаг дискретизации по времени.

В зависимости от сочетания начальных параметров (высоты падения, размеров, коэффициентов сопротивления и др.) движение может оказаться устойчивым, с квази-

периодическим суб-движением или даже с элементами хаотичного микродвижения. На рис. 2-4 приведены некоторые интересные реализации траекторий.

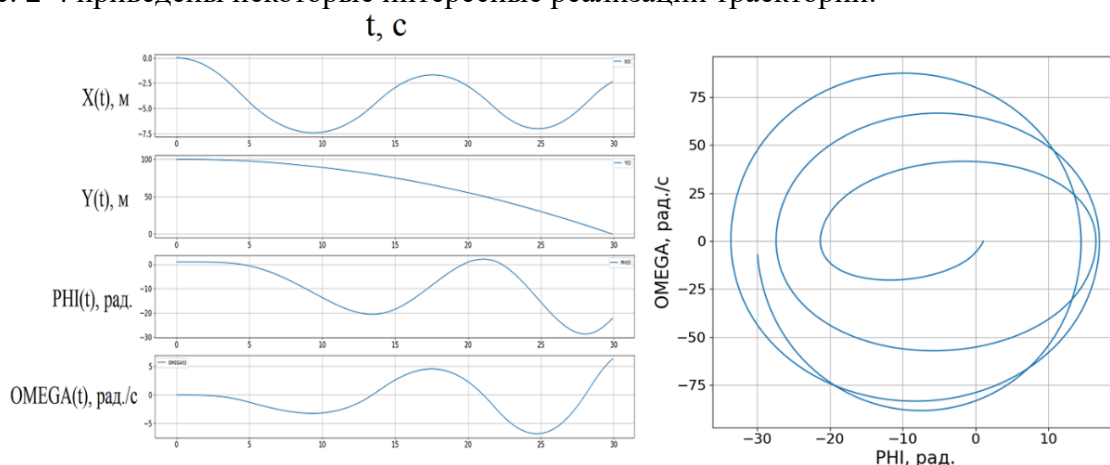


Рис. 2. Динамика вытянутого (эллиптического) тела в среде с сопротивлением, способным инициировать колебательный (вращательный) процесс. Параметры компьютерного эксперимента: $\mu_{1,2,3} = 0.13$, $\rho = 0.0028$, $A = 1.00028$, $B = 1.028$, $Q = 0.256$, $x(0) = 0$, $v_x(0) = 0$, $y(0) = 100$, $v_y(0) = 0$, $\varphi(0) = \pi/3$, $\omega(0) = 0$

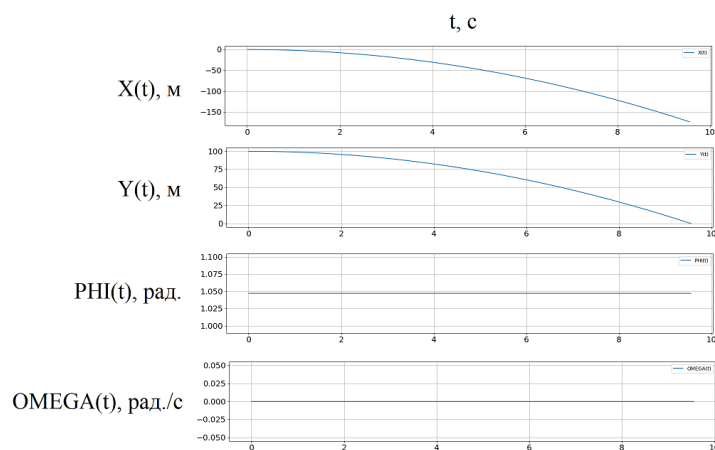


Рис. 3. Динамика круглого тела в среде с сопротивлением. Параметры компьютерного эксперимента: $\mu_{1,2,3} = 0.13$, $\rho = 0.0028$, $A = 1.0028$, $B = 1.0028$, $Q = 0.5$, $x(0) = 0$, $v_x(0) = 0$, $y(0) = 100$, $v_y(0) = 0$, $\varphi(0) = \pi/3$, $\omega(0) = 0$

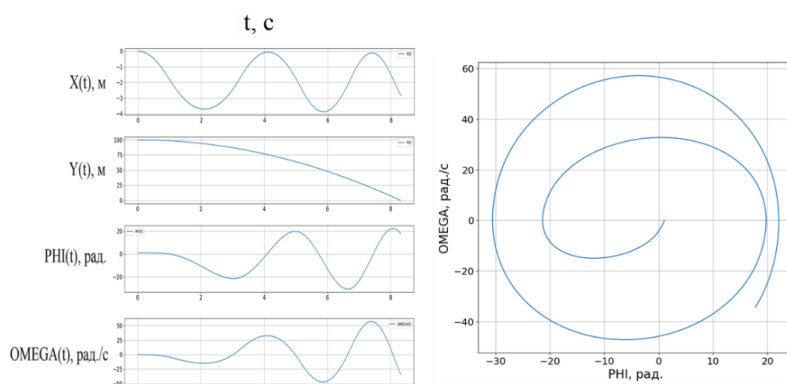


Рис. 4. Динамика средневтянутого (эллиптического) тела в среде с сопротивлением. Параметры компьютерного эксперимента: $\mu_{1,2,3} = 0.13$, $\rho = 0.0028$, $A = 1.00086$, $B = 1.095$, $Q = 0.273$, $x(0) = 0$, $v_x(0) = 0$, $y(0) = 100$, $v_y(0) = 0$, $\varphi(0) = \pi/3$, $\omega(0) = 0$

Сопоставление данных на рис. 2-4 свидетельствует, что вытянутость листовых (значит, в трехмерном пространстве полосовых) форм способствует их раскручиванию при продолжительном падении.

Движение частицы в восходящем замедляющемся потоке. Для исследования поведения древесных частиц в ограниченных каналах со сложным распределением скоростей газов целесообразно использовать эволюционную стратегию конструирования математической модели. Данный подход подразумевает поэтапное усложнение расчетной схемы. На первом шаге реализуется двухмерная (2D) модель движения, интегрирующая ранее описанные механизмы взаимодействия несимметричного тела с газовой средой, а также алгоритм пересчета геометрических размеров древесных отходов в эквивалентный аэродинамический диаметр. В дальнейшем, на основе сопоставления расчетных траекторий с данными физического эксперимента, базовая модель последовательно насыщается дополнительными факторами: турбулентными пульсациями несущей фазы, пространственным (3D) характером объектов и вращательной неустойчивостью.

Выберем систему координат и границы аэродинамической трубы в соответствии с рис. 5.

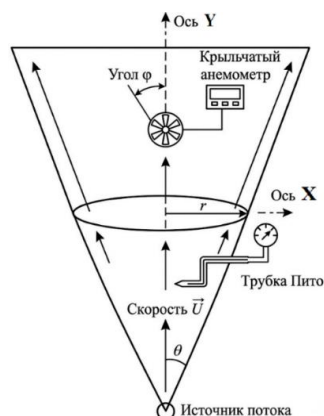


Рис. 5. Схема границ аэродинамической трубы и система координат

При этом боковые границы области движения задаются неравенством

$$-(x_{\min} + y \cdot \operatorname{tg}(\alpha)) \leq x(y) \leq x_{\min} + y \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (9)$$

а верхняя и нижняя

$$0 \leq y \leq y_{\max} \quad (10)$$

где $x_{\min}$ – полудиамер входного сечения АТ, равный для макетной установки 0.02 м, $y_{\max}$ – высота рабочего участка, равная 2 м, α – половина величины угла раскрытия, составляющая примерно 1/10 рад.

В таком устройстве, если его питать воздушным потоком от дутьевого вентилятора снизу с начальной скоростью $|U_0|$, усредненное по турбулентным пульсациям поле скорости описывается уравнением

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = |U_0| \cdot \left(\frac{y_0}{y_0 + y} \right)^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{x_{\min} + y \cdot \operatorname{tg}(\alpha)} \right)^8 \right) \cdot \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $y_0 = \frac{x_{\min}}{\operatorname{tg} \alpha}$ – конструктивный параметр АТ.

Динамика отдельной частицы в потоке (3.32) описывается уравнениями

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_x(t) \\ V_y(t) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\frac{d\mathbf{V}(t)}{dt} = -\mathbf{g} - \frac{6 \cdot \rho}{\rho_{\text{пыли}} \cdot \phi_{\text{аэро}}} \cdot \left[\sqrt{\frac{3\pi \cdot \nu}{\phi_{\text{аэро}}}} \cdot M(\mathbf{V}(t), \mathbf{U}(X(t), Y(t)))^{\frac{1}{2}} + \sqrt{\frac{1}{8}} \cdot M(\mathbf{V}(t), \mathbf{U}(X(t), Y(t))) \right]^2 \times$$

$$\times \frac{1}{M(\mathbf{V}(t), \mathbf{U}(X(t), Y(t)))} \cdot (\mathbf{V}(t) - \mathbf{U}(X(t), Y(t))) - 2 \frac{k \cdot U_y(X(t), Y(t))}{(Y(t) + y_0) \cdot \tan \alpha} \cdot \text{sign}(X(t)), \quad (13)$$

где $\mathbf{V}(t) = \begin{pmatrix} V_x(t) \\ V_y(t) \end{pmatrix}$, $\mathbf{U}(X(t), Y(t)) = \begin{pmatrix} U_x(X(t), Y(t)) \\ U_y(X(t), Y(t)) \end{pmatrix}$,

$$M(\mathbf{V}(t), \mathbf{U}(X(t), Y(t))) = \sqrt{(U_x(X(t)) - V_x(t))^2 + (U_y(X(t)) - V_y(t))^2}, \quad k -$$

постоянная, отвечающая закону Бернулли (удержание объектов в потоке за счет градиента давления).

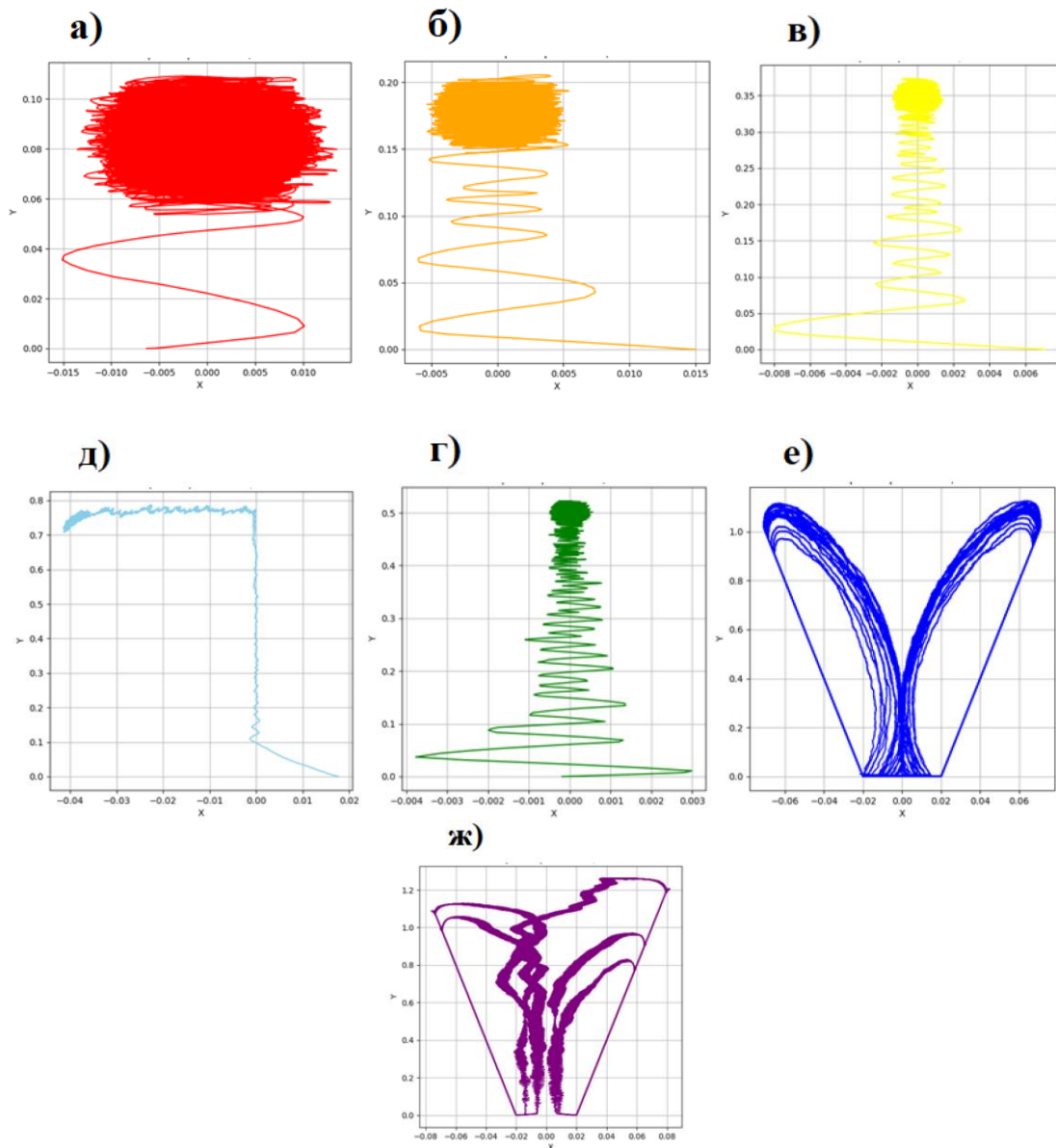


Рис. 6. Результаты компьютерной имитации динамики разноразмерных частиц в экспериментальной АТ. Условия расчета и коэффициенты модели выбраны в соответствии с параметрами запланированного сопоставительного эксперимента: а - $\phi_{\text{аэро}} = 9 \text{ мм}$, б - 7 мм , в - 5 мм , г - 4 мм , д - 3 мм , е - 2 мм , ж - 1 мм

Заключение

Математически формализовано и программно реализовано неустойчивое 2D-движение центрально-несимметричной (эллиптической) частицы в среде с сопротивлением, что позволило компьютерно воспроизвести эффекты авторотации и раскручивания вытянутых фракций пылестружечных отходов (ПСО).

На основе эволюционной стратегии сконструирована траекторная модель движения дискретных частиц в градиентном поле скоростей вертикального диффузора аэродинамической трубы, учитывающая гравитацию, силу Бернулли и комбинированные сценарии отскока от стенок.

Выполнены серии компьютерных симуляций для разноразмерных объектов ($\varnothing_{\text{аэро}} = 1 \dots 9 \text{ мм}$), результаты которых продемонстрировали адекватное воспроизведение механизмов левитации и сепарации частиц, показав хорошее согласие с физическим экспериментом.

Список литературы: 1. Актуальные вопросы анализа риска при обеспечении санитарно-эпидемиологического благополучия населения и защиты прав потребителей : материалы VIII Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 16–18 мая 2018 г.) / под ред. А. Ю. Поповой, Н. В. Зайцевой. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – 607 с. URL: https://fcrisk.ru/sites/default/files/upload/conference/1381/fcrisk_conf_16-18.05.2018_materials.pdf (дата обращения: 21.06.2026). 2. Профессиональная патология [Электронный ресурс] : национальное руководство / Под ред. И.Ф. Измерова. - М. : ГЭОТАР-Медиа, 2011. Режим доступа: <https://www.rosmedlib.ru/book/ISBN9785970419472.html> 3. Исследование загрязнения мелкодисперсной пылью рабочих мест при отделочных работах / А. Ю. Моисеенко, В. П. Батманов, И. С. Кленин, Р. И. Давудов // Экономика строительства и природопользования. – 2022. – № 1-2 (82-83). – С. 193–197. – URL: <https://science.cfuv.ru/issledovanie-zagryazneniya-melkodispersnoj-pylyu-rabochix-mest-pri-otdelochnyx-rabotax> (дата обращения: 21.06.2026). 4. Wood Structure, Properties and Quality : Proceedings of the VI International Conference (Krasnoyarsk, September 17–22, 2018) / ed. by I. N. Sotskova. – Krasnoyarsk : Institute of Forest SB RAS, 2018. – URL: http://forest.akadem.ru/Konf/2018/IF/WSPQ-2018_Proceedings.pdf (дата обращения: 21.06.2026). 5. С. П. Кузнецов, “Движение падающей пластины в жидкости: конечно-мерные модели и феномены сложной нелинейной динамики”, Нелинейная динам., 11:1 (2015), 3–49

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО МОМЕНТНОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ ДЛЯ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Тарабаев А. А., Тарабаева И. В. (ФГБОУ ВО «ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова»,
г. Новочеркасск, Россия, ФГБОУ ВО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР, Россия)
Тел.: +7 (949) 3349154; E-mail: inkatar1@yandex.ru

Представлена математическая модель активной рукояти очувствления для системы дистанционного управления. На основе уравнений Лагранжа получена система управляющих моментов для трехзвенной рукояти с вращательными кинематическими парами. Показана возможность перехода от пассивного отражения нагрузки к активному формированию сложных законов управления.

Ключевые слова: мехатронный модуль, дистанционное управление, активное очувствление, уравнения Лагранжа, копирующее управление.

A mathematical model of an active force-feedback joystick for a teleoperation system is presented. A system of control torques for a three-link joystick with rotational kinematic pairs is obtained based on Lagrange's equations. The possibility of transition from passive load reflection to active generation of complex control laws is demonstrated.

Key words: mechatronic module, teleoperation, active force feedback, Lagrange equations, master-slave control.

Введение. Системы дистанционного управления роботами-манипуляторами являются неотъемлемой частью современных производственных и исследовательских процессов. Особое значение они приобретают в условиях, где непосредственное присутствие человека невозможно или опасно: атомная промышленность, химические производства, работы в космосе и на больших глубинах [1]. Ключевым фактором, определяющим эффективность таких систем, является качество обратной связи, позволяющее оператору чувствовать взаимодействие исполнительного устройства с объектом.

Наиболее распространенным подходом к реализации обратной связи является использование копирующих систем двустороннего действия [2]. В таких системах задающая рукоять кинематически подобна исполнительному устройству, а перемещения оператора копируются манипулятором. Одновременно с этим усилия, возникающие при взаимодействии манипулятора с объектом, передаются обратно на рукоять оператора, создавая так называемый «эффект присутствия» [2].

Анализ существующих разработок, в том числе отечественных и зарубежных, показывает, что большинство систем использует пассивное отражение нагрузки с применением тормозных муфт [3,4]. Данный подход имеет ограничения, связанные с невозможностью формирования сложных тактильных ощущений и негибкостью законов управления. Переход к активным рукоятям очувствления с использованием бесщеточных двигателей постоянного тока в каждом звене позволяет реализовать более совершенные алгоритмы управления, в том числе основанные на физических принципах, описанных для гироскопических систем [5].

Целью настоящей работы является разработка математической модели активной рукояти очувствления, позволяющей синтезировать управляющие моменты для каждого звена на основе измеряемых кинематических параметров.

1. Кинематическая модель задающей рукояти. Для обеспечения точного копирования движений исполнительного устройства задающая рукоять должна обладать аналогичной кинематической структурой. В рамках данной работы рассматривается манипуляционная система с тремя вращательными степенями подвижности и последовательной кинематикой, что соответствует наиболее распространенной конфигурации промышленных манипуляторов [6]. Кинематическая схема рукояти реализована тремя последовательными поворотными звеньями с конфигурацией Z-Y-Y (рисунок 1).

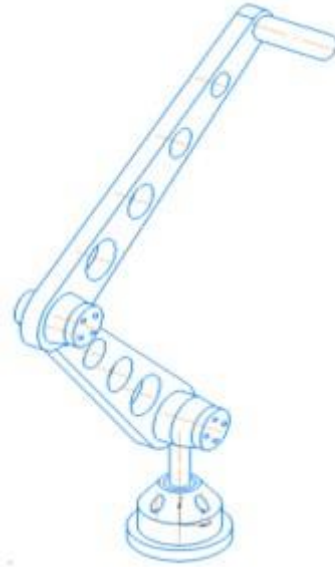


Рис. 1. Задающая рукоять

Каждое звено рукояти оснащено абсолютным энкодером для регистрации углового положения и электромагнитной тормозной муфтой (в пассивном варианте) или бесщеточным двигателем постоянного тока (в активном варианте) для создания управляющего момента.

Обобщенные координаты α, β, γ соответствуют углам поворота звеньев вокруг соответствующих осей. Для перехода между системами координат используются матрицы поворота:

$$\begin{aligned} R_z(\alpha) &= \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_y(\beta) &= \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \\ R_y(\gamma) &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

Угловые скорости каждого звена в собственной системе координат имеют вид:

$$\omega_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} \quad \omega_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\beta} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \omega_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\gamma} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Для приведения угловых скоростей к итоговой системе координат $X_3Y_3Z_3$ используются матрицы поворота:

$$\begin{aligned} R_{total1} &= R_y(\gamma) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\alpha) \\ R_{total2} &= R_y(\gamma) \cdot R_y(\beta) \\ R_{total3} &= R_y(\gamma) \end{aligned} \quad (3)$$

После преобразований получаем проекции угловых скоростей на оси связанной системы координат:

$$\begin{aligned} \omega_{1связ} &= R_{total1} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \cdot \sin \beta \cos \gamma + \dot{\alpha} \cdot \cos \beta \sin \gamma \\ 0 \\ -\dot{\alpha} \cdot \sin \beta \sin \gamma + \dot{\alpha} \cdot \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \cdot \sin(\beta + \gamma) \\ 0 \\ \dot{\alpha} \cdot \cos(\beta + \gamma) \end{pmatrix} \\ \omega_{2связ} &= R_{total2} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\beta} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\beta} \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\omega_{\text{связ}} = R_{\text{total3}} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\gamma} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\gamma} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Суммарные угловые скорости по каждой из осей:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\alpha} \cdot \sin(\beta + \gamma) \\ \omega_y &= \dot{\beta} + \dot{\gamma} \\ \omega_z &= \dot{\alpha} \cdot \cos(\beta + \gamma) \end{aligned} \quad (5)$$

2. Синтез управляющих моментов на основе формализма Лагранжа. Для определения управляющих моментов, которые необходимо приложить к звеньям рукояти, используется метод уравнений Лагранжа второго рода [7]. Данный подход позволяет получить аналитические выражения для моментов с учетом кинетической и потенциальной энергии системы.

Кинетическая энергия системы складывается из вращательной и поступательной составляющих. Вращательная кинетическая энергия определяется моментами инерции звеньев I_1, I_2, I_3 :

$$T_{\text{вращ}} = \frac{I_1 \omega_x^2 + I_2 \omega_y^2 + I_3 \omega_z^2}{2} \quad (6)$$

Поступательная кинетическая энергия вычисляется через скорость центра масс, который смещен вдоль оси X_3 на расстояние l . После подстановки выражений для угловых скоростей:

$$T_{\text{пост}} = \frac{ml^2[(\dot{\beta} + \dot{\gamma})^2 + (\dot{\alpha} \cos(\beta + \gamma))^2]}{2} \quad (7)$$

Полная кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{(\dot{\beta} + \dot{\gamma})^2(I_2 + ml^2) + \dot{\alpha}^2(I_1 \sin^2(\beta + \gamma) + (I_3 + ml^2) \cos^2(\beta + \gamma))}{2} \quad (8)$$

Потенциальная энергия определяется изменением высоты центра масс:

$$\Pi = mgl \cdot \cos(\beta + \gamma)$$

Функция Лагранжа $L = T - \Pi$:

$$L = \frac{(\dot{\beta} + \dot{\gamma})^2(I_2 + ml^2) + \dot{\alpha}^2(I_1 \sin^2(\beta + \gamma) + (I_3 + ml^2) \cos^2(\beta + \gamma))}{2} - mgl \cdot \cos(\beta + \gamma) \quad (9)$$

Уравнения Лагранжа имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} = M_i \quad (10)$$

где $q_i = \{\alpha, \beta, \gamma\}$ — обобщенные координаты, M_i — обобщенные силы (управляющие моменты).

После выполнения дифференцирования и преобразований получаем систему уравнений для управляющих моментов:

$$\begin{cases} \ddot{\alpha}(I_1 \sin^2(\beta + \gamma) + (I_3 + ml^2) \cos^2(\beta + \gamma)) + \dot{\alpha}(\dot{\beta} + \dot{\gamma}) \cdot (I_1 - (I_3 + ml^2)) \sin(2(\beta + \gamma)) = M_\alpha \\ (I_2 + ml^2)(\ddot{\beta} + \ddot{\gamma}) - \frac{\dot{\alpha}^2(I_1 - (I_3 + ml^2)) \sin(2(\beta + \gamma))}{2} - mgl \sin(2(\beta + \gamma)) = M_\beta \\ (I_2 + ml^2)(\ddot{\beta} + \ddot{\gamma}) - \frac{\dot{\alpha}^2(I_1 - (I_3 + ml^2)) \sin(2(\beta + \gamma))}{2} - mgl \sin(2(\beta + \gamma)) = M_\gamma \end{cases} \quad (11)$$

Важным результатом является равенство $M_\beta = M_\gamma$, что свидетельствует о кинематической зависимости между обобщенными координатами β и γ . Данное свойство необходимо учитывать при проектировании системы управления, так как оно указывает на невозможность независимого управления этими двумя степенями подвижности.

3. Применение модели для синтеза алгоритмов активного оцувствления. Полученная система уравнений является основой для синтеза управляющих моментов, формируемых приводами рукояти в ответ на внешние воздействия. В отличие от

пассивного подхода, где момент на рукоятки определяется простой пропорциональной зависимостью $M_T(t) = -|M_{HE}| \text{sgn}(pa_{оп}(t))$ [8], активное управление позволяет реализовать более сложные законы.

На основе математической модели можно выделить три базовых режима формирования управляющих моментов, описанных для аналогичных гироскопических систем [9]:

1. Коллинеарное управление (режим гашения колебаний). Управляющий момент формируется пропорционально угловой скорости оператора: $M_i = -k_i \cdot \dot{q}_i$. Это создает эффект вязкого демпфирования, сглаживающего резкие движения и повышающего плавность управления.

2. Ортогональное управление (режим гироскопических сил). Момент на одной оси создается пропорционально скорости по другой оси. Например, $M_\alpha \sim \dot{\beta}$. Это позволяет имитировать взаимодействие с массивной инерционной системой, создавая более богатые тактильные ощущения.

3. Режим консервативных сил. Позволяет реализовать возврат рукоятки в нейтральное положение $M_i = -k_i(q_i - q_{i0})$ или создать тактильные «защелки» при прохождении определенных угловых положений.

Таким образом, переход от пассивного отражения нагрузки к активному формированию управляющих моментов открывает возможности для создания широкого спектра тактильных ощущений, значительно улучшающих качество виртуализации в системах дистанционного управления.

4. Структура системы управления с активным оцувствлением. На основе разработанной математической модели может быть построена функциональная схема мехатронного модуля с элементами виртуальной реальности (рисунок 2). Входными сигналами системы являются момент, развиваемый оператором на рукоятки ($M_{оп}$), и момент сопротивления на исполнительном устройстве (M_{HE}).

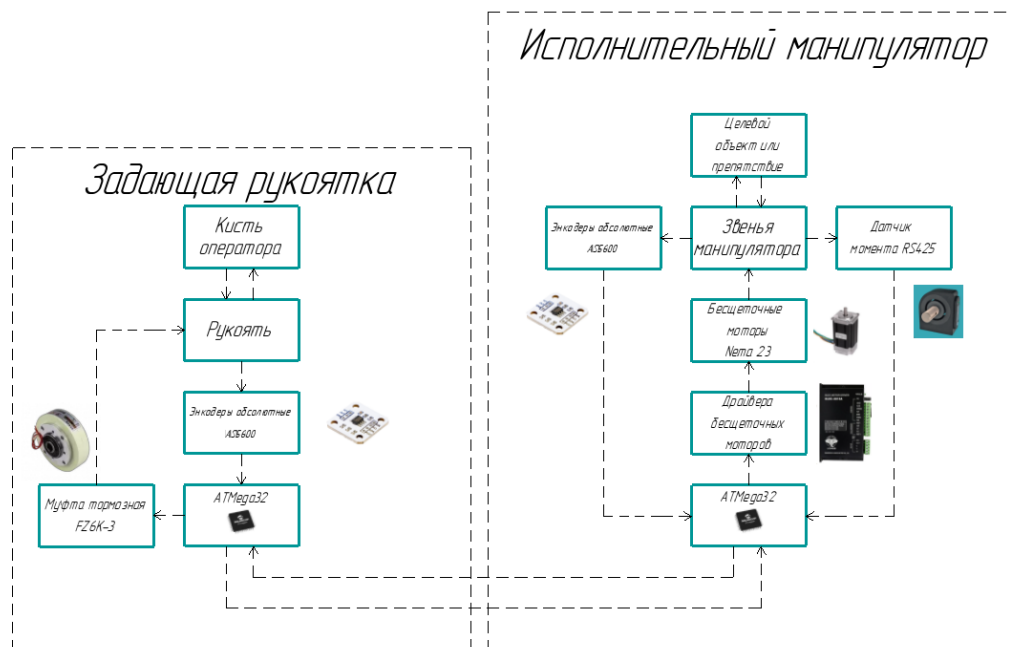


Рис. 2. Функциональная схема системы управления с активным оцувствлением

Алгоритм работы системы включает следующие этапы:

1. Регистрация угловых положений звеньев рукоятки с помощью абсолютных энкодеров.

2. Формирование управляющих сигналов для приводов исполнительного устройства на основе рассогласования положений.

3. Регистрация моментов сопротивления на валах исполнительного устройства с помощью тензометрических датчиков.

4. Расчет управляющих моментов для привода рукояти на основе уравнений (11) с учетом момента сопротивления и текущих кинематических параметров.

Формирование тактильного ощущения у оператора путем обработки рассчитанных моментов бесщеточными двигателями рукояти.

Данная структура реализует биотехническую систему копирующего управления двустороннего действия, обеспечивающую полную виртуализацию процесса управления [10].

Заключение. В результате выполнения работы была разработана математическая модель активной рукояти оцувствления для мехатронного модуля виртуальной реальности. Модель основана на кинематической схеме трехзвенной рукояти с вращательными кинематическими парами конфигурации Z-Y-Y. С использованием формализма Лагранжа получены аналитические выражения для управляющих моментов по каждой из осей. Показано, что предложенная модель позволяет реализовать различные законы управления, создающие сложные тактильные ощущения: вязкое демпфирование, гироскопические эффекты и консервативные силы. Разработанный математический аппарат является теоретической основой для проектирования систем дистанционного управления с активным оцувствлением, что позволяет существенно расширить возможности виртуализации по сравнению с традиционными пассивными системами отражения нагрузки.

Список литературы: 1. Егоров И.Н. Алгоритмы управления и электроприводы универсальных промышленных роботов / И.Н. Егоров // Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. — Тула: ТПИ, 1984. 2. Hannaford B. Time-domain passivity control of haptic interfaces / B. Hannaford, J.H. Ryu // IEEE Transactions on Robotics and Automation. — 2002. — Vol. 18, No. 1. — P. 1–10. DOI: 10.1109/70.988974. 3. Black B. Dynamic compensating controller for passive haptic manipulators in teleoperation/ B. Black, W. Book // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — 2009. — P. 1485-1491. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152646. 4. Киров С.М. Задающее устройство копирующего манипулятора / С.М. Киров, Л.И. Слуцкий, Н.К. Джамалов // Авторское свидетельство СССР № 1563962. 5. Смирнов А.В. Физические принципы формирования управляющих воздействий в задаче о гироскопическом маятнике / А.В. Смирнов, К.Н. Сарвилов // Проблемы искусственного интеллекта. — 2023. — № 3 (30). — С. 89-98. 6. Егоров И.Н. Проектирование необратимой исполнительной следящей системы при работе на нижнем режиме двойного регулирования / И.Н. Егоров, Р.С. Вишняков // Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. — Тула: ТПИ, 1982. 7. Иванов В.А. Теория дискретных систем автоматического управления / В.А. Иванов, А.С. Ющенко. — М.: Наука, 1983. 8. Егоров И.Н. Исследование привода автоматического манипулятора с самотромозящейся передачей / И.Н. Егоров, Н.А. Новикова // Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. — Тула: ТПИ, 1980. 9. Земляков С.Д. Настраиваемая и асимптотически настраиваемая инвариантность и идентифицируемость / С.Д. Земляков, Б.И. Петров, В.Ю. Рутковский // Автоматика и телемеханика. — 1981. — № 9. 10. Егоров И.Н. Дистанционно-автоматическое управление промышленными роботами / И.Н. Егоров, В.С. Кулешов, Ю.В. Подураев // IX Всесоюзное совещание по проблемам управления: Тез. докл. — М.: ИПУ, 1983.

СТРУКТУРА И ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Ткаченко В. М., Сапронов А. Н. (ДОНФТИ, г. Донецк, ДНР, Россия)

E-mail: v.tkachenko@mail.ru

В представленной работе деформационная обработка проводилась комбинированием методов интенсивной пластической деформации, таких как винтовая экструзия и кручение под высоким давлением с одним из традиционных методов обработки металлов давлением, в котором развивается однородное деформированное состояние. Показано, что комбинированная обработка приводит к увеличению среднего значения микротвердости и повышению однородности распределения прочностных свойств по объему образца, в сравнении с одностадийными методами обработки.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, кручение под высоким давлением, прочность, наноматериалы.

In the present study, deformation processing was performed by combining severe plastic deformation methods, such as screw extrusion and high-pressure torsion, with a traditional metal forming method that develops a homogeneous deformation state. It was shown that combined processing leads to an increase in the average microhardness value and a more uniform distribution of strength properties throughout the sample, compared to single-stage processing methods.

Key words: severe plastic deformation, twist extrusion, high-pressure torsion, strength, nanomaterials.

Введение. Применение методов интенсивной пластической деформации (ИПД) для обработки металлов и сплавов является эффективным способом преобразования кристаллической структуры материалов с целью улучшения их физических и механических свойств [1, 2]. Среди методов ИПД широкое распространение нашли методы винтовой экструзии (ВЭ) и кручение под высоким давлением (КВД), показавшие свою эффективность на множестве металлов, сплавов и полимерных материалов.

При ВЭ и КВД деформация в образце распределяется неоднородно, повышая свое значение от центра к краю. На начальных этапах обработки неоднородность распределения деформации приводит к неоднородности формирования структуры и свойств материалов. Как правило повышение количества циклов оборотов способствует выравниванию в центральных и периферийных областях величины структурных элементов и значений механических свойств за счет выхода на насыщения зависимостей этих параметров от деформации.

Применение комбинированных методов обработки способствует дальнейшему преобразованию кристаллической структуры материалов и повышению комплекса механических свойств [3 - 6].

Представляет интерес проследить закономерности изменений и однородности распределения прочностных свойств меди при комбинировании методов ВЭ и КВД с одним из традиционных методов обработки, таким как осадка.

Материалы и методика эксперимента

В качестве исходного материала для исследований использовалась медь марки М1 после отжига при температуре 600°C в течение 2 ч.

Комбинированную деформацию, сочетающую винтовую экструзию и осадку, реализовывалась на установке для ВЭ, смонтированной на прессе 250 т, с сечением винтового канала в виде прямоугольника с двумя закругленными гранями размером $\varnothing 28 \times 18$ мм и углом винтовой линии равным 60°. Обработка осуществлялась со скоростью деформирования 3 мм/с при комнатной температуре.

Комбинированную деформацию, сочетающую КВД и осадку, осуществляли путем осадки медной заготовки до заданной толщины диска с последующим кручением под высоким давлением. Осадка дисковых образцов проводилась на деформационной машине 2167-Р50 с фиксацией прикладываемого усилия и изменения толщины диска. КВД осуществлялось по схеме с неограниченными поверхностями, уровень прикладываемого давления составлял 1 ГПа, скорость вращения нижней наковальни – 1 об/мин.

Структурные исследования осуществлялись при помощи оптической микроскопии на микроскопе Axiovert 40 MAT. Расчет напряженно-деформированного состояния материала при деформационной обработке осуществлялся методом конечных элементов в программе Deform-3D. Прочностные свойства образцов определялись измерением микротвердости с использованием микротвердомера ПМТ-3.

Полученные результаты

Комбинированную деформацию осуществляли по двум схемам обработки. В первом случае медная заготовка с поперечным сечением в виде прямоугольника с двумя закругленными гранями размером $\varnothing 28 \times 18$ мм и длиной 60 мм под действием прикладываемой нагрузки продавливалась через винтовой канал. Из полученного за один цикл ВЭ материала вырезалась заготовка высотой 5 мм для соблюдения условия (коэффициент формы менее 0.3), при котором реализуется однородное деформированное состояние, и проводилась осадка до заданной степени деформации.

Вторую схему комбинированной обработки осуществляли путем осадки медной заготовки с последующим кручением под высоким давлением. При КВД по схеме с неограниченными поверхностями, под действием приложенной нагрузки и кручения происходит радиальное течение материала. При определенной толщине диска силы трения между образцом и поверхностью наковален уравнивают величину прикладываемого давления, толщина диска перестает уменьшаться и в материале наступает условие всестороннего сжатия.

Для проведения контролируемой осадки до заданной величины деформации на начальных этапах комбинированной обработки осадку осуществляли на деформационной машине с фиксацией прикладываемого усилия и изменения перемещения, что позволило определить уровень прикладываемого давления и толщину диска. Необходимая величина деформации определялась путем расчета исходного диаметра D_0 и высоты h_0 на основании условия сохранения объема таким образом, чтобы после осадки получить диск диаметром $D_k = 5$ мм и толщиной $h_k = 0.12$ мм. Значение толщина диска h_k определялось таким образом, чтобы при этом значении компенсировалось прикладываемое давление величиной 1 ГПа за счет сил трения и при осуществлении КВД не происходило дополнительной осадки.

Обработка такими методами ИПД, как ВЭ и КВД, вызывает неоднородное напряженное и деформированное состояние в медной заготовке. На рис.1 показано распределение величины эквивалентной деформации в продольных и поперечных сечениях образцов в процессе разных видов обработки. Винтовая экструзия (рис.1, а) и

кручение под высоким давлением (рис.1, б) вызывает градиентное распределение деформации. На графиках представлено изменение значений деформации в процессе обработок для трех характерных точек, выбранных в центральной части, вблизи поверхностного участка и на середине расстояния от центра к краю. Самые низкие значения деформации отмечаются в центральной части образцов, а самые высокие значения вблизи поверхностных участков. При осадке в заданных условиях (коэффициент формы менее 0.3) деформация распределяется равномерно по всему объему образца (рис.1, в). Комбинирование методов обработки приводит к суммированию эквивалентных деформаций, полученных на этапах одного из методов ИПД и осадки, таким образом повышается уровень деформации не только на поверхностных участках, но и в слабо прорабатываемых центральных участках при ВЭ и КВД.

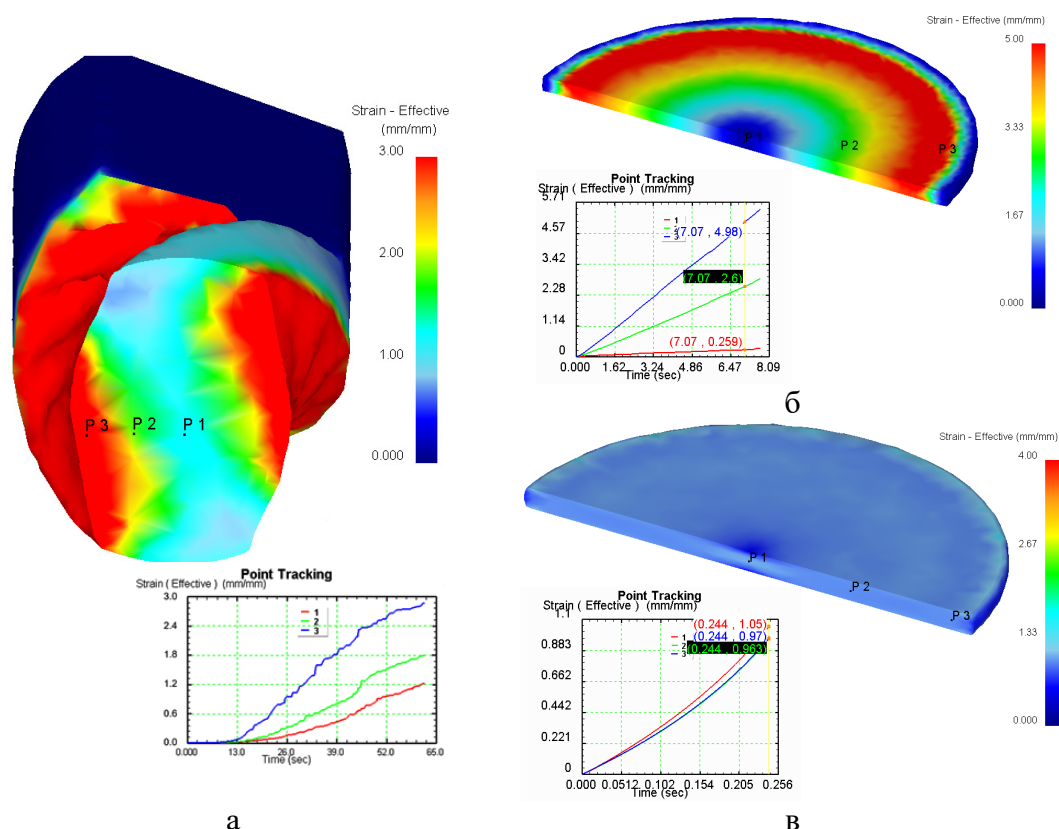


Рис. 1. Распределение эквивалентных деформаций при ВЭ (а), КВД (б) и осадке (в)

Структурные исследования показали, что комбинированные методы обработки приводят к более сильному измельчению структурных элементов с повышением однородности наблюдаемой микроструктуры в центральных и поверхностных участках.

Анализ однородности распределения прочностных свойств при разных комбинированных обработках проводился путем измерения микротвердости в поперечном сечении вдоль диагонали на образцах, полученных по схеме с ВЭ (рис. 2, а), и вдоль диаметрального направления на дисковых образцах, полученных по схеме с КВД (рис. 2, б).

В отожженном состоянии медь имела микротвердость 50 МПа. Деформационная обработка путем осадки отожженной меди (до степени деформации $\epsilon=1.0$) приводит к однородному по всему объему распределению микротвердости и повышению среднего значения примерно в 2 раза.

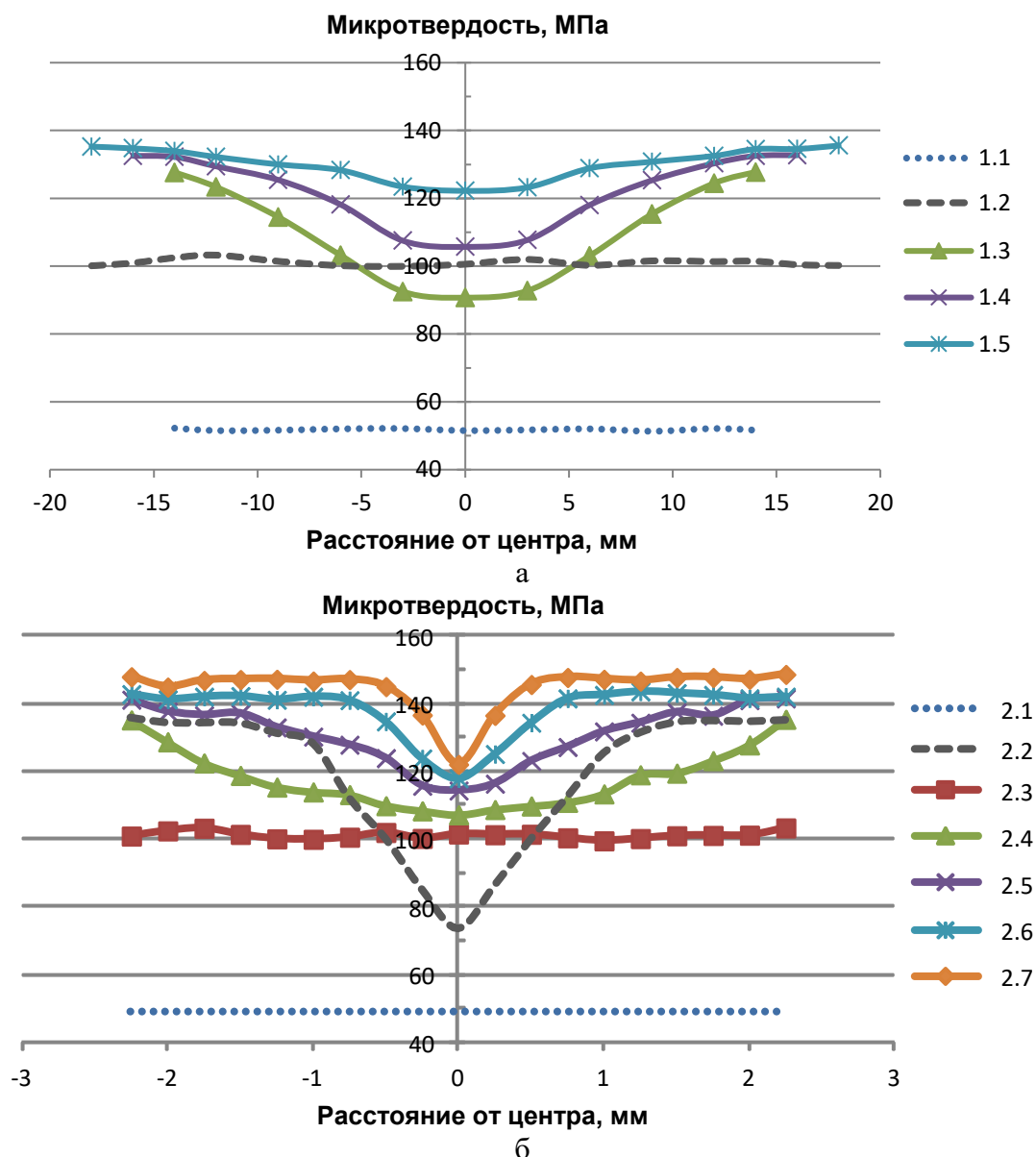


Рис. 2. Распределение микротвердости меди при комбинированной деформации, состоящей из ВЭ и осадки (а) и осадки и КВД (б): 1.1 – отжиг (600°C, 2ч), 1.2 – осадка ($\epsilon=1.0$), 1.3 – ВЭ, 1.4 – ВЭ+осадка ($\epsilon=0.5$), 1.5 – ВЭ+осадка ($\epsilon=1.0$), 2.1 – отжиг (600°C, 2ч), 2.2 – КВД (1 об.), 2.3 – осадка ($\epsilon=1.0$), 2.4 – осадка+КВД (0.25 об.), 2.5 – осадка+КВД (0.5 об.), 2.6 – осадка+КВД (0.75 об.), 2.7 – осадка+КВД (1.0 об.)

Винтовая экструзия отожженной меди, вследствие неоднородности распределения деформаций, приводит к градиентному распределению значений микротвердости по поперечному сечению образца с минимальным значением в центральной части и максимальным – на краях (рис. 2, а). По сравнению с отожженным состоянием винтовая экструзия приводит к упрочнению меди в 1.8 – 2.5 раза. Комбинирование ВЭ с осадкой позволяет повысить микротвердость в 2.4 раза в центральной зоне образца и в 2.6 раза на периферии, в сравнении с исходным отожженным состоянием. Таким образом, при комбинированной обработке, с ростом степени деформации осадки до $\epsilon=1.0$, повышается однородность распределения прочностных свойств и увеличивается среднее значение микротвердости в 1.2 раза, по сравнению с одностадийной ВЭ.

При кручении под высоким давлением отожженного материала наблюдается неравномерное распределение прочностных свойств, микротвердость имеет минимальное в 1.5 раза большее по сравнению с исходным материалом значение в центре образца и максимальное в 2.8 раза большее значение на краях (рис. 2, б).

Комбинированная обработка, сочетающая осадку и кручение под высоким давлением, приводит к более интенсивному повышению прочностных свойств в центральной части образцов и небольшому увеличению на краях, по сравнению с кручением под высоким давлением предварительно отожженной меди. По сравнению с исходным материалом увеличение микротвердости в центральной части составляло в 2.5 раза, что в 1.7 раза выше, чем для одностадийного кручения под высоким давлением. В поверхностных участках микротвердость увеличилась в 3.0 раза, что в 1.1 раза выше, чем для одностадийного кручения под высоким давлением.

Менее интенсивное повышение микротвердости в поверхностных участках при реализации комбинирования ВЭ и КВД с осадкой связано с тем, что зависимость прочностных свойств от величины деформации имеет вид кривой насыщения, это способствует повышению однородности распределения микротвердости материала с увеличением степени накопленной деформации.

Заключение. Проведенные исследования показали, что комбинированная обработка, сочетающая ВЭ и КВД с осадкой, приводит к более интенсивному повышению (в 1.7 раза) микротвердости в центральной части образца и небольшому увеличению (1.1 раза) на краях, по сравнению с величинами, полученными на этапе проведения ВЭ или КВД. Менее интенсивное повышение микротвердости в поверхностных участках при реализации комбинирования ВЭ и КВД с осадкой связано с тем, что зависимость прочностных свойств от величины деформации имеет вид кривой насыщения, что способствует повышению однородности распределения микротвердости материала с увеличением степени накопленной деформации. Таким образом, комбинированная обработка, сочетающая ВЭ и КВД с осадкой, приводит к увеличению среднего значения микротвердости и повышению однородности распределения прочностных свойств по объему образца, в сравнении с одностадийными методами обработки.

Список литературы: 1. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М: Академкнига, 2007. – 398 с. 2. Zhilyaev, A.P. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications / A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon // Progress in Materials Science. – 2008. – V.53. – P.893–979. 3. Варюхин, В.Н. Влияние винтовой гидроэкструзии и прокатки на изменение субмикроструктуры меди / В.Н. Варюхин, Е.Г. Пашинская, С.В. Добаткин, С.Г. Сынков, В.М. Ткаченко, А.В. Решетов // Физика и техника высоких давлений. – 2002. – т.12, №4. – С. 53-59. 4. Pahynskaya, E.G. Possibilities of controlling the structure and properties of metal materials under combined loading / E.G. Pahynskaya, M.M. Myshlyayev, V.N. Varyukhin, V.V. Stolyarov, S.A. Mironov, V.M. Tkachenko // Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics. – 2009. – Vol.73, No.9. – P. 1249-1252. 5. Сенникова, Л.Ф. Влияние разных схем комбинированной пластической деформации на физико-механические свойства меди марки М06 / Л.Ф. Сенникова, В.М. Ткаченко, А.Н. Гангало, Т.Т. Мороз // Физика и техника высоких давлений. – 2020. – Т. 30, №2. – С.65-72. 6. Сенникова, Л.Ф. Структура и свойства меди М06 после комбинированной пластической деформации / Л.Ф. Сенникова, Г.К. Волкова, В.М. Ткаченко, А.Н. Гангало // Вопросы материаловедения. – 2021. – Т. 105, № 1. – С. 21-27.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕМОНТЕ ПОДШИПНИКОВЫХ ОПОР СОВРЕМЕННЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Хандожко А. В., Щербаков А. Н., Капустин В. В., Федонина С. О., Лакалина Н. Ю.
(ФГБОУ ВО «БГТУ», г. Брянск, Россия)
Тел: (4832) 58-82-89, chandosh@yandex.ru

Рассмотрены вопросы ремонта подшипниковых опор шпиндельных узлов современных металлорежущих станков. Основное внимание уделено специфике дуплексирования подшипников качения, методике выполнения этой операции и соответствующего технического оснащения.

The issues of repair of bearing supports of spindle assemblies of modern metal-cutting machines are considered. The main attention is paid to the specifics of rolling bearing duplexing, the method of performing this operation and the corresponding technical equipment.

Важнейшей и постоянной тенденцией последних лет станкостроения является повышение производительности выпускаемого оборудования. Один из очевидных путей роста производительности – повышение быстроходности шпиндельных узлов. Верхняя граница частот вращения шпинделей современных станков для лезвийной обработки зачастую превышает соответствующие характеристики шлифовального оборудования. Работа преимущественно твердосплавным инструментом со сложными эффективными защитными покрытиями, хорошая организация подачи СОТС в зону резания позволяют поднять частоту вращения шпинделя (ЧВШ) – до 10000-25000 мин⁻¹ в зависимости от типоразмера и назначения оборудования. Такие конструктивные решения сегодня являются массовыми. При этом наблюдается и тенденция к упрощению конструкции шпиндельных узлов в плане смазки и охлаждения подшипниковых опор. Сравнительно редко используют конструкции с циркуляционной смазкой. Значительная часть шпиндельных узлов работает с консистентной смазкой, которая закладывается при изготовлении и замена которой на стадии эксплуатации не предусмотрена.

При таких конструктивных решениях шпиндельные опоры станочного оборудования работают в достаточно жестком тепловом режиме и условиях смазки. Естественно, что проблема качества подшипниковых опор шпинделей становится еще более острой. Производители оборудования пытаются решить эту проблему за счет использования высококачественных комплектующих и материалов. В частности, в опорах используют подшипники, ориентированные на работу на высоких скоростях. Производители подшипников позиционируют их как специализированные и в каталогах они занесены как «шпиндельные подшипники». Для смазки используют современные высокоэффективные смазочные материалы (на основе литиевого комплекса или с использованием полимочевины), предназначенные для работы на повышенных скоростях в течении продолжительного срока без замены. Более жестко регламентируется (и обеспечивается) уровень несбалансированности шпиндельного узла (модуля) в целом и его отдельных вращающихся деталей [4, 5].

Но даже такие решения не позволяют обеспечить долговечность шпиндельного узла на уровне общей долговечности станка. Это фактически означает, что предполагается проведение мероприятий по ремонту шпиндельного узла, возможно

неоднократного в рамках жизненного цикла станочного оборудования. Во многих случаях межремонтный период таких шпиндельных узлов составляет 1-3 года. Частично реализация этой концепции связана и с широким использованием модульных решений. Шпиндельный узел современного станочного оборудования во многих случаях является отдельным модулем, который при необходимости может быть заменен полностью в рамках текущего ремонта [6].

Такие узлы в значительной мере автономны, взаимозаменяемы. Новый модуль ставят на замену вышедшему из строя, который отправляется в ремонт. Процесс замены шпинделя несложен и не требует значительного времени. Это очень важно для эксплуатанта станка, для которого простой оборудования может принести организационно-финансовые потери превышающие стоимость ремонта.

Модульные решения шпиндельных узлов широко применяются в современных фрезерных, токарных, шлифовальных и других станках, количество которых в стране весьма велико и их доля постоянно растет [7].

В связи с этим растет и объем ремонтных работ по восстановлению шпиндельных модулей. При этом шпиндельный модуль является высокотехнологичным изделием, обслуживание и ремонт которого требует хорошего технического оснащения и высокой квалификации исполнителей. Дополнительные сложности возникают из-за ограничения доступа к конструкторско-технологической документации. Поэтому эта процедура выполняется на специализированных ремонтных предприятиях или непосредственно у производителя.

В большинстве случаев шпиндельные модули выходят из строя по причинам связанным с подшипниковыми узлами. Износ, аварийные нагрузки негативно влияют на точность вращательного движения. Растут вибрации, шум, усиливается тепловыделение, ухудшаются точностные характеристики.

Анализ показывает, что значительная часть технологии ремонта таких конструкций не проработана методически, а специальная оснастка и другое техническое оснащение операций в основном изготавливаются индивидуально под конкретные задачи. В данной работе рассмотрены некоторые вопросы восстановления подшипниковых узлов и необходимого технического оснащения технологических операций. В первую очередь речь идет о комплектации подшипников для опор.

К сожалению, подшипники высокой точности, пригодные для использования в опорах шпинделей в нашей стране практически перестали выпускать. Поэтому ремонт импортных шпиндельных узлов производится с использованием зарубежных подшипников или остатков советского производства.

В подшипниковых опорах шпинделей чаще всего используют радиально-упорные шариковые подшипники [3]. Для современных скоростных шпинделей с ЧВШ более 8000 мин⁻¹, как правило, используют подшипники класса точности P4, что соответствует (примерно) 2-му классу точности согласно ГОСТ 520-2011. Материалы колец подшипников – специальная сталь с повышенным содержанием азота, шарики либо из такой же стали, либо керамические. С учетом высоких ЧВШ для компоновки подшипниковых опор используют чаще всего решения, характерные для шпинделей внутришлифовальных станков [1, 2]. В этом случае шпиндель имеет две опоры. Каждая опора собрана по схеме «тандем», сами опоры относительно друг друга, обычно, собраны по схеме «О».

При этом передняя опора жесткая, задняя плавающая или тоже жесткая. В обоих случаях в подшипниках создается преднатяг. Величина преднатяга может варьироваться. ГОСТ 831-2022, приближенный к стандартам, применяемым ведущими мировыми производителями подшипников (SKF, UKF и др.), предусматривает использование трех групп преднатяга: «легкий», «средний», «тяжелый». Конкретные

величины преднатяга указаны в этом стандарте. Например, для подшипника с внутренним диаметром 60 мм, величины преднатяга составляют для «легкого» 162-198 Н, для «среднего» 486-594 Н, для «тяжелого» 972-1188 Н. Т.е. величина преднатяга для различных типов отличается кратно. Зарубежные производители предусматривают аналогичное деление на группы, номинальные значения преднатяга в которых близко указанным выше.

В случае использования жесткой и плавающих опор натяг в подшипниках и преднатяг создается пружинами. Наружные обоймы подшипника задней опоры в этом случае контактируют с опорным кольцом, поджатым комплектом пружин. Естественно, нагрузки на вытягивание подшипниковые опоры могут воспринимать лишь в рамках жесткости этих пружин. Такие конструктивные решения характерны для станков, ориентированных на чистовую (получистовую) обработку при ограниченных рабочих усилиях.

Схема с двумя жесткими опорами обеспечивает восприятие осевой нагрузки в обоих направлениях. Преднатяг в этом случае создается за счет разной длины распорных колец для наружной и внутренней обойм подшипников или за счет размеров подшипника.

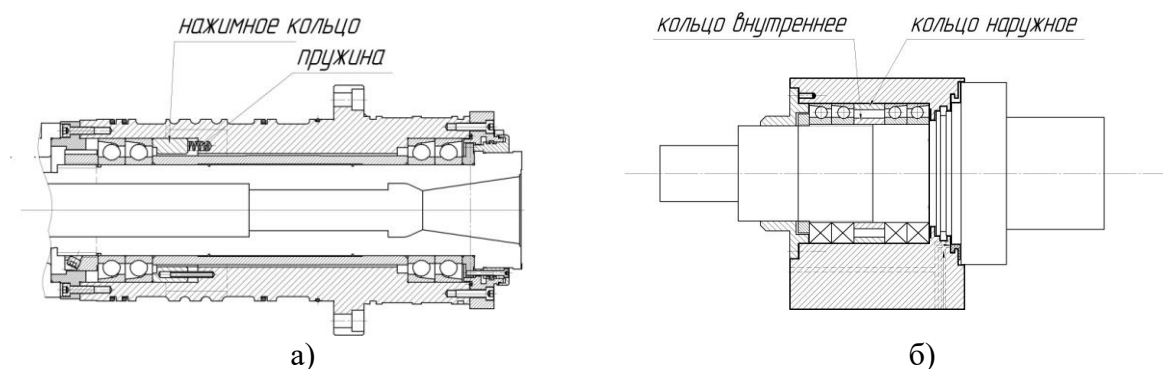


Рис. 1. Шпиндельные опоры, решение два «тандема» по схеме «О»: а) жесткая+плавающая; б) жесткая+жесткая

Для случая а) величина преднатяга в схеме «О» обеспечивается независимо от фактических размеров подшипников за счет поджатия пружин. Комплектование подшипников в данной ситуации сводится только к комплектованию двух «тандемов» для передней и задней опор.

Для случая б) жесткими опорами величина преднатяга для схемы «О» обеспечивается разновысотностью наружного и внутреннего колец с учетом фактических исполнительных размеров подшипников. Таким образом, в этом случае сначала комплектуются два «тандема», а затем для этих тандемов определяются фактические размеры распорных колец.

Таким образом, в любом случае, подшипники необходимо комплектовать, как минимум, по схеме «тандем», а в наиболее общем случае еще и по схеме «О» (или по схеме «Х»).

Часть производителей отдельно в маркировку подшипников выносят параметры для дуплексации (рисунок 2) [3]. Отечественный стандарт ГОСТ 831-2022 предусматривает изготовление так называемых универсально совместимых подшипников, т.е. подшипников, которые можно собирать в пару с любым другим подшипником идентичного обозначения. При этом универсальная совместимость предполагает равенство выступания торца наружного кольца относительно торца внутреннего кольца с одной стороны подшипника выступанию торца внутреннего

кольца относительно торца наружного кольца с другой стороны при выбранном осевом зазоре, т.е. $t_b = t_f$ (рисунок 2). Это требование корректно выполняется для подшипников с одной группой преднатяга. Универсальная совместимость подшипников, группа преднатяга отражается в обозначении подшипника.

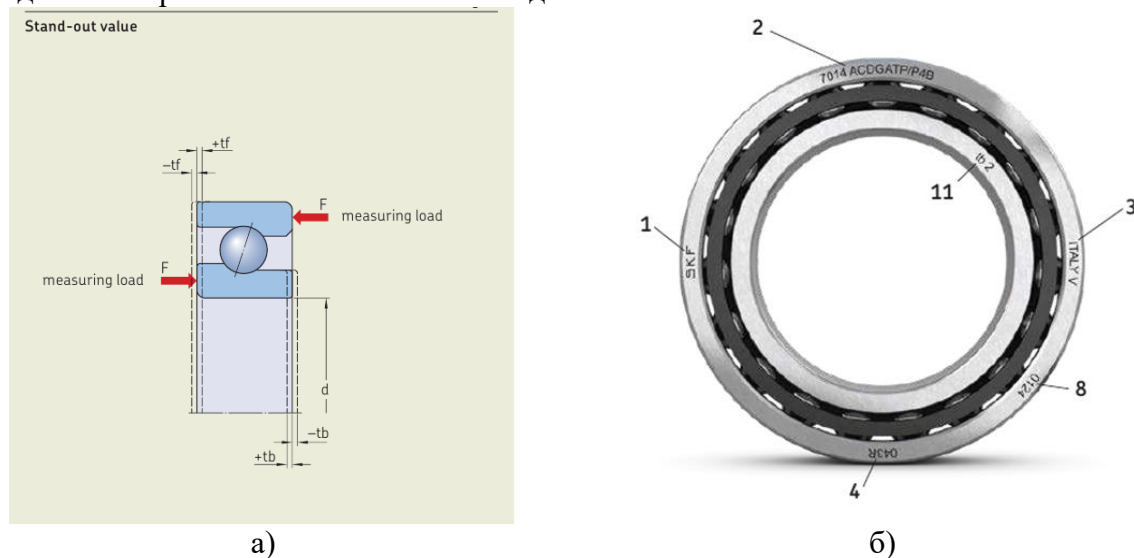


Рис. 2. Параметры дуплексации подшипника t_b , t_f :
а) – схема расположения размеров, б) – пример маркировки параметра дуплексации

На практике с учетом большого числа возможных вариантов изготовления подшипников и сложности обеспечения параметров дуплексации достаточно сложно найти требуемые комплекты (дуплексы, триплексы, схемы «О» или «Х»). В лучшем случае универсально-совместимые подшипники выпускают для одной группы преднатяга, обычно легкого. При этом стоимость комплектов возрастает кратно, по сравнению с одиночными подшипниками. Поэтому очень часто при ремонте используют именно одиночные подшипники, комплектуя и, при необходимости, их дорабатывая. Этому способствует подробная маркировка подшипников (рисунок 2б). Особенно полезна информация по параметрам дуплексирования t_b , t_f для одной из трех возможных групп преднатяга. Таким образом, комплектование подшипников в большинстве случаев (кроме заказа подшипников по отдельному техническому заданию) является достаточно распространенной операцией, требующей определенной методики выполнения и технического оснащения. Приходится отмечать также, что современный рынок подшипников плохо отрегулирован. Крайне высока вероятность поставок изделий не соответствующих прилагаемой документации и не отвечающим заявленным требованиям. Это отражается в тенденции создания собственных служб для полного входного контроля все большим числом предприятий-потребителей подшипников. С учетом высокой трудоемкости и сложности ремонта шпиндельных узлов крайне нежелательно установка в них бракованных подшипников. Поэтому даже скомплектованные производителем дуплексы (триплексы) желательно проверять перед монтажом.

Методики контроля должны быть доступными персоналу, иметь разумную трудоемкость и стоимость, а процесс их выполнения должен быть технически обеспечен.

Комплектование по схеме «тандем» проще (рисунок 3). Два подшипника в паре должны действовать как один. При минимальной нагрузке подшипники должны контактировать одновременно по наружным и внутренним кольцам (рисунок 3а).

Проверка корректности контактирования выполняется на простейшем приспособлении – шлифованной оправке, на которую подшипники устанавливаются с минимальным зазором (е6, g6).

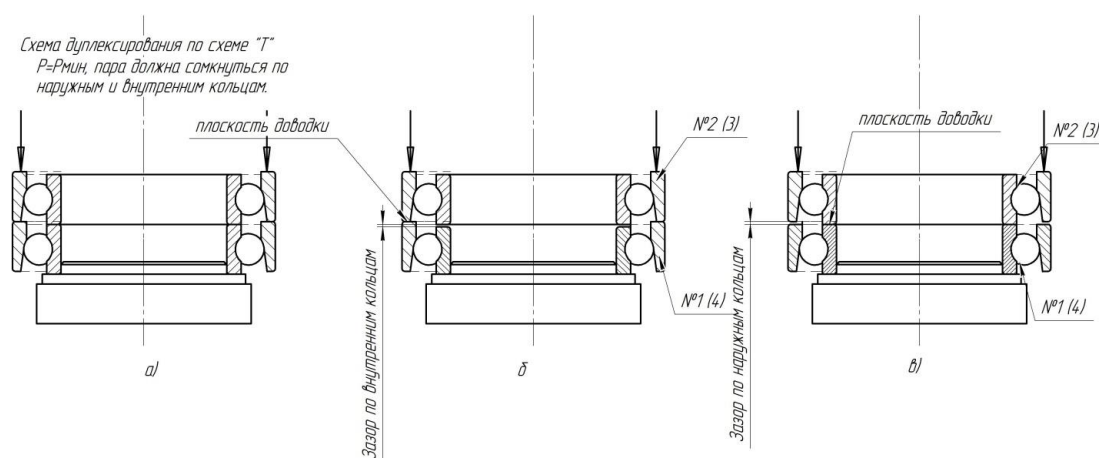


Рис. 3. Дуплексирование по схеме Т (тандем): а) комплект «тандем»; б) контакт только по наружным кольцам; в) контакт только по внутренним кольцам

При сборке подшипниковых опор возможные случаи контакта только по наружным или только по внутренним кольцам. Тогда необходима доработка колец. Это можно выполнять путем ручной доводки на плите с использованием микропорошков или алмазных паст. Операция требует аккуратности. Во-первых, нужно исключить попадание абразива на поверхности катания. Во-вторых, доводку нужно выполнять, контролируя сохранность параллельности торцов колец. Защитить подшипник от попадания абразива достаточно сложно, поэтому некоторые исполнители отказываются от использования алмазных паст в пользу микропорошков, шаржирование которыми гораздо менее вероятно. Если конструкция шпинделя допускает дополнительную установку проставочных колец, дуплексирование становится гораздо более безопасным и простым – обеспечить параллельность торцов таких колец гораздо проще, чем доработать кольца подшипников.

Дуплексирование по схемам Х и особенно О несколько сложнее. Существующие методики [1] корректны, но трудоемки и на практике достаточно сложны в реализации. Хотя для тандемов достаточно дуплексировать лишь пару подшипников, по одному из подшипников передней и задней опор, сам процесс достаточно кропотлив и требует большой аккуратности. На рисунке 4 показаны порядок дуплексации по схеме «О».

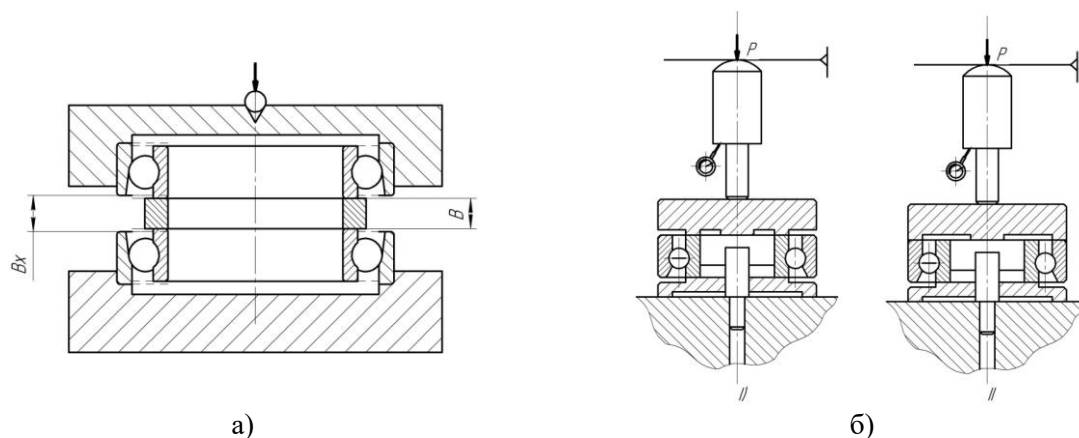


Рис. 4. Принципиальные решения оснастки для дуплексации подшипников: а) схема «Х», б) – схема «О»

Обе схемы предполагают измерения размеров, а на их основе рассчитываются размеры проставочных колец или величины доработки колец подшипников.

При дуплексации по схеме «Х» между внутренними кольцами подшипников устанавливают контрольное кольцо-вставку толщиной В. После приложения расчетной нагрузки выполняется измерение размера Вх. Измерение выполняется с помощью концевых мер длины (КМД). Разность размеров является разницей толщин проставочных распорных колец для наружных и внутренних обойм тандемов.

Дуплексирование по схеме «О» выполняется в два этапа – сначала определяются контактные деформации под действием расчетной нагрузки (рисунок 4б- I). Затем подшипники нагружаются по схеме (рисунок 4б-II). Измеренное смещение наружного кольца корректируется на величину контактных деформаций. Такие замеры выполняют последовательно для двух подшипников схемы «О». Полученные смещения пары подшипников являются разницей толщин распорных проставочных колец для наружных и внутренних обойм тандемов.

Т.е. в обоих случаях необходимо измерять линейные размеры с точностью не хуже 1-2 мкм. Например, для «легкого» натяга подшипников с наружным диаметром 50-80 мм сближение колец под расчетной нагрузкой составляет 11-23 мкм. При этом следует иметь в виду, что нагрузка должна прикладываться строго по центру нажимного кольца для исключения перекосов и ошибок измерения. Поэтому измерения необходимо выполнять несколько раз в произвольных взаимных положениях контактирующих деталей. Особую осторожность следует проявлять при измерении смещений с помощью индикаторов на стойке (дуплексация по схеме «О»), обеспечивая жесткость измерительной схемы и корректный выбор средства измерения (индикатора, микрометра и т.п.).

В связи с этим на практике используют также оснастку, работающую по факту фиксации колец подшипников под нагрузкой. В ходе выполнения работ по исследованию точности дуплексации была разработана конструкция приспособления для комплектования подшипников для работы по схеме «О». Основные технические решения приспособления показаны на рисунке 5.

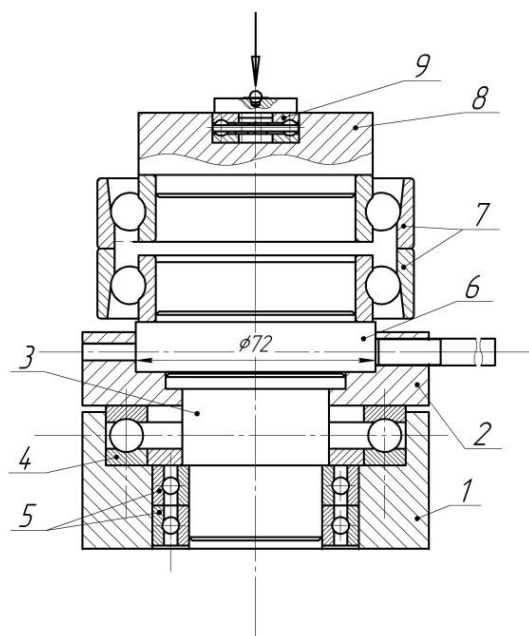


Рис. 5. Конструкция приспособления для дуплексации подшипников по схеме «О»

Приспособление устанавливается на динамометрическом столе. Контролируемые подшипники 7 устанавливаются на шпиндель приспособления 3 с помощью центрирующего пальца 6, посадка с минимальным зазором (е6, g6). Шпиндель установлен в корпусе на подшипниках, обеспечивающих его свободное вращение при приложении осевой нагрузки. Нагружение осуществляется ручным прессом через нажимную шайбу 8 с упорным подшипником 9. При нагружении шпиндель постоянно проворачивают рукояткой. До момента касания внутренних обойм подшипников вращение шпинделя передается только на наружное кольцо верхнего контролируемого подшипника. В момент смыкания внутренних колец они начнут совместно вращаться, приводя в движение нажимное кольцо 9. Эксперименты показали, что факт контактирования может быть зафиксирован с достаточно высокой точностью. При изменении усилия нагружения на 10-15% контакт колец подшипников переходит от касания до полного взаимодействия. Диапазоны допустимого преднатяга практически для всех типов радиально-упорных подшипников составляют около 22% (ГОСТ 831-2022). Найденный разброс усилий, при которых достоверно осуществляется требуемый преднатяг существенно меньше. Это позволяет сделать вывод, что предложенная методика и соответствующее техническое оснащение пригодны для инженерной практики. Дополнительным достоинством предложенной технологии является снижение требований к точности приложения усилия. Измерения при проворачивании шпинделя позволяют установить и компенсировать возможные перекосы, возникающие из погрешности такого рода.

Заключение. С учетом объема станочного оборудования, ориентированного на скоростную и высокоскоростную обработку, вопросы его обслуживания и ремонта являются крайне актуальными. Следует ожидать рост востребованности в ремонтных работах, особенно по шпиндельным узлам станков. При этом растут также объемы специфических операций – комплектование подшипников, их испытание, балансировочные работы, вибродиагностика деталей и узлов. Требуется научно-техническое наполнение этих инженерных задач, включая создание унифицированных методик и технологической оснастки.

Список литературы: 1. РТМ 23.4.57-74 Ремонт шпиндельных головок алмазно-расточных и внутришлифовальных станков. – Волгоград, ГПКТБ. 1974, 76 с. 2. Фигатнер А.М. Фискин Е.А., Бондарь С.Е. Конструкция, расчет и методы проверки шпиндельных узлов с опорами качения. Методические указания. – М. ЭНИМС, 1970, 82 с. 3. Специфика использования подшипников качения в высокоскоростных шпиндельных узлах при ремонте / А. В. Хандожко, А. Н. Щербаков, С. О. Федонина, Н. Ю. Лакалина // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 8(44). – С. 34-44. – DOI 10.30987/2782-5957-2025-8-34-44. 4. Молодцов, В. В. Опоры высокоскоростных шпиндельных узлов современных станков / В. В. Молодцов, А. В. Чурилин, В. В. Бушуев // Вестник МГТУ "Станкин". – 2014. – № 4(31). – С. 85-97. 5. Алферов, А. И. Основные направления совершенствования шпиндельных подшипников / А. И. Алферов, Д. П. Чиркин // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 8. – С. 14-19. 6. Дубовецкий, Б. О. Современное состояние и перспективы развития высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков / Б. О. Дубовецкий, И. А. Зверев // Технология машиностроения. – 2013. – № 5. – С. 27-33. 7. Зверев, И. Современное состояние и перспективы развития высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков / И. Зверев // Станкоинструмент. – 2016. – № 4(5). – С. 62-69.

ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПОД ВЛИЯНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Шипко М. Н., Помельникова А. С., Степович М. А., Комин В. Г. (ИГЭУ, ИвГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Иваново, г. Москва, Россия)

Тел.: +7 (910) 6687565, +7 (962) 1646630; E-mail: michael-1946@mail.ru, m.stepovich@mail.ru

Изучено влияние слабого импульсного магнитного поля на изменение прочностных свойств, дислокационную и кристаллическую структуру режущего инструмента из стали Р6М5 и стали 65. Установлено, что износ инструмента после обработки в импульсном магнитном поле уменьшается примерно в 1,6 раза по сравнению с его исходным состоянием.

Ключевые слова: магнитоимпульсная обработка, свойства стали.

The effect of a weak pulsed magnetic field on changes in the strength properties, dislocation, and crystalline structure of cutting tools made of P6M5 and grade 65 steel was studied. It was found that tool wear after processing in a pulsed magnetic field is reduced by approximately 1.6 times compared to its original state.

Key words: magnetic pulse treatment, steel properties.

Введение. Для упрочнения поверхностных слоёв изделий из металлов и сплавов всё чаще применяют нетрадиционные способы их обработки [1, 2]. Это связано как с конструктивными особенностями узлов машин и механизмов, так и со свойствами наносимых покрытий: высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью, термостойкостью, механической прочностью и т.д. Значительным вкладом в решение проблемы повышения механической прочности таких конструкций и изделий является привлечение в технологию их обработки различного рода физических воздействий. Из таких воздействий практический интерес представляют электрополевого, магнитополевого, ударно-волнового, тепловое, электронное, - вызывающие изменения макро-, микро- и субструктуры изделий.

Использование импульсного магнитного поля. Теоретические исследования возможности изменения прочностных свойств сплавов и наноматериалов путем магнитополевого воздействия показали, что нужный эффект можно наблюдать только в сильных полях ($H \approx 80 \cdot 10^6$ А/м) при низких температурах. Вместе с тем, несмотря на то, что не существует полного представления о влиянии магнитного поля на механические свойства металлов и сплавов, высказываются предположения о действии магнитных пондеромоторных сил, изменяющих внутренние механические напряжения, дислокационную структуру, макро- и микроструктуру фаз, присутствующих в сплавах [3]. Опыт показывает, что такие процессы активируются в импульсном магнитном поле. В частности, повышение износостойкости в импульсном магнитном поле напряженностью менее 600 кА/м обнаружено на деталях из чугунов, конструкционных легированных сталей, материалов режущих инструментов. Механизм влияния такой обработки на структурные изменения металлов и сплавов до настоящего времени остается дискуссионным.

Постановка задачи. В настоящей работе проведены комплексные исследования влияния слабого импульсного магнитного поля на изменение прочностных свойств, дислокационную и кристаллическую структуру режущего инструмента из стали Р6М5 и стали 65.

Результаты исследований. Для идентификации процессов, происходящих в образцах стали Р6М5, а также изменений их прочностных свойств под влиянием слабого импульсного магнитного поля напряженностью до 8 кА/м и длительностью импульсов 0,1-0,2 с с интервалом 1-2 с, использовали результаты рентгеноструктурного анализа, мёссбауэровской спектроскопии, электронной микроскопии, среднюю величину износа задней поверхности режущего инструмента при точении болванки из углеродистой стали 45 со скоростью 40 м/мин. (глубина резания $d = 0,5$ мм, подача $S = 0,3$ об./мин.). Установлено, что износ инструмента после обработки в импульсном магнитном поле уменьшается в 1,6 раза по сравнению с его исходным состоянием. Отмечается существенное увеличение плотности дислокаций в области режущей кромки образцов. При этом дислокации распределяются равномерно по толщине фаски износа.

Аналогичные результаты были получены для образцов из стали 65, которая является удобным объектом для выяснения механизмов влияния импульсного магнитного поля на механическую прочность изделий из стали. Установлено, что плотность дислокаций (ρ) и параметр кристаллической решетки (a) поверхностного слоя образца из стали 65 зависят от длительности его обработки. Наиболее высокие значения изменения этих параметров наблюдаются при обработке 15-40 импульсами магнитного поля.

По данным электронномикроскопических исследований, при обработке стали происходит упорядочение дислокаций вдоль направления силовых линий магнитного поля, а также повышение их плотности. В свою очередь, изменение параметра решетки указывает на структурные превращения, инициированные магнитным полем, обеспечивающие большой запас пластичности и реализуемой прочности. По данным рентгеноструктурных исследований, одновременно с упорядочением дислокаций и увеличением параметров решетки, при магнитоимпульсном воздействии происходит повышение дисперсности субзерен, что может быть вызвано дополнительными магнитоструктурными напряжениями. Однако обнаруженные изменения размеров блоков когерентного рассеяния свидетельствует о преобладающем влиянии дислокационных процессов на прочностные свойства образцов. Плотность дислокаций после обработки в импульсном магнитном поле увеличивается в среднем в 1,8 раза (с $11,6 \cdot 10^{11}$ до $19,5 \cdot 10^{11}$ см⁻²), а микронапряжения от 420 до 550 МПа. При этом число трещин у отпечатка уменьшается почти в 2 раза, а твердость и микротвердость стали повышается лишь на 10 %. В свою очередь, изменение интенсивности структурных отражений при рентгеноструктурных исследованиях указывают также на возможность протекания процессов перераспределения атомов и точечных дефектов в структуре стали под влиянием импульсного магнитного поля.

Заключение. В образцах стали Р6М5 и стали 65 установлено, что износ инструмента после обработки в слабом импульсном магнитном поле уменьшается примерно в 1,6 раза по сравнению с его исходным состоянием. Отмечается существенное увеличение плотности дислокаций в области режущей кромки образцов, при этом дислокации распределяются равномерно по толщине фаски износа. Для стали 65 также установлено, что плотность дислокаций и параметр кристаллической решетки поверхностного слоя образца зависят от длительности его обработки.

Список литературы: 1. Барон, Ю. М. Влияние магнитной и магнитообразивной обработки на фазовый состав и структуру поверхностного слоя инструментальных сталей / Ю. М. Барон // Металлообработка. - 2012, № 1. - С. 12-26. 2. Комшина, А. В. Перспективность метода низкоэнергетической обработки с использованием магнитного поля / А. В. Комшина, А. С. Помельникова // Металлообработка. - 2012, № 9. - С. 18-22. 3. Ильясова, А. И. Анализ влияния магнитного поля на свойства стали линейной части магистральных трубопроводов / А. И. Ильясова // Нефтегазовое дело. - 2019. - № 2. - С.156-168.

OBTAINING OPTIMAL MODES FOR THE FORMATION OF PLASMA COATINGS BASED ON CERAMICS AND NICKEL-CHROMIUM-ALUMINUM-YTTRIUM ALLOYS

Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A.A., Bendik T.I., Sereda V.Yu. (Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus)
Tel. / Fax+375 17 293-95-99, niil_svarka@bntu.by

Astashinsky V. M. (A. 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

The article describes the optimization of plasma coatings from composite materials based on nickel alloys with ceramics systems. Optimization of the process of spraying sublayers in plasma coating was carried out on the basis of developed methodological techniques, the main indicator is the creation of coatings with the maximum coefficient of use of powder material during the spraying process. The developed technological techniques allow creating plasma coatings that combine the heat resistance of ceramics with the plasticity of nickel alloys. The uniformity and smoothness created during the design when changing the properties and microstructure of the formed coating, the absence of sharp boundaries at the interfaces of layers with a gradual change in the values of cohesive, adhesive strength and hardness indicators, with the alignment of the elasticity moduli of ceramic, metal-ceramic and metal formed layers contributes to a significant increase in both strength characteristics and long-term operation. Based on the experience of previously completed work in the field of design and creation of coatings applied by plasma spraying with the receipt of a gradient of technological properties, the authors solved the problems of smooth variation of physical and mechanical properties of coatings, using the technology of plasma with air spraying (APS) using a plasmatron with a special nozzle. At the optimum values of the characteristics of the spraying modes for the NiCrAl powder material (flow rate of the plasma-forming nitrogen gas - 45 l/min, electric arc current - 500 A, spraying distances - 110 mm, powder material fraction < 63 μ m, powder material consumption - 4.5 kg/hour) the formed coatings have a CIP of 89%. A comparative analysis of the CIP dependencies for NiCr, NiAl and NiCrAl powder materials on the distances during the spraying process showed that, with a similar nature of the graphs in absolute value, the CIP values are higher for NiCrAl powder materials, which correlates with the higher plasticity and adhesive strength of this alloy. Plasma spraying is affected by a number of characteristics on the obtained properties of coatings: consumption of plasma-forming and transporting gases, consumption of the supplied powder material, supplied current of the electric arc of the plasma torch, affecting the power, distance from the plasma torch cut to the substrate, substrate movement speed.

Keywords: plasma spraying processes, powder compositions, plasma spraying in air, metal alloys based on microcrystals, operational characteristics, morphology and structure.

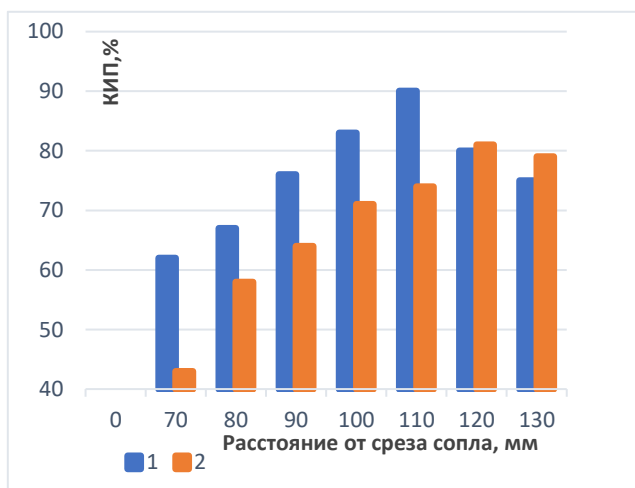
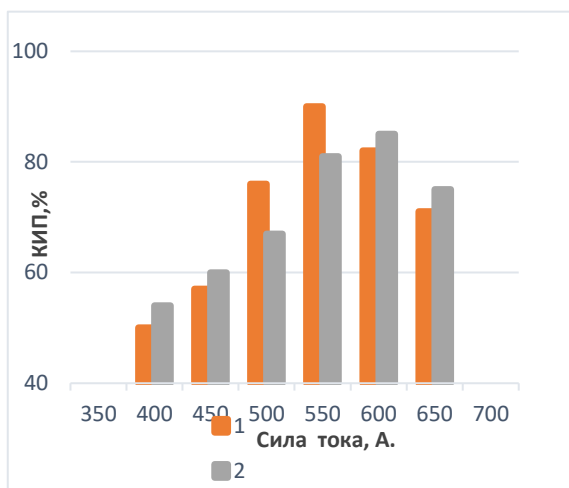
1 Introduction

The main differences between plasma coatings and compact materials are their characteristic structural features: - when laying down the sprayed particles and layers during the formation process, voids (pores) are formed; - due to temperature and speed differences in the particles of sprayed powders in the plasma flow, the structure of the layer obtained in a

single cycle is non-uniform;- a compact material has two types of boundaries: interphase and intergranular, the coating additionally has three more types: coating-substrate boundary, boundaries between particles, boundaries between layers; - coating particles during cooling and heterogeneous crystallization have a certain structure, since the front of growing crystals occurs perpendicular to the formation surface in the direction opposite to heat removal. During plasma spraying of coatings, due to the intense interaction of the spray material with the environment, as well as plasma-forming gases, their dissolution in the coating occurs in quantities significantly exceeding the solubility under equilibrium crystallization conditions. All of the above factors make it possible to form working surfaces of a wide range of parts using the plasma spraying method, operating in a very wide range of loads and speeds, at elevated temperatures and exposure to aggressive environments.

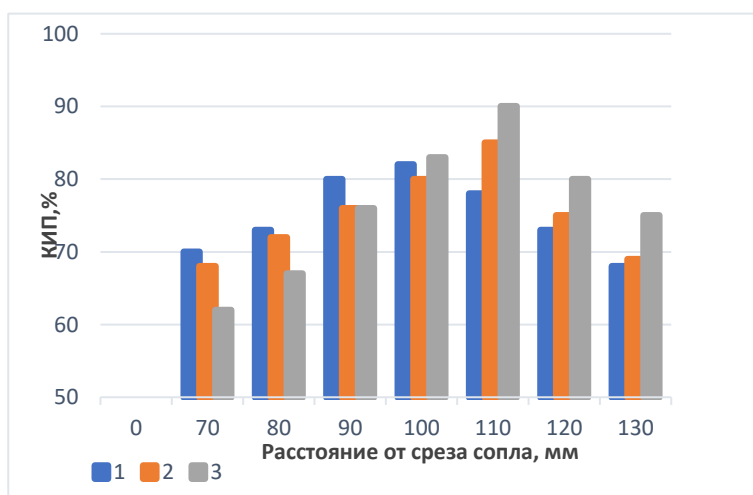
2. Formation of plasma coating based on ceramics and nickel-chromium-aluminum-yttrium alloy

Optimization of the process of spraying sublayers in the multilayer plasma coating NiCrAlY; 80%NiCrAlY- 20%(ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃); 50%NiCrAlY- 50%(ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃) ; 20%NiCrAlY- 80%(ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃) ;ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃ was carried out on the basis of the developed methodological techniques [1-8], the main indicator is the creation of coatings with the maximum coefficient of use of powder material during the spraying process. The developed technological techniques make it possible to create plasma coatings that combine the heat resistance of oxide ceramics with the plasticity of M-rolls. The uniformity and smoothness created during the design when changing the properties and microstructure of the formed coating, the absence of sharp boundaries at the interfaces of layers with a gradual change in the values of cohesive, adhesive strength and hardness indicators, with the alignment of the elasticity moduli of ceramic, metal-ceramic and metal formed layers contributes to a significant increase in both strength characteristics and long-term operation [2-4]. Based on the experience of previously completed work [1] in the field of design and creation of multilayer coatings applied by plasma spraying with the receipt of a gradient of technological properties [5-8], the authors solved the problems of smooth variation of the physical and mechanical properties of coatings, using the technology of plasma with air spraying (APS) using a plasma torch with a special nozzle. At the first stage, the instrumentation optimization was carried out at different arc current values (400 - 600 A, with 50 A intervals) and plasma-forming gas flow rates RN₂ (45; 50) l/min, but with a constant spraying distance L = 110 mm (Figure 1a, 2).



а

б



в

Figure 1. a-dependence of the instrumentation efficiency, % on the current strength of the electric arc I , A for NiCrAlI powder materials at different flow rates of the plasma-forming gas RN2: 1 - 50 l/min; 2 - 45 l/min; ($L = 110$ mm, $R_{por.} = 4.5$ kg/hour, powder material fraction 40...63 μm); б- dependence of the instrumentation efficiency, % on the distance of the spraying process L , mm for NiCrAlI powder material: 1 - with a fraction of 40...63 μm ; 2 - with fraction 63...100 μm ($I=550$ A, $RN=50$ l/min, $R_{por.}=4.5$ kg/hour); в - dependence of the instrumentation, % on the distance during spraying L , mm for powder materials NiAl(1), NiCr(2) and NiCrAlI(3) - with fractions of 40...63 μm at powder material consumption of 4.5 kg/hour: NiAl and plasma-forming gas consumption of nitrogen -45 l/min at electric arc current of 500 A; NiCr and NiCrAlI at plasma-forming gas consumption of nitrogen -50 l/min, electric arc current of 550 A

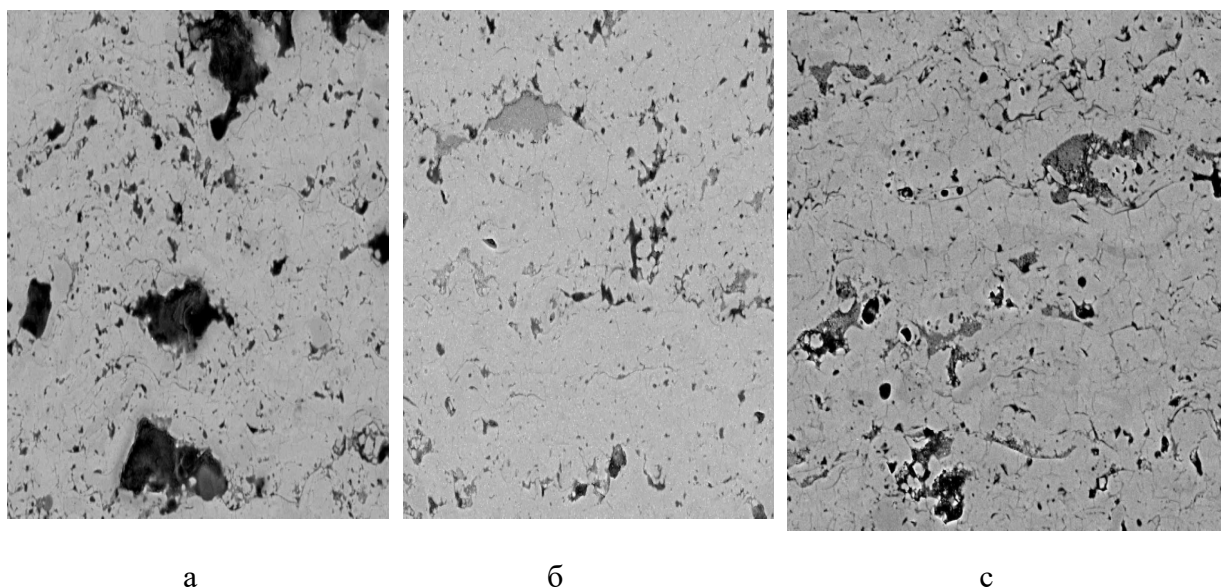


Figure 2. Structures of plasma-cut coatings (a-c) NiCrAlY at different values of plasma torch arc current: a- 400 A; b - 550 A; c- 650 A.

At the next stage of optimization, the values of spraying distances were determined at constant values of electric arc current and plasma-forming gas flow rates ($I = 550$ A; $RN_2 = 50$ l/min) for different fractions of powder materials (Figure 2b). An increase in the values of electric arc currents and plasma-forming gas flow rates (Figure 2a) at certain values leads to an increase in the values of the CIP, since the values of these parameters affect the possibility of melting powder materials [8]. Further growth causes overheating of the powder particles, accordingly, when they hit the substrate, they splash and the CIP decreases. An increase in the N_2 flow rates causes a decrease in the electric arc current values to obtain maximum values for the KIP. For flow rates of $RN_2=50$ l/min, the KIP=90% at an electric arc current of $I=550$ A, and for $RN_2=45$ l/min, the KIP=85% at $I=600$ A. A similar dependence occurs when varying the spraying distances (Figure 2b) after optimizing the parameters for N_2 flow rates and electric arc currents (in this case, $RN_2=50$ l/min, $I=550$ A). At short distances during spraying, the powder particles do not heat up and reach the substrate surface with temperatures below the melting point. An increase in the KIP occurs up to values of $L=110$ mm, with a further change in the distance during spraying, the powder particles, due to the duration of their stay in the plasma jet, are significantly remelted and, as a result of hitting the substrate, are splashed, the KIP drops [7-9]. At the optimal values of the characteristics of the spraying modes for the NiCrAlY powder material (flow rate of the plasma-forming nitrogen gas - 45 l/min, electric arc current - 500 A, spraying distance - 110 mm, fraction of the powder material $<63 \mu m$, powder material consumption - 4.5 kg/hour) the formed coatings have a CIP of 89%. In Figure 2c, to confirm the optimality of using M-rolls as underlayer materials, a comparative analysis of the dependence of the CIP with other most commonly used NiCr and NiAl underlayers on the spraying distance is given.

3. Conclusion

Optimization of the process of spraying layers in the multilayer plasma coating NiCrAlY; 80%NiCrAlY- 20%(ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃); 50%NiCrAlY- 50% (ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃); 20%NiCrAlY- 80%(ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃); ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃ was carried out on

the basis of the developed methodological techniques, the main indicator being the creation of coatings with the maximum coefficient of use of powder material during the spraying process. The uniformity and smoothness created during the design when changing the properties and microstructure of the formed coating, the absence of sharp boundaries at the layer sections with a gradual change in the values of cohesive, adhesive strength and hardness indicators, with the alignment of the elasticity moduli of ceramic, metal-ceramic and metal formed layers contributes to a significant increase in both strength characteristics and long-term operation. The authors solved the problems of smooth variation of physical and mechanical properties of coatings, using the technology of plasma with air spraying (APS) using a plasma torch with a special nozzle.

References: 1. Microstructural studies of stabilized NiCrAlY – Y₂O₃ cermet coatings ZrO₂ deposited by a plasma arc (PTA) / C. Demian. [et al.] // Mater. sci. Forum. 2010. No 65. P. 248–261. 2. Mechanical properties and thermal shock resistance of HVOF sprayed NiCrAlY coatings without and with nano ceriat / X. Sun [et al.] // Thermal spraying technology. 2012. No 21. P. 818–824. 3. Okovity, V.A. Formation and study of multilayer composite oxide plasma coatings on elements of screen anti-meteor protection” for an 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. // “Science and technology” BNTU, 2016. Iss. 5. P. 357–364. 4. Panteleenko, F.I. Investigation of plasma two-layer composite coatings zirconium dioxide - nichrome / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko E. F. // “Actual problems in mechanical engineering”, NSTU – Novosibirsk, 2017. Vol. 4. No 3. P. 100–105. 5. Okovity, V. A. Multilayer composite oxide plasma coatings on screen protection elements based on zirconium dioxide / Okovity V.A., Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Khramtsov P.P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevskiy S.B. // "Science and technology", BNTU - Minsk. 2017. Issue 5. P. 422–431. 6. Okovity, V. A. Formation and study of plasma two-layer composite coatings (viscous NiCr metal layer and solid ZrO₂) / Okovity V. A., Pan-telelenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M.Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. // Science and technology, BNTU - Minsk. 2018. Issue. 1. S. 21–28. 7. Okovity, V.A. Formation of plasma powder coatings from cermets with subsequent high-energy modification / Okovity V.A., Panteleenko F.I., Astashinsky V. M., Sobolevsky S. B., Okovity V. V. // “Science and technology”, BNTU - Minsk. 2020. Issue 6.- P.615-620. 8. Panteleenko, F. I. Development of a composite material based on ceramics with the use of additives of compounds of refractory metals / Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., Okovity V. A., Sidorov V. A., Rafail K. // Bulletin of the Kuzbak State Technical University. Kemerovo-2020. No m4 (140). P. 18–24. 9. Okovity, V. A. Optimization of the process of applying coatings from metal-ceramic powders by plasma spraying in air / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. // "Science and technology", BNTU - Minsk. -2021. Issue 5. P. 369–371.

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF COMPRESSION PLASMA TREATMENT OF COATINGS FROM MULTIFUNCTIONAL CERAMICS

Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A. A., Bendik T.I., Sereda V.Yu. (Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus)
Tel. / Fax+375 17 293-95-99, niil_svarka@bntu.by

Astashinsky V. M. (A. 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

The study is devoted to the process of high-energy processing of plasma coatings created from multifunctional ceramics. During the experiments, the technological parameters of compression plasma processing were varied, including the distance of pulse action and their total number. These parameters significantly affect the thickness of the processed coating layers. The studied wear-resistant coatings require high cohesive and adhesive strength. Thus, the total number of pulses should be sufficient for complete melting and compaction of the coating over the entire thickness, which contributes to the formation of a hardened structure. The processing was performed by pulses of a plasma jet generated by a gas-discharge quasi-stationary accelerator such as a magnetoplasma compressor.

Keywords: Plasma coating, compression plasma processing, ceramics with multifunctional properties, technology parameters, coatings with increased wear resistance.

Introduction. The maximum degree of melting and compaction of materials was chosen as the optimization criterion for the compression plasma treatment of coatings based on the composition Al_2O_3 –30% Cr_2O_3 –12.5% MoS_2 , created by agglomerating a finely dispersed batch with subsequent high-temperature sintering. This state can be achieved by increasing the energy level of the thermal and shock-wave impact of pulses while reducing the impact distance to the minimum permissible value. However, an excessive decrease in the distance is limited by the onset of coating destruction, for example, by crack formation. Compression plasma treatment of sprayed coatings was carried out using a gas-discharge quasi-stationary accelerator of a magnetoplasma compressor (MPC). Among its advantages over other accelerators are high stability of the compression flow, the ability to adjust its composition, size and characteristics of the plasma, as well as the optimal discharge duration for applied problems [1, 2]. The compact geometry setup for creating compression plasma pulses generated by the MPC includes a vacuum unit with a chamber, a system for pumping and feeding the working gas, a discharge device, a capacitive energy storage device, and a diagnostic complex. The MPC discharge current varied in the range of 70–100 kA with the initial voltage of the storage device varying from 3 to 5 kV, and the discharge duration was about 150 μs . The energy density of the pulsed action reached values of the order of $(2\text{--}3) \times 10^5 \text{ W/cm}^2$. The process of plasma spraying of coatings for further processing was carried out in an air atmosphere on a UPU-3D setup equipped with a TWIN-10 powder feeder. The resulting coating thickness varied within 0.5–0.6 mm.

Theory. When changing the technological parameters of compression plasma processing, the distance of exposure to pulses and their total number were varied [3–5]. The last of these parameters has a significant effect on the thickness of the processed coating

layers. The wear-resistant coatings under study require high cohesive and adhesive strengths. Thus, the total number of pulses should be sufficient for complete melting and compaction of the coating material throughout its thickness, which ensures the formation of a hardened structure. The coatings were processed using plasma jet pulses generated by a gas-discharge quasi-stationary accelerator of the magnetoplasma compressor (MPC) type. During the experiments, the exposure distance and the total number of pulses were selected and optimized based on predetermined criteria.

Results and discussion. Table 1 presents the results of processing distance optimization. According to these data, the optimal distance for compression plasma treatment of coatings of the Al_2O_3 –30% Cr_2O_3 –12.5% MoS_2 composition is 0.07 m. This is confirmed by the stabilization of porosity, the desired reduction of which is practically not achieved at distances less than 0.06 m. The reason is the short duration of thermal and dynamic impact of pulses ($\sim 200 \mu\text{s}$), as well as the presence of a significant proportion of refractory phase in the coating, which prevents further melting and compaction of the material. In addition, when the distance is reduced to 0.05 m for the Al_2O_3 –30% Cr_2O_3 –12.5% MoS_2 composition, the coating is destroyed with the development of macrocracks. Along with the optimization of the processing distance, the total number of plasma pulses required to form a completely melted coating across its entire thickness was adjusted. It was found that the optimal number of pulses is 12–13. Increasing the number of pulses above this value is impractical, since it leads to deterioration of the coating surface geometry and complicates its subsequent mechanical processing. The microstructure of the coating processed under optimal conditions is shown in Figure 1. It is evident that the coating structure consists of fused metal-ceramic material with uniform distribution of structural elements. Such a structure contributes to increased wear resistance of the coating. Also noticeable are inclusions of solid lubricant particles that form the coating.

Table 1 – Results of studies on selecting the optimal processing distance

Coating	Pulse-plasma processing distance, m	Porosity index, %
Al_2O_3 -30% Cr_2O_3 -12,5% MoS_2 (agglomer.)	0,09	4,5 – 5,9
	0,08	3,8 – 5,1
	0,07	3,4 – 4,8
	0,06	3,1-4,7
	0,05	Coating destruction

The specified structural elements appear as characteristic light shells that have not been etched. Preservation of the structure of the sprayed composite particles in the plasma jet, their interaction with the substrate and further action of plasma pulses indicate that the composition of the initial powders remains virtually unchanged during the coating formation process. This is an important factor for ensuring the required performance characteristics of the deposited materials. Their properties are additionally improved by using compression plasma treatment.

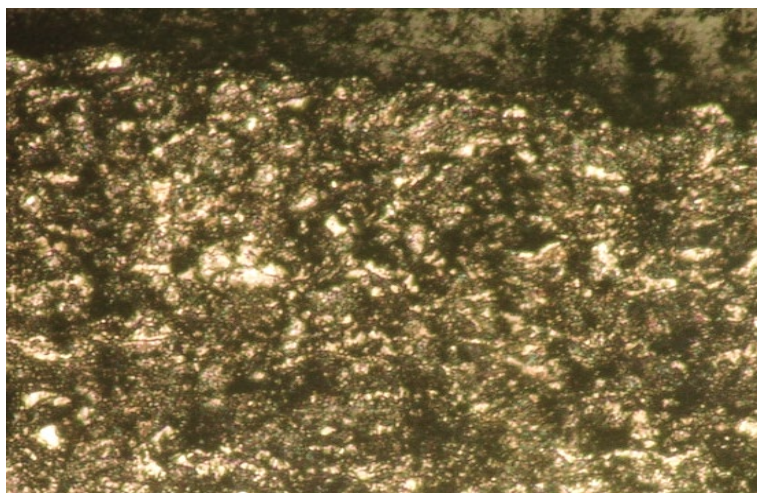


Figure 1. Microstructure of the Al_2O_3 –30% Cr_2O_3 –12.5% MoS_2 coating formed under optimized treatment parameters

The structural features of the deposited composites include the complication of the etching processes of their elements. An increase in the number of areas not subject to etching indicates the presence of hardened amorphous or similar nanocrystalline structures with high corrosion resistance and virtually insoluble in acidic solutions. In accordance with the methodological approach to studying the properties of coatings, an analysis of the change in the average microhardness of the sprayed compositions was carried out. According to the data presented in Figure 2, the microhardness of these materials increased by 1.15–1.23 times after the use of pulsed plasma treatment. This phenomenon is explained by more efficient formation of phases with increased strength, which have an amorphous or close to it nanocrystalline structure. Efficiency is achieved due to local melting and compaction of coating layers with a thickness of 30–40 μm during their ultra-fast cooling, as well as the absence of undesirable recrystallization. This is due to the fact that during compression plasma treatment, processes occur that penetrate deep into the coating, which allows the preceding compacted layers with low porosity and high thermal conductivity not to reach critical temperatures.

Conclusions. The conducted studies are aimed at optimizing the technological parameters of high-energy treatment of sprayed coatings made of multifunctional ceramics with the addition of solid lubricants. These coatings were obtained by agglomeration of finely dispersed charge with subsequent high-temperature sintering. Optimization was carried out with an emphasis on the processes of structure formation, including melting, compaction and rapid cooling of materials. The optimization criterion was the maximum degree of local melting and compaction of coatings without signs of their destruction as a result of exposure to plasma pulses. The impact energy was generated using a gas-discharge quasi-stationary accelerator of the magnetoplasma compressor (MPC) type and a solid-state quasi-stationary laser emitter. It was found that the optimal distance for compression plasma treatment of coatings of the Al_2O_3 –30% Cr_2O_3 –12.5% MoS_2 composition is 0.07 m. This value is confirmed by the observed stabilization of porosity, the desired decrease of which at distances less than 0.06 m practically does not occur. This is explained by the short duration of thermal and dynamic pulse effects ($\sim 200 \mu\text{s}$), as well as the high content of the refractory phase in the coatings, which prevents significant melting and compaction. In addition, at a distance of 0.05 m for Al_2O_3 –30% Cr_2O_3 –12.5% MoS_2 , the coating is destroyed, manifested in the formation

of macrocracks. The optimal radiation power densities (W) for processing these compositions are $(5.0-7.0) \times 10^5 \text{ W/cm}^2$. The dynamics of increasing the degree of melting and compaction confirms that the desired decrease in porosity (according to the optimization criterion) is not observed at W greater than 6.0 and $7.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$. The decrease in heat transfer efficiency is due to the high content of refractory and solid oxide phase (more than 80%), which limits melting and compaction of coatings. With a further increase in W , undesirable thermal destruction of the surfaces of the materials being processed is recorded.

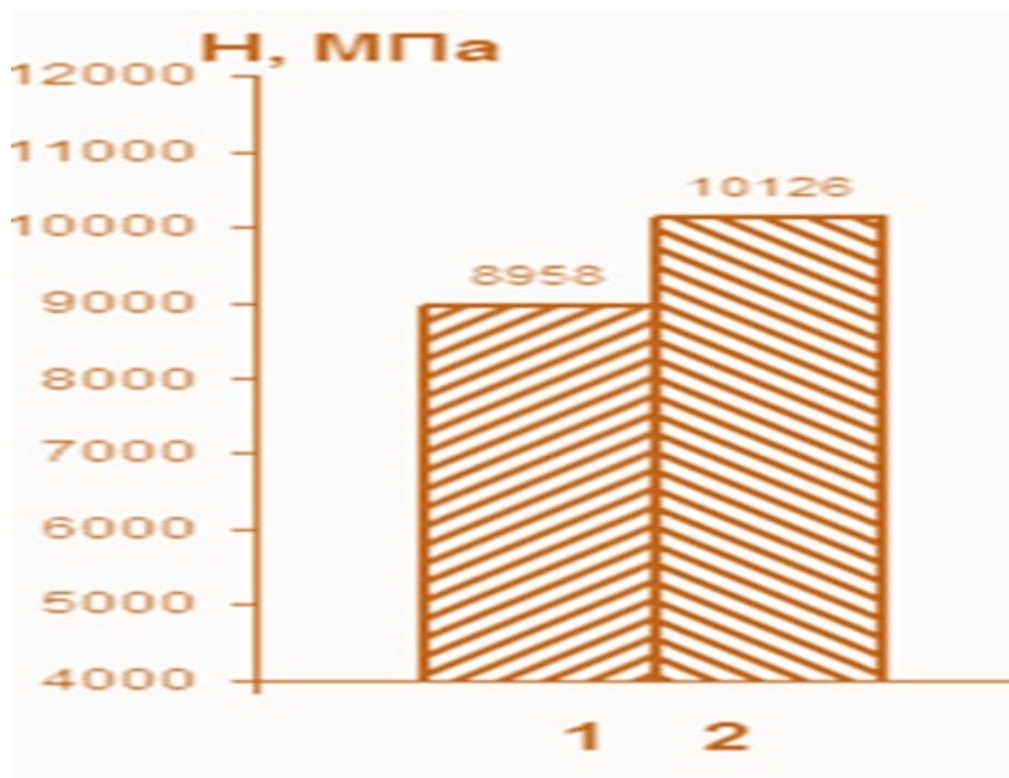


Figure 2. Microhardness of Al_2O_3 -30% Cr_2O_3 -12.5% MoS_2 coatings: 1 – after plasma spraying; 2 – after compression plasma treatment of sprayed materials

References: 1. Okovity V.A. Modification of wear-resistant plasma coatings by pulsed laser / Okovity V.A., Panteleenko F.I., Shevtsov A.I., Devoyno O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. // Bulletin of the Brest State Technical University. Mechanical Engineering. - Brest, 2009. - Issue 4 (58). - P. 49-53. 2. Okovity V.A. Study of modification processes of wear-resistant plasma coatings by pulsed plasma treatment / Okovity V.A., Panteleenko F.I., Ilyushchenko A.F., Shevtsov A.I., Astashinsky V.M., Panteleenko A.F., Okovity V.V., // Bulletin of the Belarusian National Technical University. BNTU- Minsk, 2009.-Vyp.5.- P. 38-43. 3. Okovity V.A. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant / Okovity V.A // Welding production-M., 2002. - №6. -P.41-43. 4. Okovity V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ Okovity V // J. Welding International- 2003.-vol.16, № 11.- P. 918-920. 5. Okovity V.A. Tribological tests of samples of amorphized plasma composite coatings with inclusion of solid lubricant / Okovity V.A., Shevtsov A.I., Ilyushchenko A.F., Devoyno O.G., Panteleenko F.I., Okovity V.V. // Bulletin of the Brest State Technical University. Mechanical Engineering. - Brest, 2008. - Issue. - P.2-6.

THE HIGHER SCHOOL AS THE TRAINING CENTER OF THE HARMONIOUSLY DEVELOPED PERSONALITY OF A STUDENT

Prihodchenko K. I., Kaverina O. G. (*«Donetsk national technical university», Donetsk, DPR, Russia*)

Phone: +7(949) 3585223; E-mail: olgakaverina1957@gmail.com

The article deals with the problems, carrying upbringing character. They are as follows: the development of the resilient platform as the basis of the moral-value orientations of the student youth. The main points are connected with such categories as behaviour in the collective, respect for the opinion of the groupmates, diligence, assertiveness in achieving the set goals, the constant desire for self-perfection, for formation of creative position.

Key words: *the liberal direction of a personal development, truthfulness, kindness, responsibility of a student, a definition of a word 'giftedness', collective creativity, the realization of the potential possibilities.*

В статье рассматриваются проблемы, имеющие воспитательный характер: создание жизненной платформы, основанной на морально- ценностных ориентациях студенческой молодежи. Наиболее важными являются такие категории как поведение в коллективе, уважение к мнению однокурсников, трудолюбие, упористость в достижении поставленной цели, постоянное стремление к совершенству, к формированию самобытно-творческой позиции.

Ключевые слова: *гуманистическая направленность личности; правдивость, доброта, ответственность обучаемых, позиция «одаренность», коллективное творчество, реализация потенциальных возможностей.*

The problem setting. The modern education connects the highest aim of upbringing with the harmoniously developed personality. The teachers must remember about this statement because they are the generators of the educational and upbringing process. The students must strive for achieving this goal. It especially touches the students who decide to devote their future work to liberal sphere. It directly teaches the students – future engineers, who are eager to be teachers. In this situation only the hard work together with teachers, and then an independent performance, individual activity will give positive results – the confident aspiration for creative top. The outstanding teacher Sh. Amonashvily underlined that the everyone is perfect who is eager to be perfect.

The liberal pedagogics by Amonashvily possesses the best world experience. The scientist is the follower of A. Masloy, K. Bodyers, J. Kellay, V. Frank and many others. The main concepts of the liberal pedagogics are considered to be the following moral qualities: self-actualization and the personal growth. There are actual ways of influence upon personal conscience, behaviour, enabling to develop the skills for self-education, self-upbringing and self-development. In order to achieve the top of mastership, it is necessary to be disciplined, hard-working, motivated for success, vividly to set up the goals and follow the way to achieve them with confidence. The students must strive for self-realization and consistent development in collective creative and individual activity.

The above-mentioned problems have been in the focus of attention of a lot of scientists, especially in works by A. Masloy, O. Anisimova, E. Kudinova, A. Rean, E. Morosov, T.

Andreeva and others. For example, first of all, O. Anisimova sets up the personality of a student, who is inclined for creative performance as the main point in the process of development.

It is called a special gift in this or that kind of activity. The technology being used by a teacher in this process is named intellect – developing technology [1]. S. Kudinov, E. Morosova and other scientists make an accent upon the personal self-realization, upon the working of cognitive qualities in the intellectual development in the well-organized system of the educational-upbringing process.

We can pay attention to the creativity of a person. Firstly, the term ‘creativity’ was introduced in the 60th of the xx century. It was A. Aleynikov who developed the ‘definition’ creative pedagogics and made a conception of its implementation into the actual educational process. The founder of the creativity is considered to be John Gilford who affirmatively proclaimed the thought concerning the similarity of the notions ‘creativity’ and ‘creative thinking’. The students study to work in commands, in groups, to be responsible not only for themselves but also for any groupmates. The idea to bring up with the help of collective and through collective belongs to the outstanding teacher A. Makarenko. His conception of upbringing includes the following moral values – freedom and responsibility. It is freedom to choose life position, the place of an individual in the society, the creative direction of setting and revealing a talent, and gift. In our case, it is connected with the upbringing of students of technical specialties. A. Makarenko defines the collective as the complex of aimed personalities, it is not only the simple group of persons who communicate with one and another. The red flag is in the idea of love and respect for people who fulfill all aspects of education and upbringing. According to the viewpoints of some researchers every person obtains unlimited energy, and the question is how to manage this process. Every person has his own uniqueness, everyone can become outstanding, he can reveal his interest for cognition of the world, for worldview, for understanding the sense of human life. A. Masloy considers that creativity is revealed in everyday life, everyday choice of life situations in different forms of self-expression. The scientist divides creativity into primary (the stage of aspired creativity) and secondary (the process of detailization of the creative product, its implementation in real form). In the works by J. Komensky, ‘The big didactics’ and in papers by other scientists A. Masloy, A. Bean, T. Andreeva, N. Kireeva the motivational component of activity is singled out [4,6].

The scientists take as a basis the work by V. Suhomlinsky ‘How to bring up a real person’. They underline the fact that it’s very important for the students to get the main features of the moral ideal person. They must strive for its implementation and for correct communication to people. Axiological value component is investigated in the works by V. Slstenina [7]. It will be untrue not to mark that axiological component was the basis for the pedagogical practice of our native citizen, a teacher V. Shatalov. According to his new point the essence of the axiological approach is connected with the value awareness of the importance of the activity, which is being performed by a person, in value attention for it, in value behavior. Their perfection is the main task of everyone. V. Suhomlinsky underlines the implementation of scientific truth into the life experience, into practical activity. He called it the most complicated skill, combining science and practice. The scientist marked that education is one of the leaves of a flower which is called upbringing. He transformed the accent from the process of learning and remembering to the process of creative thinking. The creativity appears to be the dominating one. The teacher and the student must be inclined to do something new, unusual. It was Suhomlinsky who firstly used the definition ‘the technology of creativity’.

Let’s examine this point upon the example of educating the students of technical specialties. The most important task is to help them develop the moral qualities. First of all, this is a discipline. Discipline means strict fulfillment of the coordinated actions individually or together with other students, with teachers helping to fulfill the complicated, well-organized

work over the gift development. These gifts are considered to be an individual – personal prerequisite of the creative process development and personal formation.

Metacompetence is thought to be one of the most important component. It includes communicative, social, collective competence in the general creative surrounding. It implies the capability of a person to enter the global sphere of the social-cultural, communicative space. The real education-upbringing process is an example of this kind of space where the students of technical professions are trained for future productive activity.

According to the viewpoint of the researcher G. Ponomaryov, a personality who is eager to be an active one, has the following characteristic features: originality of thinking, initiative, high level of self-regulation, great workability. It was V. Petrovsky who introduced the principle of oversituational activity for the characteristics of the creative activity mechanism. This definition implies the capability of a subject of activity to rise over the level of the situational demands. With the help of such a capability an individuum can overcome internal and external limitations, the obstacles of performance.

The creative person needs to know people who achieved some tops in their careers, in order to have an ideal. An ideal is a moral notion, ethic category which a personality wants to achieve. A person is eager to be similar to an ideal, especially in value relations. Without any doubt it will help to set up an unordinary personality of a student. Let's speak about talent. Talent means a capability allowing to receive a product of performance. This product must differ with its novelty, high level of perfection, originality, effective decision.

Many years ago, Seneka stated that creativity is a single happiness which cannot be enjoyed completely.

In reality the creative process allows to exist out of the frames of own 'I', revealing:

- intellectual initiative;
- a skill to constant self-education; an independent work, development of his own talent;
- synergy thinking implying cooperation;
- self-satisfaction – the feeling of self-sufficiency, inspiration, and enjoyment;
- the capability to set a goal and gain it;
- honest interpersonal relations, sincerity, integrity, loyalty for duties;
- eloquence;
- the management of the speech technique;
- the art to discuss problems, to support his own viewpoint, to argue about something.

Leonardo de Vinci marked that the main goal of life of a creative person, a performance person is a skill to live his life in such a way that it can be called a piece of art. Not less succinctly a modern researcher N. Martishina declared that formation of a creative person is a process of finding his own originality. With this aim it is necessary to combine general human values, especially which are characteristics of the period when a person lives and singular, unique, which is characteristics of a definitive personality.

Some scientists underline that every creative person should possess more than thirty qualities in order to accomplish his perspective plans and dreams. It is necessary for him to develop emotional-image perception of the obtained information, constantly contemplating but it is important in his own activity to set the aim of achieving effective and firm results, qualitative positive changes of a personality leading to perfection intellectual and cultural growth under the impact of internal and external factors. It is important to form strong beliefs, a skill to establish links between the new knowledge and the old one to apply this knowledge into practice. Such a process is called perception in science. The term 'perception' was introduced by G. Leybnits. This word has been used in pedagogics by E. Gebarr who developed the new idea of upbringing. The scientist stated that if pedagogics wants to bring up well-educated person in all aspects, it must be aware of his individuality in all relations.

The conclusions and recommendation. The main qualities of a person must be connected with: I – concept, the curiosity of mind, an interest for the activity, bravery, initiative, confidence in his own capabilities, respect for other people opinion, the feeling of empathy, creativity, assertiveness, the feeling to persuade other people, sensitivity, a skill for hard-work, observation skills, practical search activity, intellectual activity, the education in the conditions of joint performance, reflection, flexibility of thinking, self-management, self-regulation, self-control of own activity, creative potential, the skill to generate new ideas, refusal from ordinary schemes to solve problems.

So, trying to reach the personal perfection, the students of the technical occupations develop moral qualities which are being formed in the real stream of thoughts and emotions. According to V. Suhamlinsky, the results of their activity are the benefits of the student`s mental efforts where the performance is considered to be a creative process, unique process, personally important, productive in achieving the results.

References: 1. Anisimov, O.S. Creative acmeology / O.S. Anisimov / edited by A.A. Derkach - M.: RAGS, 2008, - 276 p. 2. Batarshev, A.V. Theory and practice of creative self-realization of the individual: monograph / A.V. Batarshev, A.S. Lukyanov, I.S. Makaryev, G.V. Morozova - St. Petersburg. - Petropolis Publishing House, 2013 - 254 p. 3. Bogoyavlyanskaya, D.B. Psychology of creative abilities: a textbook / D.B. Bogoyavlenskaya - M.: Academy, 2022 - 320 p. 4. Kolomiets, E.F. Creativity as a Factor in Choosing a Strategy for Self-Realization of Personality: Abstract of a PhD Thesis, Candidate of Psychological Sciences, Ekaterina Fedorovna Kolomiets; St. Petersburg State University – St. Petersburg, 2010 – 29 p. 5. Kudinov, S.I. Value-Semantic Predictors of Personal Self-Realization / S.M. Kudinov, S.S. Kudinov - Moscow: Russian University of Friendship of Peoples, 2016 – 229 p. 6. Luk, A.N. Essays on heuristic psychology / A.N. Luk - Moscow: BINOM Laboratory of Knowledge, 2011 - 228 p. 7. Maidanov, A.S. Methodology of scientific creativity / A.S. Maidanov - Moscow: LKI, 2008 - 512 p. 8. Markova, A.K. Formation and development of professionalism during training [Electronic resource] / A.K. Markova – Access mode: www.VRL?http://psychological.vapable/56-1-0-123/ 9. Maslow, A. Motivation and personality / A. Maslow – St. Petersburg: Piter, 2003 – 210 p. 10. Personal development: prognostic models, factors, variability: collective monograph / edited by I.S. Morozova; State Educational Institution of Higher Professional Education "Kemerovo University" - Tomsk: Tomsk University Publishing House, 2008 - 464 p. 11. Prikhodchenko, E.I. Psychology and pedagogy: modern educational context / E.I. Prikhodchenko – LAPLAMBET Academic Publishing PV, 2023 – 565 p. 12. Rean, A.A. On the value-motivational sphere of university students / A.A. Rean, T.V. Andreeva, N.P. Kireeva, N.A. Moskvicheva / "Ananyev Readings-99": Abstracts of the scientific-practical conference. – St. Petersburg, 1999. – Pp. 222-223. 13. Sidorenko, E.V. Training of Communicative Competence in Business Communication / E.V. Sidorenko – St. Petersburg: Rech, 2022 – 208 p. 14. Slastenin, V.A. Introduction to Pedagogical Axiology / V.A. Slastenin, G.I. Chizhakova – Moscow: Academy, 2003, 192 p. 15. Stankin, M.I. Psychology of Communication / M.I. Stankin – Moscow: Moscow Psychological and Social Institute. – Voronezh: NPO "MODEK", 2000 – 304 p. 16. Voroshko, Yu.N. Philosophy of self-realization of the individual in modern culture / Yu.N. Voroshko, E.E. Nesmeyanov, A.M. Rudenko; edited by A.M. Rudenko; scientific editor D.V. Matyash – Novocherkassk: Lik, 2015 – 166 p.

СОДЕРЖАНИЕ

Аноприенко А. Я. ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВО, ТЕХНООПТИМИЗМ И СИСТЕМОДИНАМИКА ТЕХНОСФЕРЫ.....	6
Азарова Н. В., Поезд С. А., Рудницкий А. В., Цокур В. П. ШЛИФОВАНИЕ СТАЛИ 12Х18Н10Т АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ.....	20
Анастасьев А. В., Анастасьева В. А., Пичко Н. С. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	27
Баранов А. В., Павлов К. А. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ ПО СИСТЕМЕ ВТА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ.....	31
Бедоидзе М. В., Лоскутникова И. Н., Степаницын А. С., Сулименко Д. С., Холодова С. Н. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЗВУЧАНИЕ (СПЕКТР) ЖЕСТКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	36
Бедоидзе М. В., Степаницын А. С., Сулименко Д. С., Сулименко А. С., Рахманов А. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И АЭРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЕЛИ.....	42
Бохонский А. И., Майстришин М. М., Рыжков А. И. ПРИМЕРЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНИЙ ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ.....	46
Бутенко В. И., Кадач Р. Г. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПРЕГНИРОВАНИЯ АРАЗИВНЫХ КРУГОВ ДЛЯ ЗАТОЧКИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ.....	51
Бутенко В. И. СВОЙСТВА УПРОЧНЁННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЙОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СМАЗКИ.....	55
Быков В. В., Мельникова Е. П., Абрамов А. Г. ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОРМОЗНЫХ БАРАБАНОВ АВТОМОБИЛЕЙ В ПЕРИОД ИХ «ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА».....	60

Витренко В. А., Воронцов И. Б., Ефимов А. А., Креселюк Ю. В., Стоянов А. А. ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС.....	63
Волков А. Ф. ВОСПИТАТЕЛЬНАЯ РАБОТА – ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ЛИЧНОСТИ СТУДЕНТА.....	68
Горобец И. А., Колесников В. М. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЕНСОРА 3D СИЛ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФРЕЗЕРНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ.....	72
Горобец И. А., Лазебная Л. А., Лапаева И. В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СЕТЕВЫХ СВЯЗЕЙ ШКОЛА-ВУЗ- ПРЕДПРИЯТИЕ.....	77
Гусев Е. Л., Федоров Ю. Ю., Черных В. Д. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ.....	81
Гутаревич В. О., Калугина С. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА SMATH STUDIO ПРИ ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ-МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ.....	85
Егоров Н. Т. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЕРМОУПРОЧНЕННОЙ СТАЛИ ПРИ ЗАКАЛКЕ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ В ПРЕССЕ И РОЛИКОВОЙ ЗАКАЛОЧНОЙ МАШИНЕ.....	89
Жабровец А. И., Малеев В. Б., Сидоренко В. А., Шамрай Ю. А. КАНАТ МНОГОКАНАТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ КАК ЕСТЕСТВЕННО- ЗАКРУЧЕННЫЙ СТЕРЖЕНЬ ПРИ ПЕРЕМОТКЕ ЧЕРЕЗ ШКИВ ТРЕНИЯ.....	93
Зензеров В. И. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОСИСТЕМЕ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ.....	100
Калякин С. А., Мороз О. К., Мороз Т. О. ИННОВАЦИОННАЯ СТРАТЕГИЯ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА В ОПАСНЫХ ПО ГАЗУ И ВЗРЫВАМ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ.....	104

Кардаполова М. А., Косякова И. М., Криуша С. М., Кавальчук О. Н. ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА.....	112
Коломойцева И. А., Щедрин С. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЗАУРУСА ДЛЯ СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА В ДОКУМЕНТАЦИИ ПО ПРОГРАММИРОВАНИЮ В КОНТЕКСТЕ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	118
Костенко А. В., Игнаткина Е. Л. ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РЫБНОГО ФИЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ.....	123
Костенко А. В., Каврук А. К. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАШИННОГО ЗРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЫБОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ.....	125
Лазебная Л. А. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ С ПОВЕРХНОСТИ.....	128
Ларшин В. В., Осипенко Р. М. МЕТОД ОГИБАЮЩЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ КАК СПОСОБ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ И УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	132
Лахин А. М., Байков А. В. ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АБРАЗИВА В ПРАВЯЩЕЙ СУСПЕНЗИИ НА ПРОЦЕСС ПРАВКИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ.....	142
Михайлов А. Н., Глушко В. Ю. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	146
Михайлов А. Н., Киселица Д. О., Огренич Д. В., Жарких Д. С., Пичко Н. С. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ГТД.....	152
Михайлов А. Н., Котляров С. Б., Котляров В. Б., Котляров Б. С. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ НАКАТЫВАЕМЫХ ТРУБ.....	158

Мищенко Т. П., Гутаревич В. О., Рак А. Н. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ РИСКА ВОЗГОРАНИЯ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ.....	165
Мозоленко В. А., Хандожко А. В. ВОПРОСЫ БАЛАНСИРОВКИ ШПИНДЕЛЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА.....	169
Муховатый А. А. РАЗРАБОТКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ СИНТЕЗА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПО НЕСКОЛЬКИМ КОМПЛЕКСНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ РАБОТОСПОСОБНОСТИ.....	174
Перинская Е. В. РАСШИРЕНИЕ ПАКЕТА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРО- ЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ.....	182
Плохов И. В., Савраев И. Е., Козырева О. И. СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА.....	186
Полуянович Н. К., Дубяго М. Н., Качелаев О. В. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ МАШИНОСТРОЕНИЯ.....	191
Прилуцкий М. И. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ.....	197
Репневская М. С., Лахин А. М. ПРИНЦИП АВТОМАТИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ И КАК ЭТО РАБОТАЕТ ДЛЯ СОТРУДНИКОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ИТР.....	203
Сенникова Л. Ф., Гангало А. Н., Волкова Г. К., Ткаченко В. М., Токий Н. В., Яшарова Е. В., Климова Е. Х. ВЛИЯНИЕ ГИДРОЭКСТРУЗИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ МЕДИ.....	209
Скаженик В. Б., Чернышенко И. В., Шестопалов И. Н., Фомичёв В. И. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ И НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕФТЕШАХТЫ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	214

Скворцов А. И. ОСОБЕННОСТИ АМПЛИТУДНОЙ ЗАВИСИМОСТИ И СТРУКТУРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЦИРКОНИЯ	218
Соловьев Г. И., Чуяшенко С. В. О НОВОМ СПОСОБЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ГЛУБОКИХ ШАХТ ДОНБАССА.....	221
Сулименко А. С., Сулименко Д. С., Цымбалов Д. С., Яценко О. В. КИНЕТИКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОТОПЛИВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРЕЛКАХ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ.....	229
Сулименко Д. С., Сулименко А. С., Степаницын А. С., Цымбалов Д. С., Бедоидзе М. В. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ИМИТАЦИЯ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ.....	234
Тарабаев А. А., Тарабаева И. В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО МОМЕНТНОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ ДЛЯ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ.....	240
Ткаченко В. М., Сапронов А. Н. СТРУКТУРА И ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....	245
Хандожко А. В., Щербаков А. Н., Капустин В. В., Федонина С. О., Лакалина Н. Ю. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕМОНТЕ ПОДШИПИНИКОВЫХ ОПОР СОВРЕМЕННЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	250
Шипко М. Н., Помельникова А. С., Степович М. А., Комин В. Г. ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПОД ВЛИЯНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	257
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A.A., Bendik T.I., Sereda V.Yu., Astashinsky V. M. OBTAINING OPTIMAL MODES FOR THE FORMATION OF PLASMA COATINGS BASED ON CERAMICS AND NICKEL-CHROMIUM-ALUMINUM- YTTRIUM ALLOYS.....	259
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A. A., Bendik T.I., Sereda V.Yu., Astashinsky V. M. TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF COMPRESSION PLASMA TREATMENT OF COATINGS FROM MULTIFUNCTIONAL CERAMICS.....	264

Prihodchenko K. I., Kaverina O. G.

THE HIGHER SCHOOL AS THE TRAINING CENTER OF THE HARMONIOUSLY
DEVELOPED PERSONALITY OF A STUDENT..... **268**

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрамов А. Г.	60	Криуша С. М.	112
Азарова Н. В.	20	Лазебная Л. А.	77, 128
Анастасьев А. В.	27	Лакалина Н. Ю.	250
Анастасьева В. А.	27	Лапаева И. В.	77
Аноприенко А. Я.	6	Ларшин В. В.	132
Байков А. В.	142	Лахин А. М.	142, 203
Баранов А. В.	31	Лоскутникова И. Н.	36
Бедоидзе М. В.	36, 42, 234	Майстришин М. М.	46
Бохонский А. И.	46	Малеев В. Б.	93
Бутенко В. И.	51, 55	Мельникова Е. П.	60
Быков В. В.	60	Михайлов А. Н.	146, 152, 158
Витренко В. А.	63	Мищенко Т. П.	165
Волков А. Ф.	68	Мозоленко В. А.	169
Волкова Г. К.	209	Мороз О. К.	104
Воронцов И. Б.	63	Мороз Т. О.	104
Гангало А. Н.	209	Муховатый А. А.	174
Глушко В. Ю.	146	Огренич Д. В.	152
Горобец И. А.	72, 77	Осипенко Р. М.	132
Гусев Е. Л.	81	Павлов К. А.	31
Гутаревич В. О.	85, 165	Перинская Е. В.	182
Дубяго М. Н.	191	Пичко Н. С.	27, 152
Егоров Н. Т.	89	Плохов И. В.	186
Ефимов А. А.	63	Поезд С. А.	20
Жабровец А. И.	93	Полуянович Н. К.	191
Жарких Д. С.	152	Помельникова А. С.	257
Зензеров В. И.	100	Прилуцкий М. И.	197
Игнаткина Е. Л.	123	Рак А. Н.	165
Кавальчук О. Н.	112	Рахманов А.	42
Каврук А. К.	125	Репневская М. С.	203
Кадач Р. Г.	51	Рудницкий А. В.	20
Калугина С. В.	85	Рыжков А. И.	46
Калякин С. А.	104	Савраев И. Е.	186
Капустин В. В.	250	Сапронов А. Н.	245
Кардаполова М. А.	112	Сенникова Л. Ф.	209
Качелаев О. В.	191	Сидоренко В. А.	93
Киселица Д. О.	152	Скаженик В. Б.	214
Климова Е. Х.	209	Скворцов А. И.	218
Козырева О. И.	186	Соловьев Г. И.	221
Колесников В. М.	72	Степаницын А. С.	36, 42, 234
Коломойцева И. А.	118	Степович М. А.	257
Комин В. Г.	257	Стоянов А. А.	63
Костенко А. В.	123, 125	Сулименко А. С.	36, 42, 229, 234
Косякова И. М.	112	Сулименко Д. С.	36, 42, 229, 234
Котляров Б. С.	158	Тарабаев А. А.	240
Котляров В. Б.	158	Тарабаева И. В.	240
Котляров С. Б.	158	Ткаченко В. М.	209, 245
Креселюк Ю. В.	63	Токий Н. В.	209

Федонина С. О.	250
Федоров Ю. Ю.	81
Фомичёв В. И.	214
Хандожко А. В.	169, 250
Холодова С. Н.	36
Цокур В. П.	20
Цымбалов Д. С.	229, 234
Черных В. Д.	81
Чернышенко И. В.	214
Чуяшенко С. В.	221
Шамрай Ю. А.	93
Шестопалов И. Н.	214
Шипко М. Н.	257
Щедрин С. В.	118
Щербаков А. Н.	250
Яценко О. В.	229
Яшарова Е. В.	209
Astashinsky V. M.	259, 264
Bendik T.I.	259, 264
Devoino O. G.	259, 264
Kaverina O. G.	268
Litvinko A. A.	259, 264
Okovity V. A.	259, 264
Okovity V. V.	259, 264
Panteleenko F. I.	259, 264
Prihodchenko K. I.	268
Sereda V.Yu.	259, 264

**XXXIII 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: mntk21@mail.ru
Ответственный редактор *Д. В. Огренич*

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: Россия, 283001, ДНР, г. Донецк, ул. Артема, 58, ФГБОУ ВО «ДонНТУ»,
тел. +7 (856) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: Россия, 283001, ДНР, ул. Артема, 58, тел.+ 7 949 306-08-79,
+7 (856) 301-08-05. E-mail: mntk21@mail.ru . Сайт: <http://konf-sev.donntu.ru>

Подписано к печати 28.06.2026 г.
Формат 60х84^{1/16}. Бумага Maestro.
Гарнитура «Times New Roman». Печать лазерная.
Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 17,50. Тираж 300 экз.

Отпечатано в рекламно-издательском отделе учредителя
РИО «Донецкая политехника»
Адрес: г. Донецк, ул. Артема, 58
Тел.: +7 (856) 301-09-67