

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи



Криворогова Анастасия Сергеевна

**ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО
НАПЫЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ**

2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2025

Работа выполнена в лаборатории порошковых и композиционных материалов ФГБУН Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор, **Гельчинский Борис Рафаилович**

Официальные оппоненты: **Дёма Роман Рафаэлевич**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения;

Коробов Юрий Станиславович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной и плазменной обработки;

Пыкин Юрий Анатольевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры физико-химической технологии защиты биосферы.

Защита состоится 30 октября 2025 года в 14-30 на заседании диссертационного совета УрФУ 2.5.06.15 по адресу: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=7517>

Автореферат разослан _____
Ученый секретарь
диссертационного совета

Марина Юрьевна Булганина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время алюминиевые сплавы широко используются для производства деталей и механизмов различных устройств благодаря своей надежности и стойкости к коррозии. Однако интенсивный износ может привести к нарушению нормального функционирования компонентов в узлах трения, что может вызывать дополнительную нагрузку, удары и вибрацию в соприкасающихся частях, а это, в свою очередь, может стать причиной неожиданных поломок. Поэтому существует настоятельная необходимость разработки и внедрения новых технологий, которые позволили бы восстанавливать изношенные элементы до стандартных размеров, таким образом увеличивая их срок службы. При этом важно, чтобы затраты на восстановление были экономически выгодными по сравнению с расходами на изготовление и поставку новых запасных частей. Следовательно, повышение износостойкости алюминиевых сплавов представляет собой актуальную задачу в данной области.

Степень разработанности темы. Для поверхностного упрочнения деталей, изготовленных из алюминия и его сплавов, используются такие методы, как газотермическое напыление, металлизация, вакуумное осаждение, конденсация, наплавка, микродуговое оксидирование и другие. Недостатками этих методов являются: пониженная адгезия (термическое напыление); формирование хрупкой прослойки интерметаллидов, по которой может осуществляться разрушение поверхностного слоя (наплавка); низкие значения толщины покрытий (10–100 мкм) (микродуговое оксидирование). Одним из наиболее перспективных методов нанесения покрытий является плазменное напыление, основные достоинства которого: доступность и экономичность, высокая производительность процесса, использование различных материалов для нанесения высококачественных покрытий, а также возможность комплексной механизации и автоматизации процесса. Следует отметить, что этот метод также не лишен недостатков, к которым относятся: наличие пористости и других видов несплошностей (2–15 %), невысокие значения адгезионной и когезионной прочности покрытий (80–100 МПа), высокий уровень громкости звука при открытом ведении процесса (60–120 дБ). Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой предлагается метод сверхзвукового плазменного напыления.

Для нанесения газотермических покрытий широко используются самофлюсующиеся сплавы, которые характеризуются низкими температурами плавления (950–1150 °С), высокой смачиваемостью, широким спектром эксплуатационных характеристик (жаростойкостью, жаропрочностью, износостойкостью и коррозионной стойкостью),

близостью теплофизических характеристик основного и наплавляемого материалов. Эти свойства обеспечивают технологичность самофлюсующихся сплавов по сравнению с другими материалами, используемыми для нанесения покрытий на изделия из алюминия и его сплавов. Наличие в составе сплавов флюсующих элементов (бора и кремния) повышает скорость протекания диффузионных процессов на границе фаз и обеспечивает защиту наносимого покрытия от окисления.

В настоящее время известен ряд работ по проблемам нанесения газотермических покрытий, которые выполнены в Уральском федеральном университете им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институте машиноведения УрО РАН, Институте металлургии имени академика Н.А. Ватолина УрО РАН, Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Институте порошковой металлургии им. академика О.В. Романа (г. Минск, Беларусь) и во многих других отечественных и зарубежных организациях. Следует отметить, что большая часть публикаций посвящена в основном нанесению покрытий из самофлюсующихся материалов на стальные подложки и их исследованию. В литературе описаны немногочисленные результаты о нанесении данных покрытий на подложки из алюминия и его сплавов методами детонационного напыления, наплавки, высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF/HVAF) и практически нет данных о нанесении покрытий из самофлюсующихся материалов на подложки из алюминия и его сплавов методами до- и сверхзвукового плазменного напыления.

Цель работы – научное обоснование технологии формирования порошковых покрытий системы Ni–Cr–B–Si–C методами плазменного напыления для восстановления и упрочнения поверхности изделий из алюминиевого сплава АК7ч.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Термодинамическое моделирование поведения самофлюсующихся материалов на основе никеля в атмосфере различных плазмообразующих газов в широком интервале температур.

2. Моделирование теплофизических процессов взаимодействия плазменной струи с порошковым материалом, процесса формирования структуры нанесенного покрытия и напряженно-деформированного состояния в системе покрытие – подложка.

3. Выбор оптимальных технологических параметров нанесения покрытий из самофлюсующихся порошковых материалов на основе никеля на подложки из сплава АК7ч методами до- и сверхзвукового плазменного напыления с использованием результатов компьютерного моделирования.

4. Исследование структуры, физико-химических, физико-механических и функциональных характеристик порошковых материалов системы Ni–Cr–B–Si–C и покрытий на их основе.

5. Восстановление поверхности крыльчатки рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100 методом плазменного напыления.

6. Оценка экономической эффективности применения плазменного напыления для повышения прочностных характеристик поверхности крыльчатки рабочего колеса насоса НЦПН-40/100.

Научная новизна работы заключается в комплексном исследовании функциональных свойств порошковых материалов системы Ni–Cr–B–Si–C и покрытий на их основе для оптимизации технологических режимов нанесения износостойких и коррозионностойких покрытий на детали их алюминиевых сплавов. Автором впервые получены следующие основные результаты:

1. С использованием методики термодинамического моделирования установлено, что распределение компонентов конденсированной и газовой фаз, образующихся при нагревании порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4, существенно зависит от исходного содержания порошкового материала в рабочем теле и состава плазмообразующего газа. По результатам компьютерного моделирования теплофизических процессов взаимодействия плазменной струи с порошковым материалом рекомендованы оптимальные технологические режимы напыления.

2. Получены лабораторные образцы порошковых покрытий на подложках из алюминиевого сплава АК7ч. Установлено, что твердость образцов с покрытиями на основе ПГСР-2 и ПГСР-4, полученными при до- и сверхзвуковом режимах напыления, превышает твердость материала подложки в 14–20 раз. Наиболее высокая твердость, которая превышает значение твердости подложки в 24 раза, наблюдается у покрытия ПГСР-2, нанесенного при сверхзвуковом режиме напыления. Значения микротвердости покрытий, в среднем, в 15 раз больше значений микротвердости основы.

3. Выявлено, что при механической деформации разрушение образцов происходит путем адгезионно-когезионного растрескивания в напыленном слое. Для изделий, подвергающихся механическим деформациям в результате незначительных ударов, перегибов, сжатий, рекомендуемая толщина напыленного слоя составляет 0,13–0,14 мм.

4. Установлено, что износ алюминиевого сплава АК7ч и образцов с покрытиями ПГСР-2 и ПГСР-4, нанесенными при до- и сверхзвуковом режимах напыления, испытанными в режиме сухого трения значительно ниже износа в режиме с добавлением смазки (воды).

5. Установлено, что покрытия на основе порошковых самофлюсующихся материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 обладают высокой

коррозионной стойкостью и, следовательно, могут быть использованы при работе в агрессивных средах.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты термодинамического моделирования позволяют определить равновесный состав и термодинамические характеристики самофлюсующихся порошковых материалов Ni–Cr–B–Si–C в широком интервале температур в атмосфере различных плазмообразующих газов. Компьютерное моделирование теплофизических процессов взаимодействия плазменной струи с порошковым материалом позволяет оптимизировать траекторию и скорость движения порошковых частиц в плазменной струе до столкновения с подложкой, определить характер изменения температуры в центре частицы при ее движении вдоль оси плазменной струи, рассчитать фронт испарения порошковых частиц в зависимости от дистанции напыления, оценить топологию поверхностей и пористость газотермических покрытий.

Полученные результаты использованы для разработки новых технологических приемов модифицирования (восстановления и упрочнения) деталей из сплава АК7ч, позволяющих получать покрытия с высокими эксплуатационными свойствами. Проведено восстановление поверхности крыльчатки рабочего колеса насоса НЦПН-40/100. Показано, что рассчитанный ожидаемый экономический эффект составляет порядка 200 тыс. рублей на одно рабочее колесо. Получены акты внедрения от 9 ПСЧ 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления МЧС России по Свердловской области и от ООО НПФ «УМГ» (Челябинская область) и акт промышленных испытаний от ООО НПФ «УМГ».

Объект исследования – покрытия, нанесенные методом плазменного напыления порошковых самофлюсующихся материалов на основе никеля: Ni–0,5C–15Cr–3,2Si–2B (ПГСП-2) и Ni–1C–17Cr–4,1Si–3,6B (ПГСП-4) – на подложки из алюминиевого сплава АК7ч.

Предмет исследования – физико-химические, физико-механические и функциональные свойства покрытий, полученных плазменным напылением.

Методы исследования. Научные исследования проведены с привлечением современных методов и с использованием сертифицированных и поверенных приборов и средств измерений: компьютерное моделирование; металлографический анализ; рентгеновский фазовый анализ (РФА); сканирующая электронная микроскопия (СЭМ); синхронный термический анализ (СТА); определение твердости и микротвердости по Виккерсу; испытания на трехточечный изгиб; трибологические испытания в режиме сухого трения и трения со смазкой; оценка коррозионных свойств покрытий в камере соляного тумана; щуповой метод испытания поверхности на шероховатость.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты термодинамического моделирования самофлюсующихся порошковых материалов на основе никеля ПГСР-2 и ПГСР-4.

2. Результаты компьютерного моделирования теплофизических процессов взаимодействия плазменной струи с порошковым материалом, формирования структуры нанесенного покрытия и напряженно-деформированного состояния в системе покрытие – подложка.

3. Выбор оптимальных технологических параметров нанесения покрытий с использованием результатов компьютерного моделирования.

4. Результаты исследования структуры и физико-химических характеристик порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 и покрытий на их основе.

5. Результаты исследования физико-механических и функциональных свойств порошковых покрытий, полученных методами до- и сверхзвукового плазменного напыления.

6. Технологии восстановления и упрочнения поверхности крыльчатки рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100. Расчет экономической эффективности.

Достоверность результатов исследования подтверждается большим объемом расчетных и экспериментальных данных, полученных с использованием апробированного программного обеспечения, современных методов изучения структуры и фазового состава, механических и функциональных свойств покрытий, а также поверенных приборов и средств измерений, испытательного оборудования. Полученные результаты, приведенные в диссертационной работе, не противоречат известным литературным данным и научным представлениям.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследования представлены на российских и международных конференциях: International Conference JEER – 2016, 23–25 марта 2016 г., Париж, Франция; 17th Israeli-Russian bi-national Workshop, 13–14 августа 2018 г., Москва; 16th IUPAC High Temperature Material Chemistry Conference (НТМС-ХVI), 2–6 июля 2018 г., Екатеринбург; Дни науки с международным участием «Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации», 27–31 мая 2019 г., Екатеринбург; 12-й Международный симпозиум «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», 7–9 апреля 2021 г., Минск, Беларусь; 15-я Международная конференция «Пленки и покрытия – 2021», 18–25 мая 2021 г., Санкт-Петербург; Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2021), 6–10 сентября 2021 г., Севастополь; XXIII International

Conference on Chemical Thermodynamics in Russia, 22–27 августа 2022 г., Казань; Международная научная конференция «Физико-химические основы металлургических процессов» имени академика А.М. Самарина (ФХОМП)», 10–14 октября 2022 г., Выкса; Всероссийская научно-практическая конференция «Научные аспекты техносферной безопасности – 2023», 5–7 октября 2023 г., Санкт-Петербург; XX Международная научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия», 17–18 октября 2023 г., Москва; 14–16-е международные конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка», 2021–2024 гг., Минск, Беларусь.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 34 работах, из них 7 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе, 6 в изданиях, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus; 1 патент РФ на изобретение; 19 статей в других научных журналах и трудах конференций, 7 тезисов докладов.

Личный вклад соискателя. Диссертант принимал активное участие в планировании и постановке экспериментов, подготовке образцов, нанесении покрытий методами до- и сверхзвукового плазменного напыления. Диссертантом проведено термодинамическое моделирование и моделирование теплофизических процессов, выполнены исследования механических и функциональных свойств покрытий, расчет экономической эффективности. Анализ и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Соответствие паспорту научной специальности. Тема и содержание диссертационной работы полностью соответствуют паспорту научной специальности **2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы** в части пунктов:

3. Теоретические и экспериментальные исследования физических и химических процессов нанесения покрытий в контролируемой среде и вакууме, разработка технологии и оборудования.

4. Теоретические и экспериментальные исследования процессов взаимодействия потоков заряженных и нейтральных частиц с поверхностью материалов и композитов. Получение новых материалов с высокими физико-механическими и физико-химическими характеристиками методами высокоэнергетической консолидации с помощью потоков заряженных и нейтральных частиц. Разработка технологии и оборудования.

5. Изучение структуры и свойств порошковых, композиционных материалов, покрытий и модифицированных слоев на полуфабрикатах и изделиях, исследование процессов направленной кристаллизации изделий

из порошковых и композиционных материалов, разработка технологий и оборудования.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, 6 приложений. Общий объем работы составляет 161 страницу и включает 44 рисунка, 23 таблицы, список литературы, состоящий из 166 наименований.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 20-21-00063 Росатом).

Автор выражает **глубокую признательность и благодарность:** научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Б.Р. Гельчинскому за всестороннюю помощь, поддержку и консультирование на всех этапах исследований и работы над диссертацией, кандидату химических наук, профессору О.В. Беззапонной за всестороннюю помощь, поддержку и консультирование на всех этапах исследования и работы над диссертацией, доктору технических наук Н.М. Барбину, кандидату технических наук С.А. Ильиных, кандидату физико-математических наук С.А. Петровой, научному сотруднику Е.В. Игнатевой, ведущему инженеру О.А. Королеву, кандидату химических наук А.В. Долматову, кандидату физико-математических наук Н.И. Ильиных, кандидату химических наук Т.В. Куликовой, кандидату физико-математических наук В.А. Быкову, младшему научному сотруднику Т.В. Осинкиной, кандидату физико-математических наук А.Н. Петровой за помощь в проведении экспериментальных и теоретических исследований в ИМЕТ УрО РАН, ИФМ УрО РАН, Уральском институте ГПС МЧС России.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, поставлены цель и задачи диссертационной работы, представлены сведения о научных результатах и практической значимости исследования.

В **первой главе** выполнен анализ научных и практических результатов изученности вопроса. Показано, что инженерия поверхности с использованием методов газотермического напыления позволяет изменить физико-химические и физико-механические свойства поверхностных слоев материалов путем модифицирования или посредством нанесения функциональных покрытий различными методами, а также позволяет проводить реновацию изношенных в процессе эксплуатации поверхностей деталей машин и механизмов. Для поверхностного упрочнения деталей, напыления и наплавки коррозионностойких покрытий, а также покрытий, устойчивых к изнашиванию трением и абразивными частицами, широко используются самофлюсующиеся сплавы на основе никеля Ni–Cr–B–Si–C. Выявлено, что в литературе практически нет данных о применении

покрытий из самофлюсующихся материалов на подложки из сплавов алюминия, в частности, на детали пожарной техники.

Во *второй главе* описаны методы исследования. Термодинамическое моделирование исследуемых систем проведено использованием программного комплекса TERRA. Моделирование теплофизических и динамических процессов, протекающих на различных стадиях плазменного напыления покрытий, выполнено с использованием программного комплекса Plasma 2002. Результаты моделирования были использованы при проведении лабораторных экспериментов по разработке технологии нанесения покрытий из самофлюсующихся материалов на подложки из алюминиевого сплава АК7ч.

Для нанесения покрытий использована многофункциональная плазменная установка МАК-100 (МПУ МАК-100), разработанная в ИМЕТ УрО РАН, позволяющая осуществлять до- и сверхзвуковое плазменное напыление.

Структурные исследования были проведены с использованием металлографического инвертированного микроскопа Olympus GX51 и программного обеспечения SIAMS Photolab в ЦКП «Урал М» ИМЕТ УрО РАН. Фотографии порошков ПГСП-2 и ПГСП-4 сделаны с помощью стереомикроскопа Meiji techno серии EMZ. Фазовый состав образцов определен методом порошковой рентгеновской дифракции при комнатной температуре (298 К) на дифрактометре D8 ADVANCE (Cu-K α -излучение, 40 kV, 40 mA, позиционно-чувствительный детектор VANTEC-1, β -фильтр). Фазовый анализ проведен с использованием программного пакета DIFFRACplus: EVA и базы данных Международного центра дифракционных данных (ICDD) PDF4 (Release 2021). Полнопрофильный анализ по методу Ритвельда выполнен с использованием программы TOPAS. Синхронный термический анализ (СТА) проведен с использованием прибора Netzsch STA 449 F5 Jupiter®.

Для исследования физико-механических свойств покрытий были использованы отшлифованные до шероховатости 0,14–0,16 мкм образцы размером 25×15 мм. Определение твердости поверхности образцов по Виккерсу проведено в соответствии с ГОСТ 2999–75 с помощью прибора ИТ 5010. Величина нагрузки – 5 кгс (49,03 Н). Для определения микротвердости плазменных покрытий использован микротвердомер ПМТ-3. Адгезионно-когезионные испытания проведены на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z050. Исследования износостойкости покрытий выполнены на машине трения СМТ-1М модели 2070 по схеме неподвижная колодка (образец) – жесткий вращающийся диск (контртело) в соответствии с ГОСТ 23.208–79, ГОСТ 30479–97; ГОСТ 50740–95. Скорость вращения контртела составляла 200 об/мин, нагрузка на образец $P = 100$ Н. Оценка шероховатости поверхности покрытий и подложки проведена с использованием портативного измерителя шероховатости

TR200 (профилометра) при следующих условиях: базовая длина 2,5 мм, скорость перемещения датчика при измерении $V_t = 1$ мм/с. Коррозионная стойкость покрытий исследована в камере соляного тумана EVCLIM-KCT по стандартному испытательному тесту ASTM B117.

В *третьей главе* представлены результаты термодинамического моделирования поведения самофлюсующихся порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 в интервале температур 300–6000 К в атмосфере плазмообразующих газов: аргона, азота, воздуха и смесей «92 об. % воздух + 8 об. % пропан» при общем давлении $P = 10^5$ Па. Выявлено, что распределение компонентов конденсированной и газовой фаз существенно изменяется при варьировании исходного содержания порошкового материала в рабочем теле и состава плазмообразующего газа.

С использованием программного комплекса Plasma 2002 рассчитаны траектории движения частиц порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 в струе плазмообразующего газа (воздух), изменения температуры в центре частиц порошка при их движении вдоль оси плазменной струи, изменения фронта испарения порошковых частиц в зависимости от дистанции напыления, проведено моделирование структуры покрытий. Подобраны параметры ввода частиц порошковых материалов в плазменную струю (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры ввода порошковых материалов в плазменную струю

Порошковый материал	ПГСП-2			ПГСП-4		
Размер частиц, мкм	40	60	80	40	60	80
Скорость ввода, м/с	9,50	4,52	3,27	8,45	5,2	3,75
Координаты ввода относительно оси плазмотрона:						
х, мм	3	3	3	3	3,0	3,0
у, мм	–2,5	–1,5	–1,5	–2,0	–2,0	–2,0

С учетом результатов компьютерного моделирования на МПУ МАК-100 проведено плазменное напыление порошковых материалов системы Ni–Cr–B–Si–C, отработаны технологические параметры нанесения покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4 на лабораторные образцы из алюминиевого сплава АК7ч размером 60×16×2 мм:

- *дозвуковой режим напыления*: плазмообразующие газы – воздух, смесь газов (90 % воздух + 10 % пропан), рабочий ток 120–150 А, напряжение 250–300 В, давление газа 0,2–0,4 МПа, расстояние до образца 150–200 мм, скорость плазменного потока 200–270 м/с;
- *сверхзвуковой режим напыления*: состав плазмообразующего газа (90 % воздух + 10 % пропан), рабочий ток 150 А, напряжение 300 В, давление газа 0,6 МПа, расстояние до образца 200–300 мм, скорость плазменного потока 1200–1500 м/с.

В *четвертой главе* проведено исследование структуры, физико-химических, механических и функциональных свойств самофлюсующихся порошковых материалов системы Ni–Cr–B–Si–C и покрытий на их основе.

Анализ микроструктур (п. 4.1) показывает, что порошки ПГСП-2 и ПГСП-4 имеют сферическую форму частиц со структурой литого состояния материала, размер частиц 40–100 мкм. Покрытия на основе ПГСП-2 и ПГСП-4, нанесенные при до- и сверхзвуковом режимах напыления, являются микроструктурно однородными по всей толщине нанесенного слоя. Покрытия ПГСП-4 имеют более высокую пористость по сравнению с покрытиями из ПГСП-2.

Согласно результатам РФА (п. 4.2), в порошковых материалах ПГСП-2 и ПГСП-4 присутствуют соединения $\text{Cr}_{9,5}\text{Ni}_{12,5}\text{Si}_7$, Ni_7B_3 , $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$, Ni_3B , CrB . При до- и сверхзвуковом режимах плазменного напыления формируются покрытия со сложным фазовым составом, включающим в себя карбиды, силициды, бориды и некоторые тройные соединения (таблица 2), которые существенно влияют на физико-химические и механические свойства порошковых покрытий.

Таблица 2 – Фазовый состав покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4 (до- и сверхзвуковой режимы плазменного напыления)

№	Фаза	ПГСП-2, масс. %		ПГСП-4, масс. %	
		Дозвук.	Сверхзвук.	Дозвук.	Сверхзвук.
1	$\text{Cr}_{0,6}\text{Ni}_{0,4}\text{Si}$	6,92	2,81	5,96	7,7
2	$\text{Cr}_{0,7}\text{Ni}_{0,3}$	–	14,38	9,85	12,7
3	Cr_{23}C_6	12,83	6,65	5,58	4,8
4	CrB	–	3,49	4,68	3,5
5	CrSi	3,97	–	2,79	5,2
6	Ni_2B	6,19	6,95	5,82	6,0
7	Ni_3B	18,45	14,99	26,88	24,9
8	Ni	27,14	26,64	17,55	16,8
9	NiSi	6,61	3,50	2,54	3,1
10	Cr_3C_2	13,17	10,11	11,87	10,6
11	CrSi_2	4,72	5,91	6,47	4,7
12	Al	–	4,56	–	–

Анализ результатов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (п. 4.3) показывает, что поверхности всех покрытий являются однородными с небольшим количеством пор, что согласуется с результатами металлографических исследований (рисунок 1).

Анализ энергодисперсионных рентгеновских спектров позволяет определить качественный и количественный химический состав исследуемых образцов. Усредненные значения содержания элементов представлены в таблице 3. Полученные результаты хорошо согласуются с данными завода-производителя АО «ПОЛЕМА».

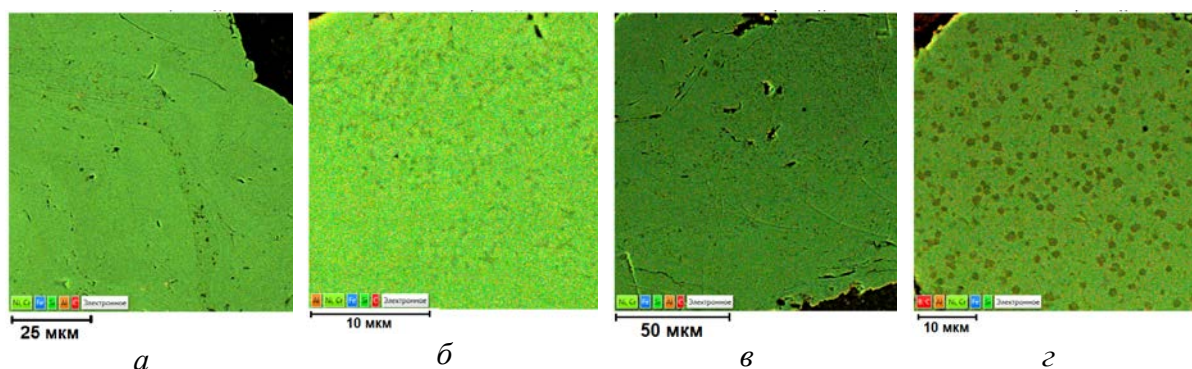


Рисунок 1 – Многослойное изображение ЭДС шлифов поверхностей образцов с покрытиями ПГСР-2 (*а, б*) и ПГСР-4 (*в, з*), нанесенными в режиме дозвукового (*а, в*) и сверхзвукового (*б, з*) плазменного напыления

В связи с ограничениями по чувствительности СЭМ к определению легких элементов выявление углерода и бора было затруднено, поэтому в таблице 3 содержание углерода не представлено, а содержание бора было установлено только для некоторых спектров.

Таблица 3 – Содержание элементов в покрытиях ПГСР-2 и ПГСР-4

Покрытие	Элемент, вес. %					
	Ni	Si	Cr	B	Fe	Al
ПГСР-2 дозвук.	75,37	3,74	15,89	–	4,49	0,51
ПГСР-2 сверхзвук.	72,94	3,45	16,37	2,85	4,39	–
ПГСР-4 дозвук.	71,8	4,4	19,0	–	4,2	0,6
ПГСР-4 сверхзвук.	67,8	4,2	18,3	5,0	4,1	0,6

Методом синхронного термического анализа (СТА) определены температуры солидус, ликвидус и фазовых превращений порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 (**п. 4.4**). Начало плавления образца ПГСР-2 (рисунок 2*а*) характеризуется эндотермическим пиком при 1005,4 °С (температура солидус), при температуре 1050 °С начинается плавление более тугоплавких соединений. Плавление порошкового материала заканчивается при 1213,4 °С (температура ликвидус). Кристаллизация расплава начинается при температуре 1187,5 °С, заканчивается при температуре 960,3 °С. Начало плавления ПГСР-4 (рисунок 2*б*) характеризуется пиком при 956,2 °С. Плавление более тугоплавких фаз начинается при температуре 1010,4 °С, заканчивается при $t = 1181,0$ °С. Кристаллизация расплава протекает в интервале температур 1115,2 °С (начало кристаллизации) – 957,8 °С (завершение). Наличие пиков на кривых нагрева и охлаждения может быть обусловлено образованием фаз (в частности, Ni_3B , Ni_2B , NiB , $Ni_{31}Si_{12}$, Ni_2Si и $NiSi$), протеканием эвтектических, перитектических или монотектических реакций.

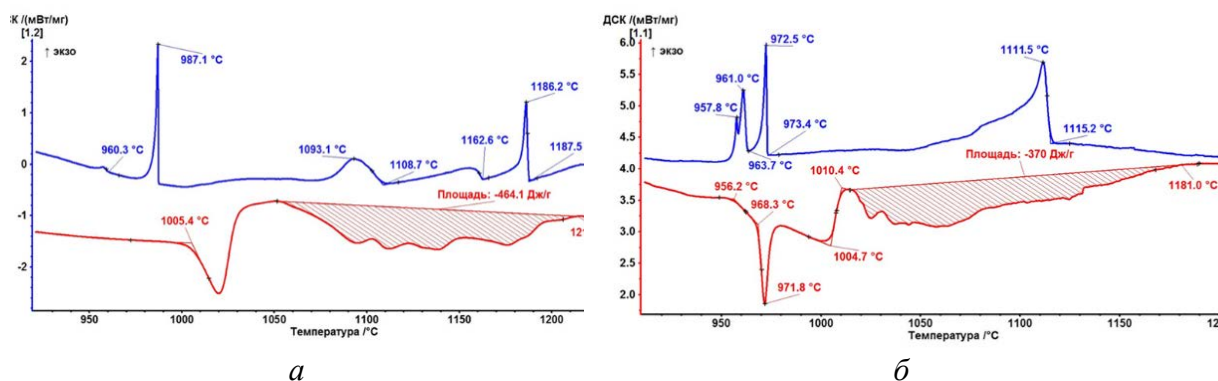


Рисунок 2 – Термограммы порошковых материалов ПГСР-2 (а) и ПГСР-4 (б)

Сравнение результатов термического анализа с известными литературными данными показывает, что имеются некоторые расхождения. Так, в частности, по данным, приведенным в справочнике «Газотермические покрытия из порошковых материалов»¹, температуры плавления ПГСР-2 и ПГСР-4 составляют 1050 °C и 990 °C соответственно. Согласно данным АО «ПОЛЕМА», для обоих порошков $t_{пл} = 1025$ °C. Такое расхождение может быть обусловлено содержанием примесей алюминия и железа, присутствующих в исследуемом нами материале, в то время как в эталонном порошке такие примеси отсутствуют.

В п. 4.5 представлены результаты исследования физико-механических свойств покрытий. В таблице 4 приведены средние значения твердости подложки и покрытий. Образцы с покрытиями на основе ПГСР-2 и ПГСР-4, полученными как при дозвуковом, так и при сверхзвуковом режимах напыления, в 14–20 раз превосходят по твердости материал подложки. Наиболее высокая твердость, которая превышает значение твердости подложки в 24 раза, наблюдается у покрытия ПГСР-2, полученного при сверхзвуковом режиме напыления.

Таблица 4 – Результаты измерений твердости покрытий

Образец	Среднее значение твердости, НВ
Подложка (АК7ч)	29,7
ПГСР-2, дозвуковой режим напыления	422,2
ПГСР-2, сверхзвуковой режим напыления	735,4
ПГСР-4, дозвуковой режим напыления	450,8
ПГСР-4, сверхзвуковой режим напыления	486,8

Значения микротвердости покрытий ПГСР-2 и ПГСР-4 варьируются от 372 до 1144 НВ. При этом уровень микротвердости покрытий ПГСР-2 и ПГСР-4, в среднем, в 15 раз превышает микротвердость основы.

¹ Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов и др. Киев: Наукова Думка, 1987. 544 с.

На границе покрытие – подложка значения микротвердости варьируются в пределах 139–297 HV, что в 3–6 раз превышает значение микротвердости основы.

Следует отметить, что значения твердости и микротвердости в различных точках поверхности образцов имеют большой разброс (рисунок 3). Это, вероятно, обусловлено тем, что покрытия имеют сложный фазовый состав, что подтверждается результатами металлографического анализа, РФА, СЭМ и СТА.

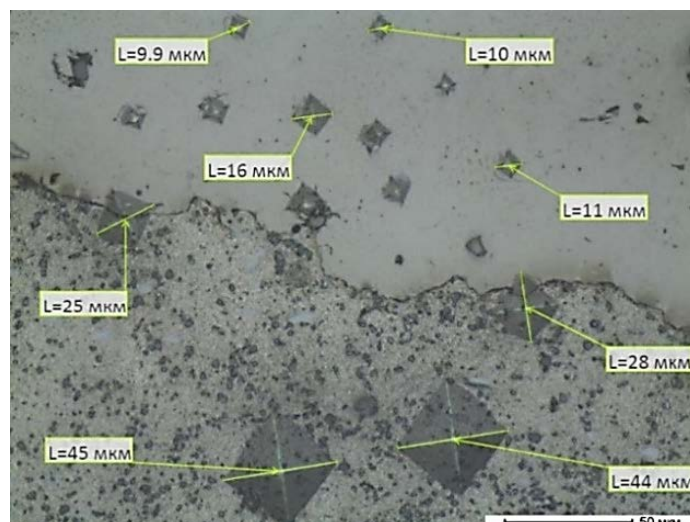


Рисунок 3 – Изображение отпечатков измерений микротвердости покрытия ПГСР-2, сверхзвуковой режим напыления

Проведено исследование системы покрытие – подложка на трехточечный изгиб для образцов покрытий ПГСР-2 и ПГСР-4, полученных при до- и сверхзвуковых режимах напыления. Построены диаграммы нагружения (рисунок 4), на которых выделены области, соответствующие отдельным этапам деформации и разрушения образцов с покрытиями различной толщины: область упругой деформации, момент образования первой трещины, область развития сети трещин.

Выявлено, что разрушение образцов происходит путем адгезионно-когезионного растрескивания. Анализ микроструктур образцов показывает, что разрушение образца происходит в напыленном слое. Так как подложка является пластичным материалом, а покрытие – хрупким, то при деформации целостность подложки не нарушается, однако покрытие растрескивается.

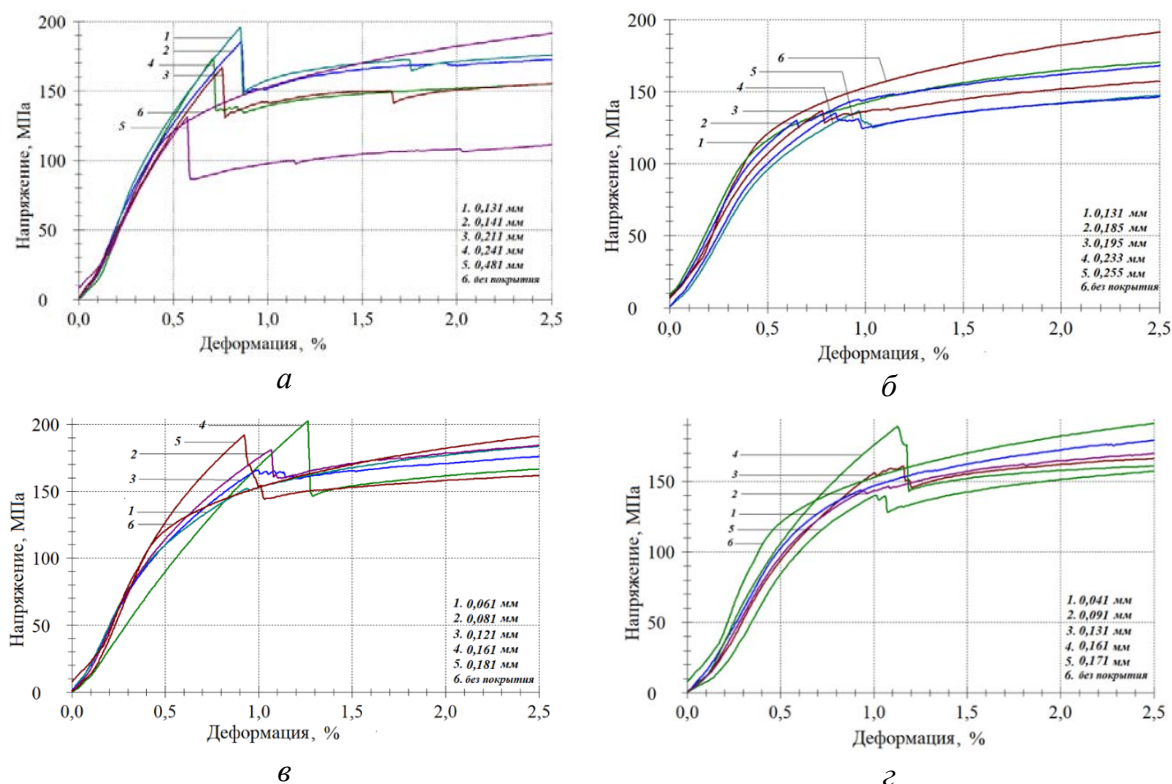


Рисунок 4 – Диаграммы напряжение – деформация серий образцов с покрытиями ПГСП-2 (а, в) и ПГСП-4 (б, г) различной толщины, полученными при дозвуковом (а, б) и сверхзвуковом режимах напыления (в, г)

Для изделий, подвергающихся механическим деформациям в результате незначительных ударов, перегибов, сжатий, рекомендуемая толщина напыленного слоя составляет 0,13–0,14 мм. Для образцов, которые не подвергаются механическим деформациям либо эти деформации пренебрежимо малы, можно наносить покрытия из самофлюсующихся порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 с толщинами более 0,14 мм.

П. 4.6 посвящен исследованию функциональных свойств покрытий. Проведены испытания износостойкости образцов алюминиевого сплава АК7ч без покрытий и с покрытиями из порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4, полученными при до- и сверхзвуковом режимах плазменного напыления, в условиях сухого трения и трения с применением смазки. В качестве смазки использовалась вода, скорость подачи воды – 45 капель в минуту (2,25 г в мин). Установлено, что износ алюминиевого сплава АК7ч и образцов с покрытиями ПГСП-2 и ПГСП-4, нанесенными при дозвуковом и сверхзвуковом режимах напыления, в режиме сухого трения значительно ниже износа в режиме с добавлением смазки (воды) (рисунок 5).

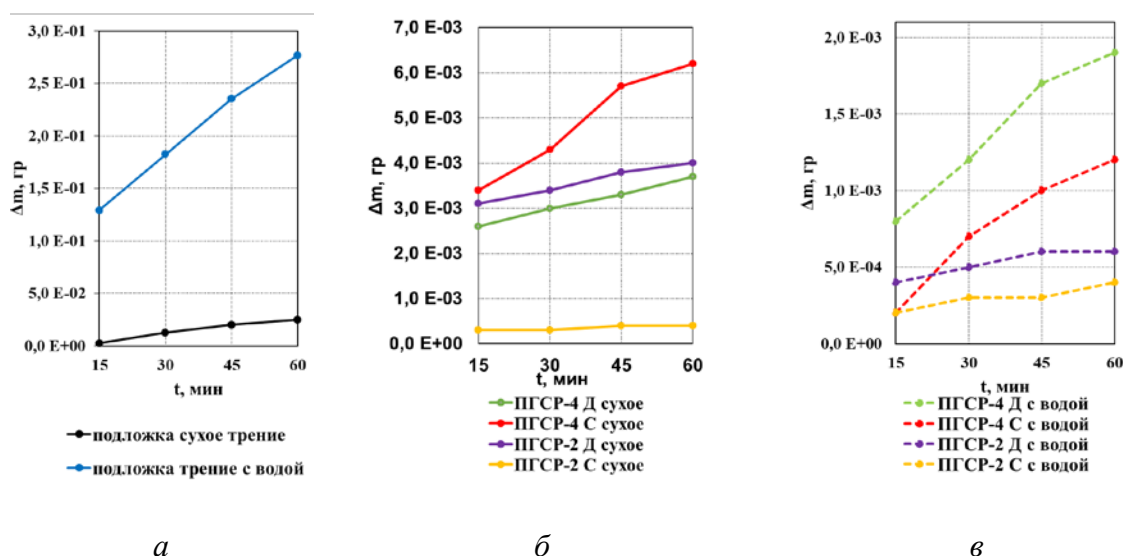


Рисунок 5 – Временные зависимости изменения массы образцов при испытаниях в режиме сухого трения и трения со смазкой: *а* – алюминиевый сплав (подложка); *б* и *в* – образцы с покрытиями

Исследование коррозионной стойкости образцов в камере соляного тумана EVCLIM-KCT по стандартному испытательному тесту ASTM B117 показывает, что покрытия на основе порошковых самофлюсующихся материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 обладают высокой стойкостью к коррозии и, следовательно, могут быть использованы при работе в агрессивных средах.

Анализ результатов исследования шероховатости образцов (таблица 5) показывает, что наименьшие значения параметров R_a , R_z и R_{max} наблюдаются для подложки, поскольку этот образец был исследован на шероховатость без предварительной дробеструйной обработки, наибольшие значения – для покрытия ПГСП-4, нанесенного при дозвуковом режиме напыления.

Таблица 5 – Результаты измерения шероховатости образцов

Образец	R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм
Подложка	0,41	1,94	4,9
ПГСП-2 дозвук.	5,1	23,45	34,1
ПГСП-2 сверхзвук.	6,4	26,7	37,5
ПГСП-4 дозвук.	8,2	31,01	44,5
ПГСП-4 сверхзвук.	6,2	26,6	38,2

После испытаний образцов на износ в режиме сухого трения получено, что шероховатость подложки существенно увеличивается: значения R_a , R_z и R_{max} увеличиваются в 8,1, 6,1 и 4,8 раз соответственно, а шероховатость всех покрытий уменьшается за счет истирания поверхностей образцов. Наименьшие значения этих параметров получены для образцов ПГСП-2 ($R_a = 0,7$ мкм, $R_z = 4,0$ мкм и $R_{max} = 8,9$ мкм) и ПГСП-4

($R_a = 1,5$ мкм, $R_z = 8,7$ мкм и $R_{max} = 25,0$ мкм), нанесенных при сверхзвуковом режиме напыления. После испытаний образцов в режиме трения со смазкой провести измерение шероховатости поверхности подложки не удалось из-за слишком глубокого износа, обусловленного «вымыванием» частичек образца с поверхности. Шероховатость всех образцов, как и в случае испытаний на износ в режиме сухого трения, уменьшается, при этом наименьшими значениями параметров $R_a = 2,3$ мкм, $R_z = 10,7$ мкм и $R_{max} = 19,0$ мкм характеризуются покрытия ПГСР-2, нанесенные в дозвуковом режиме напыления.

В *пятой главе* рассмотрены вопросы практической реализации и экономической эффективности результатов исследования. Проведен анализ причин износа и повреждения противопожарного оборудования и систем противопожарного водоснабжения, в частности, пожарных насосов.

Для нанесения порошковых покрытий использовалась МПУ МАК-100. Проведено восстановление и упрочнение поверхностей крыльчатки рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100. В качестве плазмообразующего газа использован сжатый воздух и смесь «воздух + 8–10 объемных % пропана». Для напыления покрытий были использованы порошковые самофлюсующиеся материалы на основе никеля ПГСР-2 и ПГСР-4. На рисунке 6 представлено сравнение изношенного и восстановленного колеса.



Рисунок 6 – Модифицирование рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100 с помощью МПУ МАК-100:

слева – изношенное колесо; *справа* – восстановленное методом плазменного напыления

Проведен расчет экономической эффективности проекта модернизации действующего пожарного насоса НЦПН-40/100. Показано, что надежность модернизированной методом плазменного напыления поверхности крыльчатки рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100 увеличивается минимум в пять раз. Рассчитанный экономический эффект составляет порядка 200 тыс. рублей на одно рабочее колесо. Срок окупаемости единовременных затрат на напыление лопаток составляет около одного месяца. Следовательно, проект модернизации рабочего колеса пожарного насоса с помощью плазменного напыления считается экономически обоснованным и может быть рекомендован к внедрению.

ВЫВОДЫ

1. Распределение компонентов конденсированной и газовой фаз, образующихся при нагревании ПГСР-2 и ПГСР-4, существенно изменяется при варьировании исходного содержания порошкового материала в рабочем теле и состава плазмообразующего газа.

2. Рассчитаны траектории движения частиц вдоль оси плазменной струи. Установлены параметры ввода частиц порошковых материалов в плазменную струю: начальная скорость подачи порошка, координаты ввода частиц относительно оси плазмотрона в зависимости от диаметра частиц. Показано, что частица подлетает к подложке в уже расплавленном состоянии, при этом несущественно теряет в объеме (частицы диаметром 40 мкм теряют до 25 % от первоначального размера, диаметром 60 и 80 мкм – до 17 % и 9 % соответственно), что позволяет получить плотные равномерные покрытия. Выявлено, что при различных диаметрах частиц получают поверхности с различной топологией и покрытия с различной пористостью.

3. Отработаны технологические параметры напыления и получены лабораторные образцы порошковых покрытий ПГСР-2 и ПГСР-4 на подложки из алюминиевого сплава АК7ч.

4. Определены температуры солидус, ликвидус и фазовых превращений исследуемых порошковых материалов. Установлено, что фазовый состав порошковых материалов и покрытий на их основе включает в себя бориды, карбиды, силициды. Покрытия на основе ПГСР-2 и ПГСР-4, нанесенные как при дозвуковом, так и при сверхзвуковом режимах плазменного напыления, являются микроструктурно однородными по всей толщине нанесенного слоя.

5. Значения твердости образцов с покрытиями на основе ПГСР-2 и ПГСР-4, полученными при до- и сверхзвуковом режимах напыления, превышают данные показатели для материала подложки в 14–20 раз. Значения микротвердости покрытий, в среднем, в 15 раз больше, чем у основы. Выявлено, что при механической деформации разрушение образцов происходит путем адгезионно-когезионного растрескивания в напыленном слое. Для изделий, подвергающихся механическим деформациям в результате ударов, перегибов, сжатий, рекомендуемая толщина напыленного слоя составляет 0,13–0,14 мм.

6. Установлено, что износ алюминиевого сплава АК7ч в режиме сухого трения в 11 раз ниже, чем в режиме с добавлением смазки (воды). Износ образцов с покрытиями ПГСР-2 и ПГСР-4, нанесенными при до- и сверхзвуковом режимах напыления, в режиме сухого трения в 2–7 раз ниже износа в режиме со смазкой. При этом износ образцов с покрытиями в режиме сухого трения, в среднем, в 60 раз меньше износа подложки, а в режиме трения со смазкой – в 120 раз. Шероховатость покрытий, нанесенных при дозвуковом режиме напыления, выше, чем для покрытий,

полученных методом сверхзвукового плазменного напыления. После проведения испытаний на износостойкость шероховатость подложки увеличивается, а всех образцов с покрытиями – уменьшается за счет шлифования поверхности.

7. Покрытия на основе ПГСП-2 и ПГСП-4 обладают высокой стойкостью к коррозии и, следовательно, могут быть использованы при работе в агрессивных средах.

8. Разработана технология восстановления и упрочнения поверхности крыльчатки рабочего колеса насоса НЦПН-40/100. Ожидаемый экономический эффект составляет порядка 200 тыс. рублей на одно рабочее колесо. Срок окупаемости единовременных затрат на напыление лопаток – 1 месяц.

Таким образом, проведенное комплексное исследование состава и свойств самофлюсующихся порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 и плазменных покрытий на их основе показывает, что их применение позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики, срок службы и эффективность ремонта деталей машин, изготовленных из алюминиевых сплавов, а также снизить трудовые, материальные и энергетические затраты. Проект модернизации рабочего колеса пожарного насоса с помощью плазменного напыления считается экономически обоснованным и может быть рекомендован к внедрению.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что цель диссертационной работы достигнута.

Основные положения диссертационной работы изложены и опубликованы в следующих научных трудах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Ilinykh S. Formation of Protective Coatings Using an MAK-100 Plasma Spraying Installation / S. Ilinykh, A. Krivorogova, N. Ilinykh et al. // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023, No. 8. Pp. 1201–1207. (*Scopus, Web of Science*); 0,64 п.л./0,4 п.л.

2. Ilinykh N. Thermodynamic modeling of Ni–Cr–B–C–Si system in «air+propane» atmosphere / N. Ilinykh, A. Krivorogova, B. Gelchinski et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1954 (1) (*Scopus, Web of Science*); 0,23 п.л./0,16 п.л.

3. Ilinykh S. Surface hardening of 35KHGSA steel samples on the MAK-10 plasma modification machine / S. Ilinykh, A. Krivorogova, N. Ilinykh et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1954 (1). (*Scopus, Web of Science*) 0,21 п.л./0,12 п.л.

4. Криворогова А.С. Теоретическое и экспериментальное исследование самофлюсующихся материалов на основе никеля / А.С. Криворогова, Н.И. Ильиных, С.А. Ильиных, Б.Р. Гельчинский // Расплавы. 2020. № 1. С. 87–97. 0,6 п.л./0,42 п.л.

5. Krivorogova A. Theoretical and Experimental Study of Nickel-Based Self-Fluxing Materials / A. Krivorogova, N. Ilinykh, S. Ilinykh, B. Gelchinski // Russian Metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020, No. 8. Pp. 853–858. (*Scopus, Web of Science*); 0,45 п.л./0,32 п.л.

6. Krivorogova A., Iljinykh N., Ilinykh S. Theoretical and experimental investigation of self-fluxing Ni-based alloys // The optimization of composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano- and amorphous materials: 17th Israeli-Russian Bi-national Workshop «The optimization of composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano- and amorphous materials». – Moscow, August 13–17, 2018. – Ariel University, 2018. Pp. 112–119. (*Web of Science*); 0,5 п.л./0,36 п.л.

7. Ilinykh N., Krivorogova A. Thermodynamic modeling of fluxing alloys of Ni–C–Cr–B system // The European Physical Journal. Special Topics. 2017. Vol. 226, No. 5. Pp. 1115–1121. (*Scopus, Web of Science*); 0,44 п.л./0,3 п.л.

Патент

8. Гельчинский Б.Р., Ильиных С.А., Крашанинин В.А., Криворогова А.С. Способ получения защитного покрытия. Патент на изобретение 2741040 С1, 22.01.2021. Заявка № 2020120189 от 11.06.2020. 0,5 п.л./0,12 п.л.

Статьи в журналах и сборниках:

9. Криворогова А.С., Ильиных Н.И., Ильиных С.А., Игнатьева Е.В., Петрова С.А., Гельчинский Б.Р. Исследование порошковых материалов системы Ni–Cr–B–Si–C и плазменных покрытий на их основе // Материалы 16-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». Минск, 22–24 мая 2024 г. – Минск: Беларуская навука, 2024. – С.374–376. 0,19 п.л./0,1 п.л.

10. Криворогова А.С., Ильиных Н.И., Ильиных С.А., Беззапонная О.В., Гельчинский Б.Р., Девяткин Н.О. Повышение надежности противопожарного оборудования и систем пожарного водоснабжения // Техносферная безопасность. – 2023. – № 1(38). – С. 72–86. 0,83 п.л./0,6 п.л.

11. Криворогова А.С., Долматов А.В., Ильиных С.А., Ильиных Н.И., Гельчинский Б.Р. Оценка адгезионно-когезионных свойств плазмонапыленных Ni–Cr–B–Si–C покрытий на образцы из алюминиевого сплава АК7ч // Вестник современных технологий. 2023. № 1 (29). С. 4–12. 0,43 п.л./0,3 п.л.

12. Ильиных С.А., Криворогова А.С., Ильиных Н.И., Королев О.А., Гельчинский Б.Р. Исследование функциональных свойств плазмонапыленных Ni–Cr–B–Si–с покрытий на алюминиевые образцы АК-7 // Материалы XX Международной научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия». Москва, 2023. С. 76–80. 0,31 п.л./0,16 п.л.

13. Криворогова А.С., Беззапонная О.В., Ильиных С.А., Ильиных

Н.И., Гельчинский Б.Р. Повышение надежности противопожарного оборудования, изготовленного из алюминиевых сплавов, методом сверхзвукового плазменного напыления //Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Научные аспекты техносферной безопасности-2023». Санкт-Петербург, 2023. С. 66-71. 0,44 п.л./0,23 п.л.

14. Ильиных Н.И., Криворогова А.С., Ильиных С.А., Гельчинский Б.Р., Леонтьев Л.И. Термодинамическое моделирование системы Ni-Cr-Si-B+TiC(WC) в атмосфере «воздух», «воздух + пропан», «воздух + метан». Материалы 15-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». Минск, 14-16 сентября 2022 г. – Минск: Беларуская навука, 2022. – 489-495 с. 0,44 п.л./0,2 п.л.

15. Ильиных С.А., Криворогова А.С., Ильиных Н.И., Королев О.А., Крашанинин В.А., Гельчинский Б.Р., Леонтьев Л.И. Исследование физико-механических антикоррозионных свойств плазмонапыленных покрытий на стальную подложку // Материалы 15-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». Минск, 14-16 сентября 2022 г. – Минск: Беларуская навука, 2022. – 484-489 с. 0,38 п.л./0,2 п.л.

16. Гельчинский Б.Р., Ильиных Н.И., Криворогова А.С., Ильиных С.А., Леонтьев Л.И. Термодинамическое моделирование системы Ni-Cr-Si-B в атмосфере «воздух + метан» // Сборник статей Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов» имени академика А.М. Самарина (ФХОМП). Россия, Нижегородская область, г. Выкса, 10-14 октября 2022 г. С.71-74. 0,38 п.л./0,2 п.л.

17. Криворогова А.С., Ильиных С.А., Королев О.А., Ильиных Н.И. Использование гидрофобных пропиток, нанесенных на плазмонапыленные поверхности деталей пожарной техники //Сборник материалов Дней науки с международным участием, посвященных 90-летию Гражданской обороны России «Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности». В 2-х частях. Екатеринбург, 2022. С. 96-100. 0,31 п.л./0,2 п.л.

18. Ильиных Н.И., Криворогова А.С., Ильиных С.А., Гельчинский Б.Р., Леонтьев Л.И. Термодинамическое моделирование системы Ni-Cr-B-Si с добавками карбидов WC, TiC В интервале температур 300-6000 К в атмосфере аргона и азота //Сборник докладов 12-го Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка». В 2-х частях. Минск, 2021. С. 196-204. 0,56 п.л./0,25 п.л.

19. Ильиных С.А., Криворогова А.С., Ильиных Н.И., Игнатьева Е.В., Крашанинин В.А., Гельчинский Б.Р., Леонтьев Л.И. Разработка технологических приемов эффективной защиты металлических

поверхностей деталей бурового оборудования методами плазмохимического воздействия // Сборник докладов 12-го Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка». В 2-х частях. Минск, 2021. С. 205-211. 0,44 п.л./0,12 п.л.

20. Криворогова А.С., Ильиных С.А., Гельчинский Б.Р., Крашанинин В.А., Девяткин Н.О. Применение плазмонапыленных комбинированных многокомпонентных покрытий в экстремальных условиях и агрессивных средах // Сборник материалов V Международной научно-практической конференции Современные пожаробезопасные материалы и технологии. Иваново, 2021. С. 71-75. 0,31 п.л./0,1 п.л.

21. Криворогова А.С., Ильиных Н.И., Ильиных С.А., Гельчинский Б.Р. Исследование поведения самофлюсующихся сплавов Ni-C-Cr-Si-B в экстремальных условиях системы» // Многофазные системы, 2020, № 1–2, с. 56; 0,1 п.л./0,05 п.л.

22. Nina Ilinykh, Anastasia Krivorogova, Boris Gelchinski, Sergey Ilinykh, Leonid Kovalev. Thermodynamic modeling of composition and properties of self-fluxing materials based on the nickel //MATEC Web of Conferences, 2020. V. 329. P. 02026; 0,44 п.л./0,25 п.л.

23. Sergey Ilinykh, Anastasia Krivorogova, Nina Ilinykh, Boris Gelchinski, Leopold Leontiev. Modification of aluminum surfaces by supersonic plasma sputtering //MATEC Web of Conferences, 2020. V.329. P. 02027; 0,39 п.л./0,23 п.л.

24. Ильиных Н.И., Криворогова А.С., Гельчинский Б.Р., Ильиных С.А. Термодинамическое моделирование самофлюсующихся материалов на основе никеля // Материалы 14-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». Минск, 2020. С. 164-167. 0,25 п.л./0,1 п.л.

25. Ильиных С.А., Криворогова А.С., Ильиных Н.И., Долматов А.В., Гельчинский Б.Р., Леонтьев Л.И. Упрочнение деталей машин и механизмов, изготовленных из алюминиевых сплавов, методом сверхзвукового плазменного напыления //Материалы 14-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». Минск, 2020. С. 473-479. 0,44 п.л./0,12 п.л.

26. Криворогова А.С., Беззапонная О.В. Исследование физико-химических свойств самофлюсующегося порошка на основе никеля, используемого для упрочнения поверхностей деталей пожарно-технического вооружения //Техносферная безопасность. 2019. № 2 (23). С. 98-102. 0,31 п.л./ 0,25 п.л.

27. Криворогова А.С., Беззапонная О.В. Исследование физико-химических свойств порошка, используемого для упрочнения поверхностей

деталей пожарно-технического вооружения //Материалы Дней науки с международным участием «Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации», Екатеринбург, 27-31 мая 2019 г. С. 83-87. 0,31 п.л./0,16 п.л.

Тезисы докладов:

28. Ilinykh N.I., Krivorogova A.S., Ilinykh S.A., Gelchinskii B.R., Leontiev. L.I. Thermodynamic modeling OF Ni-Cr-Si-B+TiC and Ni-Cr-Si-B+WC systems in a wide temperature range //XXIII International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia August 22-27, 2022, Kazan, Russia. – P. 230. 0,06 п.л./0,03 п.л.

29. Krivorogova A.S., Ilinykh N.I., Ilinykh S.A., Gelchinski B.R., Leontiev L.I. Investigation of self-fluxing nickel-based alloys //Book of Abstracts of the International Conference MELTS. 2021. P. 75. 0,06 п.л./0,03 п.л. 0,06 п.л./0,03 п.л.

30. Ильиных С.А., Ильиных Н.И., Криворогова А.С., Королев О.А., Крашанинин В.А., Леонтьев Л.И., Гельчинский Б.Р. Упрочнение деталей машин и механизмов методом сверхзвукового плазменного напыления //Тезисы докладов научно-практической конференции «Фазовые и структурные превращения в сталях и сплавах» (ФСП-2020). Екатеринбург 14-18 сентября 2020 года. 0,06 п.л./0,03 п.л.

31. Krivorogova A.S., Ilinykh N.I., Ilinykh S.A. Thermodynamic modeling of self-fluxing Ni-C-Cr-Si-B alloys //Book of Abstracts of the 16th IUPAC High Temperature Material Chemistry Conference (HTMC-XVI). 2018. P. 69. 0,06 п.л./0,03 п.л.

32. Krivorogova A.S., Ilinykh N.I. Thermodynamic modeling of Ni-C-Cr-Si-B alloys //Book of Abstracts of XXI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT-2017) (June 26-30, 2017, Novosibirsk, Russia): – Novosibirsk: NIIC SB RAS, 2017. – P. 241. 0,06 п.л./0,03 п.л.

33. Ilinykh N., Krivorogova A. Thermodynamic modeling of fluxing alloys of Ni-C-Cr-Si-B system //Abstract of International Conference JEEP 2016, Paris, France, 23-th – 25th of March, 2016. P. 32. 0,06 п.л./0,03 п.л.

34. Исследования когезионной прочности наплавленных Ni-Cr-Si-B покрытий / А.С. Криворогова, А.В. Долматов, С.А. Ильиных и др. // Тезисы докладов VII Уральской научно-практической конференции «Сварка. Реновация. Триботехника». ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагильский технологический институт (филиал). 2015. С. 138-142. 0,3 п.л./0,15 п.л.