

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина  
Уральского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

**Криворогова Анастасия Сергеевна**

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

Специальность:

2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических  
наук, профессор

Гельчинский Борис Рафаилович

Екатеринбург – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                                             | 5  |
| ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА .....                                                                                                                                                     | 14 |
| 1.1. Применение алюминиевых сплавов и способы их упрочнения .....                                                                                                                          | 14 |
| 1.2. Газотермические методы нанесения покрытий. Плазменное напыление ....                                                                                                                  | 17 |
| 1.3. Выбор порошковых материалов .....                                                                                                                                                     | 24 |
| Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования .....                                                                                                                              | 35 |
| ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....                                                                                                                                                         | 36 |
| 2.1. Термодинамическое моделирование .....                                                                                                                                                 | 36 |
| 2.2. Моделирование процесса плазменного напыления покрытий<br>с использованием программного комплекса Plasma 2002 .....                                                                    | 38 |
| 2.3. Плазменное напыление порошковых материалов .....                                                                                                                                      | 40 |
| 2.3.1. Подготовка поверхности изделия и порошковых материалов перед<br>нанесением покрытий .....                                                                                           | 40 |
| 2.3.2. Плазменное напыление покрытий .....                                                                                                                                                 | 43 |
| 2.4. Методы исследования порошков и покрытий на их основе .....                                                                                                                            | 45 |
| 2.4.1. Исследование структуры и фазового состава .....                                                                                                                                     | 45 |
| 2.4.2. Термический анализ .....                                                                                                                                                            | 47 |
| 2.4.3. Измерение твердости .....                                                                                                                                                           | 47 |
| 2.4.4. Микротвердость .....                                                                                                                                                                | 49 |
| 2.4.5. Испытания на трехточечный изгиб .....                                                                                                                                               | 50 |
| 2.4.6. Износостойкость .....                                                                                                                                                               | 52 |
| 2.4.7. Шероховатость .....                                                                                                                                                                 | 53 |
| 2.4.8. Коррозионная стойкость .....                                                                                                                                                        | 54 |
| Выводы по главе 2 .....                                                                                                                                                                    | 56 |
| ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ<br>ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ<br>ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ<br>НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ..... | 58 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Термодинамическое моделирование самофлюсующихся материалов на основе никеля .....                | 58  |
| 3.2. Моделирование процесса плазменного напыления покрытий .....                                      | 68  |
| 3.3. Плазменное напыление самофлюсующихся порошков на образцы из алюминиевого сплава .....            | 74  |
| Выводы по главе 3 .....                                                                               | 75  |
| ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ .....     | 77  |
| 4.1. Анализ микроструктур порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 и покрытий на их основе .....         | 77  |
| 4.2. Определение фазового состава порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 и покрытий на их основе ..... | 80  |
| 4.2.1. Рентгенофазовый анализ исходных порошков .....                                                 | 80  |
| 4.2.2. Рентгенофазовый анализ покрытий .....                                                          | 81  |
| 4.3. Сканирующая электронная микроскопия плазменных покрытий .....                                    | 85  |
| 4.4. Синхронный термический анализ порошковых материалов .....                                        | 92  |
| 4.5. Физико-механические свойства покрытий .....                                                      | 95  |
| 4.5.1. Определение твердости по Виккерсу .....                                                        | 95  |
| 4.5.2. Микротвердость .....                                                                           | 97  |
| 4.5.3. Адгезионно-когезионные свойства .....                                                          | 99  |
| 4.6. Функциональные свойства .....                                                                    | 105 |
| 4.6.1. Трибологические свойства .....                                                                 | 105 |
| 4.6.2. Шероховатость .....                                                                            | 111 |
| 4.6.3. Коррозионная стойкость .....                                                                   | 112 |
| Выводы по главе 4 .....                                                                               | 116 |
| ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ .....                                  | 119 |
| 5.1. Анализ причин износа противопожарного оборудования и систем противопожарного водоснабжения ..... | 119 |
| 5.2. Модернизация действующего пожарного насоса НЦПН-40/100 .....                                     | 127 |

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. Расчет экономической эффективности .....                                                                                            | 129 |
| 5.3.1. Методика расчета материальных затрат при газотермическом<br>напылении .....                                                       | 129 |
| 5.3.2. Расчет сумм единовременных затрат на нанесение защитного покрытия<br>на рабочее колесо .....                                      | 131 |
| Выводы по главе 5 .....                                                                                                                  | 135 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                         | 137 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....                                                                                           | 140 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                                                  | 141 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акт внедрения от 9 ПСЧ 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления<br>МЧС России по Свердловской области .....                       | 156 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акт внедрения от ООО НПФ «УМГ» .....                                                                                       | 157 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акт промышленных испытаний от ООО НПФ «УМГ» .....                                                                          | 158 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Патент на изобретение.....                                                                                                 | 159 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 5. «Бронзовая медаль» XXIV Московского международного<br>салона изобретений и инновационных технологий «Архимед – 2021» ..... | 160 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 6. «Золотая медаль» Всемирного изобретательского форума Global<br>Invention Forum in Cyprus (2021) .....                      | 161 |

## ВВЕДЕНИЕ

**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 [1–15]. 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 [16–25].

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 [26–37]. 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 [37–40].

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 [5–42]. 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, функциональных и механических 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 диссертационной 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 из алюминиевых сплавов. Автором впервые получены следующие основные результаты:

1. 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.

2. По результатам компьютерного моделирования теплофизических процессов взаимодействия плазменной струи с порошковым материалом определены технологические параметры напыления и получены лабораторные образцы порошковых покрытий ПГСР-2 и ПГСР-4 на подложки из алюминиевого сплава АК7ч.

3. 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, полученного при сверхзвуковом режиме напыления. Значения микротвердости покрытий, в среднем, в 15 раз больше значений микротвердости основы.

4. 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.

5. 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).

6. Установлено, что покрытия на основе порошковых самофлюсующихся материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 обладают высокой стойкостью к коррозии 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» (Приложения 1–3).

**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.

**Методология и 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 модифицирования (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 JEEP – 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.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в 34 работах, среди которых 1 патент РФ на изобретение, 7 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ, в том числе, 6 в изданиях, входящих в в базы данных Web of Science и Scopus, 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 (в рамках проекта 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. Игнатъевой, 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.

## Глава 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

### 1.1. Применение алюминиевых сплавов и способы их упрочнения

Алюминий и его сплавы широко используются в различных областях техники благодаря сочетанию некоторых физических, химических и механических свойств [41–46].

Температуры плавления ( $t_{\text{пл}}$ ) и кипения ( $t_{\text{кип}}$ ) алюминия зависят от чистоты металла. В настоящее время принято считать  $t_{\text{пл}} = 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а  $t_{\text{кип}} = 2497\text{ }^{\circ}\text{C}$  [44–45]. Плотность алюминия ( $\rho$ ) в твердом состоянии также зависит от его чистоты: для алюминия особой чистоты  $\rho = 2698,08\text{ кг/м}^3$ , а для алюминия технической чистоты  $\rho = 2727\text{ кг/м}^3$ . Так как плотность алюминия почти в три раза меньше плотности железа ( $7874\text{ кг/м}^3$ ) [44], применение алюминия и его сплавов позволяет существенно снизить массу металлических конструкций, деталей машин и различных изделий без потери механической прочности конструкционных материалов.

В настоящее время объемы производства и применения алюминия и его сплавов занимают второе место после стали [47]. Алюминиевые сплавы являются доминирующим конструкционным материалом в авиации. Алюминий и некоторые его сплавы не теряют пластичности при низких температурах, поэтому из них изготавливают резервуары для хранения криогенных жидкостей, например, жидкого метана ( $t = -161\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Высокая электропроводность алюминия  $(34\text{--}38) \cdot 10^6\text{ Ом/м}^2$  обуславливает широкое применение его для массивных проводников электрического тока (линии передач, оболочки высоковольтных кабелей, шины распределительных устройств), т. е. там, где наиболее ощутимы его преимущества по сравнению с другими материалами. В автомобилестроении из алюминиевых сплавов (в основном силуминов) изготавливают картеры, блоки цилиндров, головки блоков цилиндров, шкивы и другие детали.

По методу получения алюминиевые сплавы делят на литейные и деформируемые.

Литейные сплавы по химическому составу разделяются на пять групп.

Группа I. Сплавы на основе Al–Si–Mg: АК12 (АЛ2), АК9 (АЛ9), АК9ч (АЛ4), АК9пч (АЛ4-1), АК8л (АЛ34), АК7 (АЛ7), АК7ч (АЛ9), АК7пч (АЛ9-1), АК5М2.

Группа II. Сплавы на основе Al–Si–Cu: АК5М (АЛ5), АК5Мч (АЛ5-1), АК8М (АЛ32), АК5М4, АК5М7, АК8М3, АК8М3Ч (ВАЛ8), АК9М2, АК12ММгН (АЛ30), АК12М2МгН (АЛ25).

Группа III. Сплавы на основе системы Al–Cu: АМ5 (АЛ19), АМ4, 5Кд (ВАЛ10).

Группа IV. Сплавы на основе Al–Mg: АМг4К1,5, АМг5К (АЛ13), АМг5Мц (АЛ28), АМг6л (АЛ23), АМг6лч (АЛ23-1), АМг10 (АЛ27), АМг7 (АЛ29).

Группа V. Сплавы на основе системы Al – прочие компоненты (в том числе никель, цинк, железо): АК7Ц9 (АЛ11), АЦ4Мг (АЛ24).

Для изготовления деталей различного пожарного оборудования применяются сплавы АК12 (АЛ-2), АК9ч (АЛ4), АК5М (АЛ5), АК7ч (АЛ9) (таблица 1.1) [48]. Так, например, из сплава АК12 отливают детали карбюраторов двигателей внутреннего сгорания, из сплава АК9ч – блоки головок и рубашки цилиндров. Из сплава АК7ч изготавливают корпуса и рабочие колеса центробежных пожарных насосов; из сплавов АК5М и АК7ч – корпуса подколесного пожарного насоса, корпуса разветвлений и водозаборных колонок. Кроме этого, из алюминиевого сплава отливают корпус, крышку и рабочее колесо пожарного насоса ПН-40 [48–53].

Таблица 1.1 – Алюминиевые литейные сплавы для пожарной техники [48, 50]

| Марка      | Содержание элементов, % (остальное – алюминий) |         |           |          |
|------------|------------------------------------------------|---------|-----------|----------|
|            | Кремний                                        | Медь    | Магний    | Марганец |
| АК12 (АЛ2) | 10–13                                          | <0,6    | <0,1      | 0,25–0,5 |
| АК9ч (АЛ4) | 9–10                                           | 0,3–1,5 | 0,35–0,55 | 0,1–0,6  |
| АК5М (АЛ5) | 4,5–5,5                                        | 1–1,5   | 0,35–0,6  | <0,5     |
| АК7ч (АЛ9) | 6–8                                            | <0,2    | 0,2–0,4   | <0,5     |

Деформируемые сплавы выпускаются в виде листов, плит, прутков и профилей. Они поддаются ковке, штамповке, прокатке, прессованию и другим видам деформации. Наиболее широко применяются деформируемые сплавы типа дуралюмин на основе системы алюминий – магний – медь – марганец и сплавы, по составу близкие к дуралюмину (маркируются буквами «АК»).

Применение алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности (автомобилестроении, машиностроении, авиастроении, текстильной промышленности и других) обусловлено высокими значениями механической прочности и коррозионностойкости. В качестве основного недостатка данных материалов следует отметить невысокую износостойкость, что приводит к утрате работоспособности устройств, имеющих в своем составе детали из алюминиевых сплавов [7]. Таким образом, повышение износостойкости изделий из алюминиевых сплавов является актуальной проблемой.

Для того чтобы работоспособность деталей оставалась на высоком технологическом уровне, необходимо защитить поверхностные слои материала, из которого они изготовлены, не изменяя существенно геометрических размеров и массы изделия. С этой целью на детали наносятся специальные защитные покрытия, отличные по своим свойствам и структуре от состава подложки и обеспечивающие высокие эксплуатационные характеристики (износостойкость, жаростойкость, коррозионностойкость, антифрикционные, теплозащитные и другие) [1–15].

Из существующих методов поверхностного упрочнения наиболее широко в настоящее время применяются методы газотермического напыления, металлизации, вакуумного осаждения, конденсации, наплавки, микродугового оксидирования и др. [1–15]. Недостатками этих методов является пониженная адгезия, формирование хрупкой прослойки интерметаллидов и малая толщина при микродуговом оксидировании. Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой предлагается метод сверхзвукового плазменного напыления [16–25].

## 1.2. Газотермические методы нанесения покрытий. Плазменное напыление

Основателем газотермического метода получения покрытий признан швейцарский ученый Макс Ульрих Шооп, разработавший в 1913 г. газопламенный проволочный распылитель [8–9].

При газотермическом нанесении покрытий распыляемый материал (порошок, проволока либо стержень) подается в зону нагрева и распыляется струей газа. Распыляющий газ нагревает материал и размельчает его (если в зону нагрева подаются проволоки или стержни). Разогретые частицы при соударении с подложкой деформируются и, закрепляясь, накладываются друг на друга, образуя слоистое покрытие с заданными свойствами [1–6, 11–18].

Для упрочнения и восстановления деталей из алюминия наиболее широкое применение получили следующие способы: газопламенное порошковое напыление, дуговая металлизация, сверхзвуковое газопламенное (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel, HVAF – High Velocity Air Fuel), холодное газодинамическое напыление, электродуговое, детонационное, плазменное (до- и сверхзвуковое) напыление.

В таблице 1.2 представлены основные достоинства, недостатки и области применения различных методов газотермического напыления (ГТН).

В настоящее время одним из наиболее перспективных методов нанесения покрытий является *плазменное напыление* [1–6, 16–26, 54–55]. В качестве источника нагрева, распыления и ускорения частиц в данном методе используется плазменная струя, которая характеризуется высокой скоростью истечения и температурой, плазменная струя, что позволяет проводить напыление практически любых материалов на различные подложки [3–6, 13–14, 56].

Таблица 1.2 – Достоинства, недостатки и области применения методов ГТН

| Название метода                                                                                                                                        | Достоинства                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Применение                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Газопламенное<br>порошковое<br>напыление                                                                                                               | Возможность нанесения покрытий различного состава на изделия из самых разнообразных материалов; равномерность покрытий при напылении на поверхности большой площади; простота и мобильность оборудования; небольшая деформация подложки вследствие ее нагрева; высокая производительность и относительно небольшая трудоемкость процесса напыления [1–3, 56–59] | Ограничение напыляемых материалов по температуре плавления (не более 2800 К); высокая пористость покрытий (5–25 %); низкая адгезия покрытия с подложкой; низкие значения КПД нагрева частиц порошкового материала (0,01–0,15); большие потери напыляемого материала; наличие в плазменной струе активных газов, взаимодействующих с материалами порошка и подложки [2, 5, 13–14, 56]  | Восстановление и ремонт изношенных деталей, изготовление деталей различной формы                                                                                                                                                                                                                        |
| Высокоскоростное<br>газопламенное<br>напыление<br>(HVOF, HVAF).<br>Российский аналог<br>HVOF/HVAF – это<br>газопламенное<br>сверхзвуковое<br>напыление | Низкая пористость (менее 2 %), небольшой размер пор (менее 10 мкм), высокая адгезионная прочность (порядка 70 МПа); шероховатость $R_a = 25\text{--}30$ мкм [14]; эффективная защита от агрессивных коррозионных сред. Подача распыляемого материала в смесь газов до ее сгорания с последующим нагревом и ускорением в сверхзвуковом сопле.                    | Метод используется только для агломерированных спеченных порошков металл – карбид (металл – Ni или Co, карбид – карбиды хрома или вольфрама). Кислородосодержащая атмосфера пламени приводит к дополнительному окислению железа, хрома и алюминия как в порошке, так и на поверхности подложки, и к образованию тонкой оксидной пленки между металлом основы и порошковым материалом. | Нанесение покрытий из различных карбидов, хрома, никель-, кобальт- и железобазированных порошков, MeCrAlY. Напыление покрытий на поверхности с относительно малой шероховатостью, получение высококачественных, плотных покрытий даже на внутренних поверхностях. Возможно использование тонкозернистых |

Продолжение таблицы 1.2

| Название метода              | Достоинства                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Применение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                              | Большой расход газов приводит к существенному увеличению мощности пламени                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Сложность в эксплуатации, высокая стоимость, энергоемкость, малая пригодность для ручного и мобильного применения, высокий уровень высокочастотного шума [60]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | порошков, что дает преимущества в равномерности структуры покрытий [60–65]                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Детонационное напыление (ДН) | Высокие значения адгезионной и усталостной прочности, низкая пористость. Возможно проводить напыление покрытий на холодные изделия ( $T_{\text{и}} < 473 \text{ K}$ ), при этом наблюдается умеренный нагрев изделий ( $T_{\text{и}} < 573 \text{ K}$ ). Невысокая чувствительность к состоянию исходной поверхности напыления. Высокая производительность (1–10 кг/ч). Возможность использования различных распыляемых материалов [13–14] | Невозможно напыление внутренних поверхностей на глубину, превышающую диаметр входного отверстия. Затруднено нанесение покрытий на изделия, имеющие развитую поверхность и высокую поверхностную твердость ( $\text{HRC} = 60$ ). Сложно проводить напыление покрытий из порошков с невысокой удельной массой. Высокий уровень шума (140 дБ и более). Образование вредных соединений ( $\text{CO}$ , углеводороды, оксид азота и другие) при сгорании смеси горючий газ – кислород [13] | Нанесение покрытий различного назначения с использованием большого класса порошков, в том числе материалов, чувствительных к разложению при нагреве (кермет), причем размеры и форма изделий определяются только техническими возможностями устройств, используемых для нанесения покрытий, и размерами камеры напыления [1, 5, 13–14] |
| \                            | Частицы порошкового материала переносятся в «холодном» состоянии со скоростями переноса до 2 М и более. Разогрев частиц происходит за счет преобразования кинетической энергии в тепловую в процессе взаимодействия                                                                                                                                                                                                                        | Невозможно напылять непластичные материалы, например, керамику [69]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Получение покрытий, полностью идентичных по составу напыляемому порошку, а также композиционных покрытий с постоянным и регулируемым составом по толщине покрытия [66–67]                                                                                                                                                              |

## Окончание таблицы 1.2

| Название метода           | Достоинства                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                 | Применение                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                           | с подложкой, т. е. непосредственно при формировании покрытия. Отсутствует термическое воздействие на материал подложки. Метод является относительно безопасным, простым и экономичным [66–69]                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Плазменное напыление (ПН) | Высокая производительность процесса; возможность использования различных материалов для нанесения покрытий (проволока, порошки); проведение процесса напыления с общей защитой (напыление в камере) для получения особо качественных покрытий; высокие значения коэффициента использования материала; возможность комплексной механизации и автоматизации процесса; доступность и экономичность метода [1–3, 5, 13–20] | Низкие значения коэффициента использования энергии; наличие пористости и других видов несплошностей (2–15 %); низкие значения адгезионной и когезионной прочности покрытий (80–100 МПа); высокий уровень громкости звука при открытом ведении процесса (60–120 дБ) [13–14] | Нанесение износостойких, жаро- и коррозионностойких, уплотнительных и других покрытий для деталей устройств авиационной, ракетной и космической техники, металлургии, химии, машиностроения, энергетики, нефтяной и угольной промышленности, транспорта, ремонта машин и восстановление деталей [1–3, 5, 13–14] |

Плазма – это частично или полностью ионизированный газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц, суммарный заряд которых равен нулю. Плазму принято называть «холодной» (низкотемпературная плазма), если ее температура составляет порядка  $10^5$  К и «горячей» (высокотемпературная плазма), если ее температура равна  $10^6$ – $10^7$  К. Для напыления покрытий используется низкотемпературная плазма [1–3, 16–19].

Для генерации плазменной струи используют дуговой прогрев газа, высокочастотный индукционный и лазерный нагрев, электрический взрыв и другие способы. Между катодом и анодом плазмотрона возникает разряд, через который проходит плазмообразующий газ. Скорость истечения плазменной струи может достигать 300–2500 м/с, а ее температура – 15000 К за счет принудительного сжатия дуги в плазмотроне. При этом газ (аргон, водород, гелий, азот или их смеси) переходит в ионизированное состояние. При диссоциации газа на свободные электроны и ионы происходит выделение энергии, достаточной для расплавления любого материала. В плазменную струю подается напыляемый материал, который нагревается и ускоряется струей до 50–500 м/с. Порошок оседает на подложке, образуя покрытие [3, 5, 13–14].

При порошковом напылении как условия теплообмена, так и теплофизические характеристики плазменной струи существенно зависят от выбора плазмообразующего вещества [1–2, 13–14, 38–39, 70]. Плазмообразующие газы должны удовлетворять ряду требований, в частности: высокие значения теплообменных критериев; высокие значения температуры и энтальпии; инертность по отношению к распыляемому материалу, пассивность к элементам плазменного распылителя, невысокая стоимость и дефицитность. На практике используют инертные газы и их смеси (Ar, He, Ar + He), активные газы и их смеси ( $N_2$ ,  $NH_3$ , воздух, пропан, бутан, воздух +  $NH_3$  и др.), а также инертные газы в смеси с активными (Ar +  $H_2$ , Ar +  $N_2$  и др.).

Следует отметить, что аргоновая струя слабо разогревает порошковые частицы, что обусловлено низкими значениями критерия Био и малой длиной высокотемпературной части плазменной струи [1–2, 38]. Использование азота или

водородсодержащих газов позволяет достичь более высокая степень прогрева напыляемых частиц [38–39, 70–72]. Добавки водорода к аргону, азоту или применение аммиака позволяют получать плазменную струю с высокой теплопроводностью, в результате чего усиливается теплообмен между частицами порошкового материала и плазмообразующим газом. В работах [38, 70] показано, что самым высокоэнтальпийным газом является водород, самой низкой энтальпией обладает аргон. Что же касается плазмообразующей смеси газов, то установлено, что ее теплосодержание растет с увеличением температуры и доли двухатомного газа (азота или водорода) в смеси. Введение порошковых материалов в плазму приводит к изменению полной энтальпии системы по сравнению с чистой плазмой.

В настоящее время большое внимание в работах российских и зарубежных ученых, например, [21, 23–25, 30, 73–81], уделяется развитию метода *сверхзвукового плазменного напыления*, позволяющего формировать покрытия в основном из частиц без расплавления, находящихся в вязкопластическом состоянии [17, 82–83].

В основе данного метода лежит нагрев порошковых частиц с одновременным их ускорением до сверхзвуковых скоростей. Увеличение скорости частиц в момент столкновения с основой в 3–4 раза приводит к повышению кинетической энергии в 9–16 раз ( $E_k = mv^2/2$ ), что, в свою очередь, приводит к улучшению условий формирования покрытий, ограничению вредного воздействия окружающей среды, снижению интенсивности процессов термического разложения материалов [1–2, 23–24, 55]. Кинетическая энергия частиц порошка, которые посредством газовой струи переносятся на деталь, при ударе о подложку превращается в тепловую. Именно здесь происходит качественный скачок в улучшении всех служебных свойств напыленных покрытий. Чтобы обеспечить достаточную греющую способность сверхзвуковой струи, в качестве плазмообразующего газа используется высокоэнтальпийная смесь воздуха с метаном либо с пропаном и формируется струя плазмы с пролонгированным начальным участком. Покрытия из различных порошковых материалов, нанесенные методом сверхзвукового плазменного напыления, характеризуются низкой пористостью (0–3 %), высокой

прочностью сцепления с основой (до 150 МПа), повышенной микротвердостью [23, 80].

В мировой практике сверхзвуковое плазменное напыление реализуют с помощью установки PlazJet – 200, в которой в качестве рабочего газа используют азот или смесь азота с водородом и аргоном. При мощности установки 200 кВт температура струи достигает 6600 °С, скорость частиц в 6–8 раз выше, чем при обычном плазменном напылении [25, 84].

Большое внимание развитию метода сверхзвукового плазменного напыления уделяется в работах сотрудников Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск), например, работы [21, 24–25, 85–87]. Авторами этих и ряда других статей представлены результаты разработки каскадного плазмотрона постоянного тока с секционной межэлектродной вставкой, реализующей сверхзвуковые режимы тепловых потоков плазмы. Отличительной особенностью данного плазмотрона является использование воздуха в качестве основного рабочего газа, а также инжекция распыляемого материала в поток термической плазмы с использованием кольцевого входного узла с газодинамической фокусировкой дисперсной фазы. С использованием сверхзвуковых потоков воздушной плазмы были нанесены износостойкие покрытия системы Ni–Cr–B–Si–C, покрытия WC/10Co/4Cr и другие. Показано, что использование сверхзвуковых режимов напыления позволяет получать покрытия высокой плотности с практически нулевой пористостью (менее 0,4 %).

В работе [24] показано, что использование сверхзвукового режима напыления позволяет увеличить среднюю скорость напыляемых частиц более чем в 1,5 раза, что соответствует увеличению кинетической энергии частиц в 3 раза. В данной работе приведено сравнение характеристик покрытий из никелевых сплавов, нанесенных в до- и сверхзвуковых режимах. Пористость покрытий из частиц порошка Ni–Al, напыленных в сверхзвуковом режиме, составляет менее 2 %, что в 3 раза ниже, чем у покрытий, нанесенных при дозвуковых режимах. Кроме этого, в покрытиях не наблюдается исходных частиц вследствие

значительной пластической деформации частиц порошка при соударении их с твердой подложкой или с уже затвердевшим материалом покрытия.

Таким образом, использование сверхзвуковых струй при плазменном напылении приводит к существенным количественным и качественным изменениям свойств покрытий, расширяет технологические возможности метода напыления.

### **1.3. Выбор порошковых материалов**

Выбор материала для формирования газотермических покрытий зависит как от назначения и области применения покрытия, так и от состава и свойств защищаемого материала (подложки). Покрытие в комплексе должно удовлетворять целому ряду требований, количественные характеристики которых определяются конкретными эксплуатационными условиями [3–4, 36]: достаточная прочность сцепления с основой; способность обеспечить специальные поверхностные свойства и защиту материала подложки от воздействия агрессивной среды; химическая совместимость и близость коэффициентов термического расширения с материалом подложки; достаточная механическая прочность; стабильность свойств при эксплуатации; применимость метода нанесения порошкового материала к конструкции. Кроме этого, должны учитываться такие аспекты, как стоимость материала, простота и воспроизводимость способа, возможность ремонта, обработки, качество и чистота поверхности и т. д. [3–4, 36, 54, 79, 81].

Особенно высокие требования предъявляются к обеспечению надежности покрытий и к их техническому состоянию и безопасности в тех случаях, когда металлоконструкции (изделия) работают в экстремальных условиях, в частности: в агрессивных средах (насыщенная вредными веществами промышленная зона, контакт с нефтепродуктами, морская вода и т. п.), при высоких или, наоборот, криогенных температурах (регионы Севера), повышенных давлениях [1–4, 54].

Среди большого многообразия порошковых материалов, применяемых для нанесения газотермических покрытий, используются самофлюсующиеся сплавы

[26, 84, 80–81, 88–89]. Эти сплавы были разработаны в 1937 г. в США, однако их массовое промышленное применение пришлось на 60-е годы двадцатого столетия, что было связано с интенсивным развитием технологии наплавки. Согласно американской спецификации, самофлюсующиеся сплавы получили торговое название «Колмоной» (Colmonoy). Эти сплавы выпускаются в нашей стране и за рубежом (АО «ПОЛЕМА», АО «Тулачермет» (Россия), Wall Colmonoy (США), Sulzer Metco, Castolin Eutectic (Швейцария), Kobe Steel (Япония, торговое название сплавов «Фукудалои») и др.) под различными названиями и торговыми марками в промышленном масштабе [26, 90].

Отличительной особенностью самофлюсующихся сплавов является наличие флюсующих компонентов (Si, В, реже Mn) в их составах. Эти сплавы имеют низкие температуры плавления, высокую смачиваемость, близость теплофизических характеристик основного и наплавляемого материалов, что обеспечивает их технологичность [36, 85].

В настоящее время разработаны сплавы на основе никеля или кобальта, которые обладают широким спектром эксплуатационных характеристик, а именно жаростойкостью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью. В качестве депрессантов температуры плавления и флюсующих агентов используют бор, фосфор, кремний по отдельности или в различных комбинациях. Следует отметить, что повышенная хрупкость самофлюсующихся сплавов системы Co–Cr–Si–В в сочетании с высокой стоимостью существенно ограничивает их применение.

Порошковые самофлюсующиеся материалы на основе никеля применяются для формирования упрочняющих покрытий на деталях машин и оборудовании горячих цехов металлургических заводов, нефтяных, погружных и грунтовых насосов, газоперекачивающих установок, горнодобывающей, дорожной и сельскохозяйственной технике и др. [91]. Сформированные покрытия обладают высокой стойкостью к абразивному износу и способностью работать при значительных ударных нагрузках, высокой жаростойкостью, коррозионной стойкостью, а также высокой стойкостью к кавитационному износу [91]. Кроме этого, самофлюсующиеся никелевые сплавы используют в качестве матричных

материалов, составляющих основу композиционных покрытий.

Исследованием структуры и свойств самофлюсующихся покрытий на никелевой основе в СССР активно занимались в 80-е годы прошлого века, однако интерес к ним не угасает и в настоящее время [40, 42, 79, 90–93]. Наиболее распространенными материалами, применяемыми для поверхностного упрочнения деталей, напыления и наплавки коррозионностойких покрытий, а также покрытий, устойчивых к изнашиванию трением и абразивными частицами, являются самофлюсующиеся сплавы системы Ni–Cr–B–Si–C [27–30, 31–32, 34, 88].

Рассмотрим подробнее влияние каждого из этих элементов на свойства сплавов.

В самофлюсующихся порошках никель применяют в качестве основы сплава, что позволяет существенно повысить стойкость покрытий к ударным нагрузкам, коррозионная и износостойкость, а также технологичность нанесения покрытий благодаря образованию в системе Ni–Cr–B–Si–C гетерогенной структуры эвтектического типа с низкой температурой плавления [79].

Бор и кремний образуют с никелем легкоплавкие эвтектики с температурой плавления 950–1080 °С, а также восстанавливают оксидные пленки на поверхности подложки с образованием боросиликатных шлаков (самофлюсование) в присутствии жидкой фазы и улучшают смачиваемость подложки жидким металлом [26]. При легировании никеля бором образуются высокотвердые бориды (NiB, Ni<sub>2</sub>B, Ni<sub>3</sub>B), характеризующиеся высокой микротвердостью и малой растворимостью в металлах. Таким образом, бор понижает температуру плавления и способствует формированию твердых фаз, повышая твердость покрытий [26, 28–30, 75].

Углерод является основным карбидообразующим элементом, что обеспечивает износостойкость покрытий. Однако углерод резко снижает коррозионную стойкость покрытий, поэтому для коррозионностойких покрытий содержание углерода уменьшают [36].

Хром обеспечивает стойкость к окислению и коррозии при повышенных температурах и увеличение твердости за счет формирования твердых фаз [26, 36].

Наибольшее влияние хрома на эксплуатационные свойства износостойких сплавов наблюдается при наличии углерода вследствие образования карбидов: орторомбический  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , тригональный  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  и кубический  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ .

Покрытия, сформированные при наплавке порошковых материалов Ni–Cr–B–Si–C, обладают высокой твердостью и износостойкостью за счет образования мелкодисперсных частиц упрочняющих фаз, таких как CrB,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  и др. [89]. Дополнительное легирование тугоплавкими металлами второй подгруппы Периодической системы элементов Менделеева (Hf, V, Ti, Mo, Zr, Nb и др.) приводит к измельчению структуры и формированию износостойких тугоплавких частиц на их основе.

Основная структурная фаза покрытий из сплавов Ni–Cr–B–Si–C:  $\gamma$ -твердый пересыщенный раствор на основе никеля; упрочняющие фазы: бориды хрома и никеля переменного состава, карбиды и карбобориды хрома. В порошках с повышенным содержанием углерода дополнительно присутствует карбид  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ . Твердость и износостойкость покрытий возрастают по мере увеличения в никелевых сплавах содержания хрома, бора, кремния и углерода.

Покрытия данной системы обладают высокими антикоррозионными свойствами. Они устойчивы против газовой коррозии вплоть до температур 700–850 °C, стойки в пресной и морской воде, солевых растворах, нефтесодержащих средах, аммиаке и в других агрессивных средах, однако в растворах минеральных кислот нестойки или слабостойки [26, 36].

К общим характеристикам Ni–Cr–B–Si–C сплавов относится способность сохранять твердость и сопротивление абразивному изнашиванию после отпуска с нагревом до 600 °C. Твердость же сплавов при повышенных температурах («горячая» твердость), например при 650 °C, может составить 50–70 % от измеренной при комнатной температуре. В таблице 1.3 представлены химический состав порошков и твердость покрытий из сплавов на никелевой основе, производимых АО «ПОЛЕМА» [26].

Таблица 1.3 – Химический состав порошков и твердость покрытий из сплавов на никелевой основе, производимых АО «ПОЛЕМА» [26]

| Марка порошка          | Ni, %  | C, %    | Cr, %     | B, %    | Si, %   | Fe, % | Твердость покрытия HRC |
|------------------------|--------|---------|-----------|---------|---------|-------|------------------------|
| ПР-НХ15СР2<br>(ПГСР-2) | основа | 0,2–0,5 | 12,0–15,0 | 1,5–2,1 | 2,0–3,1 | <5,0  | 35–46<br>42–48         |
| ПР-НХ17СР4<br>(ПГСР-4) | основа | 0,6–1,0 | 15,0–18,0 | 2,8–3,8 | 3,0–4,5 | <5,0  | 55–60                  |

Адгезия, когезия и сопротивление изнашиванию покрытий из сплавов одинакового состава при сухом трении и абразивном воздействии, как правило, повышаются с увеличением плотности (снижении пористости) покрытия. Пористость неоплавленных плазменных покрытий из самофлюсующихся сплавов может достигать 10–12 %, газопламенных – до 20 %. Снижение пористости покрытий и, как следствие, увеличение прочности в 5–10 раз достигаются оплавлением покрытия, которое производится либо одновременно с напылением при плазменной наплавке, либо при послойном нанесении покрытия методом газопорошковой наплавки, путем чередования процесса напыления слоев с их оплавлением.

Триботехнические свойства материалов в значительной степени определяются содержанием упрочняющих соединений в матрице сплава. Химический состав, стехиометрия и объемная доля данных соединений в сплавах зависят от количества хрома, бора, углерода и кремния [30, 31–32, 94]. В ряде работ [27, 30–32, 36], посвященных изучению самофлюсующихся сплавов систем Ni–Cr–B–Si и Ni–Cr–B–Si–C, приводятся следующие типы упрочняющих соединений: карбиды борида, силициды, карбоборида различной стехиометрии. Необходимо отметить, что способ формирования покрытий на основе самофлюсующихся сплавов оказывает существенное влияние на фазовый состав модифицированных слоев. Это объясняется тем, что при формировании покрытий различными способами, в том числе с применением высококонцентрированных источников

энергии (лазерного, электронного излучения и др.) возможно образование метастабильных соединений и пересыщенных твердых растворов вследствие существенного отклонения температурно-временных условий от равновесных [33–34, 86–87, 94 и др.].

В работе [34] представлен обзор исследований покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе Ni, нанесенных термическим напылением с использованием разработанных экспериментальных и статистических методов за последние двадцать лет. В работе рассматриваются газопламенные методы напыления, высокоскоростное распыление кислородно-воздушного топлива, плазменное напыление, дуговая сварка, лазерная наплавка. Используются данные о процессе для анализа и интерпретации результатов статистического анализа экспериментальных данных.

В статье [35] представлен новый способ определения и прогнозирования взаимосвязи между термодинамическими и физико-механическими параметрами при формировании слоя после напыления на подложку сплава NiCrBSi и его последующей обработки фрезерованием. Экспериментальная часть статьи посвящена исследованию влияния параметров резания при обработке выбранной комбинации материалов (подложка – покрытие: сталь EN 10060 – сплав NiCrBSi). Аналитические результаты термодинамических расчетов могут быть использованы для прогнозирования технологических параметров фрезерования сферической подложки из стали EN 10060 после напыления HVOF, а также для подготовки образцов и последующего получения высококачественных покрытий.

Авторы работы [86] методом плазменного напыления наносили покрытия из самофлюсующегося порошка марки ПР-Н77Х15С3Р2 на подложку из низкоуглеродистой стали 20. Для изучения влияния температуры оплавления на структурные и фазовые превращения образцы с покрытиями оплавливали в печи при температурах от 1030 до 1100 °С. Показано, что основными структурными составляющими покрытий после оплавления являются дендриты  $\gamma$ -Ni, включения  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  и эвтектика Ni–Ni<sub>3</sub>B. Для покрытий, оплавленных ниже 1070 °С, характерно также наличие включений CrB и эвтектики Ni<sub>3</sub>B – Ni<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>B, а для покрытий,

оплавленных при 1100 °С, – включений  $\text{CrB}_2$  и эвтектики  $(\gamma\text{-Ni})\text{-CrB}$ . Выявлено, что с повышением температуры оплавления объемная доля твердых фаз (эвтектики, а также карбидов и боридов хрома) увеличивается, что приводит к росту микротвердости и износостойкости.

В работе [87] исследованы структурные особенности покрытий  $\text{Ni-Cr-Si-B}$  (масс. %: Ni – основа, Cr – 15,1, Si – 2, B – 2, C – 0,4), полученных различными методами. Самофлюсующиеся покрытия были нанесены на трубы из низкоуглеродистой стали методом плазменного напыления. Объемные цилиндрические образцы были получены искровым плазменным спеканием (SPS). Показано, что основными фазами покрытий и спеченных материалов являются  $\gamma\text{-Ni}$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{CrB}$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ . Установлено, что частицы, не расплавленные в процессе плазменного напыления или искрового плазменного спекания (SPS), состоят из эвтектики  $\gamma\text{-Ni-Ni}_3\text{B}$ , а также включений  $\text{CrB}$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ . Высокие скорости охлаждения расплавленных частиц при плазменном напылении способствуют образованию пересыщенного твердого раствора Cr, Si и Fe в  $\gamma\text{-Ni}$ . Структура расплавленных частиц в спекаемом материале имеет градиентный состав: ядро состоит из зерен Ni размером 10 мкм с эвтектикой  $\gamma\text{-Ni-Ni}_3\text{B}$  по краям. Результаты эксперимента показывают, что спекаемый материал имеет меньшую микротвердость по сравнению с плазменными покрытиями (650 и 850 МПа соответственно), но при этом он обладает большей плотностью (пористость менее 1 %), чем плазменные покрытия (пористость около 2–3 %).

Структурные особенности самофлюсующихся покрытий, полученных методом плазменного напыления воздуха с входом в кольцо концентратора и газодинамической фокусировки порошка, представлены в работе [33]. В качестве материала для формирования износостойких покрытий используется самофлюсующийся порошок на основе никеля марки ПН77Х15С3Р2 дисперсностью 40/100 мкм. Порошок напыляли на трубу из низкоуглеродистой стали Ст3 с внутренним диаметром 25 мм и толщиной стенки 3 мм. Показано, что использование кольцевого узла ввода позволяет повысить эффективность нагрева и ускорить частицы в плазменной струе по сравнению с односторонним точечным

вводом порошка в плазменную струю. С помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии установлено, что большая часть частиц, формирующих покрытие, в плазменной струе находится в расплавленном или пластифицированном состоянии. Высокоскоростное охлаждение частиц на подложке способствует образованию пересыщенного твердого раствора на основе  $\gamma$ -Ni со средним размером зерен 80 нм. Кроме этого, в покрытии выделяются упрочняющие фазы:  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{Cr}_2\text{B}$ ,  $\text{CrB}$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Ni}_3\text{Si}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Fe}$ , размеры которых составляют от 5 до 50 нм.

В работе [95] покрытия из сплава на основе Ni были нанесены на сталь 45 методом лазерной наплавки с использованием лазерной системы CW-CO<sub>2</sub>. Микроструктура покрытий была проанализирована с помощью оптического микроскопа, сканирующего электронного микроскопа и рентгеновского дифрактометра. Фракции фаз, фазовый состав и процесс затвердевания в покрытиях рассчитывались с помощью программного обеспечения Thermo-Calc. Показано, что при оптимальных технологических параметрах получается плотное пористое покрытие без трещин. Расчетные результаты, полученные с помощью программного обеспечения Thermo-Calc, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В работах [96–101] исследованы структура и характеристики покрытий из самофлюсующихся порошковых материалов, нанесенных методом лазерной наплавки. Проведен анализ влияния параметров лазерной наплавки на микроструктуру и характеристики абразивного износа покрытий NiCrBSi [96]. Порошок наносили на подложку из мягкой стали (Fe–0,17% C). При различных мощностях лазера и скоростях наплавки получены покрытия толщиной 0,7–1,2 мм. Микроструктура и химический анализ покрытий были проанализированы с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Трибологические свойства покрытий были оценены методом испытания на износ штифтом на диске. EDX-анализ выявил влияние скорости наплавки на растворение железа из подложки в покрытие. Более высокое содержание железа соответствует более

низкой твердости и износостойкости соответствующих покрытий. Полученные результаты указывают на то, что лазерная наплавка является подходящим методом для изготовления абразивно-изнашиваемых покрытий NiCrBSi и что можно подобрать подходящие параметры для оптимизации трибологических характеристик этих покрытий.

В работе [97] лазерное осаждение покрытий было произведено из сплава Colmonoy 69 (Ni–Cr–B–Si–C) и модифицированного Nb сплава Colmonoy 69 методом лазерной наплавки с инъекцией порошка. Добавление Nb было сделано для уменьшения структурного масштаба выделений борида Cr за счет обеспечения Nb-обогащенных агентов для образования зародышей. Выполнена оценка возможности микроструктурного измельчения в качестве механизма упрочнения сплавов Ni–Cr–B–Si–C. Показано, что, хотя значительное измельчение осадков, богатых Cr, при сохранении первоначального уровня твердости в этих сплавах могло быть обусловлено добавлением Nb, восприимчивость к растрескиванию не уменьшалась. Это объясняется наличием непрерывной сети твердых эвтектик, обеспечивающей легкий путь для роста трещин. Результаты данной работы показывают, что эффективный механизм упрочнения сплавов Ni–Cr–B–Si–C должен включать измельчение твердых выделений и модификацию эвтектической структуры.

В публикациях сотрудников Института физики металлов УрО РАН А.В. Макарова, Н.Н. Соболевой и др. приводятся данные о получении упрочненного никельхромборкремниевого покрытия на металлических деталях [98], а также результаты исследований влияния термической обработки на свойства хромоникелевых покрытий [99–100]. Способ получения покрытия, представленный в [98], позволяет создать на поверхности слой с нанокристаллической и субмикроструктурной структурой с полностью деформационно растворенными в твердом растворе боридными никеля и карбидами хрома и может быть использован для получения покрытий на деталях из сплавов на основе железа, меди, титана и алюминия.

В работе [99] исследовано влияние термической обработки на микромеханические свойства покрытий, полученных высокоскоростным лазерным сплавлением. В качестве основы была использована сталь 30ХРА, в качестве наплавляемого материала – порошок марки ПГСР-2. После наплавления слоя образцы подвергались нагреву при температурах 800 °С, 950 °С, 1075 °С с последующим охлаждением в печи. Показано, что после часовой выдержки при температурах 950 °С и 1075 °С средние значения микротвердости хромоникелевого покрытия уменьшаются по сравнению как с наплавленным образцом, не подвергавшимся термообработке, так и образцом после термической обработки при 800 °С.

В работе [100] проведена высокотемпературная обработка покрытия, сформированного лазерной наплавкой порошкового материала ПГСР-2: Ni – основа, Cr – 14,8; В – 2,1; Si – 2,9; Fe – 2,6; С – 0,48 (масс. %). Исследовано влияние условий нагрева и последующего охлаждения на особенности формирования структурно-фазового состояния и свойства данного покрытия. Показано, что высокотемпературный нагрев ( $T = 1050$  °С, выдержка – 1 час) приводит к частичному диффузионному растворению  $Ni_3V$  и  $Cr_{23}C_6$  в твердом растворе, снижению твердости, повышению интенсивности абразивного изнашивания и коэффициента трения. При охлаждении образцов на воздухе, в муфельной и вакуумной печах замедление скорости охлаждения приводит к образованию фаз, отсутствовавших в структуре наплавленного покрытия: CrB и  $Ni_3Si$ . Карбиды и бориды хрома образуют износостойкие структуры каркасоподобного типа, что способствует возрастанию твердости и сопротивления.

В статье [101] рассматриваются свойства слоев сплава NiCrBSi, полученных по гибридной технологии, основанной на объединении технологий атмосферного плазменного напыления и лазерной наплавки *in situ* с помощью диодного лазера. Результаты показывают, что лазерный переплав вызывает рост дендритной микроструктуры, которая существенно уменьшает пористость покрытия, полученного методом напыления. Кроме этого, повышаются адгезия, твердость и модуль упругости. Фазового перехода после лазерной обработки не наблюдается.

Показано, что гибридный процесс позволяет получить покрытия с высокими механическими свойствами.

Способ получения покрытия системы Ni–Cr–B–Si с повышенными эксплуатационными свойствами, включающий плазменное напыление на стальную поверхность порошкового материала (масс. %: 10–14 % Cr, 1,7–2,5 % B, 1,2–3,2 % Si, 0,3–0,6 % C, Ni – основа) и ультразвуковую обработку инструментом, колеблющимся с частотой ~20 Гц и амплитудой ~20 мкм, при различном усилии прижима инструмента, представлен в работе [102]. Показано, что покрытие без ультразвуковой обработки характеризуется наличием опасных растягивающих напряжений в поверхностном слое. Проведение ультразвуковой обработки напыленного покрытия с усилием прижима инструмента 100 Н обеспечивает устранение растягивающих напряжений, а проведение обработки поверхности при нагрузке более 100 Н позволяет получить в поверхностном слое благоприятные сжимающие остаточные напряжения. При обработке покрытия с усилием прижима >500 Н происходит растрескивание покрытия, приводящее к его разрушению. Использование данного способа не приводит к упрочнению поверхностного слоя, а направлено только на создание благоприятного напряженного состояния поверхности.

Следует отметить, что цитируемые выше работы, а также исследования, проведенные другими авторами, например [27–29, 36–37, 80, 85, 103], посвящены в основном нанесению покрытий на стальные подложки и их исследованию. В литературе практически нет данных о нанесении покрытий из самофлюсующихся материалов на подложки из алюминия и его сплавов методами до- и сверхзвукового плазменного напыления.

Поэтому исследование порошковых материалов, а также структуры и свойств покрытий на их основе с последующей разработкой технологии модификации (упрочнения и восстановления) деталей машин и механизмов, изготовленных из алюминиевых сплавов, методами до- и сверхзвукового плазменного напыления, является **актуальной** задачей.

## Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования

1. 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 для изменения свойств, а также позволяет проводить реновацию изношенных в процессе эксплуатации поверхностей деталей машин и механизмов.

2. Нанесение специальных покрытий позволяет усиливать такие характеристики, как износостойкость, коррозионностойкость, антифрикционные, теплозащитные и другие свойства. Для восстановления деталей широкое применение получили газотермические методы, среди которых особое внимание уделяется до- и сверхзвуковому плазменному напылению.

3. Наиболее распространенными материалами для поверхностного упрочнения деталей, напыления и наплавки коррозионностойких покрытий, а также покрытий, устойчивых к изнашиванию трением и абразивными частицами, являются самофлюсующиеся материалы Ni–Cr–B–Si–C.

Поэтому **целью работы** является исследование порошковых материалов системы Ni–Cr–B–Si–C, разработка физических основ технологии формирования покрытий на их основе методами до- и сверхзвукового плазменного напыления на поверхности изделий из алюминиевого сплава АК7ч и исследование свойств полученных покрытий. Для достижения поставленной цели решались **задачи**, представленные в разделе «Введение» настоящей работы.

## Глава 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Термодинамическое моделирование

Термодинамическое моделирование (ТМ) – это разновидность математического моделирования, имеющая свои особенности. Расчет термодинамического равновесия произвольных многокомпонентных систем заключается в определении всех равновесных параметров, термодинамических свойств, а также химического и фазового состава [104–109].

В сложных системах для моделирования термодинамических свойств каждой фазы в отдельности и поведения многокомпонентной системы в целом используют такие вычислительные методы, как CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) [110–111]. В настоящее время для расчета равновесного состава химически реагирующих систем создано большое количество программ, в которых используются различные алгоритмы расчета равновесия (Thermo-Calc, FactSage, MTDData, Pandat, HSC, TERRA, «Ивтантермо» для Windows и др.), программные коды (OpenCalphad, PyCalphad и ESPEI), а также ряд термодинамических баз данных с экспертной информацией (как коммерческих, так и свободно распространяемых) для различных материалов (стали, суперсплавы, полупроводниковые материалы, водные растворы, оксиды и т. д.) [106, 109–124].

В диссертационной работе для моделирования фазового и химического равновесия использовался программный комплекс TERRA, созданный в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана [104–106, 109, 122]. Этот программный комплекс предназначен для расчета произвольных систем с химическими и фазовыми превращениями. Наличие обширной базы данных свойств индивидуальных веществ позволяет проводить моделирование произвольных по химическому составу систем.

Определение параметров равновесного состояния заключается в нахождении значений всех зависимых переменных, при которых величина энтропии достигает максимума. С математической точки зрения определение максимума энтропии

системы  $S$  сводится к решению задачи на условный экстремум. С этой целью составляется функция Лагранжа вида  $\Lambda(p, T, n_i, n_l, n_{гх}, \lambda_j, \lambda_e, \lambda_u, \lambda_p, \lambda_x)$  [106–109, 122]. Продифференцировав функцию Лагранжа по всем независимым переменным  $p, T, n_i, n_l, \lambda_j, \lambda_e, \lambda_u, \lambda_p, \lambda_x$  и приравняв частные производные к нулю, получают систему уравнений, описывающую связи, существующие в равновесии между параметрами состояния и составом рассматриваемой многокомпонентной системы. Для однозначного определения состояния равновесия в соответствии с фундаментальными положениями термодинамики необходимо задать два параметра состояния, в качестве которых могут быть выбраны любые величины из числа тех, что известны по условиям постановки общей проблемы моделирования. Выбор задаваемых характеристик обусловлен только удобством описания условий равновесия системы с окружающей средой. Равновесие может задаваться не только значениями традиционных пар параметров: давление  $p$  и температура  $T$  или объем  $V$  и температура  $T$ , – но и другими комбинациями термодинамических параметров (энтропии  $S$ , энтальпии  $I$ , внутренней энергии  $U$ , свободной энергии  $F$  и изобарно-изотермического потенциала  $\Phi$ ).

Максимальное число химических элементов, из которых может состоять исследуемая система, равно пятидесяти. В ходе одного расчета можно учитывать не более 200 конденсированных фаз и не более 800 компонентов газовой фазы, образующихся в равновесии (число индивидуальных веществ). При проведении расчетов возможно использование как модели однокомпонентных несмешивающихся фаз, так и моделей конденсированных растворов (например, идеального, идеального ассоциированного либо регулярного растворов).

Рассчитываемые характеристики состояния включают в себя термодинамические параметры состояния и транспортные свойства системы: давление, температура, удельный объем, энтропия, полная энтальпия, полная внутренняя энергия, равновесная скорость звука, массовая доля всех конденсированных фаз и так далее. После завершения всех вычислений полученные результаты могут быть сохранены в виде таблицы Excel, текстового или графического файлов, а также напечатаны на принтере.

## **2.2. Моделирование процесса плазменного напыления покрытий с использованием программного комплекса Plasma 2002**

Для прогнозирования динамических и теплофизических процессов, происходящих на различных стадиях процесса плазменного напыления, использован программный комплекс Plasma 2002, который позволяет моделировать весь процесс формирования покрытия: движение и нагрев частиц порошка в плазменной струе, формирование структуры покрытия, поведение модели покрытия в напряженно-деформированном состоянии [125–128].

Реализация программного комплекса осуществлялась на языке Microsoft Visual C++ 6.0 с использованием современных технологий объектно-ориентированного программирования и пользовательского интерфейса.

В данном программном комплексе реализованы следующие модели.

1. Модель нагрева и движения частиц порошка в плазменной струе. В плазменной струе частицы дисперсного порошка нагреваются в основном за счет конвективного и лучистого теплообмена. Степень проявления каждого из видов теплообмена и в особенности условия протекания конвективного теплообмена в большой степени зависят от состояния пограничного слоя (ламинарное или турбулентное) и от характера обтекания частиц газовым потоком. Для проведения моделирования в качестве входных данных используются геометрические размеры частиц, свойства их материала, параметры плазмообразующего газа, тип плазмотрона и технологические параметры процесса напыления.

2. Модель формирования структуры покрытия. Входные данные передаются из первой модели. Пользователем задаются следующие параметры: интересующие значения диаметров частицы, численное значение времени распыления и число проходов плазменной струи над основанием, а также геометрические размеры подложки (основания). Выходными данными модели являются полученные изображения напыленного покрытия в виде укрупненного панорамного изображения всего покрытия с выделением своим цветом каждого прохода плазмотрона. Кроме этого, моделируется ламельная структура покрытия (ламель –

расплющенная при соударении с основанием частица) с цветным изображением каждой ламели, рассчитывается процентное содержание пор, образующихся в местах перекрытия ламелей.

3. Модель напряженно-деформированного состояния в системе покрытие – основание (подложка). Для расчета модели необходимы физические параметры материалов порошка и подложки и технологические параметры процесса (время напыления покрытия, время охлаждения системы покрытие – основание). Выходными данными модели являются: динамические поля распределения температуры и напряжений в подложке в заданный при моделировании момент времени; изменение температуры и напряжений в подложке в различные моменты времени; динамика изменения температуры в различных точках подложки; распределение напряжений в подложке в момент завершения заданного времени охлаждения; динамика изменения напряжений в интерфейсном слое подложки.

Блок управления потоками данных, входящий в структуру комплекса, осуществляет согласование работы моделей, поддерживает универсальный протокол обмена данными, позволяет передавать их из одной модели в другую, загружает данные из базы по запросам моделей, осуществляет передачу информации в модуль отображения.

В программном комплексе реализован режим сквозного моделирования процесса плазменного напыления с передачей данных первой модели к последующим. В частности, в качестве входных данных модели нагрева и движения частиц порошка используются одно- и двухмерные аппроксимации температуры и скорости в незагруженной плазменной струе, которые хранятся в базе данных. На вход второй модели передаются свойства выбранных для моделирования материала покрытия и плазмообразующего газа, дистанция напыления, скорость частиц порошка в момент соударения с основанием, на вход третьей модели – также свойства материалов, режимы напыления, рассчитанная в первой модели температура плазменной струи и пористость покрытия.

## 2.3. Плазменное напыление порошковых материалов

Процесс получения покрытий плазменным методом представляет собой совокупность операций, выполняемых в определенной последовательности. Технологическая схема операций представлена на рисунке 2.1.

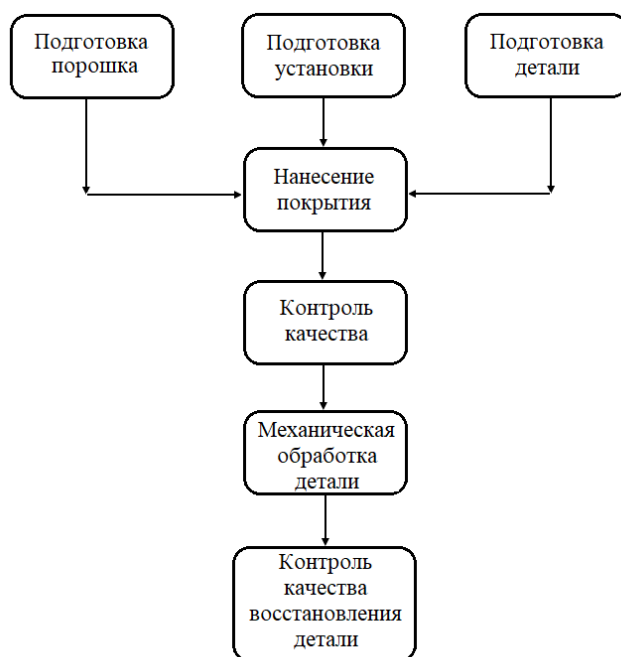


Рисунок 2.1 – Технологическая схема операций процесса получения покрытия плазменным методом

### 2.3.1. Подготовка поверхности изделия и порошковых материалов перед нанесением покрытий

1. Подготовка поверхности перед нанесением плазменных покрытий включает комплекс операций:

- 1) механическая обработка деталей методами шлифовки или резания;
- 2) очистка от грязи, жиров, влаги и ржавчины осуществляется в соответствии с ГОСТ 9.402–2004 с применением органических растворителей, щелочных растворов и различных эмульсий;

3) с целью удаления масел за счет выгорания производится общий подогрев детали. Подогрев осуществляют до  $T = 373\text{--}423\text{ К}$  с последующим медленным охлаждением в печи или на воздухе;

4) места, подлежащие восстановлению, обезжириваются ацетоном или уайт-спиритом. Места, не подлежащие плазменной обработке, необходимо защитить дополнительными механическими экранами;

5) для снятия оксидной пленки и поверхностных напряжений деталей, увеличения площади поверхности напыления, обнаружения внутренних дефектов детали (пор, трещин) проводится дробеструйная обработка при давлении сжатого воздуха до 0,6 МПа. Расстояние от среза сопла до поверхности составляет 20–100 мм, угол наклона сопла к поверхности от 75–90°. В качестве абразивного материала используется чугунная или стальная дробь № 04,08 ГОСТ 11964–81 или электрокорунд 13А, фракция 100–160 мкм ГОСТ 3647–80. Дробеструйная обработка осуществляется до создания шероховатости 10–30 мкм, однородной по всей обрабатываемой поверхности. После дробеструйной обработки прикосновение к напыляемой поверхности и попадание различных паров и капель жидкостей категорически запрещается. Переноска и размещение деталей для напыления должны осуществляться в чистых рукавицах и специально подготовленным инструментом (обезжиренным).

## 2. Подготовка порошковых материалов:

1) сушка порошка. Перед употреблением для плазменного напыления порошки просушиваются в вакуумном сушильном шкафу в течение 2–5 часов при температуре 100–150 °С на противнях из нержавеющей стали при толщине засыпки до 20 мм. Невыполнение этой подготовительной операции может привести к насыщению материала покрытия кислородом и ухудшению текучести порошка, что отрицательно скажется на процессе плазменного напыления и свойствах покрытия;

2) выделение фракции. На процесс напыления и свойства покрытия сильное влияние оказывает размер частиц и его гранулометрический состав. При употреблении порошка, не прошедшего операции фракционирования, может

произойти расплавление более мелких частиц в непосредственной близости от места подачи порошка в сопло, что приводит к заплавлению отверстия, через которое подается порошок и отрыву плазменной струей вырастающих комков в виде больших капель, что приводит к ухудшению качества покрытия;

3) определение гранулометрического состава порошковых материалов проводилось методом ситового анализа, основанного на механическом разделении частиц по крупности. Сущность метода заключается во взвешивании остатков на ситах и определении их содержания в процентах от общей массы просеянного материала. Размеры зерен в каждой фракции шлифзерна и шлифпорошков определяются размерами ячеек контрольных сит в свету, применяемых для анализа. Для проведения ситового анализа были использованы: установка лабораторная для разделения песчаной основы формовочных песков на фракции по крупности зерен модели 029, производства Усманского завода литейного оборудования, с набором контрольных сит с сетками по ГОСТ 6613–86, весы лабораторные ВЛР-200г, имеющие точность измерения массы  $\pm 0,1$  мг; вакуум-сушильный шкаф типа SPT-200. Ситовый анализ проводился для навесок порошка массой 100 г. При этом результаты в граммах соответствуют процентному содержанию фракции. Последующая работа по определению гранулометрического состава порошков проводилась на анализаторе частиц по размерам и форме CAMSIZER-XT (RetschTechnology, Германия), принцип действия которого основан на регистрации проекционных изображений частиц. Анализируемая проба движется через измерительную ячейку, подсвеченную планарным светодиодом. Находящиеся в пробе частицы попадают в поле зрения двух цифровых камер, содержащих высокочувствительные ПЗС-матрицы. Высокая частота кадров (275 кадров в секунду) позволяет получать массив цифровых изображений частиц. Обработка полученных данных позволяет получить кривую плотности распределения частиц по размерам, средний размер частиц, коэффициенты формы.

### 3. Подготовка плазмообразующих газов:

1) перед применением газов проводилась их проверка (по сертификату) на соответствие выбранному. При обнаружении несоответствия или проявления

низкого качества газа в процессе напыления, что определяется по возникновению пульсации плазменного факела, скачков напряжения и других признаков, следует прекратить работу и заменить газ;

2) перед каждым включением плазмотрона проводилось определение влажности подаваемого воздуха с помощью тестового метода на рабочем месте. Данный метод заключается в следующем: в течение одной минуты на фильтровальную бумагу подается сжатый воздух; через минуту визуально оценивается сухость рабочего газа; если воздух влажный, проводится ревизия оборудования, смена фильтров, удаление конденсата из компрессора.

### **2.3.2. Плазменное напыление покрытий**

В настоящей работе для нанесения порошковых покрытий использовалась многофункциональная плазменная установка МАК-100 (МПУ МАК-100) [129–133], разработанная в Институте металлургии УрО РАН. Установка оснащена дуговыми плазмотронами прямого и косвенного действия мощностью до 100 кВт и позволяет осуществлять плазменную резку, сварку, модифицирование стальных поверхностей, плазменное дозвуковое и сверхзвуковое напыление, а также плазменное распыление металлических материалов для получения порошка для аддитивных технологий. В качестве плазмообразующих газов возможно использование аргона, воздуха, смесей газов (воздух + пропан, воздух + метан и других).

Установка конструкционно обеспечена пультом управления, камерой напыления, порошковым дозатором, вытяжным вентилятором, плазмотроном, устройством для перемещения изделия, водяным насосом и холодильником.

Универсальность данного оборудования заключается в его мобильности как при перемещении в пространстве, так и при перенастройке силовых модулей для различных технологических операций.

При выборе режимов напыления учитывались такие факторы, как скорость и температура напыляемых частиц, дистанция напыления, фракция применяемого порошка, состав и расход плазмообразующих газов.

В таблице 2.1 представлены рабочие характеристики МПУ МАК-100, полученные на основании экспериментальных данных по отработке технологии нанесения покрытий [130, 133].

Таблица 2.1 – Рабочие характеристики МПУ МАК-100 [130, 133]

| Параметры                                                                                      | Значения параметров                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Номинальное напряжение, В                                                                      | 380                                   |
| Число фаз                                                                                      | 3                                     |
| Частота сети, Гц                                                                               | 50                                    |
| Напряжение холостого хода источника питания, В                                                 | 40–500                                |
| Ток плазмотрона, А                                                                             | 20–400                                |
| Максимальная потребляющая мощность, кВт                                                        | 100                                   |
| Плазмообразующие газы                                                                          | воздух, аргон, азот, метан и их смеси |
| Номинальное давление плазмообразующего газа, МПа                                               | 0,6                                   |
| Максимальный расход плазмообразующего газа (м <sup>3</sup> /ч, л/мин)                          | 30/500                                |
| Производительность напыления порошка, кг/ч                                                     | 20–40                                 |
| Охлаждение плазмотрона                                                                         | жидкостное (вода, антифриз)           |
| Система охлаждения (холодильная установка ВМТ-4 с гидромодулем), холодопроизводительность, кВт | замкнутая<br>5,6                      |
| Емкость системы охлаждения, л                                                                  | 60                                    |
| Давление охлаждающей жидкости, МПа                                                             | 0,3–0,6                               |
| Режим работы, ПН %                                                                             | 100                                   |
| Габаритные размеры установки (без компрессора и чиллера), мм                                   | 600×1200×400                          |
| Масса установки (без компрессора и чиллера), кг, не более                                      | 150                                   |

Основными характеристиками, обеспечивающими конкурентоспособность МПУ МАК-100, являются: компактность (малый вес и габариты), мобильность (транспортировка установки непосредственно на место проведения работ). Принцип последовательно-параллельного соединения отдельных модулей питания по 7,5 кВт позволяет собрать источник питания постоянного тока на любую требуемую мощность, ток и напряжение. Применение современных AVR-микроконтроллеров наделяет установку МАК-100 достаточным интеллектом, позволяющим минимизировать вмешательство оператора в технологический процесс, что гарантирует производительность и повторяемость результатов.

Приведение МПУ МАК-100 в рабочее положение осуществляется в соответствии с инструкцией по эксплуатации установки. Задаются требуемые параметры давления и расхода газов и порошка. Контролируется подача порошка и уровень засыпки. Задается требуемая скорость вращения детали, а также скорость подачи плазмотрона вдоль оси восстанавливаемой детали.

## **2.4. Методы исследования порошков и покрытий на их основе**

### **2.4.1. Исследование структуры и фазового состава**

Структурные исследования выполнены с использованием металлографического инвертированного микроскопа Olympus GX51 и программного обеспечения SIAMS Photolab в ЦКП «Урал-М», в диапазоне увеличений от 50 до 500 крат в режиме светлого поля. Фотографии порошков ПГСР-2 и ПГСР-4 были сделаны с помощью стереомикроскопа Meiji Techno серии EMZ. Для изучения градиентной структуры наплавленных слоев исследованию подвергались сечения образца, перпендикулярные поверхностному слою.

Фазовый состав образцов определен порошковой рентгеновской дифракцией. Съёмки дифрактограмм проводились при комнатной температуре (298 К) на дифрактометре D8 Advance (Cu-K $\alpha$ -излучение, 40 kV, 40 mA, позиционно-чувствительный детектор VANTEC-1,  $\beta$ -фильтр). Данные записывались

в интервале углов  $15\text{--}110^\circ$  с шагом  $0,021^\circ$  по  $2\theta$  и экспозицией в точке равной  $\sim 500$  с. Фазовый анализ проводился с использованием программного пакета DIFFRAC<sup>plus</sup>: EVA [134] и базы данных Международного центра дифракционных данных (ICDD) PDF4 (Release 2021) [135]. Полнопрофильный анализ по методу Ритвельда [136] выполнен с использованием программы TOPAS [137].

Рентгеновский дифрактометр D8 Advance с перестраиваемой геометрией предназначен для исследования структуры порошкообразных материалов. С помощью дифрактометра D8 Advance можно проводить качественный и количественный анализ кристаллических фаз, определять размеры кристаллитов, исследовать изменения структуры кристаллических фаз в зависимости от температуры, влажности и атмосферы.

Для оценки целостности покрытия, его химического состава и особенностей структуры был использован аналитический сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) TescanMira. Исследование проводилось в Институте физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург.

Сканирующая (растровая) электронная микроскопия (СЭМ, РЭМ) позволяет получить изображения объемных электронно-плотных образцов с высоким разрешением путем сканирования образцов тонко сфокусированным пучком электронов. Источником электронов в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TescanMira является полевая электронная эмиссия. Ускоряющее напряжение электронов составляло 20 кВ. Возможно получение информации о строении поверхности объекта (топографический контраст, вторичные электроны), о составе объекта (обратно-рассеянные электроны, анализ характеристического рентгеновского излучения) и некоторых других характеристик.

Энергодисперсионный анализ, позволяющий проводить локальное определение химического состава изучаемого образца, составлять карты распределения химического состава, выполнен с помощью энергодисперсионного спектрометра Oxford Instruments UltimXmax, совмещенного с СЭМ.

### 2.4.2. Термический анализ

В настоящей работе синхронный термический анализ (СТА) проводился на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter<sup>®</sup>, представляющем собой измерительный комплекс, в котором объединены функции дифференциального сканирующего калориметра и высокочувствительных аналитических весов, что позволяет проводить одновременно в одном эксперименте и на одном образце измерения как теплоты и температуры фазового перехода, так и регистрировать изменение массы исследуемого образца. Перед проведением исследований методами ТА проведена калибровка термоанализатора с использованием стандартных образцов металлов по температуре и по чувствительности.

Исследование порошковых материалов ПР-Н77Х15СЗР2 (ПГСП-2) и ПР-Н70Х17С4Р4 (ПГСП-4) проводилось в корундовых тиглях в интервале температур 25–1400°С со скоростью нагрева 10 С°/мин в среде аргона. Температуры плавления компонентов анализируемых порошков определялись по температуре начала эндотермических пиков на ДСК-кривой.

### 2.4.3. Измерение твердости

Определение твердости поверхности образцов проводилось в соответствии с ГОСТ 2999–75 [138] с помощью прибора ИТ 5010, представляющего собой конструкцию с рычажной системой воспроизведения заданных нагрузок и нанесения отпечатка на образце. Данный прибор позволяет определять твердость материала по Бринеллю и по Виккерсу.

Твердость по Виккерсу определяют путем статического вдавливания в поверхность исследуемого образца алмазной четырехгранной пирамиды с углом  $\alpha = 136^\circ$  между противоположными гранями. Значение твердости определяют по формуле (2.1):

$$HV = \frac{P}{F} = 1,854 \frac{P}{d^2}, \text{ кгс/мм}^2, \quad (2.1)$$

где  $P = 5\text{--}100$  кгс;  $d$  – диагональ отпечатка.

При испытании измеряют обе диагонали отпечатка  $d_1$  и  $d_2$  с точностью до 0,001 мм при помощи микроскопа. В расчетах применяют среднеарифметическое значение обеих диагоналей:  $(d_1 + d_2)/2$  (рисунок 2.2).

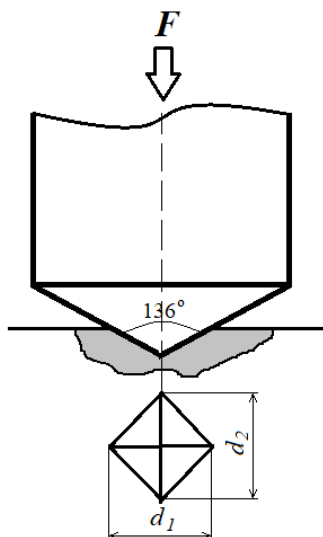


Рисунок 2.2 – Схема измерения твердости по Виккерсу прибором ИТ 5010

Измерение отпечатка в режиме работы *по методу Виккерса* производится с помощью встроенной отсчетно-проекционной системы. Перед измерением твердости необходимо произвести осмотр образцов. Поверхность испытуемого образца должна иметь шероховатость не более 0,16 мкм, поэтому перед измерением твердости образцы подвергались шлифовке алмазной фрезой.

При измерении твердости алмазной пирамидой применялась нагрузка 5 кгс (49,03 Н), при этом были соблюдены условия: плавное возрастание нагрузки до необходимого значения; поддержание постоянства приложенной нагрузки в течение 15 с; выдерживалось расстояние между центром отпечатка и краем образца или краем соседнего отпечатка не менее 2,5 длины диагонали отпечатка. Исследование твердости проводилось по всей площади поверхности образца, количество отпечатков – 10; твердость по Виккерсу для измеренных диагоналей определялась по таблице значений твердости [138].

#### 2.4.4. Микротвердость

Для определения микротвердости плазменных покрытий использован микротвердомер ПМТ-3, представляющий собой микроскоп, предназначенный для измерения микротвердости металлов, стекла, абразивов, керамики, минералов и других материалов. Принцип действия прибора основан на вдавливании алмазной пирамиды в исследуемый материал (рисунок 2.3) под определенной нагрузкой и измерения линейной величины диагонали полученного отпечатка.

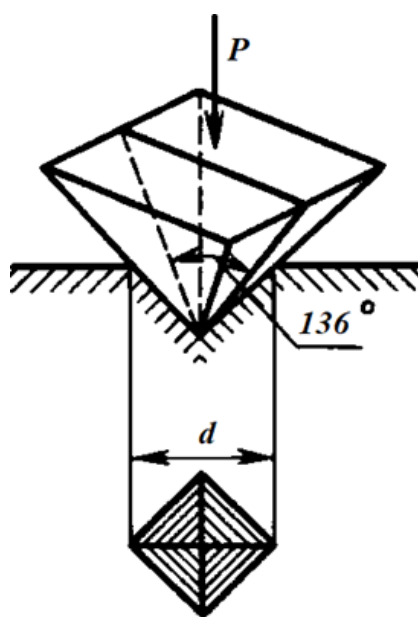


Рисунок 2.3 – Измерение микротвердости: принцип действия прибора ПМТ-3

Значение твердости ( $H$ ) (2.2) определяется как частное от деления нагрузки  $P$  (в кг) на боковую поверхность  $S$  ( $\text{мм}^2$ ) отпечатка в предположении, что углы отпечатка соответствуют углам пирамиды:

$$H = \frac{P}{S} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1,854P}{d^2}, \quad (2.2)$$

где  $\alpha$  – угол при вершине алмазной пирамиды ( $136^\circ$  или 2,47 радиан). Если  $P$  выразить в граммах, а  $d$  – в микронах, то формула для вычисления примет вид (2.3):

$$H = \frac{1854P}{d^2} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}. \quad (2.3)$$

Таким образом, исследование микротвердости – один из наиболее тонких способов механических испытаний материалов, который позволяет сделать выводы о неоднородности распределения растворимых примесей по зерну и осуществить оценку твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов.

#### **2.4.5. Испытания на трехточечный изгиб**

Важным критерием прочности и работоспособности покрытий в реальных условиях является поведение системы покрытие – подложка при воздействии внешних деформирующих факторов. Наличие резко выраженной границы между покрытием и основой является основным фактором, который и определяет поведение этой системы при механическом нагружении. Кроме этого, существенное влияние оказывает и неоднородность структуры напыленного покрытия.

При плазменном напылении покрытие формируется послойно, частицы материала последовательно укладываются друг на друга, деформируясь и растекаясь при этом. Из-за неоднородности порошкового сплава возникают межзеренные и межфазные границы в самом покрытии, в подложке и на границе между покрытием и подложкой. Вследствие того, что охлаждение и кристаллизация частиц происходят в условиях быстрой закалки, формируются неравновесные структуры. При ударе о поверхность подложки частицы растекаются и кристаллизуются неравномерно из-за высоких скоростей напыления. При этом некоторые частицы могут отскочить от поверхности, оставив в ней полость, что приводит к образованию пустот на стыках частиц, которые могут наполняться газом. Некоторые частицы к моменту соударения с подложкой успевают остыть и кинетической энергии соударения недостаточно для их проплавления. Поэтому такие частицы остаются в покрытии в шарообразной форме. При напылении покрытий в воздушной среде происходит взаимодействие частиц порошка с кислородом, что приводит к формированию оксидов

и выгоранию некоторых частиц. Все это влияет на характер разрушения материала при механической деформации [139–140].

При нагружении по схеме трехточечного изгиба системы покрытие – основа деформация происходит равномерно вдоль линии соприкосновения с верхней опорой. Различие структуры и физико-химических свойств покрытия и подложки приводит к различию развития в них пластической деформации. Максимальное растягивающее напряжение будет возникать на противоположной к месту приложения нагрузки грани [139–140]. Схематичные изображения испытания на трехточечный изгиб и возникновения сжимающих и растягивающих напряжений при этих испытаниях представлены на рисунках 2.4 и 2.5 соответственно.

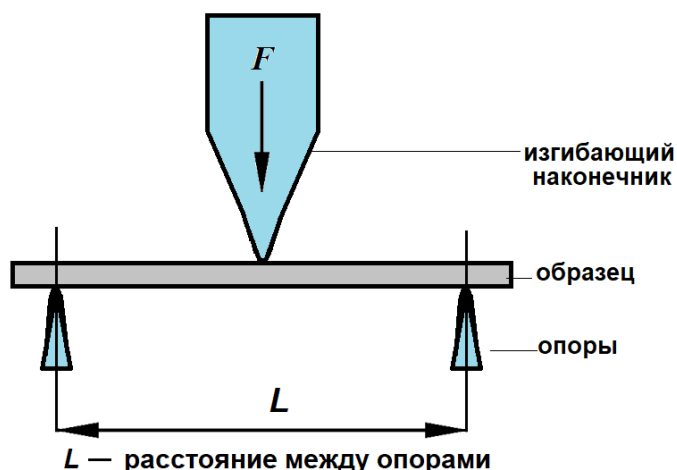


Рисунок 2.4 – Схематичное изображение испытания на трехточечный изгиб

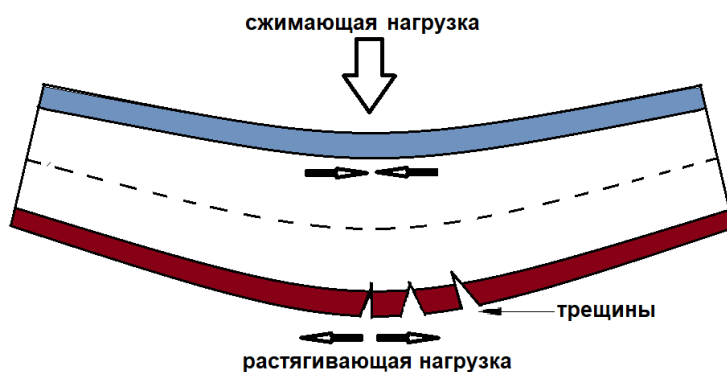


Рисунок 2.5 – Схематичное изображение возникновения сжимающих и растягивающих напряжений при испытаниях на трехточечный изгиб

Исследования закономерностей развития деформации при трехточечном изгибе проводились на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z050. Образцы для испытаний изготавливались из алюминиевого сплава АК7ч в форме плоских пластин размером  $50 \times 15 \times 1,5$  мм, на которые методами дозвукового и сверхзвукового плазменного напыления наносились покрытия различной толщины из самофлюсующихся порошков ПГСП-2 и ПГСП-4. Расстояние между опорами составляло 20 мм, пластина укладывалась покрытием вниз, чтобы нагружение происходило со стороны подложки. Скорость перемещения подвижной траверсы составляла 4 мм/мин.

#### 2.4.6. Износостойкость

Исследования износостойкости проведены на машине трения СМТ-1М модели 2070 по схеме неподвижная колодка (образец) – жесткий вращающийся диск (контртело) в соответствии с ГОСТ 23.208–79 [141], ГОСТ 30479–97 [142], ГОСТ 50740–95 [143]. Для проведения испытаний было изготовлено контртело в форме диска из стали ШХ-15 с твердостью 832 HV (65 HRC), диаметром 50,0 мм. Все диски были подвергнуты термообработке: закалка с охлаждением в воде с последующим шлифованием торца контртела до шероховатости  $R_a = 2,0\text{--}2,5$  мкм (ГОСТ 2789–73). Скорость вращения контртела составляла 200 об/мин, нагрузка на образец  $P = 100$  Н. Схема проведения испытаний представлена на рисунке 2.6.

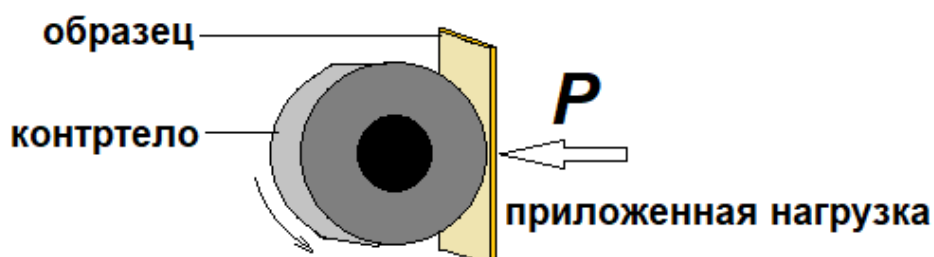


Рисунок 2.6 – Схема проведения испытаний на машине трения СМТ-1М

Испытания образцов проводились в двух режимах: 1) сухое трение; 2) трение с применением смазки. В качестве смазки использовалась вода. Скорость подачи воды – 45 капель (2,25 граммов) в минуту). Образцы истирались в течение 60 минут, при этом каждые 15 минут машину трения останавливали, проводили взвешивание образца на аналитических весах ATL-220d4-1, класс точности I специальный. Масса образца определялась на высокоточных весах с точностью до 0,0001 г. С учетом вышесказанного и паспортных данных приборов рассчитано, что погрешность измерений составляет не более 2 %.

### 2.4.7. Шероховатость

В соответствии с ГОСТ 25142–82 [144] установлены следующие параметры шероховатости (рисунок 2.7).

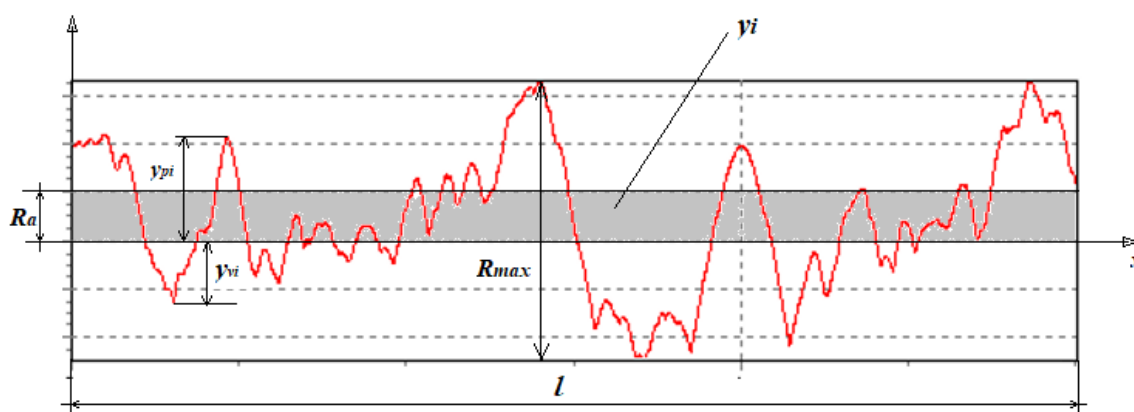


Рисунок 2.7 – Профилограмма поверхности

*Базовая длина  $l$  – длина базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности.*

*Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений в пределах базовой длины (2.4):*

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (2.4)$$

*Высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$*  – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины (2.5):

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi}}{5}. \quad (2.5)$$

*Наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$*  – расстояние между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Исследование шероховатости поверхности проводилось с использованием портативного профилометра TR200, при работе которого контактный датчик для криволинейной поверхности, представляющий собой индентор, подключаемый к моноблоку прибора, располагают на поверхности исследуемого образца и проводят им по поверхности с постоянной скоростью. Радиус кончика алмазного пера – 5 мкм, сила прижима при измерении – 4 мН (0,4 гс), угол заточки кончика пера – 90°, радиус кривизны скользящего элемента – 45 мм. Максимальный диапазон перемещения датчика – 17,5 мм. Скорость перемещения от 0,135 мм/с до 1 мм/с. Неровности поверхности вызывают смещения в датчике, в результате чего изменяется индуктивность катушки, генерирующей аналоговый сигнал, пропорциональный размерам неровностей. Микросхема цифровой обработки сигналов, зарегистрировав эти изменения, переводит их в электрический сигнал и просчитывает характеристики шероховатости и профиля поверхности. Полученные результаты выводятся на жидкокристаллический дисплей в виде цифровых значений и графиков.

#### **2.4.8. Коррозионная стойкость**

Испытания коррозионной стойкости покрытий проводились в камере соляного тумана EVCLIM-KCT по стандартному испытательному тесту ASTM B117 в соответствии с ГОСТ 34388–2023 (ISO 9227:2017) [145]. Образцы

выдерживались в камере соляного тумана в распыляемой нейтральной соляной среде, содержащей пятипроцентный раствор хлорида натрия, с рН 6,5–7,2. В процессе испытаний периодически выполнялся контроль и оценка внешнего вида покрытий в соответствии с ГОСТ 9.311–2021 [146]. Обозначение оценки каждого вида разрушения состоит из условного вида разрушения:

А – потускнение: цвета побежалости или полупрозрачный слой легкоудаляемых продуктов коррозии на покрытии (различим исходный цвет покрытия);

Б – изменение цвета покрытия: образование полупрозрачного слоя легкоудаляемых продуктов коррозии покрытия (различим исходный цвет покрытия);

В – разрыхление покрытия;

Г – коррозия покрытия с образованием оксидообразных продуктов;

Д – коррозия покрытия с образованием солеобразных продуктов (в т. ч. гидратов окислов);

Е – коррозия подслоя (подслоев) покрытия;

К – коррозия основного металла.

Оценку защитных свойств покрытий (Аз) в баллах проводят по результатам оценки коррозионных поражений основного металла, в зависимости от площади коррозионных поражений основного металла (таблица 2.2). Оценку декоративных свойств покрытий (Ад) в баллах проводят по результатам оценки коррозионных поражений покрытия и основного металла.

Таблица 2.2 – Оценка защитных свойств покрытий

| Площадь коррозионного поражения, % | Оценочный балл |
|------------------------------------|----------------|
| Повреждения отсутствуют            | 10             |
| 0–0,20                             | 9              |
| 0,21–0,45                          | 8              |
| 0,46–1,00                          | 7              |
| 1,01–2,24                          | 6              |
| 2,25–5,00                          | 5              |

Окончание таблицы 2.2

| Площадь коррозионного поражения, % | Оценочный балл |
|------------------------------------|----------------|
| 5,01–11,20                         | 4              |
| 11,21–25,00                        | 3              |
| 25,01–56,00                        | 2              |
| 56,01–100,00                       | 1              |

Площадь коррозионных поражений определяется непосредственным измерением площади всех коррозионных очагов или наложением на оцениваемую поверхность пластины из прозрачного материала с нанесенной на нее сеткой или проволоочной сетки. Запись обобщенной оценки коррозионного поражения образца в сокращенной форме состоит из условного обозначения вида поражения и цифры, обозначающей оценочный балл площади поверхности, занятой этим видом поражения [146].

Изучение коррозии позволяет оценить влияние состава, структуры и состояния поверхности металлов и сплавов на эксплуатационные характеристики и коррозионное поведение сложных металлических конструкций и сооружений, а также провести выбор коррозионностойких покрытий для различных деталей.

### Выводы по главе 2

Для проведения комплексного исследования состава и свойств самофлюсующихся порошковых материалов, а также структуры, физико-химических, механических и функциональных свойств покрытий на их основе использованы апробированное программное обеспечение, современные надежно аттестованные методы и оборудование.

1. Компьютерное моделирование выполнено с использованием программных комплексов TERRA и Plasma 2002.

2. Для нанесения покрытий методами до- и сверхзвукового плазменного напыления использована МПУ МАК-100.

3. Исследование структуры и фазового состава порошковых материалов и плазменных покрытий выполнено с использованием материаловедческого микроскопа Olympus GX51 (металлографический анализ), дифрактометра D8 Advance (рентгенофазовый анализ), аналитического сканирующего электронного микроскопа TescanMira.

4. Определение теплот и температур фазовых переходов и изменение массы исследуемых образцов выполнено методом синхронного термического анализа (СТА) на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter®.

5. Измерения твердости и микротвердости покрытий проведены с помощью прибора ИТ5010 и микротвердомера ПМТ-3 соответственно. Испытания на трехточечный изгиб проводились на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z050.

6. Для исследования эксплуатационных свойств покрытий использованы приборы: машина трения СМТ-1М модели 2070 (определение износостойкости покрытий), профилометр TR200 (измерение шероховатости), камера соляного тумана EVCLIM-KCT (изучение коррозионной стойкости).

### **Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ**

Для проектирования и оптимизации процессов нанесения газотермических покрытий необходимо проведение комплекса экспериментальных и теоретических исследований, позволяющих получить как информацию о составе, структуре, содержании компонентов, интегральных физико-химических свойствах материалов, используемых в процессе напыления, так и осуществить выбор входных параметров (исходный состав порошкового материала и плазмообразующего газа, температура, давление, дистанция напыления и другие).

Использование компьютерного моделирования позволяет существенно сократить объем экспериментальных исследований, уменьшить временные и материальные затраты для подбора оптимальных параметров и, следовательно, выбора оптимальных технологических режимов нанесения покрытий.

#### **3.1. Термодинамическое моделирование самофлюсующихся материалов на основе никеля**

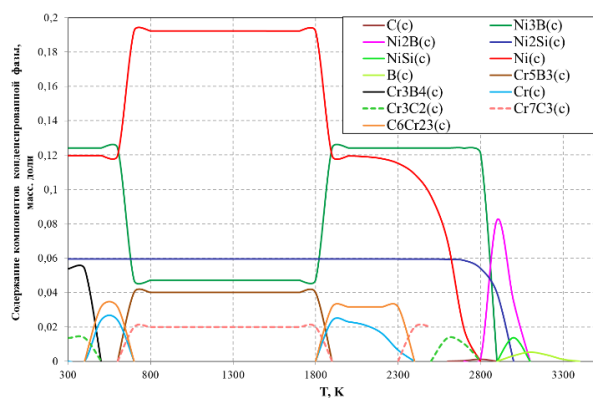
Исследование равновесного состава и термодинамических характеристик самофлюсующихся порошковых материалов Ni–Cr–B–Si–C проведено с использованием программного комплекса TERRA [104–109, 122].

Моделирование выполнено в интервале температур 300–6000 К при общем давлении  $P = 10^5$  Па в атмосфере различных плазмообразующих газов: аргона, азота, воздуха и смесей «воздух + пропан». Исходный состав моделируемых систем соответствовал составу порошковых самофлюсующихся материалов на основе

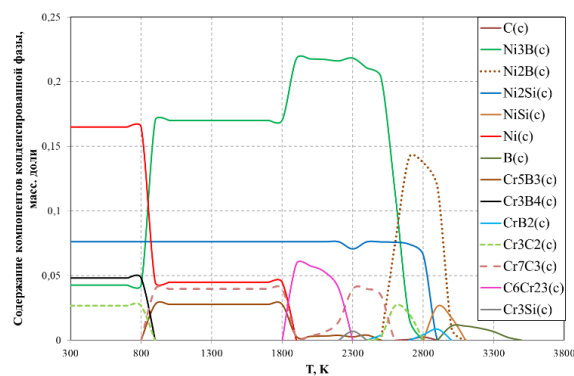
никеля (масс. %): Ni – 79,3, C – 0,5, Cr – 15, Si – 3,2, B – 2 (ПГСП-2), Ni – 74,3, C – 1, Cr – 17, Si – 4,1, B – 3,6 (ПГСП-4) [147–152].

При подготовке исходных данных для моделирования учитывались усредненные технологические параметры установки плазменного напыления МАК-100: расход плазмообразующего газа – 1 л/с, расход порошка – 1 г/с, 5 г/с и 10 г/с. При моделировании учитывались элементы, ионы и соединения из базы данных программного комплекса TERRA, в частности *газообразные* (Ar, N<sub>2</sub>, N, O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>x</sub>C<sub>y</sub>, SiN, NH<sub>3</sub>, CN, C<sub>2</sub>N, N<sub>2</sub>C, BN, Ni, C, Cr, Si, B, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, Si<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>, SiC, Si<sub>2</sub>C, SiC<sub>2</sub>, Si<sub>2</sub>C<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>C, B<sub>2</sub>, BC, B<sub>2</sub>C, BC<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>, CrC<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, электронный газ e<sup>-</sup>, Ar<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, N<sup>-</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sup>+</sup>, O<sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, Si<sup>+</sup>, Ni<sup>+</sup>, Cr<sup>+</sup>, B<sup>+</sup>, BO<sup>-</sup>, BO<sub>2</sub><sup>-</sup>, C<sup>+</sup>, C<sup>-</sup>, C<sub>2</sub><sup>+</sup>, C<sub>2</sub><sup>-</sup>); *конденсированные* (Ni, C, Cr, Si, B, Ni<sub>3</sub>C, NiB, Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B, Ni<sub>4</sub>B<sub>3</sub>, NiSi, NiSi<sub>2</sub>, Ni<sub>2</sub>Si, Ni<sub>7</sub>Si<sub>13</sub>, SiC, SiB<sub>14</sub>, B<sub>4</sub>Si, B<sub>6</sub>Si, B<sub>4</sub>C, CrB, CrB<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub>, Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, CrSi, CrSi<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>Si, Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BN, CrN, Cr<sub>2</sub>N, NiO, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HBO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Ni<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>).

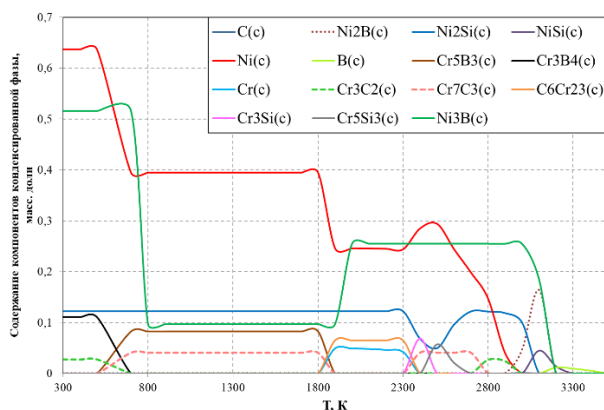
Результаты моделирования показывают, что при равновесном нагревании ПГСП-2 (рисунок 3.1а–в) и ПГСП-4 (рисунок 3.1г–е) в атмосфере аргона при расходе плазмообразующего газа 1 л/с и различном расходе порошка основными компонентами конденсированной фазы являются Ni, Cr, а также ряд соединений: Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>Si, Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Cr, Ni<sub>2</sub>B, NiSi, CrB, CrSi. При высоких температурах возможно наличие бора, а также образование соединений Ni<sub>2</sub>B, NiSi. Характер температурных зависимостей содержания Ni<sub>2</sub>Si, Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> в обеих системах идентичен, однако поведение никеля, Ni<sub>3</sub>B и хрома существенно различаются для ПГСП-2 и ПГСП-4. Это может быть обусловлено более высоким исходным содержанием бора в ПГСП-4. Содержание углерода в конденсированной фазе незначительно. При расходе порошка 5 г/с, наряду с указанными выше соединениями, наблюдается также образование Cr<sub>3</sub>Si, Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> и CrB<sub>2</sub>.



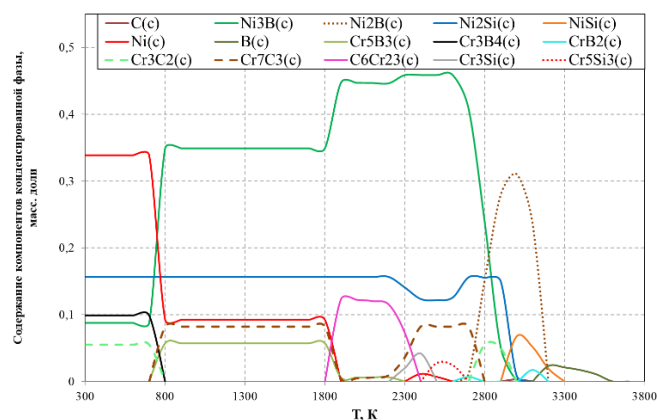
а



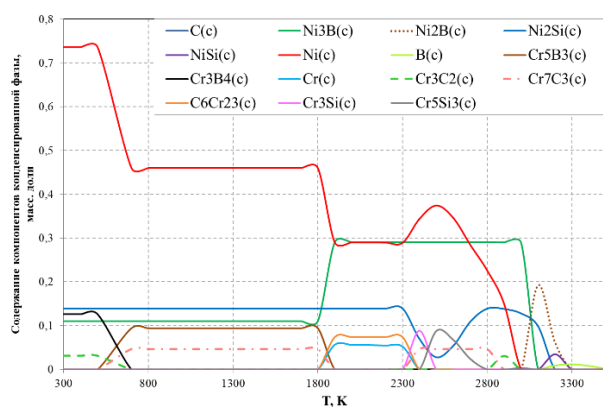
z



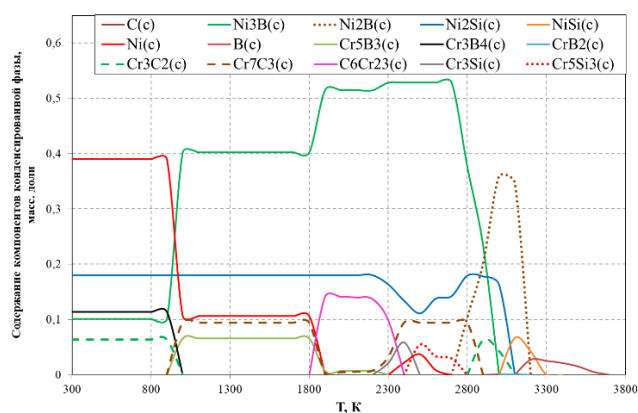
б



д



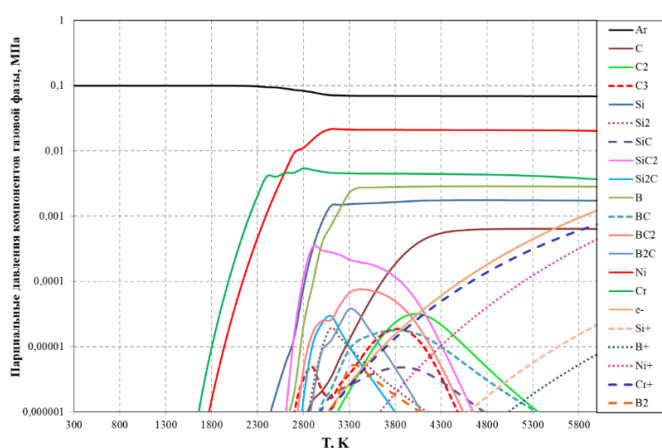
в



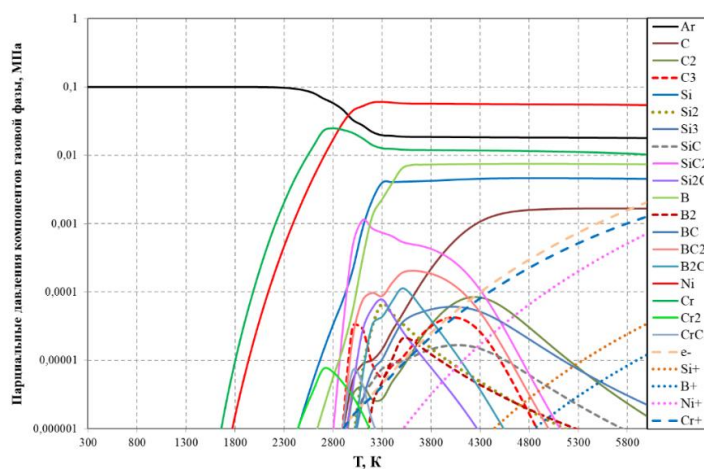
е

Рисунок 3.1 – Температурные зависимости содержания компонентов конденсированной фазы: ПГСР-2 (а–в), ПГСР-4 (z–е). Расход плазмообразующего газа (аргон) – 1 л/с, расход порошка – 1 г/с (а, z), 5 г/с (б, д) и 10 г/с (в, е)

На рисунке 3.2 в качестве примера представлены температурные зависимости парциальных давлений компонентов газовой фазы ( $P_i$ ), образующейся при равновесном нагревании ПГСР-2 в атмосфере аргона при различном расходе порошкового материала.



а



б

Рисунок 3.2 – Температурные зависимости парциальных давлений компонентов газовой фазы. ПГСР-2 в атмосфере аргона. Расход плазмообразующего газа (аргон) – 1 л/с, расход порошка (ПГСР-2) – 1 г/с (а), 10 г/с (б)

В интервале 300–1700 К испарение порошкового материала практически не происходит, поэтому основным компонентом газовой фазы в данном температурном диапазоне является аргон. Парциальные давления Ni и Cr резко возрастают при  $T \geq 1700$  К, а парциальные давления B, Si, SiC<sub>2</sub>, BC<sub>2</sub>, C, B<sub>2</sub>C и других компонентов – при  $T \geq 2500$  К. Горизонтальные участки на графиках зависимостей  $P_i = f(T)$  при  $T > 3000$  К свидетельствуют о полном испарении компонентов конденсированной фазы. Дальнейшее повышение температуры приводит к диссоциации молекул SiC<sub>2</sub>, SiC, BC<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>C, C<sub>3</sub>, BC, а также к ионизации газа. Парциальные давления ионов никеля, хрома, бора, кремния и электронного газа

монотонно увеличиваются с ростом температуры, однако степень ионизации в исследованном интервале температур невысока. Увеличение расхода порошкового материала от 1 до 10 г/с приводит к увеличению парциальных давлений компонентов газовой фазы.

Аналогичные зависимости получены при моделировании нагрева порошкового материала ПГРС-4 в атмосфере аргона.

Результаты моделирования нагрева ПГРС-2 и ПГРС-4 в атмосфере азота (рисунок 3.3) показывают, что основными компонентами конденсированной фазы являются Ni, Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>Si, CrN, BN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Cr, CrB, CrSi. При высоких температурах возможно образование соединений Ni<sub>2</sub>B, NiSi, CrB<sub>2</sub>, а также В. Характер температурных зависимостей содержания основных компонентов в обеих системах идентичен, однако массовые доли никеля, Ni<sub>3</sub>B и некоторых других компонентов существенно различаются для ПГРС-и ПГРС-4, что может быть обусловлено различным содержанием никеля, хрома, кремния, бора и углерода в этих порошковых материалах.

Основным компонентом газовой фазы в широком интервале температур является N<sub>2</sub>. Поведение других компонентов газовой фазы аналогично поведению газовой фазы, образующейся при нагревании ПГРС-2 и ПГРС-4 в аргоне. Так, парциальные давления Ni и Cr резко возрастают при  $T \geq 1700$  К, а парциальные давления В, Si, SiC<sub>2</sub>, BC<sub>2</sub>, С, B<sub>2</sub>C, CN и других компонентов – при  $T \geq 2500$  К. Дальнейшее повышение температуры приводит к диссоциации молекул SiC<sub>2</sub>, SiC, CN, BC<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>C, C<sub>3</sub>, BC, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>C, Si<sub>2</sub>, CrN, а также к ионизации газа. Парциальные давления ионов никеля, хрома, бора, кремния и электронного газа монотонно увеличиваются с ростом температуры, однако степень ионизации в исследованном интервале температур невысока.

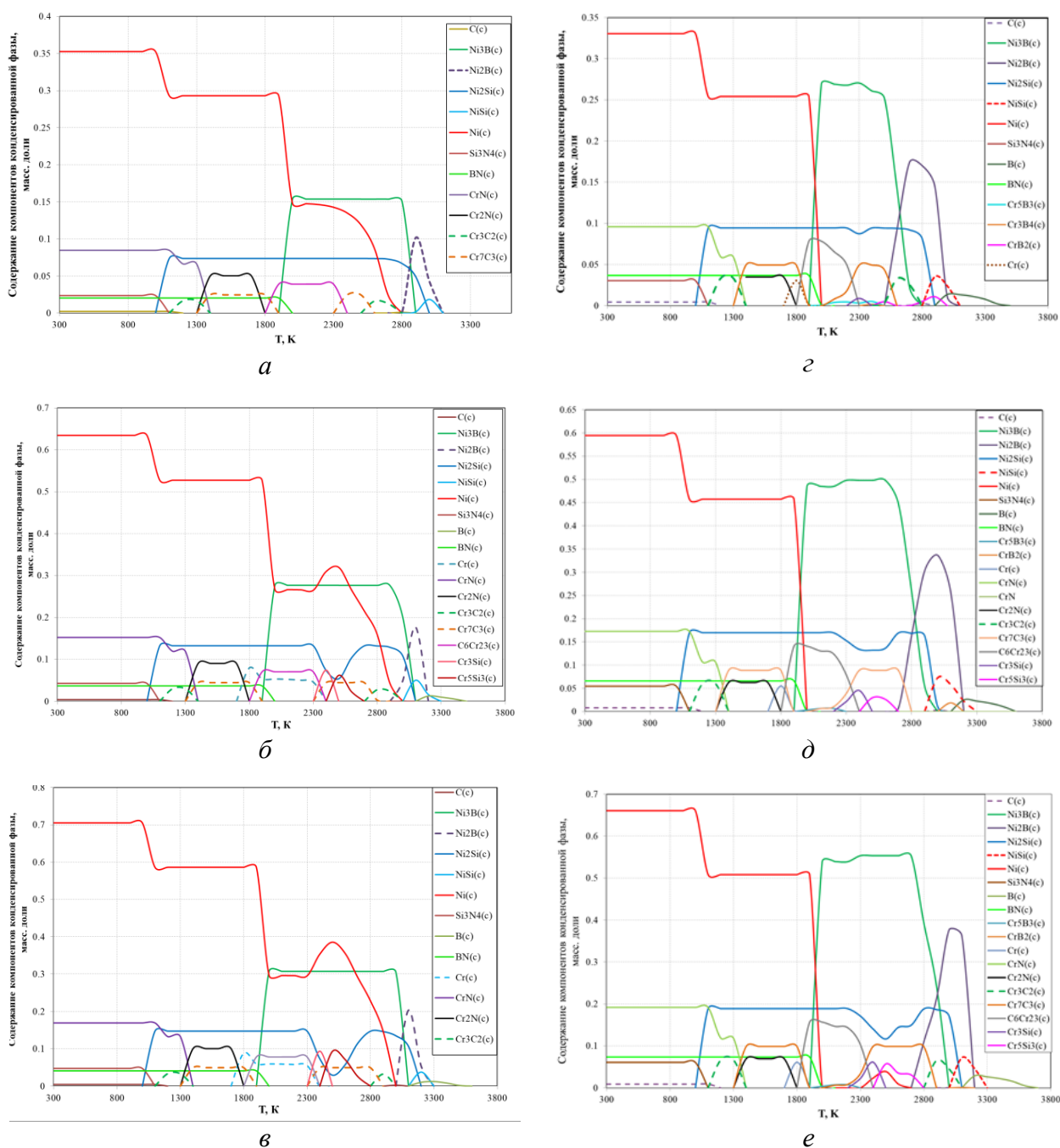


Рисунок 3.3 – Температурные зависимости содержания компонентов конденсированной фазы: ПГСР-2 (*a–в*) и ПГСР-4 (*г–е*). Расход плазмообразующего газа ( $N_2$ ) – 1 л/с, расход порошка – 1 г/с (*a, г*), 5 г/с (*б, д*) и 10 г/с (*в, е*)

На рисунке 3.4 представлены температурные зависимости содержания компонентов конденсированной фазы, образующейся при равновесном нагревании ПГСР-2 и ПГСР-4 в атмосфере воздуха при различных расходах порошковых

материалов. При исходном составе, соответствующем расходу плазмообразующего газа 1 л/с и порошкового материала 1 г/с (рисунок 3.4а, з) происходит активное окисление обоих порошковых материалов. В конденсированной фазе возможно существование углерода, никеля и оксидов NiO, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

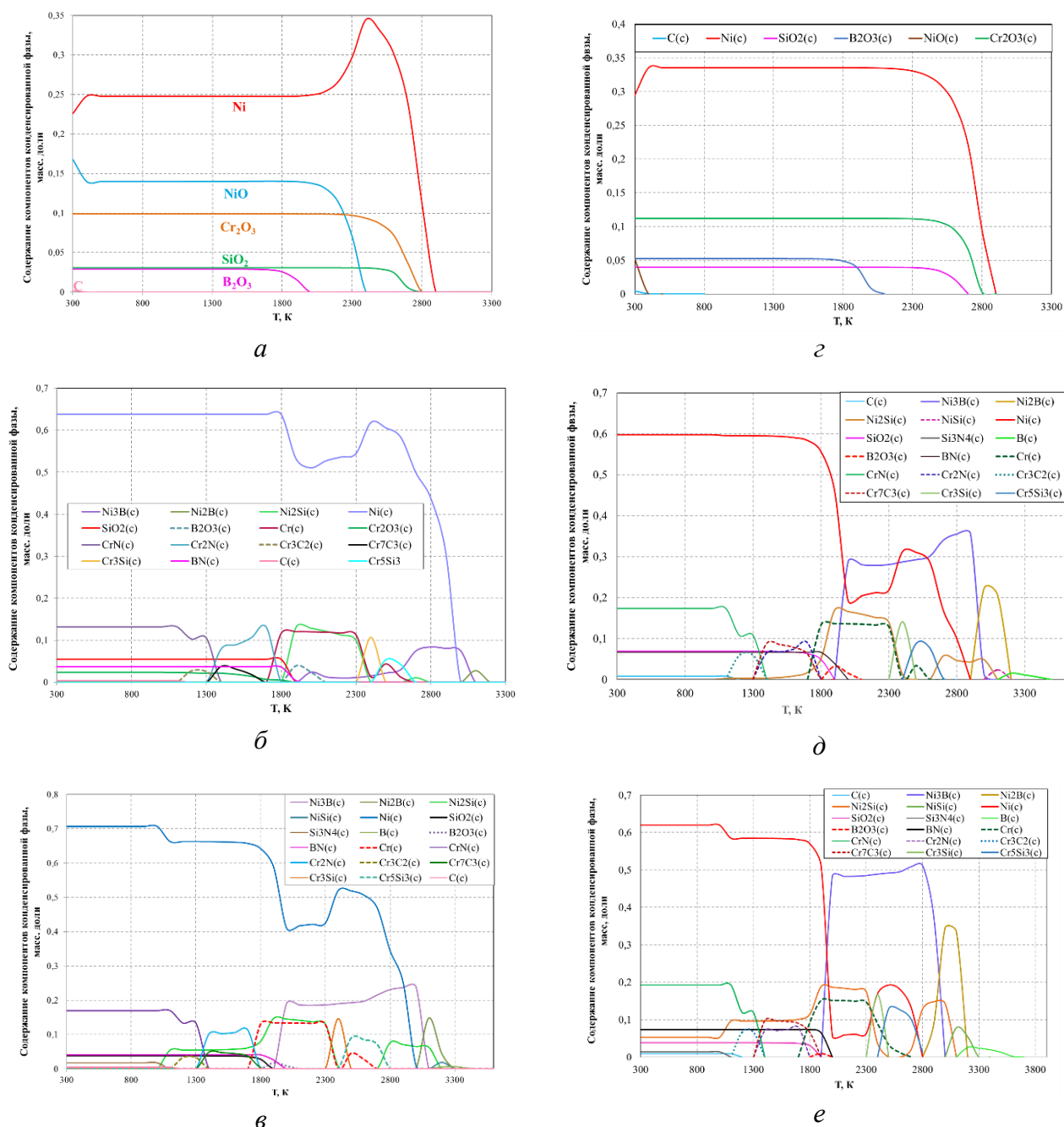


Рисунок 3.4 – Температурные зависимости содержания компонентов конденсированной фазы: ПГСП-2 (а–в), ПГСП-4 (з–е). Расход газа (воздух) – 1 л/с. Расход порошкового материала: 1 г/с (а, з), 5 г/с (б, д), 10 г/с (в, е)

При исходных составах моделируемых систем, соответствующих расходам плазмообразующего газа 1 л/с и порошкового материала – 5 г/с (рисунок 3.4б, д) и 10 г/с (рисунок 3.4в, е), в конденсированной фазе возможно образование Ni, Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B, Ni<sub>2</sub>Si, SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr, CrN, Cr<sub>2</sub>N, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>Si, Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, BN, C. Кроме этого, при увеличении расхода порошкового материала в конденсированной фазе наблюдается появление бора и соединений NiSi, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Рассмотрим подробно поведение компонентов конденсированной фазы на примере рисунка 3.4б. Содержание никеля практически не меняется в интервале температур 300–1800 К. В интервале температур 1800–2000 К наблюдается снижение массовой доли никеля, а при 2000–2400 К – ее повышение. Дальнейший рост температуры до 3000 К сопровождается резким снижением массовой доли никеля до нуля. В области температур 1900–3100 К возможно образование соединений Ni<sub>3</sub>B (2000–3000 К), Ni<sub>2</sub>Si (1900–2400 К), Ni<sub>2</sub>B (3100 К), B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1900–2100 К), Cr<sub>3</sub>Si (2400 К), Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> (2500–2600 К). Содержание CrN практически неизменно в интервале температур 300–1100 К, при 1100–1300 К наблюдается немонокотное поведение, обусловленное образованием Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, а при 1300–1400 К – резкое снижение до нуля. Соединения Cr<sub>2</sub>N и Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> существуют в интервале температур 1400–1700 К. Содержание SiO<sub>2</sub>, BN, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и C практически не меняется в широком диапазоне температур: 300–1800 К (SiO<sub>2</sub> и BN), 300–1300 К (CrN), 300–1000 К, 300–1400 К (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). При  $T \geq 1700$  К происходит разложение соединений Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, CrN, Cr<sub>3</sub>Si, поэтому в интервале температур 1800–2600 К наблюдается существование конденсированного Cr.

Показано, что в интервале температур 300–1500 К основной вклад в состав газовой фазы, образующейся при нагревании ПГСП-2 и ПГСП-4, вносят N<sub>2</sub> и CO, содержание остальных компонентов существенно ниже. Рост температуры сопровождается испарением компонентов конденсированной фазы и, соответственно, повышением содержания паров никеля, хрома, кремния, бора, их оксидов, нитридов в газовой фазе. Дальнейшее возрастание температуры приводит к диссоциации N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO и других молекул, что обуславливает увеличение массовых долей и, соответственно, парциальных давлений атомарного

кислорода, азота, бора, никеля, кремния и других компонентов. Содержание ионизированных газов ( $\text{Ni}^+$ ,  $\text{Si}^+$ ,  $\text{Cr}^+$ ,  $\text{BO}^-$ ,  $\text{BO}_2^-$ ,  $\text{O}^-$ ) в исследованном интервале температур невелико.

Результаты моделирования равновесного нагрева ПГСП-2 и ПГСП-4 в атмосфере «92 об. % воздух + 8 об. % пропан» представлены на рисунке 3.5.

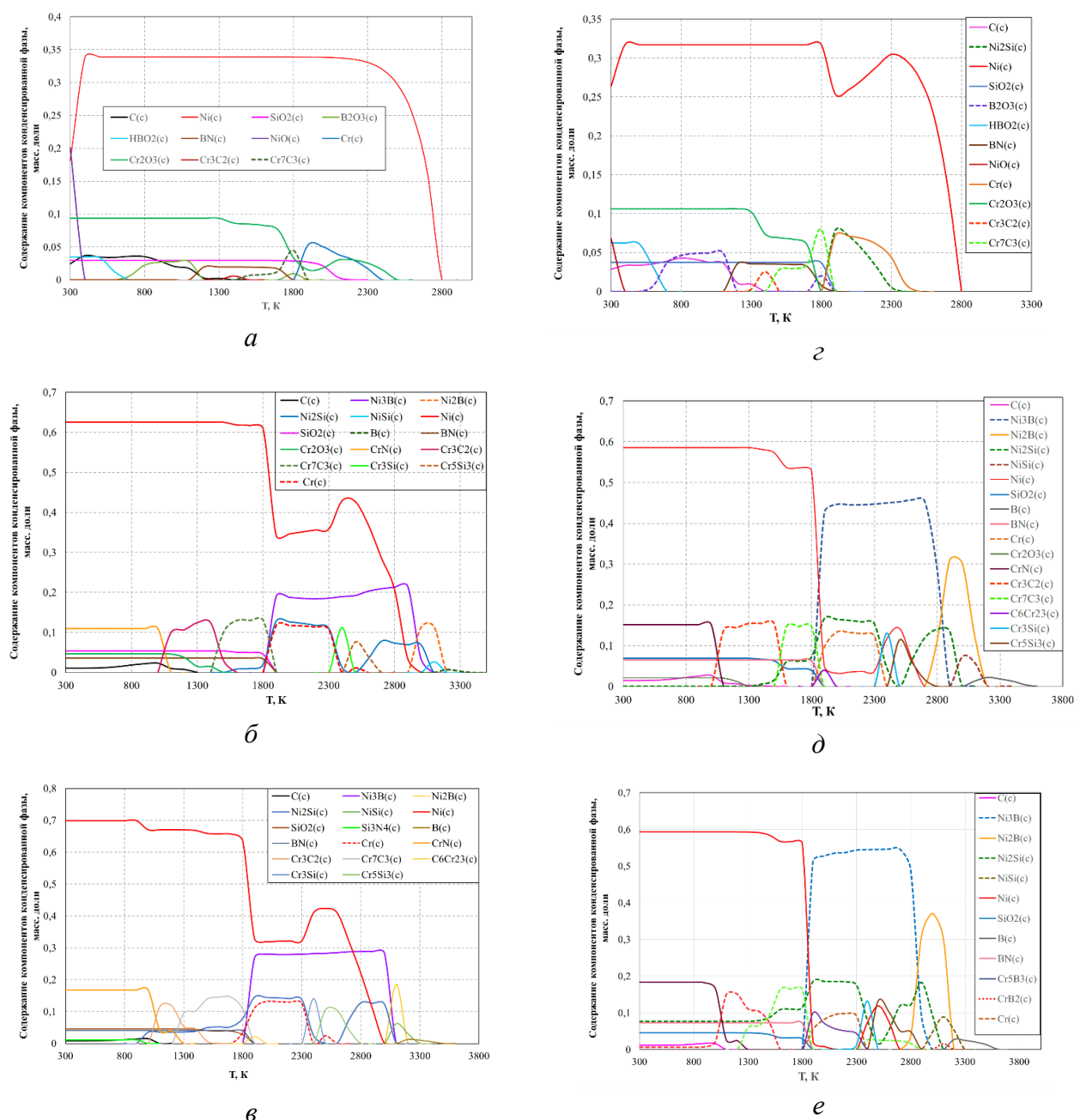


Рисунок 3.5 – Температурные зависимости содержания компонентов конденсированной фазы: ПГСП-2 (*a–в*), ПГСП-4 (*г–е*). Расход плазмообразующего газа (воздух + пропан) – 1 л/с, расход порошка – 1 г/с (*a, г*), 5 г/с (*б, д*) и 10 г/с (*в, е*)

Основными компонентами газовой фазы во всем исследованном интервале температур являются  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ . Парциальные давления  $H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$  и  $CO_2$  с ростом температуры изменяются немонотонно, а давление  $N_2$  монотонно уменьшается. Вклад остальных компонентов газовой фазы в общее давление становится заметным при  $T \geq 1300$  К. Следует отметить, что в исследованном интервале температур основными ионизированными компонентами газовой фазы являются электронный газ  $e^-$ , а также ионы  $Ni^+$  и  $Cr^+$ .

Рассчитаны температурные зависимости интегральных термодинамических характеристик – энтальпии ( $I$ ) и энтропии ( $S$ ) – для систем ПГСП-2 (ПГСП-4) + газ (газ –  $Ar$ ,  $N_2$ , воздух, воздух + пропан). Показано, что с ростом температуры значения данных характеристик немонотонно увеличиваются. Увеличение расхода порошкового материала приводит к росту энтальпии и уменьшению энтропии для обеих систем. Эти тенденции становятся более выраженными при высоких температурах ( $T > 3000$  К), когда происходит активное испарение основных компонентов системы и наблюдается резкий рост парциальных давлений компонентов газовой фазы. На рисунке 3.6 в качестве примера представлены температурные зависимости  $I = f(T)$  и  $S = f(T)$  для систем ПГСП-2 (ПГСП-4) +  $Ar$ . Для системы ПГСП-4 +  $Ar$  значения всех термодинамических параметров выше, чем для системы ПГСП-2 +  $Ar$ .

Сравнение температурных зависимостей состава конденсированной и газовой фаз и термодинамических характеристик показывает, что между ними существует корреляция: изломы на графиках наблюдаются при одинаковых температурах. Это можно объяснить фазовыми превращениями, которые происходят в конденсированной и газовой фазах, в частности, плавлением и испарением.

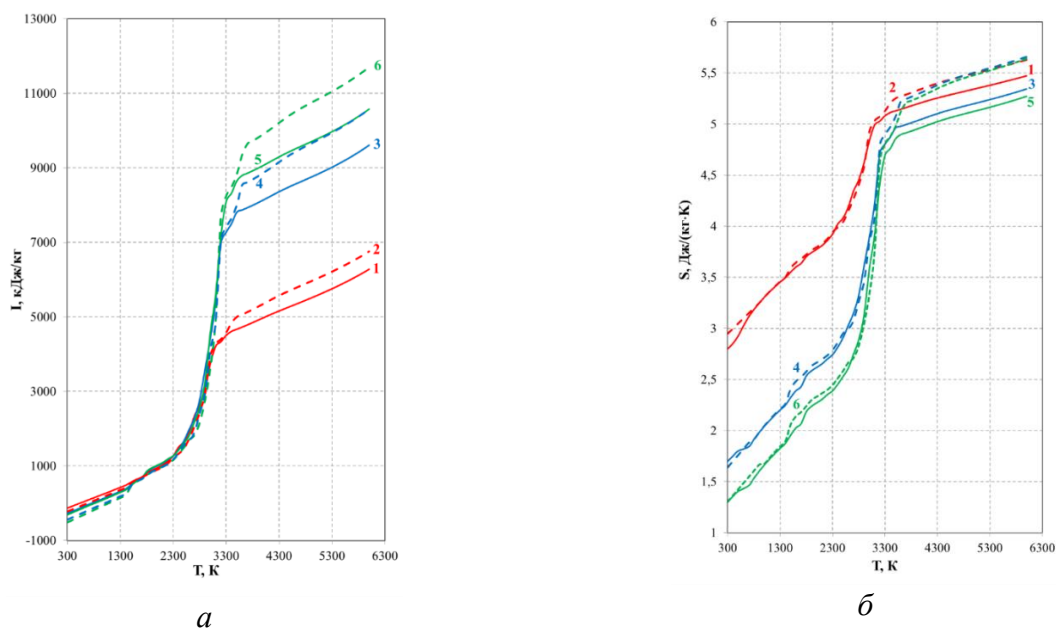


Рисунок 3.6 – Температурные зависимости полной энтальпии (а) и энтропии (б) систем ПГСР-2 + Ag (сплошные линии) и ПГСР-4 + Ag (пунктирные линии).

Расход плазмообразующего газа – 1 л/с, расход порошка:

1, 2 – 1 г/с; 3, 4 – 5 г/с; 5, 6 – 10 г/с

### 3.2. Моделирование процесса плазменного напыления покрытий

С использованием программного комплекса Plasma 2002 [125–128] проведено моделирование процесса плазменного напыления покрытий порошковых самофлюсующихся материалов ПГСР-2 и ПГСР-4.

Исходные данные для моделирования: плазмообразующий газ – воздух; начальный диаметр частиц 40, 60, 80 мкм; начальная скорость 3–9,5 м/с; дистанция напыления – 200 мм; время напыления – 5 с; время охлаждения – 30 с [153].

Параметры ввода порошкового материала в плазменную струю подбирались таким образом, чтобы траектория частицы пересекала ось струи плазматрона, а сама частица долетала до подложки, практически не испаряясь и минимально уменьшаясь в размерах.

Траектории движения частиц порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 были рассчитаны при различных исходных данных (начальная скорость ввода,

координаты ввода порошка относительно оси плазмотрона, диаметр частиц). В качестве примера на рисунке 3.7 представлены траектории движения частиц с диаметрами 40, 60 и 80 мкм.

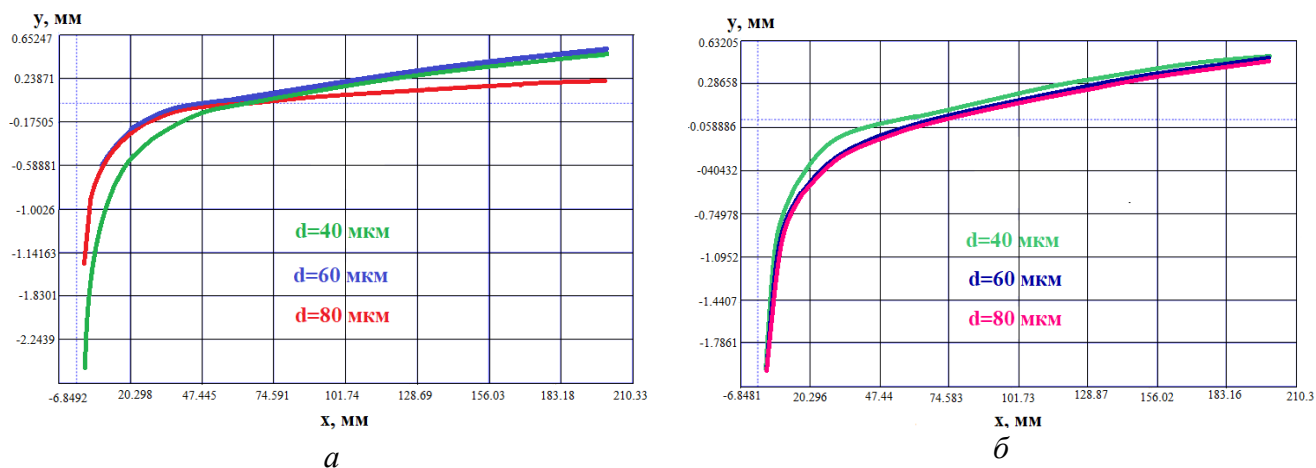


Рисунок 3.7 – Траектории движения частиц порошковых материалов ПГСР-2 (а) и ПГСР-4 (б)

При плазменном напылении закономерности движения и нагрева частиц зависят от ряда величин [1–5, 13–14, 17–18]. Так, например, траектория движения частицы существенно влияет на ее температуру, скорость и время пребывания в струе [127]. Если частицы порошка большую часть времени до столкновения с подложкой движутся в центральной зоне плазменной струи, они получают максимальное ускорение и тепловое воздействие. Отклонение частиц от осевого движения может быть обусловлено следующими факторами [127]: радиальной скоростью компонентов окружающего газа; вращательной составляющей, обусловленной особенностью плазменного разряда в плазмотроне, начальным импульсом частиц. Радиальная составляющая скорости почти всегда направлена от оси плазмотрона, исключение составляет лишь небольшой участок вблизи сопла плазмотрона (за счет подсоса воздуха и турбулентности). При приближении к оси плазменной струи увеличивается сила лобового сопротивления, которая пропорциональна квадрату скорости движения частицы  $v$  и площади проекции  $S$  частицы на плоскость, перпендикулярную направлению ее движения:

$$F_c = c_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (3.1)$$

где  $c_x$  – коэффициент лобового сопротивления,  $\rho$  – плотность среды.

Таким образом, создается барьер, который может быть преодолен частицами с большим диаметром, имеющими большую инерционность, так как их масса увеличивается пропорционально третьей степени диаметра  $d$  ( $m = \rho_c V$ , где  $\rho_c$  – плотность частицы,  $V \sim d^3$  – объем), а сила лобового сопротивления пропорциональна его второй степени ( $S \sim d^2$ ). Частицы с меньшим диаметром не достигают высокотемпературных и высокоскоростных участков струи, но время нахождения их в струе больше, поэтому они могут разгоняться до больших скоростей и нагреваться до высоких температур. На рисунке 3.8 представлено изменение скорости частиц порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 вдоль оси плазменной струи.

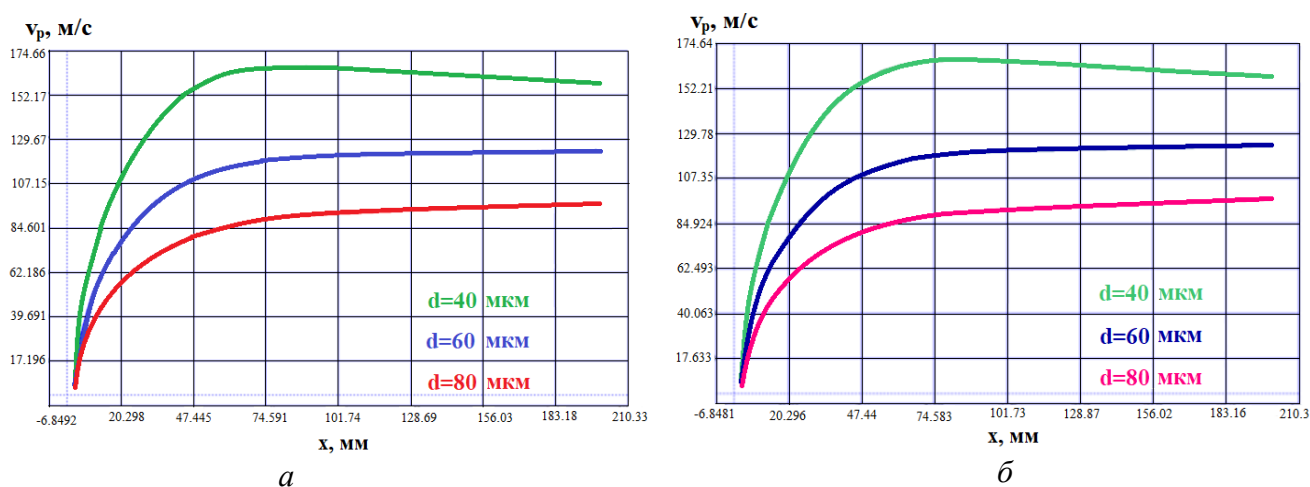


Рисунок 3.8 – Изменение скорости частиц порошка вдоль оси плазменной струи:

$a$  – ПГСР-2;  $b$  – ПГСР-4

Частицы порошка ПГСР-2 диаметром 40 мкм достигают максимальной скорости на дистанции 70–90 мм; частицы диаметром 60 мкм и 80 мкм максимально ускоряются в конце дистанции. Для частиц диаметрами 40 мкм, 60 мкм и 80 мкм скорости в момент соударения с подложкой составляют 160 м/с, 126 м/с и 97 м/с соответственно. Частицы порошка ПГСР-4 диаметром 40 мкм

достигают максимальной скорости на расстоянии 80–90 мм от среза сопла плазмотрона, частицы диаметром 60 мкм и 80 мкм – в конце дистанции. Скорости частиц диаметрами 40 мкм, 60 мкм и 80 мкм в момент соударения с подложкой составляют соответственно 160 м/с, 125 м/с и 98 м/с.

Тепловая энергия, получаемая частицей от плазменной струи, пропорциональна площади поверхности частицы, которая, в свою очередь, пропорциональна второй степени радиуса, масса же частицы пропорциональна третьей степени радиуса. Поэтому температура нагрева частицы должна уменьшаться с увеличением ее размеров, о чем свидетельствуют графики изменения температуры в центре частицы  $T_{p,r} = 0$  при движении вдоль оси плазменной струи (рисунок 3.9).

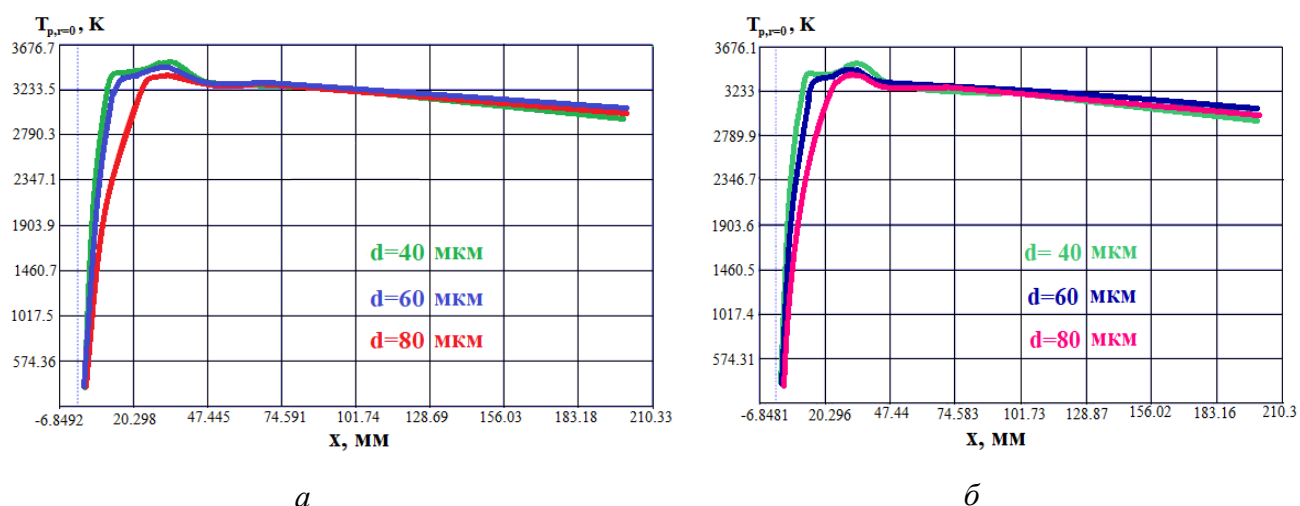


Рисунок 3.9 – Изменение температуры в центре частиц порошка вдоль оси плазменной струи: *a* – ПГСР-2; *б* – ПГСР-4

Результаты моделирования показывают, что частицы порошкового материала ПГСР-2 различных фракций прогреваются до температуры плавления ( $T_{пл} \approx 1050$  °С [4, 54]) на расстоянии от среза сопла 8–12 мм, а частицы порошка ПГСР-4 ( $T_{пл} = 950$  °С [4, 54]) – на участке 8–10 мм от среза сопла. Температура плавления частиц обоих порошковых материалов достигается на расстоянии 15–30 мм от среза сопла плазмотрона. При дальнейшем движении частицы начинают охлаждаться вследствие уменьшения температуры плазменной струи.

Проведено исследование изменения фронта испарения порошковых частиц в зависимости от дистанции напыления (рисунок 3.10). Вследствие испарения происходит уменьшение диаметра частиц. Частицы диаметром 40 мкм теряют до 25 % от первоначального размера (для обоих порошков), частицы диаметром 6 мкм – до 15 % (ПГСП-2) и 17 % (ПГСП-4), а частицы диаметром 80 мкм – до 9 % и 8 % для ПГСП-2 и ПГСП-4 соответственно.

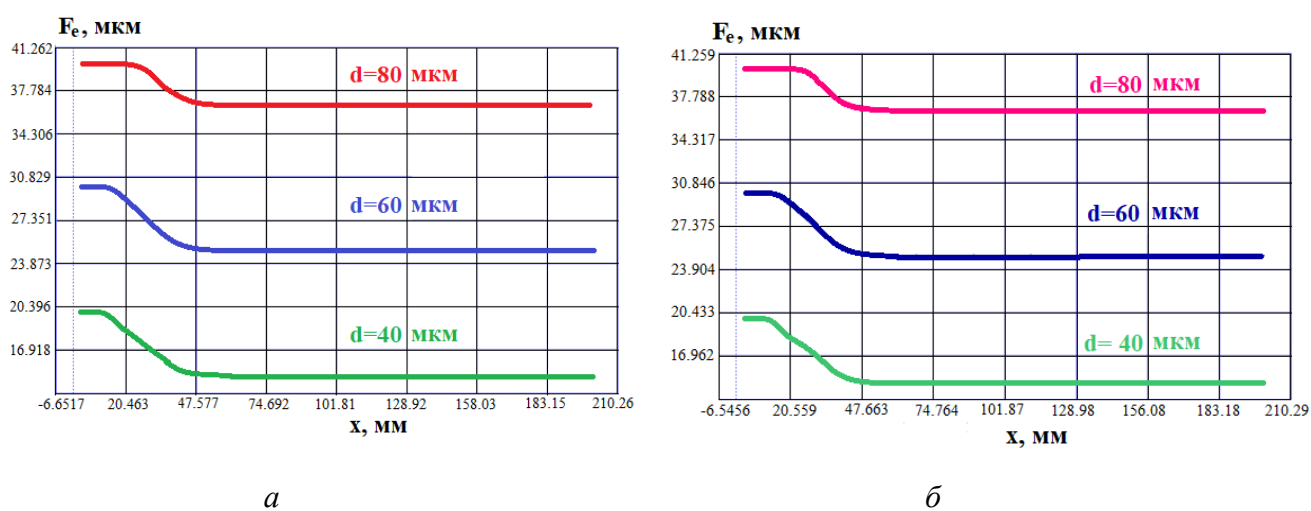


Рисунок 3.10 – Динамика фронта испарения частиц порошковых материалов:

$a$  – ПГСП-2;  $б$  – ПГСП-4

Проведено моделирование структуры покрытия. Получены изображения напыленного покрытия в виде укрупненного панорамного изображения всего покрытия с выделением своим цветом каждого прохода плазматрона. Показано, что при различных диаметрах частиц получаются различные топологии поверхностей и пористости полученных покрытий. На рисунке 3.11 представлены структуры покрытий ПГСП-2 (рисунок 3.11а) и ПГСП-4 (рисунок 3.11б), формируемых при напылении.

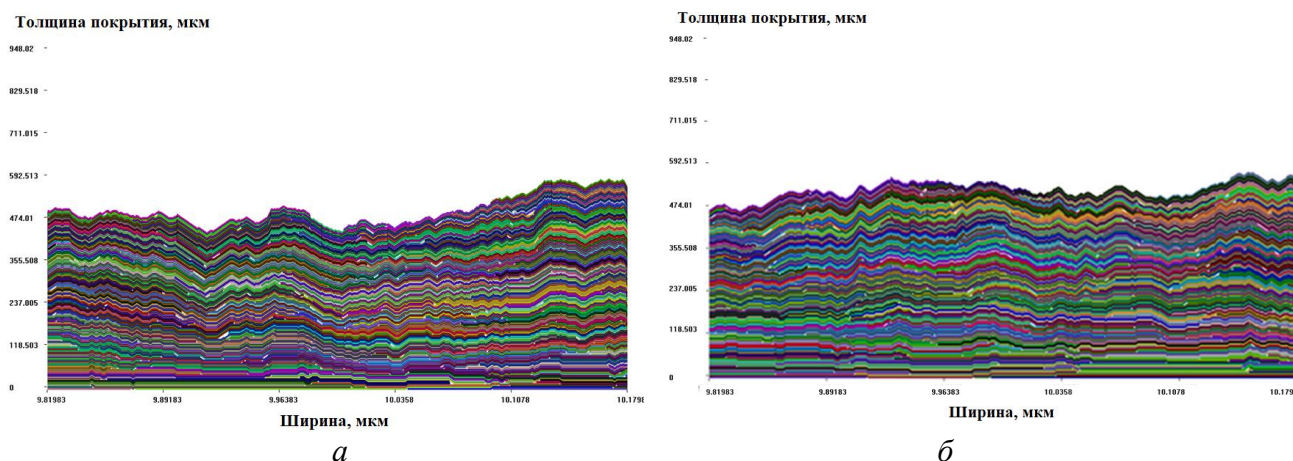


Рисунок 3.11 – Структуры покрытий ПГСР-2 (*а*) и ПГСР-4 (*б*), формируемых при каждом проходе. Диаметр частиц 50–70 мкм

Пористость и шероховатость покрытий зависят от размеров частиц напыляемого материала. Так, в частности, при изменении диаметра частиц порошка ПГСР-2 от 30 до 90 мкм пористость полученных покрытий изменяется от 2,9 % до 7,5 %, а шероховатость – от 140 до 166 мкм. Для ПГСР-4 изменения пористости и шероховатости составляют соответственно 2,6–7,3 % и 66–120 мкм.

При моделировании напряженно-деформированного состояния в системе покрытие – подложка (основание) выявлено, что в процессе напыления ПГСР-2 в промежуточном слое между покрытием и подложкой возникают сжимающие напряжения (до  $-2,5$  МПа), которые в дальнейшем при охлаждении системы снижаются до  $-1,5$  МПа, а в покрытиях, полученных при напылении ПГСР-4, в промежуточном слое между покрытием и основанием формируются растягивающие напряжения ( $1,45$  МПа), которые при охлаждении системы переходят в сжимающие ( $-2,3$  МПа), затем снижаются до  $-1,2$  МПа.

Таким образом, при плазменном напылении закономерности движения и нагрева частиц зависят от ряда параметров, между которыми существует определенная корреляция. Так, траектория движения частиц определяется начальными условиями напыления (координаты ввода относительно оси плазматрона, начальная скорость и т. д.). В свою очередь, от траектории движения частицы зависит ее температура, скорость, время пребывания в струе. Важными

параметрами являются также масса частиц и их размеры.

Анализ результатов моделирования позволил подобрать технологические параметры для нанесения частиц порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 методом дозвукового плазменного напыления (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Параметры ввода порошковых материалов в плазменную струю

| Порошковый материал                            | ПГСР-2 |      |      | ПГСР-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 |

Эти данные были использованы при проведении лабораторных экспериментов по разработке технологии нанесения покрытий из самофлюсующихся материалов на основе никеля.

### 3.3. Плазменное напыление самофлюсующихся порошков на образцы из алюминиевого сплава

С использованием установки плазменного напыления МАК-100 и учетом результатов моделирования, представленных выше, экспериментально отработаны оптимальные технологические режимы нанесения самофлюсующихся порошковых покрытий ПГСР-2 и ПГСР-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.

Результаты работы в дальнейшем были использованы для восстановления и упрочнения поверхностей крыльчатки рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100 (акты внедрения и промышленных испытаний представлены в Приложениях 1–3).

### Выводы по главе 3

1. Проведено термодинамическое моделирование самофлюсующихся порошковых материалов на основе никеля ПГСП-2 и ПГСП-4 в интервале температур 300–6000 К в атмосфере различных 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.

2. 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. Оптимальные параметры ввода частиц порошковых материалов в плазменную струю:

- фракция 40 мкм: скорость ввода  $v = 9,50$  м/с, координаты ввода относительно оси плазматрона  $x = 3$  мм,  $y = -2,5$  мм;
- фракция 60 мкм:  $v = 4,52$  м/с,  $x = 3$  мм,  $y = -1,5$  мм;
- фракция 80 мкм:  $v = 3,27$  м/с,  $x = 3$  мм,  $y = -1,5$  мм.

3. Экспериментально отработаны оптимальные технологические условия нанесения самофлюсующихся порошковых 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.

## Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

### 4.1. Анализ микроструктур порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 и покрытий на их основе

На рисунке 4.1 представлены фотографии самофлюсующихся порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4, полученные с помощью стереомикроскопа Meiji Techno серии EMZ при 70-кратном увеличении. Частицы порошков обоих составов имеют сферическую форму со структурой литого состояния материала, размер частиц 40–100 мкм.

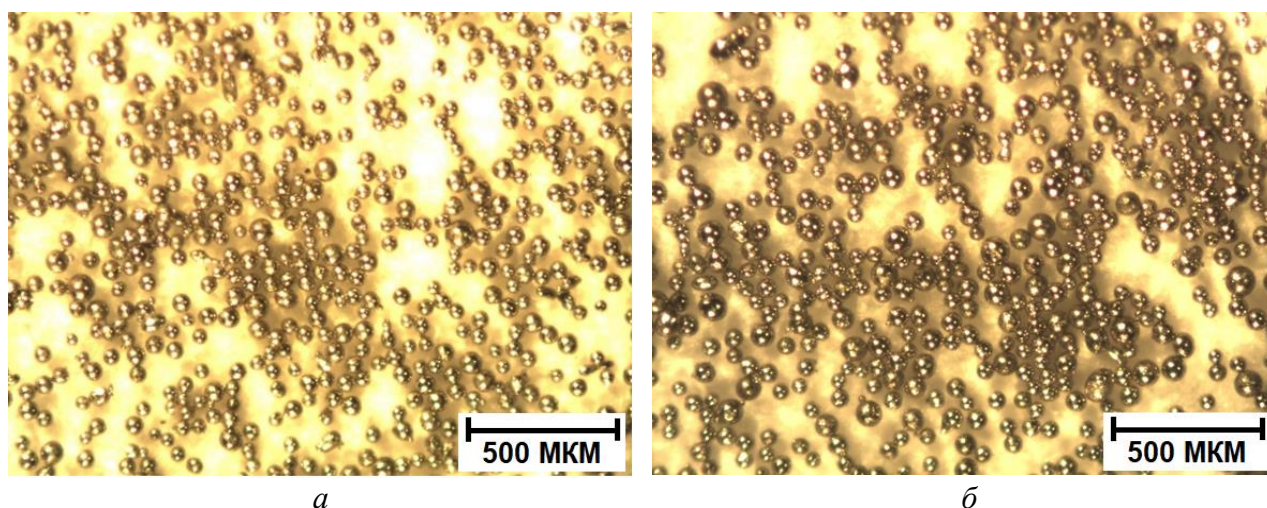


Рисунок 4.1 – Фотографии порошков ПГСР-2 (а) и ПГСР-4 (б)

Образцы для металлографических исследований покрытий были подготовлены по стандартной технологии, включающей в себя операции шлифования и полирования. Для изучения структуры напыленных слоев исследованию подвергались сечения образцов, перпендикулярные поверхностному слою. Типичные микроструктуры покрытий из порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4, нанесенных на образцы из алюминиевого сплава АК7ч при дозвуковом и сверхзвуковом режимах плазменного напыления, представлены на рисунке 4.2.

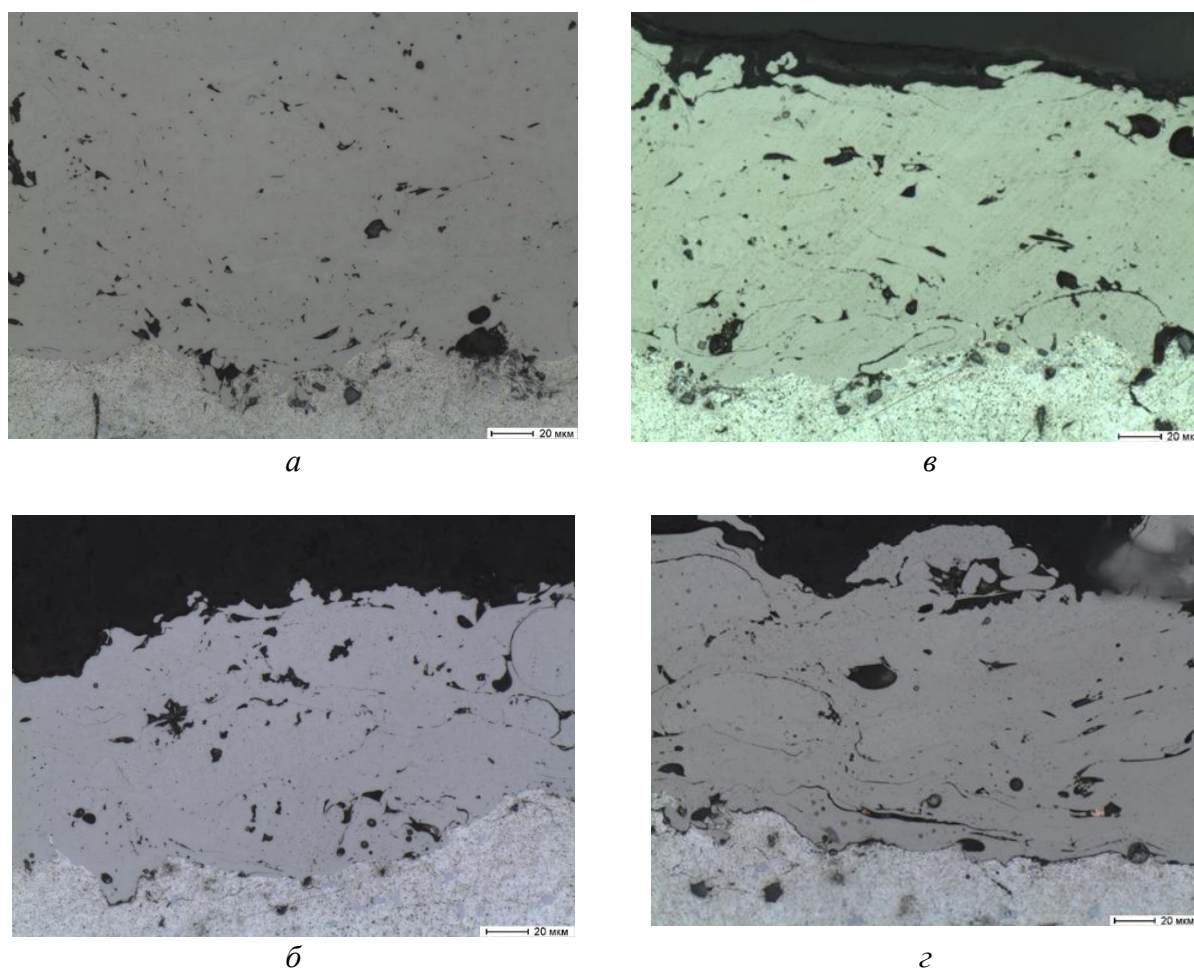


Рисунок 4.2 – Микроструктуры покрытий: *а* – ПГСП-2, дозвуковой режим напыления; *б* – ПГСП-2, сверхзвуковой режим напыления; *в* – ПГСП-4, дозвуковой режим напыления; *г* – ПГСП-4, сверхзвуковой режим напыления

Анализ микроструктур показывает, что в покрытиях не происходит диффузионного проникновения материала покрытия в основу.

Покрытие из ПГСП-2, полученное при дозвуковом режиме плазменного напыления (рисунок 4.2*а*), характеризуется низкой пористостью и высокой плотностью. Поры расположены хаотично и имеют маленькие размеры. Скопление наиболее крупных пор фиксируется у границы между покрытием и основой. Это может быть обусловлено тем, что первый слой напыленного материала покрытия не успевает проплавиться из-за быстрой кристаллизации. В неблагоприятных условиях эксплуатации это может привести к отслоению покрытия.

Покрывание, полученное при сверхзвуковом напылении ПГСР-2 (рисунок 4.2б), характеризуется меньшим количеством дефектов на границе с подложкой, однако при этом наблюдается более высокая общая пористость. Размер пор в покрывании порядка 10 мкм. Кроме этого, наблюдаются участки несплошности в покрывании, обусловленные неполным расплавлением порошка в сверхзвуковой плазменной струе.

Покрывание ПГСР-4, полученное при дозвуковом режиме напыления (рисунок 4.2в), характеризуется высокой плотностью и наличием пор неправильной формы с размерами от нескольких микрон до 40 мкм. Участок покрывания на границе с подложкой характеризуется равномерной структурой.

Для покрывания ПГСР-4, полученного при сверхзвуковом режиме напыления (рисунок 4.2г), пористость меньше, чем для покрывания, полученного при дозвуковом напылении, но существенно больше, чем для покрывания ПГСР-2.

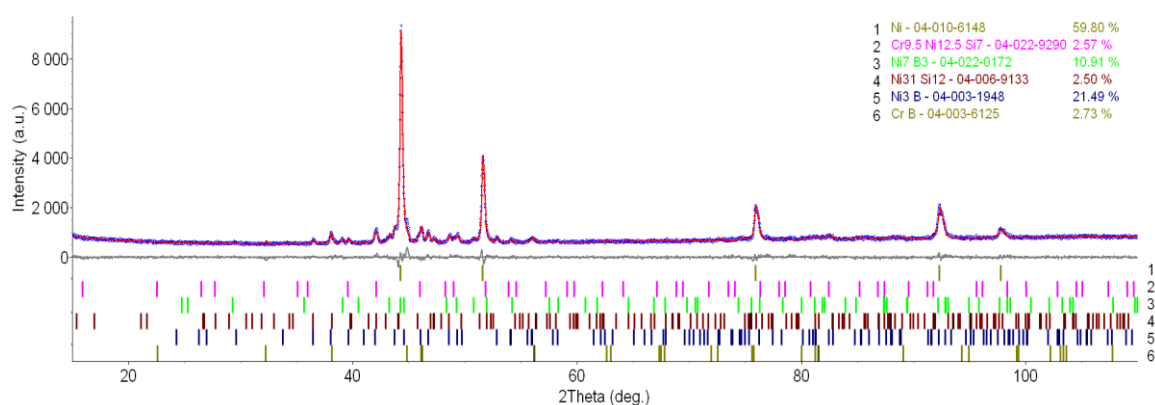
Следует отметить, что, несмотря на наличие пор, полученные покрывания являются микроструктурно однородными по всей толщине нанесенного слоя. На границе покрывание – подложка порошковый материал достаточно хорошо проплавлен, покрывания имеют слоистую структуру. Пores имеют как округлую, так и вытянутую форму. Линия сплавления с подложкой достаточно ровная и плотная. Образование пор может быть обусловлено дегазацией расплавленного порошкового материала (порошинок) во время кристаллизации. Поскольку напыление проводилось в атмосфере «воздух + пропан», образуются тонкие оксидные пленки, которые располагаются вдоль границ раздела подложки (сплав АК7ч) с покрыванием, что свидетельствует о «выгорании» частиц порошка.

Таким образом, исследование микроструктуры полученных покрываний показывает, что самофлюсующиеся порошковые материалы на основе никеля могут быть использованы в качестве материалов для инженерии поверхностей деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, в том числе деталей, подвергающихся кавитационному и гидроабразивному износу методами плазменного напыления.

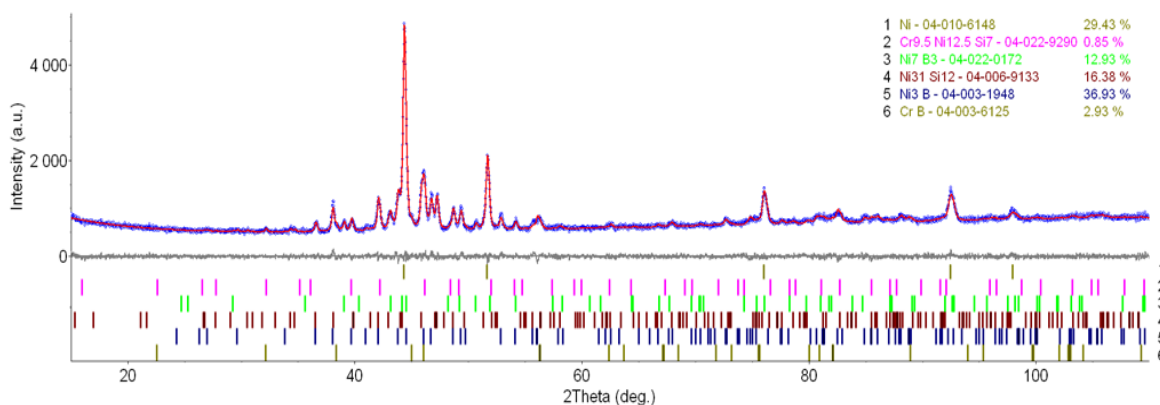
## 4.2. Определение фазового состава порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 и покрытий на их основе

### 4.2.1. Рентгенофазовый анализ исходных порошков

На рисунке 4.3 представлены дифрактограммы порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4.



*a*



*б*

Рисунок 4.3 – Дифрактограммы порошковых материалов ПГСР-2 (*a*) и ПГСР-4 (*б*). Экспериментальная (синие точки) и расчетная (красная кривая) дифрактограммы, а также разностная кривая (серая). Вертикальные штрихи соответствуют разрешенным для каждой фазы брэгговским отражениям

Фазовый состав данных порошковых материалов представлен в таблице 4.1. Выявлено, что фазовый состав порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 формируется из химических элементов Ni, Cr, B, Si, C, при этом возможно образование соединений  $\text{Cr}_{9,5}\text{Ni}_{12,5}\text{Si}_7$ ,  $\text{Ni}_7\text{B}_3$ ,  $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}$ , CrB.

Таблица 4.1 – Фазовый состав порошков ПГСП-2 и ПГСП-4

| № | Фаза                                         | ПГСП-2, масс. % | ПГСП-4, масс. % |
|---|----------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1 | Ni                                           | 59,8            | 29,4            |
| 2 | $\text{Cr}_{9,5}\text{Ni}_{12,5}\text{Si}_7$ | 2,6             | 0,8             |
| 3 | $\text{Ni}_7\text{B}_3$                      | 10,9            | 12,9            |
| 4 | $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$               | 2,5             | 16,4            |
| 5 | $\text{Ni}_3\text{B}$                        | 21,5            | 36,9            |
| 6 | CrB                                          | 2,7             | 2,9             |

В порошковом материале ПГСП-2 основными компонентами являются (масс. %): никель (59,8),  $\text{Ni}_3\text{B}$  (21,5), и  $\text{Ni}_7\text{B}_3$  (10,9). Содержание других компонентов существенно ниже и составляет 2,5–2,7 %. Изменение исходного состава порошковой смеси, которая используется для изготовления ПГСП-4, а именно увеличение содержания легирующих добавок хрома, кремния, бора и углерода, приводит к существенному изменению фазового состава. Основными компонентами ПГСП-4 являются (масс. %): никель (29,4),  $\text{Ni}_3\text{B}$  (36,9),  $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$  (16,4) и  $\text{Ni}_7\text{B}_3$  (12,9). Массовые доли фаз  $\text{Cr}_{9,5}\text{Ni}_{12,5}\text{Si}_7$  и CrB составляют 0,8 и 2,9 масс. %, соответственно.

#### 4.2.2. Рентгенофазовый анализ покрытий

На рисунках 4.4 и 4.5 представлены результаты рентгенофазового анализа (далее – РФА) покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4, нанесенных методом плазменного напыления в до- и сверхзвуковом режимах.

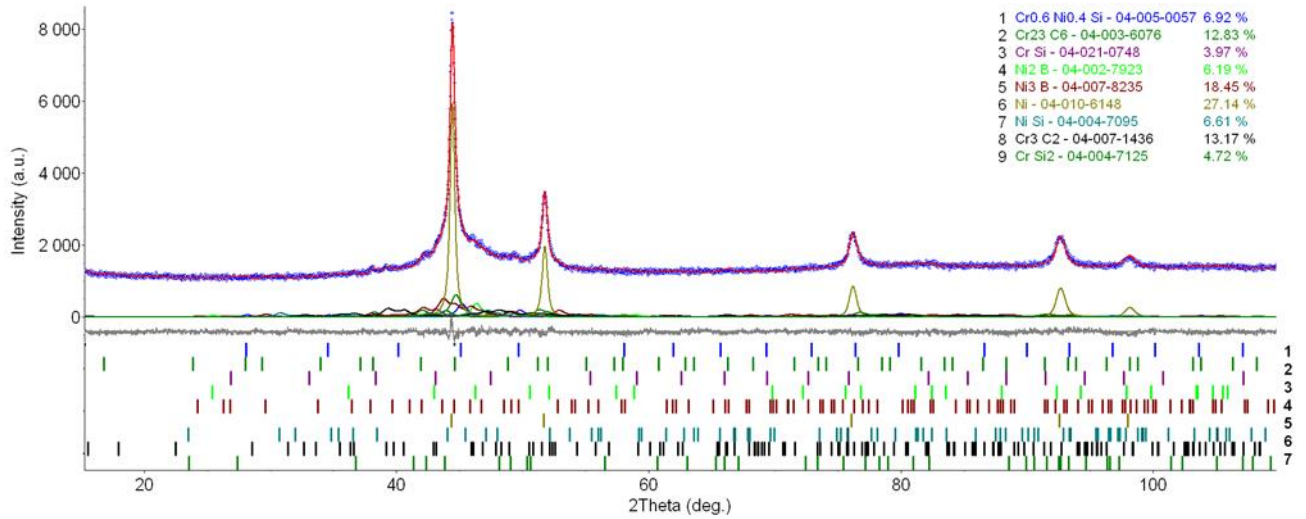
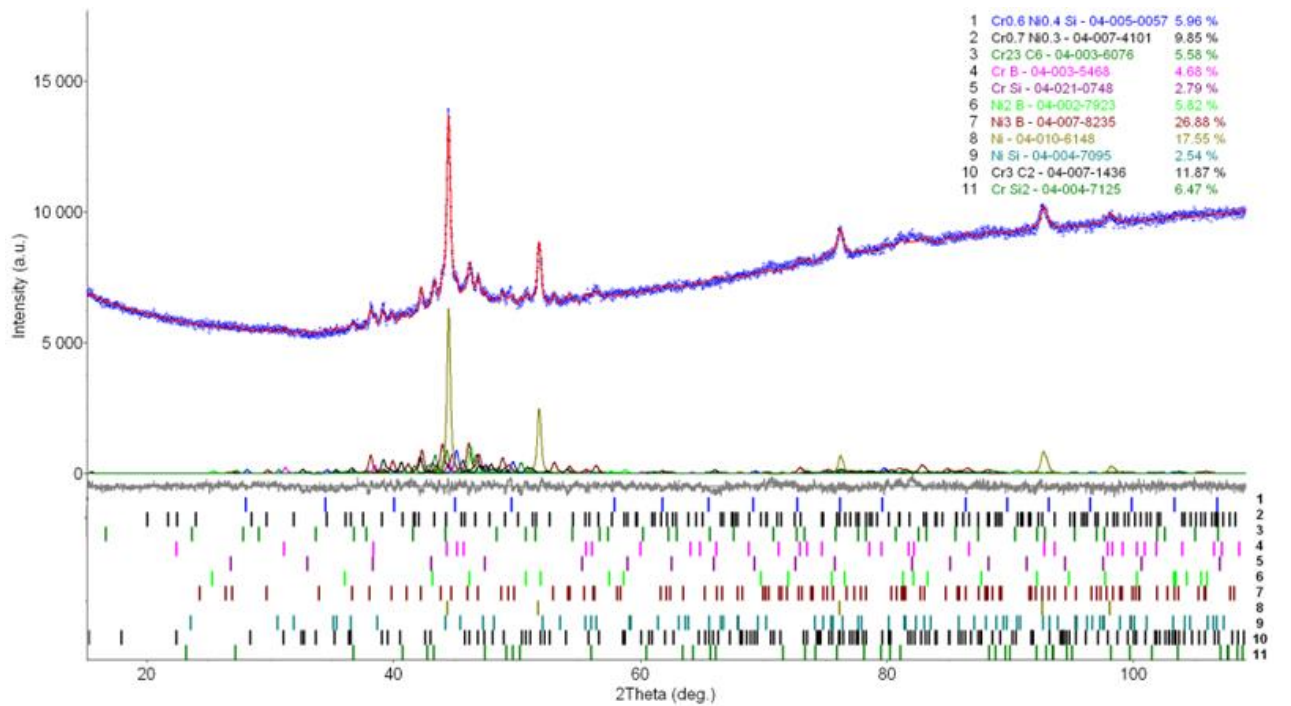
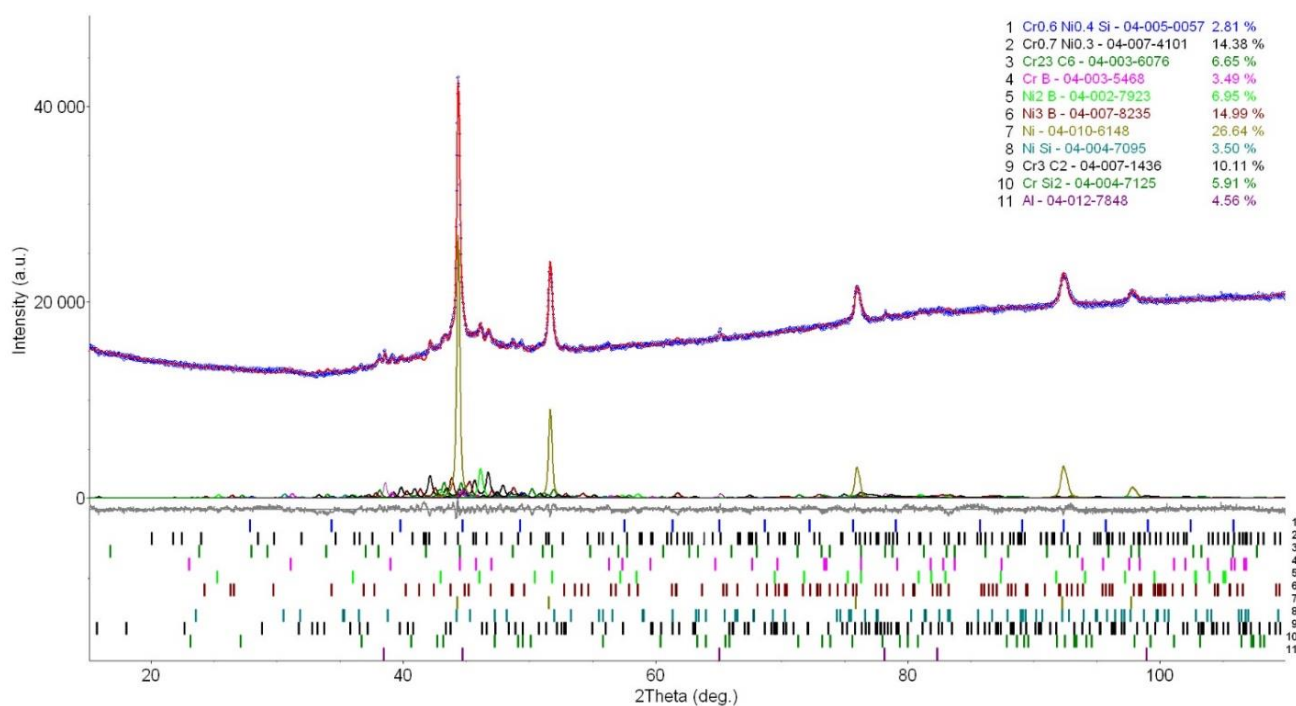
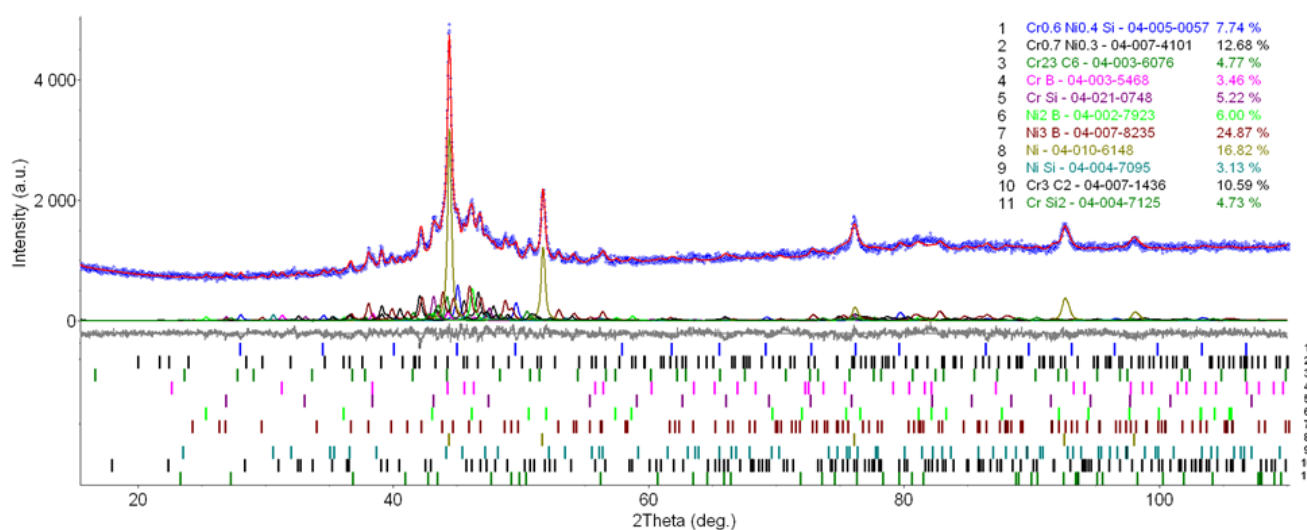
*a**б*

Рисунок 4.4 – Дифрактограммы образцов покрытий, полученных при дозвуковом режиме напыления: *a* – ПГСР-2; *б* – ПГСР-4. Экспериментальная (синие точки) и расчетная (красная кривая) дифрактограммы, а также разностная кривая (серая). Вертикальные штрихи соответствуют разрешенным для каждой фазы брэгговским отражениям



a



б

Рисунок 4.5 – Дифрактограммы образцов покрытий, полученных при сверхзвуковом режиме напыления: а – ПГСР-2; б – ПГСР-4.

Экспериментальная (синие точки) и расчетная (красная кривая) дифрактограммы, а также разностная кривая (серая). Вертикальные штрихи соответствуют разрешенным для каждой фазы брэгговским отражениям

Фазовый состав покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4, полученных при напылении в до- и сверхзвуковом режимах, представлен в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Фазовый состав покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4 (до- и сверхзвуковой режимы плазменного напыления)

| ПГСП-2, масс. % |                                           |         |            | ПГСП-4, масс. % |            |
|-----------------|-------------------------------------------|---------|------------|-----------------|------------|
| №               | Фаза                                      | 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               | $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$                | 12,83   | 6,65       | 5,58            | 4,8        |
| 4               | $\text{CrB}$                              | –       | 3,49       | 4,68            | 3,5        |
| 5               | $\text{CrSi}$                             | 3,97    | –          | 2,79            | 5,2        |
| 6               | $\text{Ni}_2\text{B}$                     | 6,19    | 6,95       | 5,82            | 6,0        |
| 7               | $\text{Ni}_3\text{B}$                     | 18,45   | 14,99      | 26,88           | 24,9       |
| 8               | $\text{Ni}$                               | 27,14   | 26,64      | 17,55           | 16,8       |
| 9               | $\text{NiSi}$                             | 6,61    | 3,50       | 2,54            | 3,1        |
| 10              | $\text{Cr}_3\text{C}_2$                   | 13,17   | 10,11      | 11,87           | 10,6       |
| 11              | $\text{CrSi}_2$                           | 4,72    | 5,91       | 6,47            | 4,7        |
| 12              | $\text{Al}$                               | –       | 4,56       | –               | –          |

Как видно из результатов РФА, фазовый состав всех покрытий формируется из основных химических элементов Ni, Cr, B, Si, C. Фазовый состав покрытий на основе ПГСП-2, полученных в при дозвуковом режиме плазменного напыления, включает никель и ряд соединений:  $\text{Cr}_{0,6}\text{Ni}_{0,4}\text{Si}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{CrSi}$ ,  $\text{Ni}_2\text{B}$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{NiSi}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{CrSi}_2$ . Основной вклад в фазовый состав покрытия вносят никель (27,14 %),  $\text{Ni}_3\text{B}$  (18,45 %),  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (13,17 %),  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (12,83 %). Содержание остальных соединений ниже 10 %. Фазовый состав покрытий на основе ПГСП-4 также включает никель и указанные выше соединения, однако в покрытии присутствуют еще соединения  $\text{Cr}_{0,7}\text{Ni}_{0,3}$ ,  $\text{CrB}$ .

В покрытиях, полученных при сверхзвуковом режиме напыления ПГСП-2 и ПГСП-4, основными компонентами являются никель,  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Cr}_{0,7}\text{Ni}_{0,3}$ .

Содержание остальных соединений менее 10 %. Оксиды и нитриды присутствуют в незначительных количествах и не отличаются по величинам пиков от фона.

Таким образом, в результате плазменного напыления формируются покрытия со сложным фазовым составом, включающим карбиды, силициды, бориды и некоторые тройные соединения. Эти соединения существенно влияют на физико-химические и механические свойства порошковых покрытий.

#### **4.3. Сканирующая электронная микроскопия плазменных покрытий**

С использованием аналитического сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TescanMira (Институт физики металлов УрО РАН) проведено исследование покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4, полученных методами до- и сверхзвукового плазменного напыления на подложки из сплава АК7ч. С использованием энергодисперсионного спектрометра Oxford Instruments UltimXmax, совмещенного с СЭМ, проведен энергодисперсионный анализ, позволяющий сделать выводы о качественном и количественном составе исследуемых образцов.

На рисунках 4.6–4.11 представлены результаты СЭМ-исследований отдельных областей шлифов поверхностей образцов с покрытиями ПГСП-2 и ПГСП-4, нанесенных в режимах до- и сверхзвукового плазменного напыления: электронное и многослойное изображение ЭДС шлифов поверхностей образцов с покрытиями, карты распределения элементов на поверхности исследуемых образцов и энергодисперсионные рентгеновские спектры покрытий.

Анализ полученных результатов показывает, что поверхности всех покрытий являются достаточно однородными с небольшим количеством пор (рисунки 4.6, 4.9), что согласуется с результатами металлографических исследований.

На картах распределения элементов (рисунки 4.7, 4.10) каждая цветная точка – это квант характеристического рентгеновского излучения; черные поля показывают отсутствие этого элемента. На энергодисперсионных картах наблюдается равномерное распределение элементов в образцах. В приграничном слое покрытие – подложка наблюдается присутствие алюминия.

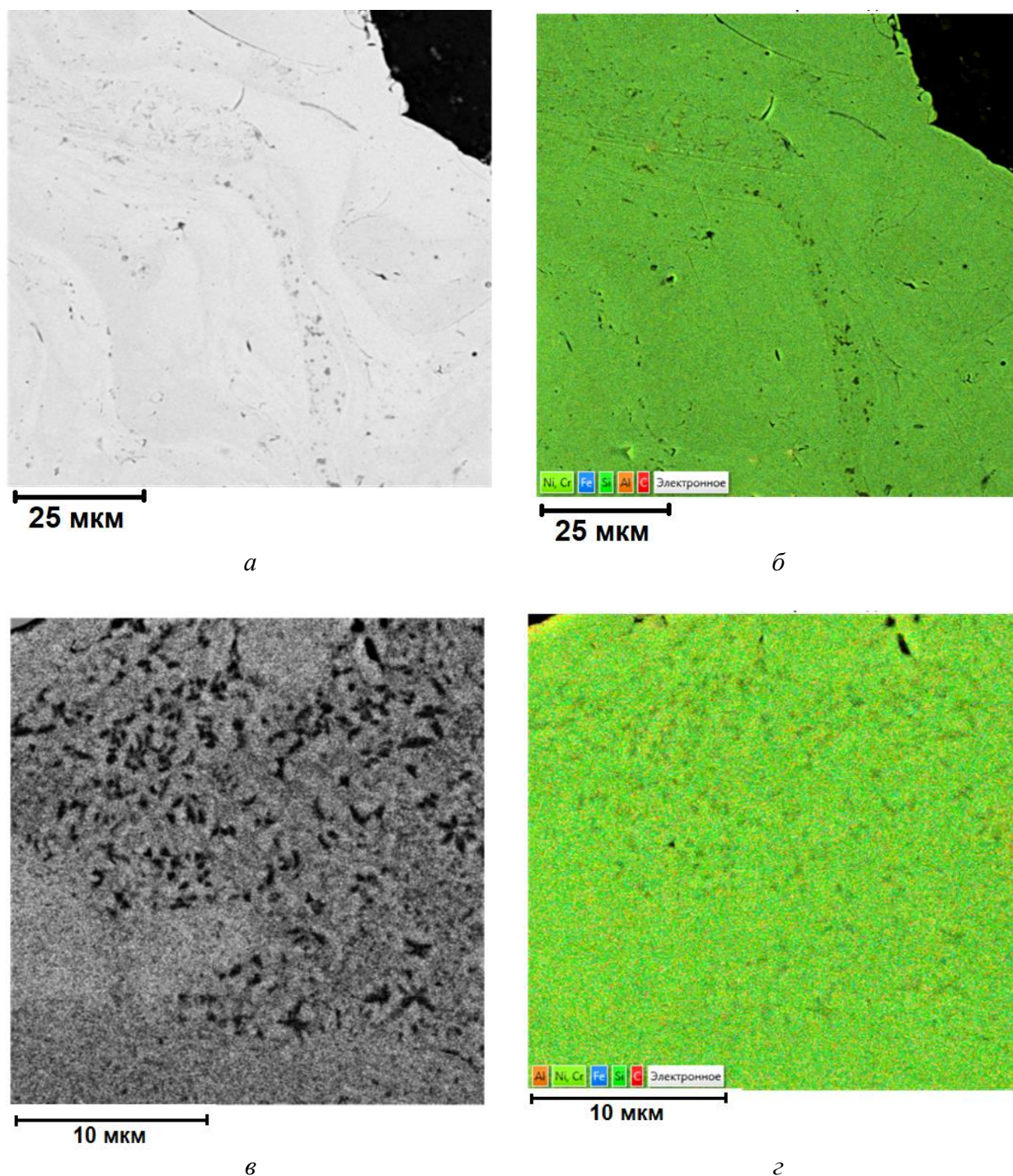


Рисунок 4.6 – Электронное (*a*, *в*) и многослойное изображение ЭДС (*б*, *г*) шлифов поверхностей образцов с покрытиями ПГСР-2, нанесенными в режиме дозвукового (*a*, *б*) и сверхзвукового (*в*, *г*) плазменного напыления

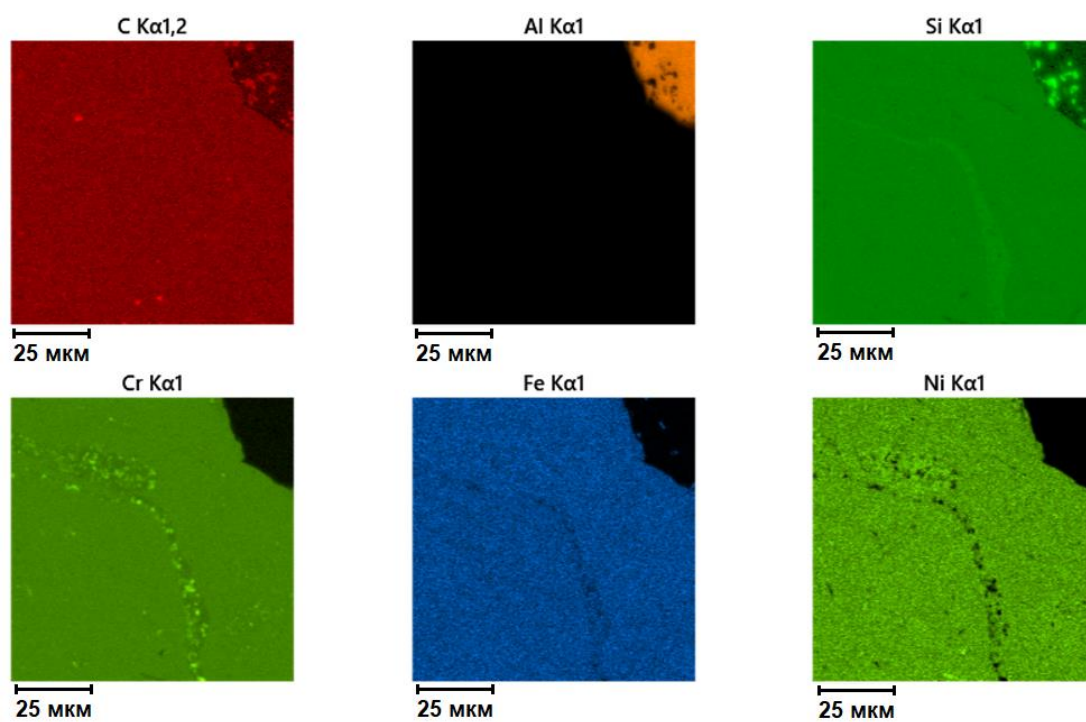
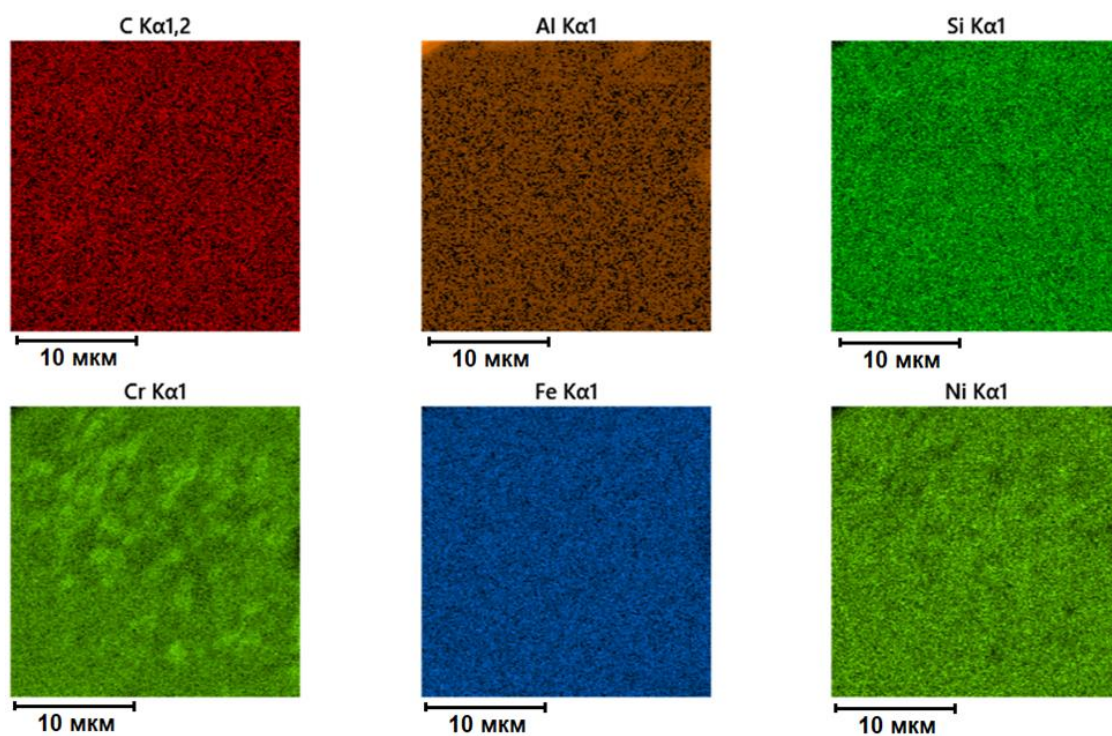
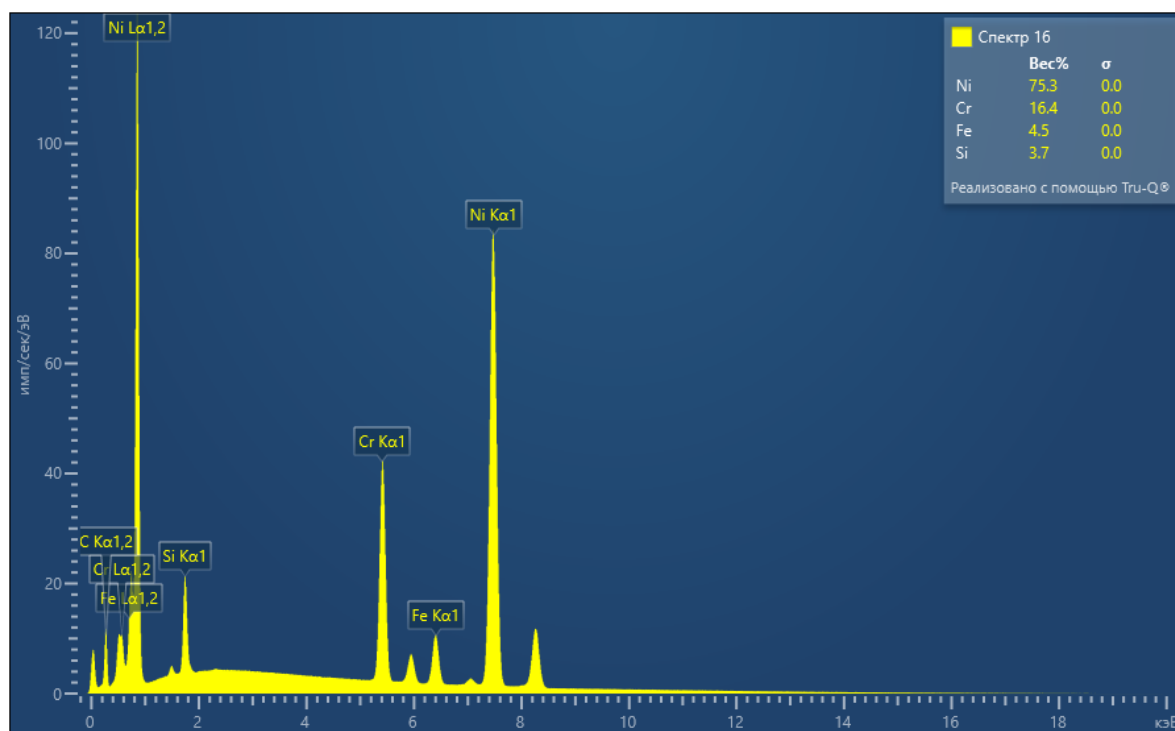
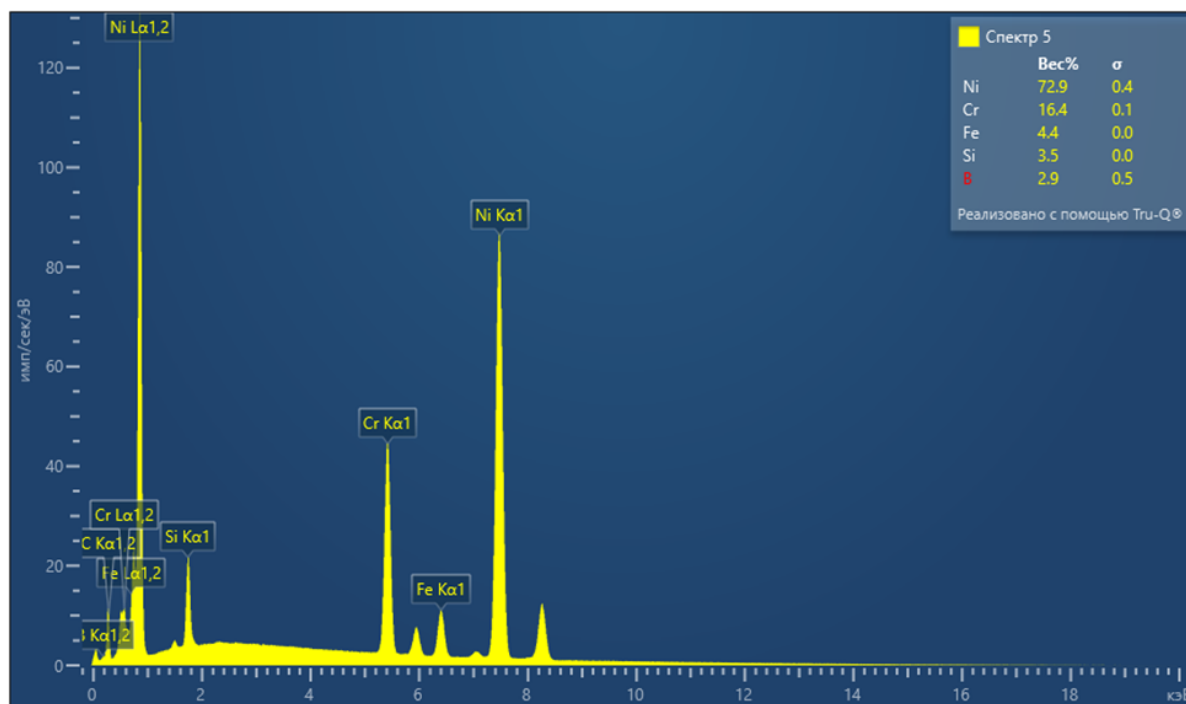
*a**б*

Рисунок 4.7 – Распределение элементов на поверхности исследуемых образцов с покрытиями ПГСП-2, нанесенными в режиме дозвукового (*а*) и сверхзвукового (*б*) плазменного напыления



а



б

Рисунок 4.8 – Энергодисперсионные рентгеновские спектры покрытий ПГСП-2, нанесенных в режиме дозвукового (а) и сверхзвукового (б) плазменного напыления

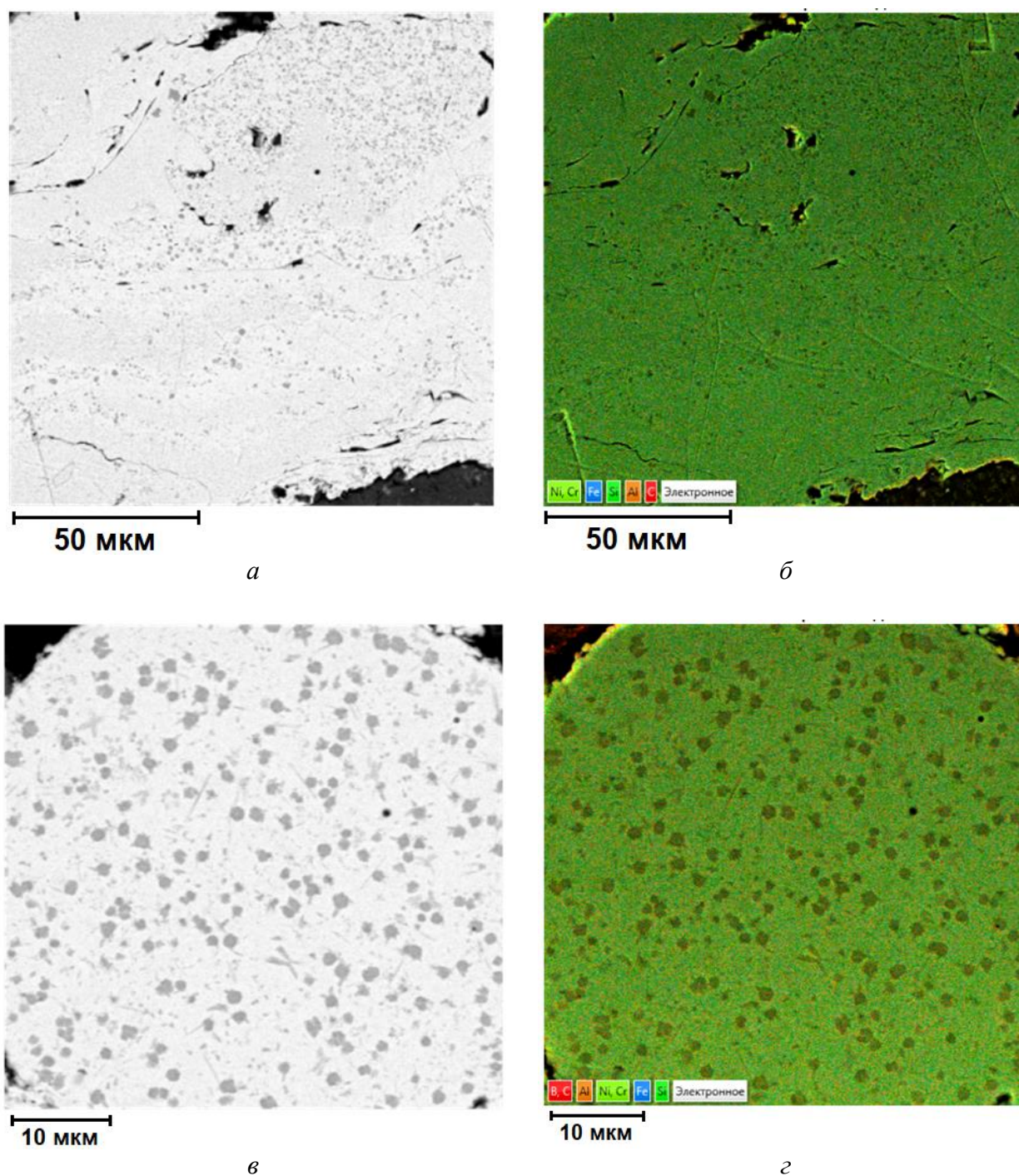


Рисунок 4.9 – Электронное (*a*, *в*) и многослойное изображение ЭДС (*б*, *г*) шлифов поверхностей образцов с покрытиями ПГСР-4, нанесенными в режиме дозвукового (*a*, *б*) и сверхзвукового (*в*, *г*) плазменного напыления

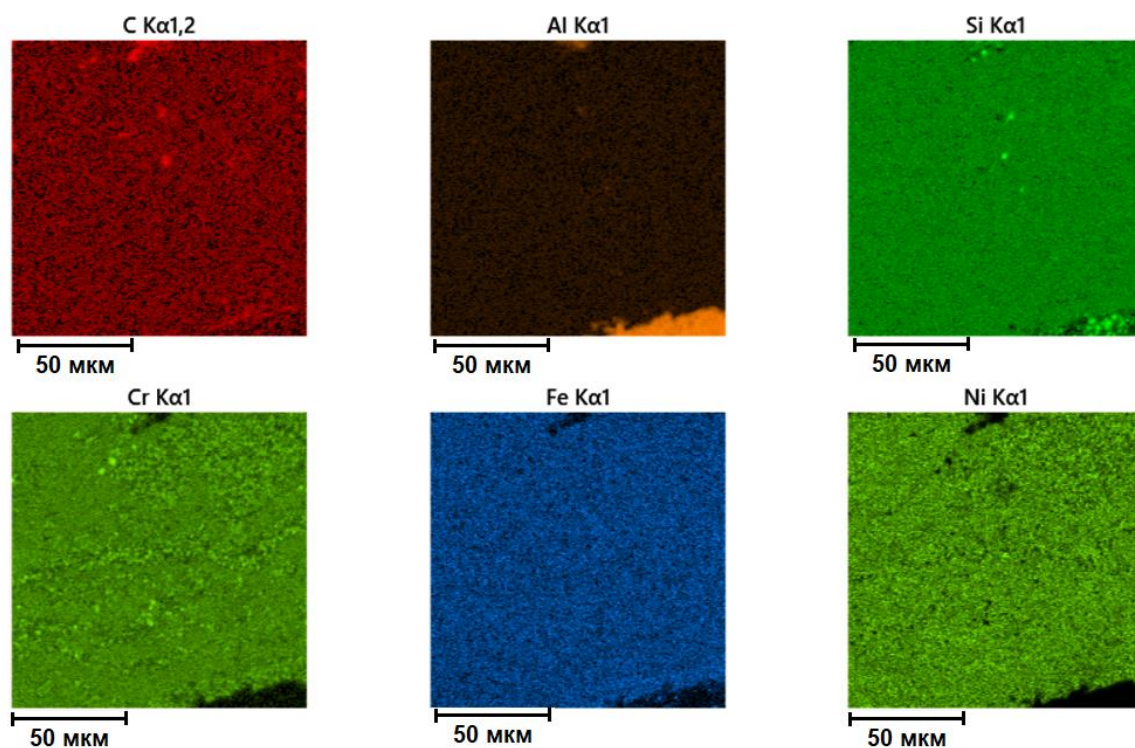
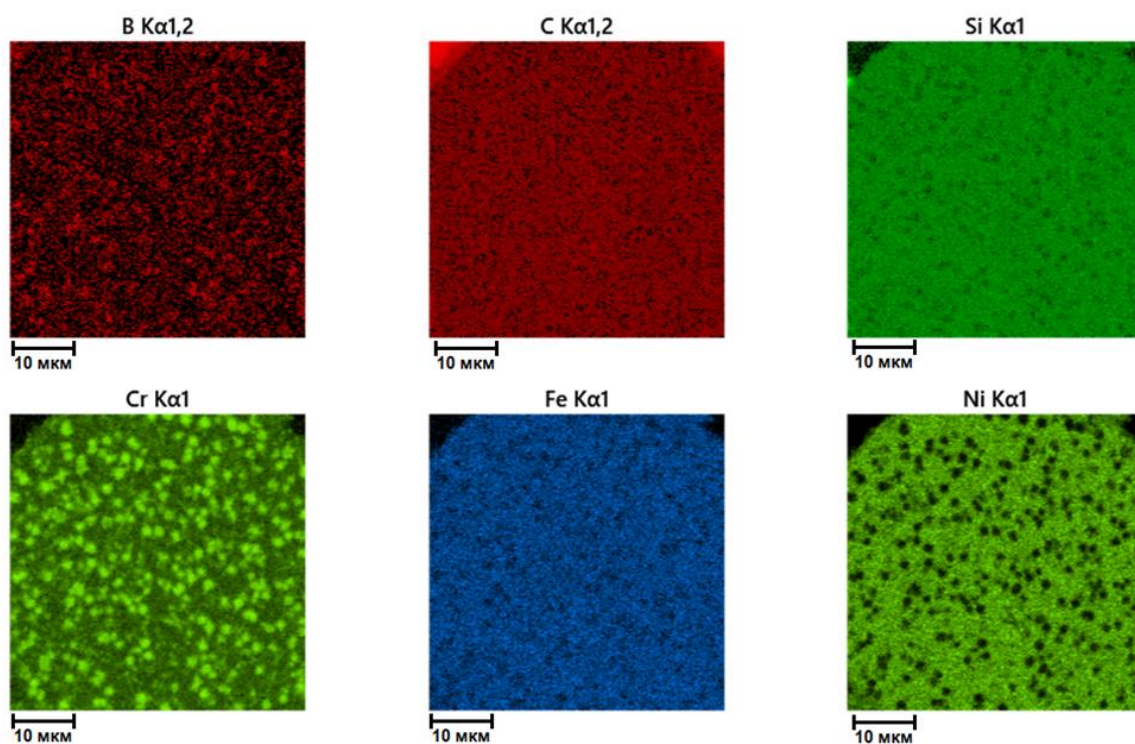
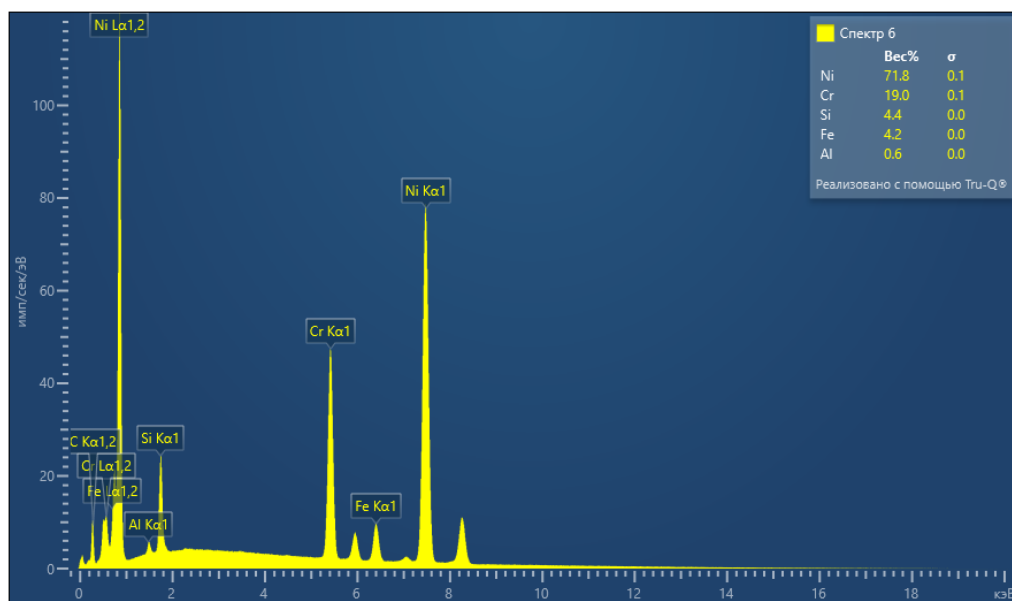
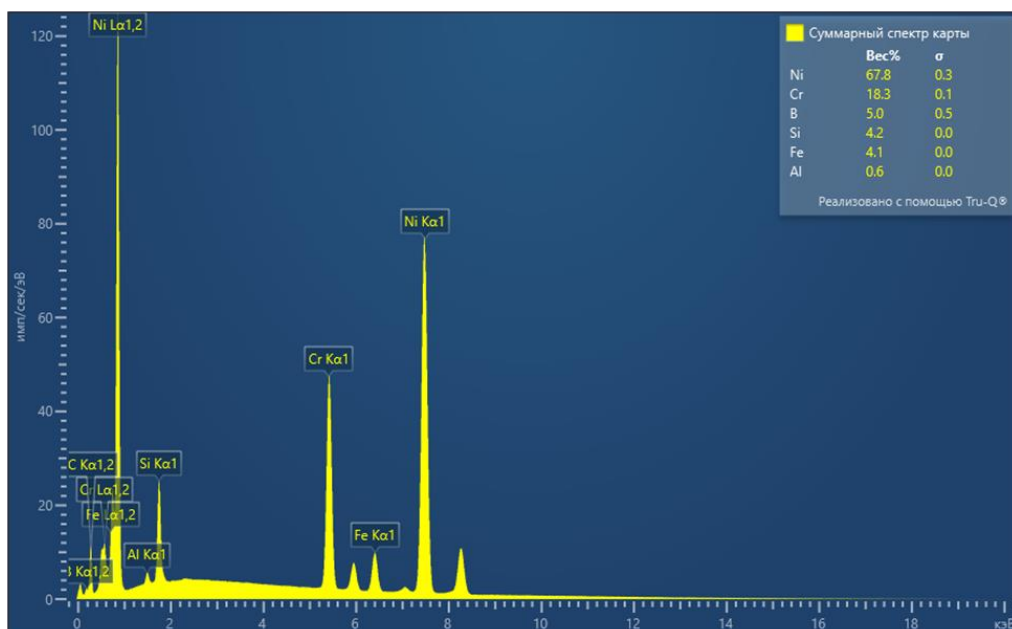
*a**б*

Рисунок 4.10 – Распределение элементов на поверхности исследуемых образцов с покрытиями ПГСР-4, нанесенными в режиме дозвукового (*a*) и сверхзвукового (*б*) плазменного напыления



а



б

Рисунок 4.11 – Энергодисперсионные рентгеновские спектры покрытий ПГСП-4, нанесенных в режиме дозвукового (а) и сверхзвукового (б) плазменного напыления

Анализ энергодисперсионных рентгеновских спектров (рисунки 4.8, 4.11) позволяет определить качественный и количественный химический состав исследуемых образцов. Усредненные значения содержания элементов представлены в таблице 4.3.

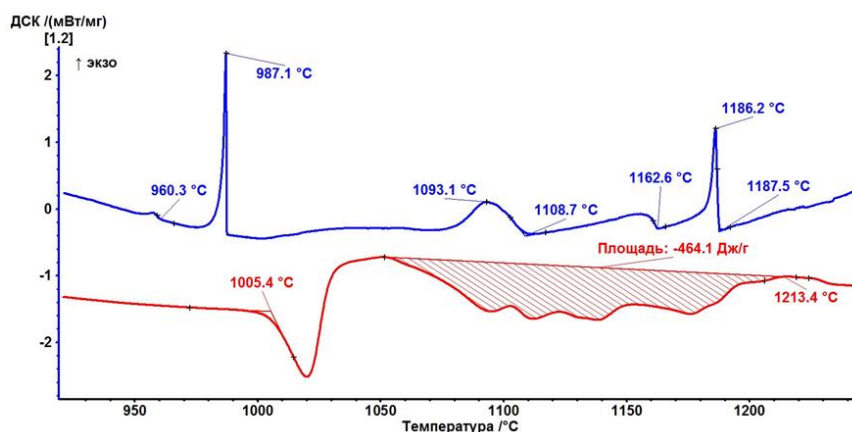
Таблица 4.3 – Содержание элементов в покрытиях ПГСП-2 и ПГСП-4

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

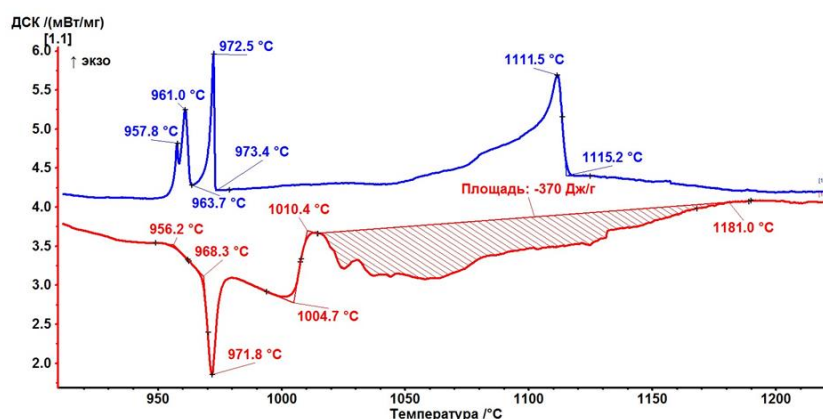
Полученные результаты хорошо согласуются с химическим составом порошков ПГСП-2 и ПГСП-4, производимых АО «ПОЛЕМА» [26]. В связи с ограничениями по чувствительности СЭМ к определению легких элементов выявление углерода и бора было затруднено, поэтому в таблице 4.3 содержание углерода не представлено, а содержание бора было установлено только для некоторых спектров.

#### 4.4. Синхронный термический анализ порошковых материалов

Исследование порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 проведено методом синхронного термического анализа (СТА) на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter<sup>®</sup> в среде аргона в интервале температур 900–1300 °С, со скоростью нагрева и последующего охлаждения 10 К/мин, в корундовых тиглях. Задачей исследований являлось изучение термолиза указанных порошковых материалов с целью получения сведений о температурах фазовых превращений, солидус и ликвидус для оптимизации режима плазменного напыления данных материалов [154]. На рисунке 4.12 представлены термограммы нагрева и кристаллизации порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4.



а



б

Рисунок 4.12 – Термограммы порошковых материалов ПГСР-2 (а) и ПГСР-4 (б)

Как видно из рисунка 4.12а, тепловые эффекты в образце ПГСР-2 наблюдаются только в интервале температур от 950 °С до 1215 °С. На ДСК-кривой нагрева начало плавления образца характеризуется эндотермическим пиком при 1005,4 °С (температура солидус). При температуре 1050 °С начинается плавление более тугоплавких соединений, с эндотермическим эффектом, составляющим 464,1 Дж/кг. Плавление порошкового материала заканчивается при 1213,4 °С (температура ликвидус), что соответствует полному расплавлению образца. Кристаллизация расплава начинается при температуре 1187,5 °С, что на 29,5 °С ниже температуры ликвидус сплава, зафиксированной в режиме нагрева. При охлаждении на кривой ДСК наблюдается пять экзотермических эффектов с температурами начала 1187,5 °С, 1162,6 °С, 1108,7 °С, 987,1 °С, 960,3 °С. Кристаллизация сплава заканчивается при температуре 960,3 °С.

На ДСК-кривой нагрева порошкового материала ПГСП-4 (рисунок 4.12б) начало плавления характеризуется пиком при 956,2 °С. Начиная с температуры 1010,4 °С происходит плавление более тугоплавких фаз с эндотермическим эффектом –370 Дж/кг. Плавление сплава заканчивается при температуре 1181,0 °С. Температура начала кристаллизации расплава – 1115,2 °С, таким образом переохлаждение расплава составляет 65,8 °С. Далее на ДСК-кривой охлаждения наблюдаются три пика с максимумами при температурах 972,5 °С, 961,0 °С и 957,0 °С. Кристаллизация сплава заканчивается при температуре 957,8 °С. Наличие пиков на кривых охлаждения может быть обусловлено образованием фаз, протеканием эвтектических, перитектических или монотектических реакций.

Анализ диаграмм состояния [155] показывает, что в системе Ni–В образуется пять промежуточных фаз:  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{Ni}_2\text{B}$ ,  $\text{Ni}_4\text{B}$ ,  $\text{Ni}_4\text{B}_3$  и  $\text{NiB}$ . Первые три плавятся конгруэнтно при 1156 °С, 1125 °С и 1031 °С соответственно, а оставшиеся две образуются по перитектическим реакциям при 1025 °С и 1035 °С соответственно. В данной системе наблюдаются также четыре эвтектических равновесия при содержании бора (масс. %): 17 % (1093 °С), 30 % (1111 °С), 39,5 % и 45,3 % (1018 °С).

В системе Ni–Si, согласно [155, 156], существуют следующие фазы:  $\beta_1$  ( $\text{Ni}_{10}\text{Si}_3$ ),  $\beta_3$  ( $\text{Ni}_3\text{Si}$ ),  $\gamma$  ( $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ ),  $\delta$  ( $\text{Ni}_2\text{Si}$ ),  $\theta$  ( $\text{Ni}_5\text{Si}_3$ ),  $\varepsilon'$  ( $\text{Ni}_3\text{Si}_2$ ),  $\text{NiSi}$  и  $\text{NiSi}_2$ . Соединения  $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ ,  $\text{Ni}_2\text{Si}$  и  $\text{NiSi}$  плавятся конгруэнтно при 1242 °С [150] (1260 °С [155]), 1306 °С [150] (1305 °С [155]) и 992 °С [150] (993 °С [155]) соответственно. Фазы  $\beta_3$ ,  $\delta$  и  $\beta\text{NiSi}_2$  образуются по перитектическим реакциям при 1170 °С, 1255 °С и 993 °С соответственно [150]. Фазы  $\beta_1$  и  $\varepsilon'$  образуются по перитектоидным реакциям при 1035 °С и 845 °С. Три фазы имеют высоко- и низкотемпературные модификации:  $\beta_3 \leftrightarrow \beta_2$  (1115 °С),  $\varepsilon' \leftrightarrow \varepsilon$  (830 °С) и  $\beta\text{NiSi}_2 \leftrightarrow \alpha\text{NiSi}_2$  (981 °С).

Соединения и фазы в системах Ni–Cr, Ni–C, Cr–B, Cr–Si, Cr–C, B–Si, B–C, Si–C в ходе проведенного СТА не выявлены, так как, согласно данным [150], температуры образования возможных соединений не входят в исследованный диапазон 900–1300 °С. Таким образом, можем говорить о том, что образовавшиеся

в процессе кристаллизации пики соответствуют соединениям Ni–Si и B–Ni, что согласуется с данным РФА, представленным выше (п. 4.2.1).

Сравнение полученных результатов термического анализа с известными литературными данными [4, 26, 54] показывает, что имеются некоторые расхождения. Так, в частности, согласно [4, 54] температура плавления ПГСП-4 составляет 990 °С, а температура плавления ПГСП-2 – 1050 °С, согласно [26] – 1025 °С. Такое расхождение может быть обусловлено различным содержанием примесей алюминия и железа, присутствующих в исследуемом нами материале, в то время как в стандартном порошке такие примеси отсутствуют.

Таким образом, исследование многокомпонентных самофлюсующихся сплавов на основе никеля методами термического анализа в интервале температур до 1300 °С позволило установить температуры солидус, ликвидус и фазовых превращений, указывающих на возможные соединения, обеспечивающие износостойкость металлическим деталям после напыления данного порошка на их поверхность.

## **4.5. Физико-механические свойства покрытий**

### **4.5.1. Определение твердости по Виккерсу**

В качестве объекта исследования были использованы отшлифованные до шероховатости 0,14–0,16 мкм образцы размером 25×15 мм. Величина нагрузки – 5 кгс (49,03 Н). Проведено измерение твердости алюминиевого сплава АК7ч (АЛ9) без покрытия и с покрытиями ПГСП-2 и ПГСП-4, полученными при дозвуковом и сверхзвуковом режимах напыления. Результаты измерений представлены в таблице 4.4. Покрытия на основе ПГСП-2 и ПГСП-4, полученные как при дозвуковом, так и при сверхзвуковом режимах напыления, значительно (в 14–20 раз) превосходят по твердости материал подложки. Наиболее высокая твердость, превышающая значение твердости подложки в 24 раза, наблюдается у покрытия ПГСП-2, полученного при сверхзвуковом режиме напыления.

Таблица 4.4 – Результаты измерений твердости покрытий

| Образец                                  | Размер диагонали,<br>мм | Твердость<br>по Виккерсу, HV | Среднее значение<br>твердости, HV |
|------------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Подложка<br>(АК7ч)                       | 0,567                   | 28,8                         | 29,7                              |
|                                          | 0,576                   | 27,9                         |                                   |
|                                          | 0,544                   | 31,3                         |                                   |
|                                          | 0,564                   | 29,1                         |                                   |
|                                          | 0,545                   | 31,2                         |                                   |
| ПГСР-2, дозвуковой<br>режим напыления    | 0,131                   | 540                          | 422,2                             |
|                                          | 0,121                   | 633                          |                                   |
|                                          | 0,178                   | 293                          |                                   |
|                                          | 0,163                   | 349                          |                                   |
|                                          | 0,177                   | 296                          |                                   |
| ПГСР-2, сверхзвуковой<br>режим напыления | 0,109                   | 780                          | 735,4                             |
|                                          | 0,115                   | 701                          |                                   |
|                                          | 0,105                   | 841                          |                                   |
|                                          | 0,116                   | 689                          |                                   |
|                                          | 0,118                   | 666                          |                                   |
| ПГСР-4, дозвуковой<br>режим напыления    | 0,150                   | 412                          | 450,8                             |
|                                          | 0,149                   | 418                          |                                   |
|                                          | 0,132                   | 532                          |                                   |
|                                          | 0,157                   | 376                          |                                   |
|                                          | 0,134                   | 516                          |                                   |
| ПГСР-4, сверхзвуковой<br>режим напыления | 0,138                   | 487                          | 486,8                             |
|                                          | 0,126                   | 548                          |                                   |
|                                          | 0,149                   | 418                          |                                   |
|                                          | 0,138                   | 487                          |                                   |
|                                          | 0,137                   | 494                          |                                   |

Значения твердости образцов, приведенные в Таблице 4.4, имеют большой разброс. Это, вероятно, связано с тем, что покрытия имеют сложный фазовый состав (см. пп. 4.2 и 4.3). При вдавливании индентора на участках образца, содержащих различные фазы (бориды, карбиды, силициды и т. д.), получают отпечатки различного размера и, соответственно, расчет приводит к различным значениям твердости.

### 4.5.2. Микротвердость

В качестве объекта исследования были использованы поперечные шлифы алюминиевых образцов с покрытиями ПГСП-2 и ПГСП-4, полученными при дозвуковом и сверхзвуковом режимах напыления.

Размер отпечатков оценивали с помощью металлографического инвертированного микроскопа Olympus GX51 и программного обеспечения SIAMS Photolab в ЦКП «Урал М» (рисунок 4.13).

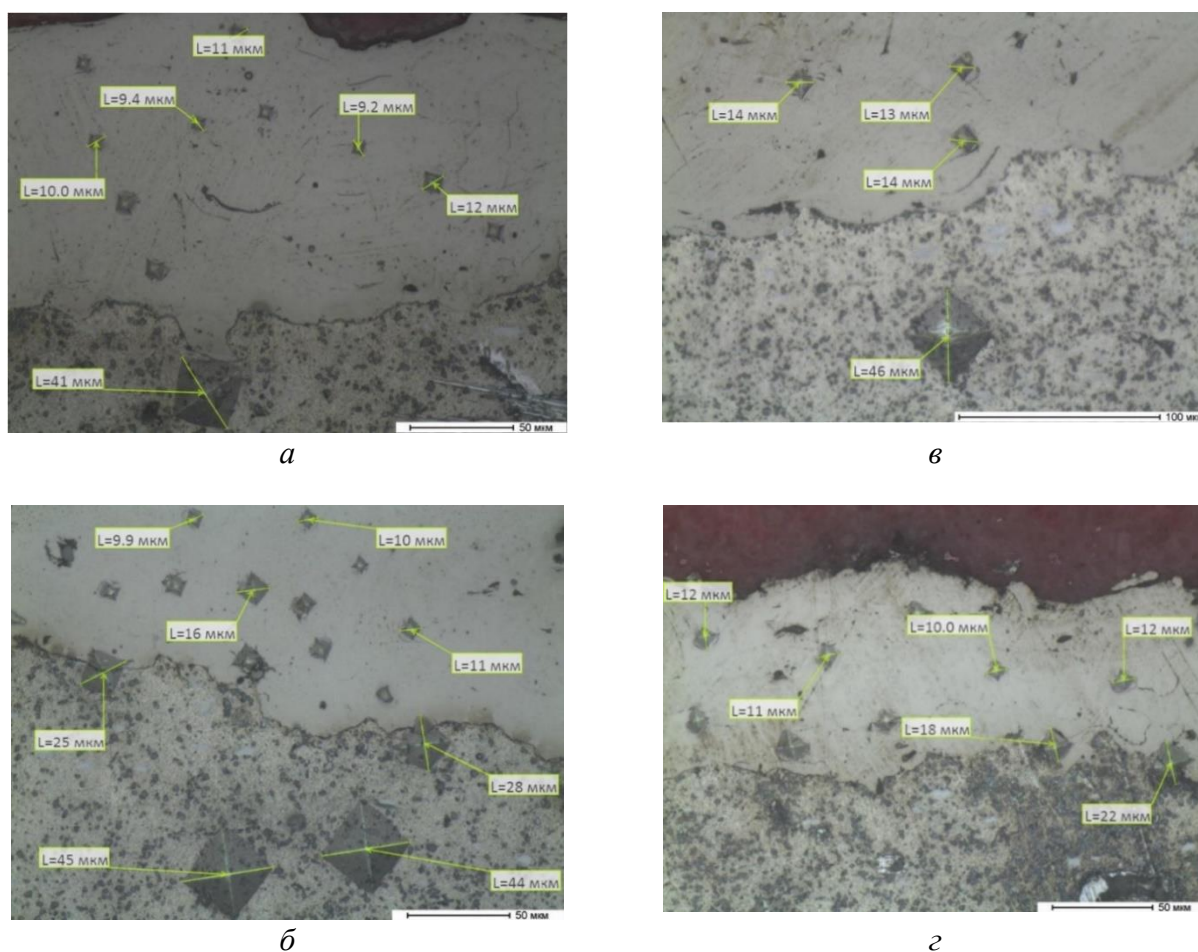


Рисунок 4.13 – Изображения отпечатков проводимых измерений микротвердости:

*a* – ПГСП-2, дозвуковой режим напыления; *б* – ПГСП-2, сверхзвуковой режим напыления; *в* – ПГСП-4, дозвуковой режим напыления; *г* – ПГСП-4, сверхзвуковой режим напыления

Результаты исследования микротвердости образцов с покрытиями ПГСП-2 и ПГСП-4, полученными при дозвуковом и сверхзвуковом режимах напыления, представлены в Таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты измерений микротвердости образцов с покрытиями ПГСП-2 (дозвуковой и сверхзвуковой режимы напыления), HV

| №,<br>п/п | Место замера | В HV               |                       |                    |                       |
|-----------|--------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|           |              | ПГСП-2,<br>дозвук. | ПГСП-2,<br>сверхзвук. | ПГСП-4,<br>дозвук. | ПГСП-4,<br>сверхзвук. |
| 1         | Подложка     | 45                 | 43                    | 45                 | 43                    |
| 2         | Подложка     | 42                 | 42                    | 47                 | 43                    |
| 3         | Подложка     | 47                 | 45                    | 53                 | 50                    |
| 4         | Подложка     | 40                 | 45                    | 43                 | 46                    |
| 5         | Подложка     | 44                 | 45                    | 45                 | 42                    |
| 6         | Граница      | 152                | 182                   | 177                | 297                   |
| 7         | Граница      | 139                | 174                   | 153                | 213                   |
| 8         | Покрытие     | 763                | 839                   | 372                | 686                   |
| 9         | Покрытие     | 962                | 781                   | 470                | 615                   |
| 10        | Покрытие     | 628                | 677                   | 398                | 599                   |
| 11        | Покрытие     | 689                | 1050                  | 644                | 726                   |
| 12        | Покрытие     | 1107               | 900                   | 528                | 628                   |
| 13        | Покрытие     | 900                | 955                   | 760                | 1050                  |
| 14        | Покрытие     | 985                | 695                   | 1039               | 727                   |
| 15        | Покрытие     | 536                | 774                   | 575                | 900                   |
| 16        | Покрытие     | 695                | 995                   | 549                | 608                   |
| 17        | Покрытие     | 1240               | 649                   | 473                | 549                   |
| 18        | Покрытие     | 1144               | 866                   | 553                | 1006                  |
| 19        | Покрытие     | 802                | 918                   | 618                | 841                   |
| 20        | Покрытие     | 1145               | 936                   | 802                | 1049                  |

Значительный разброс значений микротвердости может быть обусловлен следующими обстоятельствами. Известно, что порошковые материалы ПГСП-2 и ПГСП-4 и покрытия на их основе изначально являются многокомпонентными

(см. п. 1.4.1, пп. 4.2, 4.3). При плазменном напылении эти материалы подвергаются термическому воздействию, вследствие чего происходят фазовые и химические превращения, в результате которых образуются карбиды, бориды, силициды (Таблицы 4.1–4.2), которые, с одной стороны, способствуют увеличению твердости за счет формирования твердых фаз, а, с другой стороны, приводят к неоднородности по твердости вследствие того, что эти фазы распределены по объему образцов неравномерно.

#### 4.5.3. Адгезионно-когезионные свойства

Проведено исследование прочности системы покрытие – подложка на трехточечный изгиб для образцов порошковых покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4, полученных при до- и сверхзвуковых режимах напыления [157]. Для каждой серии испытаний подготовлено по 15 образцов с покрытиями различной толщины. Для описания характерных закономерностей были отобраны по пять образцов с покрытиями различной толщины (Таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Характеристики покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4, полученных при дозвуковом и сверхзвуковом режимах напыления

| № п/п                                          | Толщина покрытия, мм | Напряжение в момент образования первой трещины, МПа | Максимальное значение приложенного напряжения, $F_{\max}$ , МПа |
|------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Покрытие ПГСП-2, дозвуковой режим напыления    |                      |                                                     |                                                                 |
| 1                                              | 0,131                | 196,7                                               | 195,7                                                           |
| 2                                              | 0,141                | 185,8                                               | 185,9                                                           |
| 3                                              | 0,211                | 166,8                                               | 173,5                                                           |
| 4                                              | 0,241                | 173,0                                               | 173,8                                                           |
| 5                                              | 0,481                | 131,0                                               | 137,0                                                           |
| Покрытие ПГСП-2, сверхзвуковой режим напыления |                      |                                                     |                                                                 |
| 1                                              | 0,061                | 152,0                                               | 201,7                                                           |
| 2                                              | 0,081                | 181,0                                               | 200,1                                                           |

Окончание таблицы 4.6

| № п/п                                          | Толщина покрытия, мм | Напряжение в момент образования первой трещины, МПа | Максимальное значение приложенного напряжения, $F_{\max}$ , МПа |
|------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 3                                              | 0,121                | 181,0                                               | 191,0                                                           |
| 4                                              | 0,161                | 202,5                                               | 202,5                                                           |
| 5                                              | 0,181                | 191,7                                               | 191,8                                                           |
| Покрытие ПГСР-4, дозвуковой режим напыления    |                      |                                                     |                                                                 |
| 1                                              | 0,131                | 131,0                                               | 189,3                                                           |
| 2                                              | 0,185                | 130,0                                               | 189,4                                                           |
| 3                                              | 0,195                | 136,6                                               | 177,7                                                           |
| 4                                              | 0,233                | 136,5                                               | 167,2                                                           |
| 5                                              | 0,255                | 135,0                                               | 164,9                                                           |
| Покрытие ПГСР-4, сверхзвуковой режим напыления |                      |                                                     |                                                                 |
| 1                                              | 0,041                | 143,8                                               | 205,0                                                           |
| 2                                              | 0,091                | 143,0                                               | 199,1                                                           |
| 3                                              | 0,131                | 156,0                                               | 187,6                                                           |
| 4                                              | 0,161                | 188,9                                               | 188,9                                                           |
| 5                                              | 0,171                | 140,2                                               | 180,0                                                           |

Построены диаграммы нагружения, на которых выделены области, соответствующие отдельным этапам деформации и разрушения образца: область упругой деформации, момент образования трещины, область развития сети трещин (рисунки 4.14–4.17).

В качестве примера для анализа диаграмм напряжение – деформация рассмотрим образец с покрытием ПГСР-2, полученным при дозвуковом режиме напыления, толщиной 0,131 мм (рисунок 4.14, график 1). От начала нагружения образца до точки, соответствующей образованию первой трещины, происходит упругое деформирование образца без заметного разрушения покрытия и подложки. Образование первой трещины происходит при напряжении 195,68 МПа. Спад нагрузки составляет 49,98 МПа (от 198,68 до 148,7). Резкий скачок обусловлен появлением в покрытии монотрещины. Образование второй трещины происходит при нагружении 172,0 МПа, при этом фиксируется спад нагрузки до 164,2 МПа.

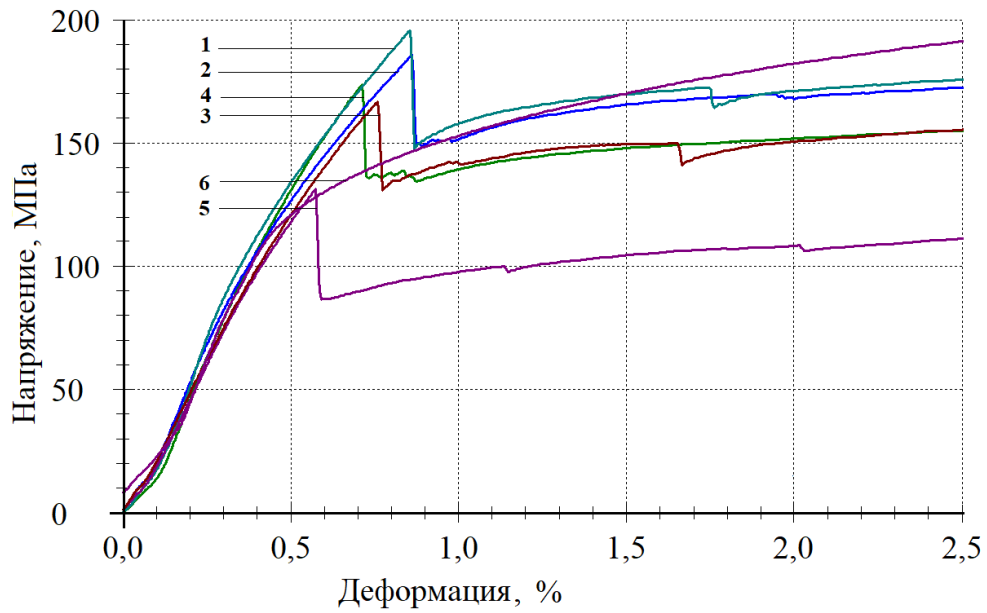


Рисунок 4.14 – Диаграммы напряжение – деформация серии образцов с покрытиями ПГСР-2, полученными при дозвуковом режиме напыления. Толщины покрытий: 1 – 0,131 мм; 2 – 0,141 мм; 3 – 0,211 мм; 4 – 0,241 мм; 5 – 0,481 мм; 6 – без покрытия

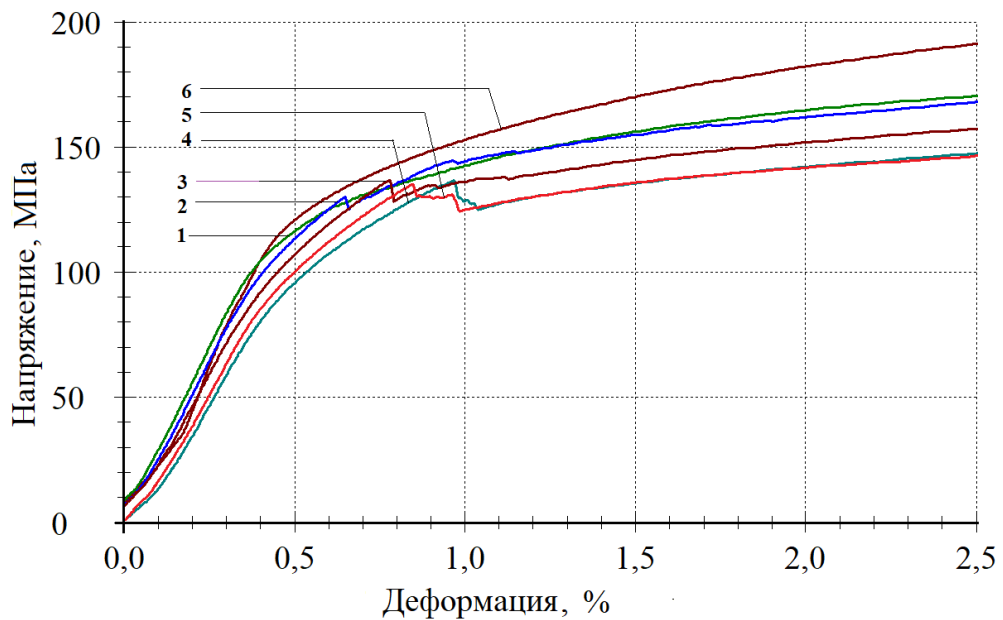


Рисунок 4.15 – Диаграммы напряжение – деформация серии образцов с покрытиями ПГСР-4 различной толщины, полученными при дозвуковом режиме напыления. Толщины покрытий: 1 – 0,131 мм; 2 – 0,185 мм; 3 – 0,195 мм; 4 – 0,233мм; 5 – 0,255 мм; 6 – без покрытия

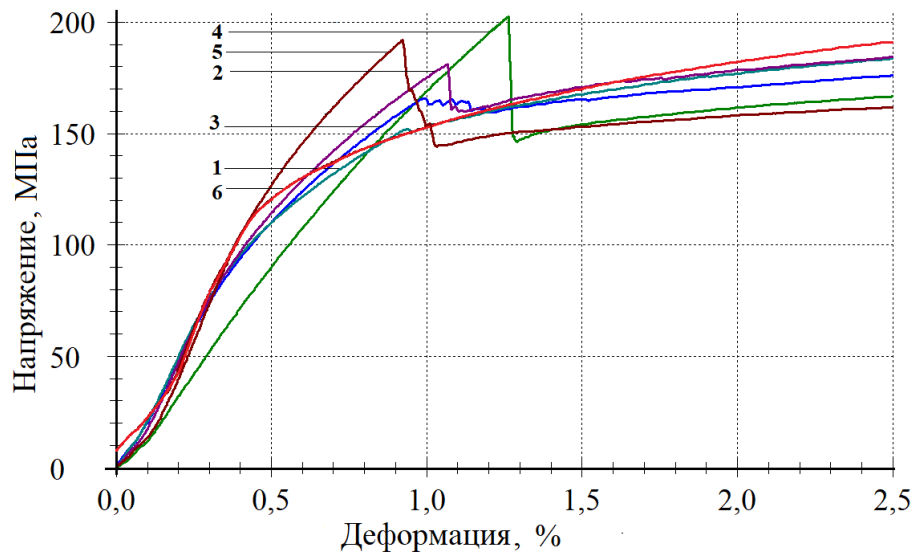


Рисунок 4.16 – Диаграммы напряжение – деформация серии образцов с покрытиями ПГСР-2, полученными при сверхзвуковом режиме напыления.

Толщины покрытий: 1 – 0,161 мм; 2 – 0,081 мм; 3 – 0,121 мм; 4 – 0,161мм;  
5 – 0,181 мм; 6 – без покрытия

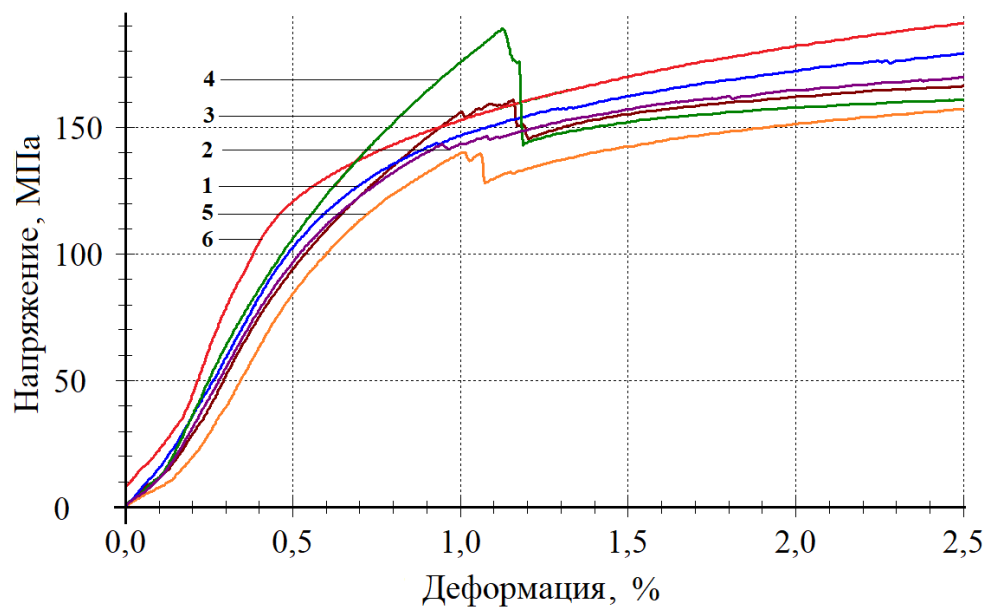


Рисунок 4.17 – Диаграммы напряжение – деформация серии образцов с покрытиями ПГСР-4, полученными при сверхзвуковом режиме напыления.

Толщины покрытий: 1 – 0,041 мм; 2 – 0,091 мм; 3 – 0,131 мм; 4 – 0,161мм;  
5 – 0,171 мм; 6 – без покрытия

На фотографии образца (рисунок 4.18) отчетливо видны две монотрещины, параллельные друг другу, при этом отслоения покрытия от основы не наблюдается.

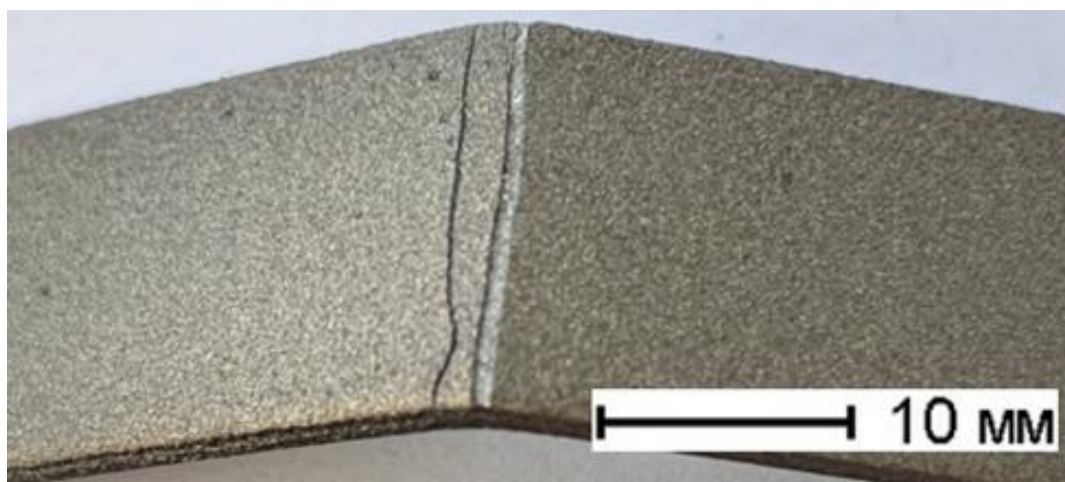


Рисунок 4.18 – Фотография образца с покрытием ПГСР-2 толщиной 0,131 мм, полученным при дозвуковом режиме напыления

Анализ диаграмм напряжение – деформация для всех исследованных образцов показывает, что разрушение образцов происходит путем адгезионно-когезионного растрескивания. При нагружении образцов с толщиной покрытия до 0,140 мм образование трещин происходит за счет когезионного растрескивания покрытия, у более толстых покрытий наблюдались адгезионные отслоения материала после когезионного разрушения покрытия.

На рисунке 4.19 представлены микроструктуры деформаций образцов после испытаний на трехточечный изгиб. Разрушения подложки при трехточечном изгибе не наблюдается, присутствует деформация в покрытии, связанная с тем, что на данную поверхность действовала растягивающая нагрузка. Так как подложка является пластичным материалом, а покрытие хрупким, то при деформации целостность подложки не нарушается, однако покрытие растрескивается и в месте перегиба происходит частичное отслоение покрытия от основы.

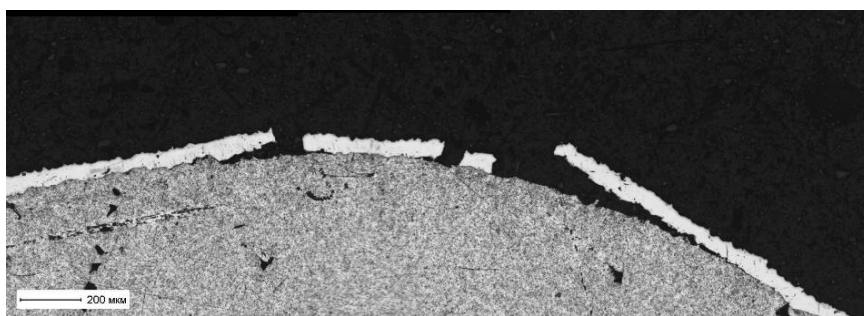
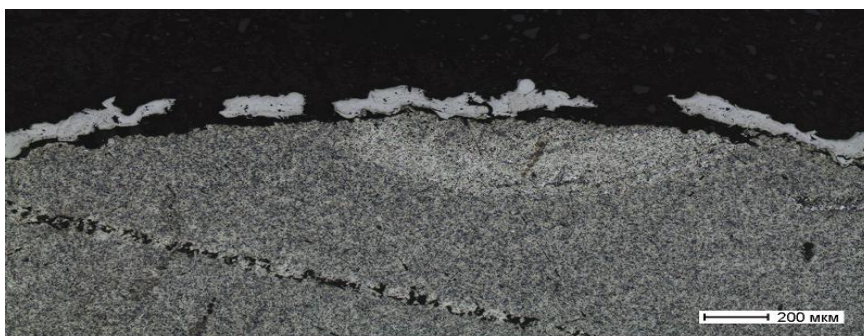
*a**б**в**г*

Рисунок 4.19 – Микроструктуры деформаций образцов с покрытиями после трехточечного изгиба: *a* – ПГСР-2, дозвуковой режим; *б* – ПГСР-2, сверхзвуковой режим; *в* – ПГСР-4, дозвуковой режим; *г* – ПГСР-4, сверхзвуковой режим

Для образцов с покрытием ПГСР-4, нанесенным при дозвуковом режиме напыления, среднее значение напряжения, при котором начинается образование

первой трещины, составляет  $F = 134$  МПа, а для образцов с покрытием ПГСП-4, нанесенным при сверхзвуковом режиме –  $F = 154$  МПа. Увеличение значения напряжения говорит о том, что прочность покрытия у образцов с покрытием ПГСП-4, полученных при сверхзвуковом режиме напыления, выше, чем у образцов, полученных при дозвуковом режиме.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что для изделий, подвергающихся механическим деформациям в результате ударов, перегибов, сжатий, рекомендуемая толщина напыленного слоя составляет 0,13–0,14 мм. Для образцов, которые не подвергаются механическим деформациям либо эти деформации незначительны, можно наносить покрытия из самофлюсующихся порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 с толщинами более 0,14 мм.

#### 4.6. Функциональные свойства

##### 4.6.1. Трибологические свойства

Для триботехнических исследований были подготовлены образцы без покрытий и с покрытиями, нанесенными методами до- и сверхзвукового плазменного напыления (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Образцы для триботехнических испытаний

| № образца | Подложка (основа)      | Покрытие           | Размеры образца, мм |
|-----------|------------------------|--------------------|---------------------|
| 1         | Алюминиевый сплав АК7ч | –                  | 50×15×1,675         |
| 2         | Алюминиевый сплав АК7ч | ПГСП-4, дозвук.    | 50×15×1,815         |
| 3         | Алюминиевый сплав АК7ч | ПГСП-4, сверхзвук. | 50×15×1,818         |
| 4         | Алюминиевый сплав АК7ч | ПГСП-2, дозвук.    | 50×15×1,816         |
| 5         | Алюминиевый сплав АК7ч | ПГСП-2, сверхзвук. | 50×15×1,814         |

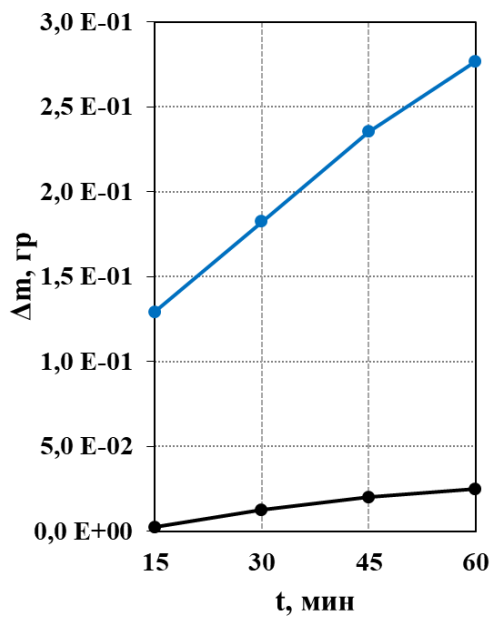
Проведены испытания износостойкости образцов в режиме сухого трения и трения с применением смазки. В качестве смазки использовалась вода, скорость подачи воды – 45 капель (2,25 г) в минуту.

В ходе исследования фиксировалось изменение массы образцов, оценивался коэффициент трения, определялась интенсивность изнашивания образцов путем отношения весового износа к пути трения.

Величину износа определяли взвешиванием на электронных лабораторных весах ATL-220d4-1 (класс точности I специальный) Кроме этого, фиксировалось среднее значение момента сил, приложенных к образцу. Для обеспечения корректности сравнения результатов подобран режим проведения испытания для алюминиевого сплава без покрытия. Приложенная нагрузка и число оборотов в минуту выбраны таким образом, чтобы износ образца был критическим. Испытания образцов с покрытиями проводились в тех же условиях. Полученные данные приведены в таблице 4.8.

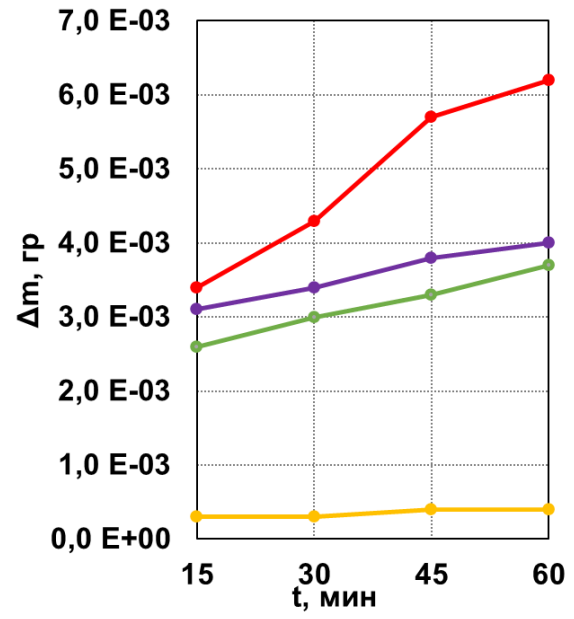
На рисунке 4.20 представлены зависимости убыли массы  $\Delta m$  образцов от времени испытания. Показано (рисунок 4.20а), что износ алюминиевого сплава в режиме сухого трения существенно меньше износа в режиме с добавлением смазки (воды). Это обусловлено следующими обстоятельствами. В режиме сухого трения частицы поверхности «возвращаются» обратно под действием нагрузки и нагревания поверхностей образца и контртела, а при проведении испытаний на износ с использованием смазки происходит «вымывание» частичек образца с поверхности и, как следствие этого, наблюдается более значительный износ.

На рисунках 4.20б и 4.20в представлены зависимости изменения массы от времени истирания для образцов с покрытиями ПГСР-2 и ПГСР-4, нанесенными при дозвуковом и сверхзвуковом режимах напыления, испытанными в режиме сухого трения и трения со смазкой. Как видно, износ образцов с покрытием значительно меньше, чем износ образцов без покрытия.



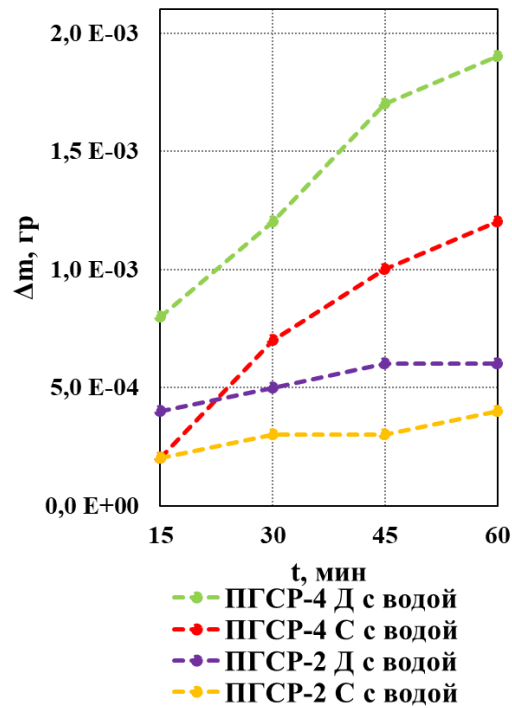
—●— подложка сухое трение  
—●— подложка трение с водой

а



—●— ПГСП-4 Д сухое  
—●— ПГСП-4 С сухое  
—●— ПГСП-2 Д сухое  
—●— ПГСП-2 С сухое

б



—●— ПГСП-4 Д с водой  
—●— ПГСП-4 С с водой  
—●— ПГСП-2 Д с водой  
—●— ПГСП-2 С с водой

в

Рисунок 4.20 – 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

Таблица 4.8 – Результаты исследования трибологических свойств покрытий

| № п/п | Образец, испытание           | Время испытания t, мин | Масса образца m, г | Убыль массы $\Delta m$ , г | Момент силы M, Н·м | Путь S, мм | Коэффициент трения $\mu$ | Интенсивность изнашивания I, кг/м |
|-------|------------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1     | Подложка, сухое трение       | 0                      | 3,2951             |                            |                    | 1897208    |                          | 1,30718E-08                       |
|       |                              | 15                     | 3,2926             | 0,0025                     | 5,7                |            | 0,363                    |                                   |
|       |                              | 30                     | 3,2824             | 0,0127                     | 5,8                |            | 0,369                    |                                   |
|       |                              | 45                     | 3,2751             | 0,02                       | 4,4                |            | 0,280                    |                                   |
|       |                              | 60                     | 3,2703             | 0,0248                     | 4,7                |            | 0,299                    |                                   |
| 2     | Подложка, трение вода        | 0                      | 3,3617             |                            |                    | 1896240    |                          | 1,45973E-07                       |
|       |                              | 15                     | 3,2324             | 0,1293                     | 4,7                |            | 0,299                    |                                   |
|       |                              | 30                     | 3,1793             | 0,1824                     | 5,07               |            | 0,322                    |                                   |
|       |                              | 45                     | 3,1265             | 0,2352                     | 5,21               |            | 0,331                    |                                   |
|       |                              | 60                     | 3,0849             | 0,2768                     | 5,24               |            | 0,334                    |                                   |
| 3     | ПГСР-4 дозвук., сухое трение | 0                      | 4,6702             |                            |                    | 1896325    |                          | 1,95114E-09                       |
|       |                              | 15                     | 4,6676             | 0,0026                     | 5,9                |            | 0,376                    |                                   |
|       |                              | 30                     | 4,6672             | 0,003                      | 4,57               |            | 0,291                    |                                   |
|       |                              | 45                     | 4,6669             | 0,0033                     | 4,36               |            | 0,278                    |                                   |
|       |                              | 60                     | 4,6665             | 0,0037                     | 4,34               |            | 0,276                    |                                   |
| 4     | ПГСР-4 дозвук., трение вода  | 0                      | 4,7056             |                            |                    | 1897974    |                          | 1,00107E-09                       |
|       |                              | 15                     | 4,7048             | 0,0008                     | 6,54               |            | 0,417                    |                                   |

Продолжение таблицы 4.8

|   |                                       |    |        |        |      |         |       |             |
|---|---------------------------------------|----|--------|--------|------|---------|-------|-------------|
|   |                                       | 30 | 4,7044 | 0,0012 | 5,46 |         | 0,348 |             |
|   |                                       | 45 | 4,7039 | 0,0017 | 5,81 |         | 0,370 |             |
|   |                                       | 60 | 4,7037 | 0,0019 | 5,65 |         | 0,360 |             |
| 5 | ПГСР-4<br>сверхзвук., сухое<br>трение | 0  | 4,8812 |        |      | 1897261 |       | 3,26787E-09 |
|   |                                       | 15 | 4,8778 | 0,0034 | 4,6  |         | 0,293 |             |
|   |                                       | 30 | 4,8769 | 0,0043 | 4,6  |         | 0,293 |             |
|   |                                       | 45 | 4,8755 | 0,0057 | 4,6  |         | 0,293 |             |
|   |                                       | 60 | 4,875  | 0,0062 | 5,1  |         | 0,325 |             |
|   | ПГСР-4<br>сверхзвук., трение<br>вода  | 0  | 4,875  |        |      | 1897995 |       | 6,32246E-10 |
|   |                                       | 15 | 4,8748 | 0,0002 | 6,1  |         | 0,389 |             |
|   |                                       | 30 | 4,8743 | 0,0007 | 6,1  |         | 0,389 |             |
|   |                                       | 45 | 4,874  | 0,001  | 6,2  |         | 0,395 |             |
|   |                                       | 60 | 4,8738 | 0,0012 | 6,8  |         | 0,433 |             |
| 7 | ПГСР-2 дозвук.,<br>сухое трение       | 0  | 4,878  |        |      | 1895875 |       | 2,10984E-09 |
|   |                                       | 15 | 4,8749 | 0,0031 | 5,4  |         | 0,344 |             |
|   |                                       | 30 | 4,8746 | 0,0034 | 5,5  |         | 0,350 |             |
|   |                                       | 45 | 4,8742 | 0,0038 | 5,3  |         | 0,338 |             |
|   |                                       | 60 | 4,8740 | 0,0040 | 5,8  |         | 0,369 |             |
| 8 | ПГСР-2 дозвук.,<br>трение вода        | 0  | 4,8740 |        |      | 1895636 |       | 3,16516E-10 |
|   |                                       | 15 | 4,8736 | 0,0004 | 5,1  |         | 0,325 |             |
|   |                                       | 30 | 4,8735 | 0,0005 | 5,3  |         | 0,338 |             |

Окончание таблицы 4.8

|    |                                       |    |        |        |     |         |       |             |
|----|---------------------------------------|----|--------|--------|-----|---------|-------|-------------|
|    |                                       | 45 | 4,8734 | 0,0006 | 5,4 |         | 0,344 |             |
|    |                                       | 60 | 4,8734 | 0,0006 | 5,7 |         | 0,363 |             |
| 9  | ПГСР-2<br>сверхзвук., сухое<br>трение | 0  | 4,8943 |        |     | 1896325 |       | 2,10934E-10 |
|    |                                       | 15 | 4,8940 | 0,0003 | 6,8 |         | 0,433 |             |
|    |                                       | 30 | 4,8940 | 0,0003 | 7,6 |         | 0,484 |             |
|    |                                       | 45 | 4,8939 | 0,0004 | 4,8 |         | 0,306 |             |
|    |                                       | 60 | 4,8939 | 0,0004 | 6,2 |         | 0,395 |             |
| 10 | ПГСР-2<br>сверхзвук., трение<br>вода  | 0  | 4,8939 |        |     | 1896107 |       | 2,10959E-10 |
|    |                                       | 15 | 4,8937 | 0,0002 | 6,7 |         | 0,427 |             |
|    |                                       | 30 | 4,8936 | 0,0003 | 6,4 |         | 0,408 |             |
|    |                                       | 45 | 4,8936 | 0,0003 | 5,3 |         | 0,338 |             |
|    |                                       | 60 | 4,8935 | 0,0004 | 6   |         | 0,382 |             |

#### 4.6.2. Шероховатость

Испытания шероховатости проводились при следующих условиях: базовая длина – 2,5 мм, скорость перемещения датчика при измерении  $V_t = 1$  мм/с. Полученные данные представлены в таблице 4.9. 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 этих параметров наблюдаются для покрытия ПГСП-4, нанесенного при дозвуковом режиме напыления. Покрытия ПГСП-2 и ПГСП-4, нанесенные при сверхзвуковом режиме плазменного напыления, имеют примерно одинаковые значения  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_{max}$ .

Таблица 4.9 – Результаты измерения шероховатости образцов, полученных методом плазменного напыления

| 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 проведения испытаний на износостойкость шероховатость образцов существенно изменяется (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Результаты измерения шероховатости образцов после испытаний на износостойкость

| Образец                      | $R_a$ , мкм                                                   | $R_z$ , мкм | $R_{max}$ , мкм |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|
| Подложка, сухое трение       | 3,3                                                           | 11,8        | 23,6            |
| Подложка, с водой            | Провести измерение невозможно, так как слишком глубокий износ |             |                 |
| ПГСП-2 дозвук., сухое трение | 4,0                                                           | 18,6        | 29,5            |
| ПГСП-2 дозвук., с водой      | 0,8                                                           | 5,4         | 12,34           |

Окончание таблицы 4.10

| Образец                         | $R_a$ , мкм | $R_z$ , мкм | $R_{max}$ , мкм |
|---------------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| ПГСП-2 сверхзвук., сухое трение | 0,7         | 4,0         | 8,9             |
| ПГСП-2 сверхзвук., с водой      | 1,1         | 5,7         | 12,7            |
| ПГСП-4 дозвук., сухое трение    | 1,5         | 8,7         | 25,0            |
| ПГСП-4 дозвук., с водой         | 2,3         | 10,7        | 19,0            |
| ПГСП-4 сверхзвук., сухое трение | 0,7         | 3,7         | 7,1             |
| ПГСП-4 сверхзвук., с водой      | 4,5         | 19,9        | 29,2            |

После испытаний образцов в режиме трения со смазкой провести измерение шероховатости поверхности подложки не удалось из-за слишком глубокого износа, обусловленного, как указывалось выше, «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  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_{max}$  характеризуются покрытия ПГСП-2, нанесенные в дозвуковом режиме напыления.

#### 4.6.3. Коррозионная стойкость

Исследование коррозионной стойкости образцов проводилось в камере соляного тумана EVCLIM-KCT по стандартному испытательному тесту ASTM B117, в соответствии с ГОСТ 34388–2023 (ISO 9227:2012) [145], который заключается в непрерывном распылении соляного тумана в течение заданного времени. Для создания солевого тумана использован 5%-й водный раствор NaCl, с pH 6,5–7,2. Температура испытаний – 35 °С, продолжительность – до появления видимых разрушений покрытий. В качестве исследуемого слоя выступало покрытие, нанесенное методом плазменного напыления на пластинки из сплава АК7ч размером 60×14×2 мм. Подложки были подготовлены к напылению методом абразивоструйной очистки с предварительным обезжириванием растворителем по ГОСТ 8832–76. Описание и нумерация исследованных образцов представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Толщина покрытий исследуемых образцов

| № образца | Исследуемый образец | Толщина покрытия, мкм |
|-----------|---------------------|-----------------------|
| 1-1-3     | Подложка (АК7ч)     | 0                     |
| 2-1       | ПГСП-2, дозвук.     | 104                   |
| 2-2       |                     | 115                   |
| 2-3       |                     | 126                   |
| 3-1       | ПГСП-2, сверхзвук.  | 102                   |
| 3-2       |                     | 114                   |
| 3-3       |                     | 125                   |
| 4-1       | ПГСП-4, дозвук.     | 102                   |
| 4-2       |                     | 113                   |
| 4-3       |                     | 125                   |
| 5-1       | ПГСП-4, сверхзвук.  | 103                   |
| 5-2       |                     | 115                   |
| 5-3       |                     | 126                   |

Защитные свойства покрытий определялись по их стойкости к воздействию соляного тумана. В качестве критерия качества покрытий принят внешний вид покрытий, который в ходе испытаний периодически контролировался и оценивался в соответствии с ГОСТ 9.311–2021 [146].

Вид и площадь коррозионного поражения образцов оценивались визуально, невооруженным глазом с расстояния 25 см от поверхности образца, а также с помощью лупы. После испытаний в камере соляного тумана образцы выдерживались на воздухе в течение 30 минут, промывались проточной водой для удаления остатков раствора соли, затем погружались в емкость с водой комнатной температуры на 30 минут и высушивались, после чего проводилась оценка защитных и декоративных свойств покрытий. Результаты испытаний защитных свойств покрытий приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Защитные свойства покрытий

| № обр. | Вид оценки                      | 24 часа   | 120 часов | 264 часа  | 360 часов | 480 часов |
|--------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1-1-3  | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | Отсутств. | Отсутств. | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 2-1    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | Отсутств. | A         | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 2-2    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A         | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 2-3    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A         | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 3-1    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A         | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 3-2    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A         | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 3-3    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A         | A         | A         |

Продолжение таблицы 4.12

| № обр. | Вид оценки                      | 24 часа   | 120 часов | 264 часа | 360 часов | 480 часов |
|--------|---------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         |
| 4-1    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A        | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         |
| 4-2    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A        | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         |
| 4-3    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A        | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         |
| 5-1    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A        | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         |
| 5-2    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A        | A         | A         |
|        | Площадь коррозионного поражения | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         |
| 5-3    | Вид коррозионного поражения     | Отсутств. | A         | A        | A         | A         |

Окончание таблицы 4.12

| № обр. | Вид оценки                      | 24 часа | 120 часов | 264 часа | 360 часов | 480 часов |
|--------|---------------------------------|---------|-----------|----------|-----------|-----------|
|        | Площадь коррозионного поражения | 0       | 0         | 0        | 0         | 0         |

Защитные свойства покрытий (Аз) определялись по результатам оценки коррозионных поражений основного металла. Декоративные свойства покрытий (Ад) оценивались по результатам коррозионных поражений покрытия и основного металла. При оценке образцов по таблице 1, представленной в [146], выявлено, что коррозия основного металла отсутствует, наблюдается небольшое потускнение, которое легко удаляется ветошью. Исследование поверхности образцов покрытий свидетельствует о том, что после 480 часов испытаний на покрытиях не обнаружено разрушений. Защитные свойства образцов с покрытиями оценены баллом Аз10, декоративные свойства Ад10.

Проведенные исследования показывают, что покрытия ПГСП-2 и ПГСП-4, нанесенные методами до- и сверхзвукового плазменного напыления на подложки из сплава АК7ч, обладают высокой стойкостью к коррозии и, следовательно, могут быть использованы при работе в агрессивных средах.

#### Выводы по главе 4

1. Показано, 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 как при дозвуковом, так и при сверхзвуковом режимах плазменного напыления, являются микроструктурно однородными по всей толщине нанесенного слоя. Порошковые покрытия ПГСП-4 имеют более высокую пористость по сравнению с покрытиями из ПГСП-2.

2. Согласно результатам РФА, в порошковых материалах ПГСП-2 и ПГСП-4 присутствуют соединения  $\text{Cr}_{9,5}\text{Ni}_{12,5}\text{Si}_7$ ,  $\text{Ni}_7\text{B}_3$ ,  $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{CrB}$ .

При до- и сверхзвуковом режимах плазменного напыления формируются покрытия со сложным фазовым составом, включающим карбиды, силициды, бориды и некоторые тройные соединения, которые существенно влияют на физико-химические и механические свойства порошковых покрытий.

3. Результаты СЭМ показывают, что поверхности всех покрытий являются однородными с небольшим количеством пор, что согласуется с результатами металлографических исследований. Определен качественный и количественный химический состав исследуемых образцов. Полученные результаты хорошо согласуются с данными завода-производителя АО «ПОЛЕМА».

4. Методом синхронного термического анализа проведено исследование нагрева и кристаллизации порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4, определены температуры солидус, ликвидус и фазовых превращений.

5. Установлено, что образцы с покрытиями на основе ПГСР-2 и ПГСР-4, полученными как при дозвуковом, так и при сверхзвуковом режимах напыления, значительно 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. Значения микротвердости покрытий ПГСР-2 и ПГСР-4 в среднем в 15 раз выше, чем для основы.

6. Результаты испытаний на трехточечный изгиб показывают, что разрушение образцов происходит путем адгезионно-когезионного растрескивания. Разрушение образца происходит в напыленном слое. Для изделий, подвергающихся механическим деформациям в результате ударов, перегибов, сжатий, рекомендуемая толщина напыленного слоя составляет 0,13–0,14 мм. Для образцов, которые не подвергаются механическим деформациям либо эти деформации незначительны, можно наносить покрытия из самофлюсующихся порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 с толщинами более 0,14 мм.

7. Выявлено, что при испытаниях в режиме сухого трения износ как алюминиевого сплава АК7ч, так и образцов с покрытиями ПГСР-2 и ПГСР-4, нанесенными при дозвуковом и сверхзвуковом режимах напыления, значительно

ниже износа в режиме с добавлением смазки (воды).

8. Шероховатость покрытий, нанесенных при дозвуковом режиме напыления выше, чем для покрытий, полученных методом сверхзвукового плазменного напыления. После проведения испытаний на износостойкость шероховатость подложки существенно увеличивается, а шероховатость всех образцов с покрытиями уменьшается за счет шлифования поверхности.

9. 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.

Таким образом, исследование многокомпонентных самофлюсующихся порошковых ПГСР-2 и ПГСР-4 показывает, что применение данных материалов позволит повысить износостойкость деталей различного оборудования, в том числе и пожарного, способствуя продлению срока его службы и применению при высоких температурах.

## **Глава 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

### **5.1. Анализ причин износа противопожарного оборудования и систем противопожарного водоснабжения**

Основным рабочим элементом пожарных автоцистерн и мотопомп, используемых при тушении пожаров, является насосное оборудование. С развитием технологий производства насосы модернизируются и с каждым годом области их применения расширяются [158]. В первую очередь, пожарные насосы обеспечивают подачу огнетушащих составов непосредственно на место пожара, а также находят свое применение в работе автолестниц, коленчатых подъемников, в системах внешнего и внутреннего противопожарного водоснабжения, а также в вакуумных системах. Для обеспечения эффективной работы насосов крайне важно осуществлять их своевременное и качественное техническое обслуживание в соответствии с установленными правилами и в установленные сроки [159, 160].

Автор работы [159] разделяет насосы на три группы: по подаче ОВ (центробежные, струйные, шестерные), по вакуумным системам (струйные, шибберные, поршневые, водокольцевые), по гидравлическим системам (шестеренные, аксиально-поршневые).

В соответствии с требованиями ГОСТ ISO 17769-1–2014 [161] и ГОСТ Р 58790–2019 [162], насосы подразделяются на два основных типа: динамические и объемные. Различие между этими типами заключается в принципах, лежащих в основе перемещения жидкости внутри насоса. В динамических насосах перемещение рабочей среды осуществляется под воздействием массовых сил и сил трения жидкости. В объемных насосах перемещение происходит под воздействием поверхностного давления при изменении объема пространства, занимаемого жидкостью. Динамические насосы, в зависимости от принципа силового воздействия, делятся на две категории: лопастные и насосы трения.

Лопастные насосы представляют собой устройства, в которых энергия, передаваемая при обтекании лопастей рабочего колеса, приводит к перемещению жидкости. Эти насосы подразделяются на три основные группы: центробежные, диагональные и осевые. Диагональные (радиально-осевые) насосы представляют собой промежуточную форму между центробежными и осевыми насосами: вход воды у них осевой, а выход – по диагонали между осевым и радиальным направлениями.

Несмотря на разнообразие видов пожарных насосов с механическим приводом, их работа характеризуется двумя основными процессами – нагнетанием и всасыванием перекачиваемой жидкости. Кроме этого, насосы характеризуются такими величинами, как высота всасывания, высота нагнетания, напор, подача, мощность и коэффициент полезного действия [159, 163].

Центробежные насосы представляют собой ключевые устройства, предназначенные для обеспечения подачи огнетушащих веществ непосредственно к очагу возгорания. Эти агрегаты находят свое применение в различных системах пожаротушения, включая пожарные автомобили, мотопомпы, а также стационарные установки. Установка центробежных насосов на автомобилях пожаротушения обусловлена наличием следующих важных достоинств: небольшие габаритные размеры, простота конструкции и надежность эксплуатации, равномерная подача средств огнетушения, высокий КПД, способность работать без чрезмерного повышения давления при перекрытии подачи воды при закрытии пожарного ствола, при засорении или при перегибе рукавов. Однако необходимо отметить и недостатки: невозможность самостоятельно забирать воду из водоисточников (поэтому дополнительно монтируется установка вакуумных систем), уменьшение создаваемого насосом напора при увеличении мощности подачи огнетушащих средств, вследствие кавитации наблюдается снижение напора, подачи и КПД, кроме этого, кавитация приводит к разрушению лопастей рабочего колеса.

В зависимости от конструктивных особенностей, центробежные насосы подразделяются на три основных типа: насосы нормального давления,

обеспечивающие подачу огнетушащих веществ при давлении на выходе до 2 МПа; насосы высокого давления, давление на выходе которых варьируется от 2 до 5 МПа; комбинированные насосы, представляющие собой комбинацию последовательно соединенных насосов нормального и высокого давления, имеющих общий привод. По числу рабочих колес насосы подразделяют на одноступенчатые и многоступенчатые. Также насосы различаются расположением вала (горизонтальные, вертикальные, с наклонным расположением вала). По конструкции рабочего колеса бывают с закрытым или открытым рабочим колесом. По расположению в автомобиле – с передним, средним и задним расположением.

Рабочее колесо 2 (рисунок 5.1), соединенное с валом 1, является основой центробежного насоса. Внутри рабочего колеса находятся изогнутые в сторону вращения лопасти. Корпус насоса 5 выполнен в виде спиральной камеры 6, переходящей в напорный патрубок 4.

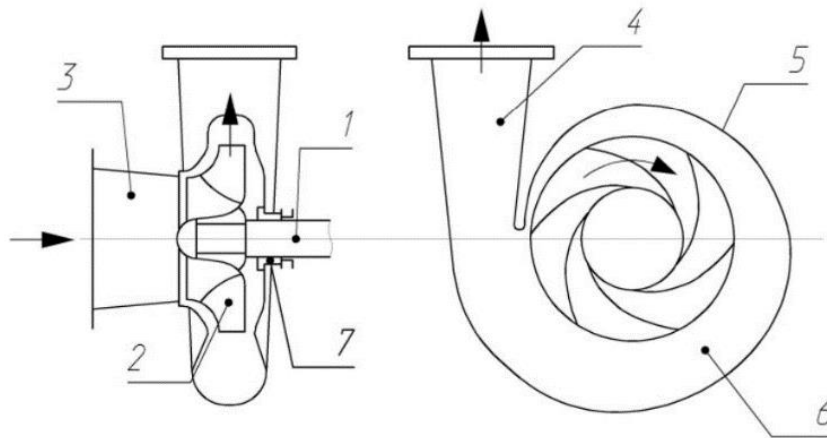


Рисунок 5.1 – Схема центробежного насоса: 1 – вал, 2 – рабочее колесо; 3 – всасывающий патрубок; 4 – напорный патрубок; 5 – корпус; 6 – спиральная камера; 7 – уплотнение вала рабочего колеса [158]

В центробежном насосе жидкость, поступающая через всасывающий патрубок 3, направляется в каналы, которые образуются лопастями рабочего колеса 2, расположенными между основным и покрывным дисками. В процессе работы

насоса жидкость, находящаяся в каналах, вращается вместе с рабочим колесом. Под воздействием центробежных сил она выбрасывается через спиральный отвод в напорный патрубок 4. При этом происходит увеличение давления и снижение скорости жидкости. Вокруг ступицы рабочего колеса создается область пониженного давления, что способствует постоянному притоку жидкости к колесу от всасывающего патрубка 3 [164].

В Свердловской области 80 % автомобилей пожаротушения, состоящих на балансе, оборудованы центробежными пожарными насосами: ПН-40, ПН-40УВ, ПН-40УА, НЦПН-40/100, НЦПК-40/100-4/100-В1Т, НЦПП-150/100, НЦПН-70/100, НЦПН-100/100н, НЦП-40/100-р-р и прочие.

Насосы серии ПН предназначены для эксплуатации на автоцистернах и автонасосах и обозначаются ПН-40УВ. В данном обозначении «ПН» указывает на то, что это пожарный насос, «40» обозначает максимальную подачу насоса (40 литров в секунду), «У» обозначает «унифицированный», а «В» указывает на особенность данной серии. Пожарные насосы ПН-60 и ПН-110 геометрически подобны серии насосов ПН-40УВ. Чаще всего используются на пожарных аэродромных автомобилях и пожарных насосных станциях. Все эти насосы имеют одинаковую номенклатуру основных деталей, идентичны по конструкции, но отличаются габаритами и массой.

**Пожарный центробежный насос ПН-40УВ** (рисунок 5.2) представляет собой сложное устройство, состоящее из следующих основных частей: корпуса насоса 1, двух напорных патрубков 2, двух напорных задвижек 3, пеносмесителя 4 и задвижки коллектора 6, установленных на коллекторе 5. Продольный разрез насоса представлен на рисунке 5.3. В корпусе насоса 1, закрытом крышкой 2, на подшипниках 8 и 16 установлен вал 9 насоса. На конической части вала расположено рабочее колесо 5, которое сопряжено с валом с помощью шпонки и закреплено гайкой со шплинтом.

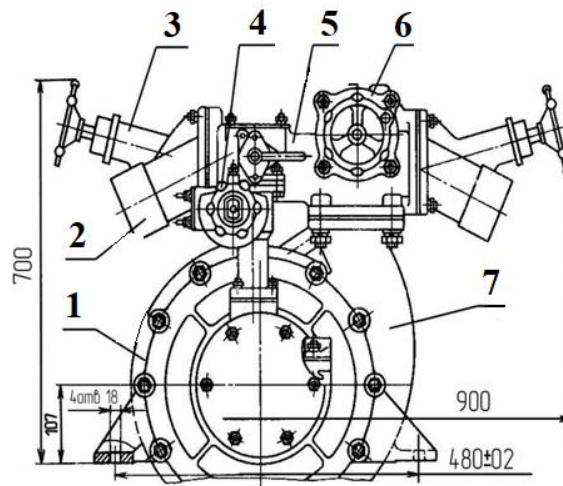


Рисунок 5.2 – Пожарный насос ПН-40УВ:

1 – насос; 2 – напорный патрубок; 3 – напорная задвижка; 4 – пеносмеситель;  
5 – коллектор; 6 – задвижка коллектора; 7 – отвод насоса [155]

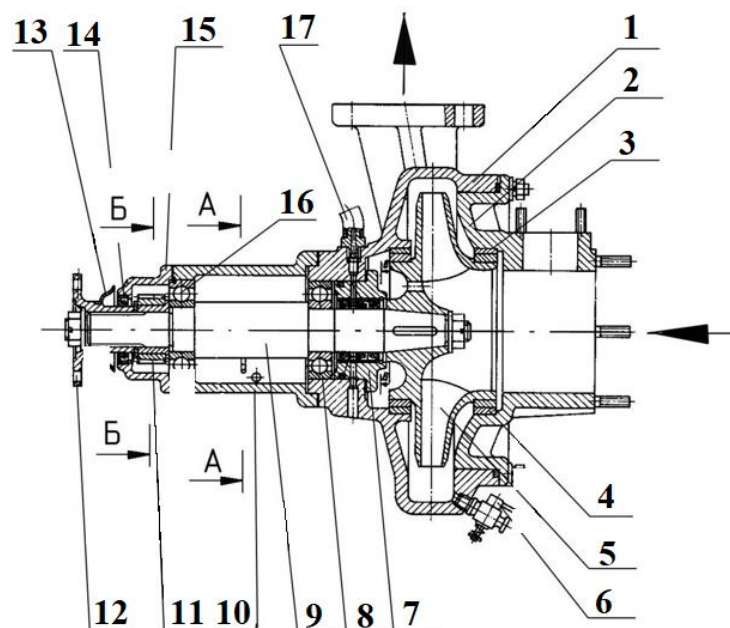


Рисунок 5.3 – Продольный разрез насоса ПН-40УВ:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 и 4 – уплотнительные кольца; 5 – рабочее колесо;  
6 – сливной кран; 7 – уплотнительный стакан с манжетами; 8 – подшипник;  
9 – вал насоса; 10 – масляная ванна; 11 – червячная шестерня привода тахометра;  
12 – муфта-фланец; 13 – предохранительный клапан; 14 – манжета; 15 – корпус  
привода тахометра; 16 – подшипник; 17 – шланг [155]

На насосах ПН-40У и ПН-40УА рабочее колесо установлено на цилиндрическом шипе вала, закреплено в осевом направлении гайкой и стопорится стопорной шайбой. От проворачивания колесо крепится одной и двумя шпонками, соответственно, на ПН-40У и ПН-40УА. Корпус насоса 1 и масляная ванна 10 выполнены в виде одной детали. Все корпусные детали насосов, а также рабочие колеса изготовлены из алюминиевого сплава АЛ9 (АК7ч). Валы насосов изготовлены из стали 45Х и термически обработаны.

**Насос нормального давления НЦПН-40/100** является усовершенствованной версией насоса ПН-40. Конструкция и размеры насоса НЦПН-40/100 полностью идентичны характеристикам насоса ПН-40УВ. Это позволяет использовать насос НЦПН-40/100 в автоцистернах, в которых насос ПН-40УВ вышел из строя без внесения изменений в корпус автоцистерны.

Насос обеспечивает напор 100 м при подаче воды до 50 л/с. КПД на 20 % выше, чем у насоса ПН-40. Улучшенные характеристики достигнуты за счет особого профилирования рабочего колеса и отводов. В насосе предусмотрен дополнительный форсированный режим. В частности, обеспечение напора 100 м на частоте вращения 2800 об/мин при подачах до 60 л/с.

Насосная установка на основе НЦПН-40/100 состоит из насоса, напорных вентилях, пеносмесителя, автоматической системы дозирования, вакуумной системы, приборов управления. Давление на входе насоса составляет  $6 \cdot 10^5$  Па, а на выходе  $15 \cdot 10^5$  Па.

В ходе эксплуатации насосов детали проточной части подвергаются интенсивному износу, который может привести к поломкам и последующему серьезному ремонту. Износ деталей насосного оборудования происходит в результате воздействия твердых частиц, содержащихся в перекачиваемой жидкости, на поверхность металла. В результате этого процесса происходит отделение мельчайших частиц металла в виде стружки или иных фрагментов [164]. Согласно [165], к износам относятся механическое, коррозионно-механическое изнашивание, а также изнашивание при действии электрического тока.

Виды механического изнашивания: абразивное, гидроабразивное (газоабразивное), гидроэрозионное (газоэрозионное), кавитационное, усталостное изнашивание, а также механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, изнашивание при заедании и фреттинге. К коррозионно-механическому изнашиванию относятся: окислительное, коррозионно-механическое изнашивание, изнашивание при фреттинг-коррозии [165].

Кавитация представляет собой процесс, в результате которого с поверхностей деталей пожарных насосов происходит отделение твердых фрагментов металла, что приводит к образованию множества мелких отверстий, через которые загрязнения проникают в объем детали. Усилению кавитационных процессов и ускорению износа поверхности способствуют выбитые абразивные частицы, а также посторонние элементы (камешки, песчинки), попадающие в насос при его эксплуатации. Глубина износа может достигать от 10 до 40 мм в год, что требует частого проведения ремонтных работ и замены не только изношенных деталей, но и сопряженных с ними элементов, таких как подшипники, коленчатые валы и другие [164].

На рисунке 5.4 представлены фотографии лопастей и втулки рабочего колеса центробежного насоса с типичными повреждениями.



Рисунок 5.4 – Фотографии деталей рабочего колеса насоса с повреждениями

В процессе эксплуатации крыльчатки пожарного насоса наиболее интенсивному износу и разрушению подвергаются периферийные кромки в зазоре между лопастью и камерой рабочего колеса, а также поверхность пера лопасти,

преимущественно с тыльной стороны. Во втулке наиболее интенсивно изнашивается поверхность в области соприкосновения с торцевой частью лопасти, особенно в местах соединения с входными и выходными кромками. Кроме этого, при длительной работе насосов в режимах повышенной вибрации, при нештатной работе агрегата, либо из-за использования при изготовлении деталей материалов низкого качества, в углах пересечения периферийной и входной кромок или в местах перехода от фланца к перу могут образовываться трещины (рисунок 5.5). Появление трещин может привести к поломке или отрыву лопасти.



Рисунок 5.5 – Трещины металла

Основным износом камеры рабочего колеса центробежного насоса является кавитационный износ, локализованный в области оси вращения лопастей. На рабочей поверхности камеры можно наблюдать такие признаки износа, как пористость, глубокие раковины и язвы. Появление даже небольших неровностей или язвин на рабочей поверхности может привести к быстрому разрушению всей детали [164].

В лопастном насосе явление кавитации обычно возникает на лопастях рабочего колеса, особенно в области передней кромки. В этой зоне давление значительно ниже, чем во входном патрубке насоса, это обусловлено увеличением скорости потока при взаимодействии с лопастью и гидравлическими потерями в подводящем трубопроводе [158]. При достаточно больших значениях высоты всасывания и сопротивления подводящего трубопровода либо при малом давлении в приемной емкости, давление на входе в рабочее колесо снижается, что приводит

к появлению кавитации. Для снижения вероятности возникновения кавитации в центробежных пожарных насосах выбирают водозаборный источник с минимальной высотой всасывания и минимальной температурой воды. Стараются обеспечить герметичность всасывающей линии и насоса, а также снизить частоту вращения вала насоса [158].

Для снижения влияния кавитационных явлений на поверхности деталей можно применять следующие способы: соблюдение допустимой высоты всасывания насосов либо ее уменьшение; изменение конструкции входных патрубков и формы лопастей рабочего колеса; использование более устойчивых к износу материалов для изготовления насосов; упрочнение поверхностного слоя деталей, подвергающихся износу с помощью метода плазменного напыления с использованием материалов, поверхностные свойства которых более устойчивы к износу, чем свойства основного материала.

## **5.2. Модернизация действующего пожарного насоса НЦПН-40/100**

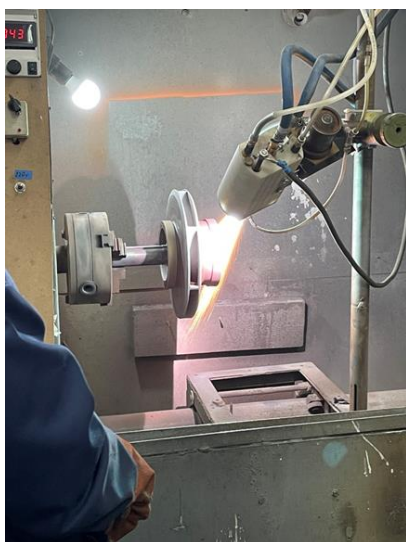
С целью увеличения срока службы одной из деталей действующего пожарного насоса НЦПН-40 – рабочего колеса – проведена его модернизация, которая заключается в нанесении износостойкого покрытия методом плазменного напыления.

Для нанесения порошковых покрытий использовалась многофункциональная плазменная установка МАК-100 (МПУ МАК-100) [129–133]. В качестве плазмообразующего газа использованы сжатый воздух и смесь «воздух + (8–10) объемных % пропана», а в качестве материала покрытий – самофлюсующиеся порошки ПГСР-2 и ПГСР-4. Напыление покрытий на рабочие детали проводилось методами до- и сверхзвукового плазменного напыления при оптимальных технологических режимах, отработанных на лабораторных образцах с учетом результатов моделирования и представленных в главе 3.

Проведена модернизация (восстановление и упрочнение) поверхностей крыльчатки рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100. Получены акты

внедрения и промышленных испытаний (Приложения 1–3).

На рисунке 5.6*а* представлен процесс модифицирования рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100 с помощью МУП МАК-100. На рисунке 5.6*б* представлен вид восстановленного колеса, а на рисунке 5.6*в* – сравнение изношенного и восстановленного колеса.



*а*



*б*



*в*

Рисунок 5.6 – Модифицирование рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100 с помощью МУП МАК-100: *а* – процесс напыления; *б* – восстановленная деталь; *в* – сравнение изношенного и восстановленного колеса

Работы по сборке-разборке насосов проведены силами сотрудников пожарной части. Для оценки эффективности данной работы необходимо рассчитать единовременные затраты на проведение модернизации и сопоставить их со снижением годовых текущих затрат (годовой экономией).

### 5.3. Расчет экономической эффективности

#### 5.3.1. Методика расчета материальных затрат при газотермическом напылении

Стоимость процесса плазменного напыления складывается из затрат на предварительную подготовку поверхности, процесс напыления, а также на иные вспомогательные операции. Основные временные и материальные затраты составляют затраты на напыление ( $C_H$ ) и струйно-абразивную обработку ( $C_{aco}$ ) (5.1):

$$C = C_H + C_{aco}. \quad (5.1)$$

Стоимость напыления складывается из затрат на напыляемый материал ( $C_M$ ), воду для охлаждения установки ( $C_B$ ), плазмообразующий газ ( $C_G$ ), электроэнергию ( $C_Э$ ) (5.2):

$$C_H = C_M + C_B + C_G + C_Э. \quad (5.2)$$

В стоимость струйно-абразивной обработки входят затраты на электрокорунд ( $C_{ЭК}$ ) и сжатый воздух ( $C_{возд}$ ) (5.3):

$$C_{aco} = C_{ЭК} + C_{возд}. \quad (5.3)$$

Стоимость напыляемого материала рассчитывается следующим образом (5.4):

$$C_M = \frac{W \rho_0 \lambda_M}{k}, \quad (5.4)$$

где  $W$  – объем напыляемого материала ( $m^3$ );  $\rho_0$  – плотности напыляемого материала ( $кг/м^3$ );  $\lambda_M$  – удельная стоимость напыляемого материала ( $руб/кг$ );  $k$  – коэффициент использования материала.

Введем обозначение  $\rho = \rho_0/k$  – «кажущаяся» плотность покрытия, тогда выражение для стоимости напыляемого материала примет вид (5.5):

$$C_M = W \rho \lambda_M. \quad (5.5)$$

Стоимость плазмообразующего газа рассчитаем по формуле (5.6):

$$C_G = \tau_H \cdot V_G \cdot \lambda_G, \quad (5.6)$$

где  $\tau_H$  – время напыления (с);  $V_G$  – расход газов ( $м^3/с$ );  $\lambda_G$  – удельная стоимость газов ( $руб/м^3$ ).

Время напыления  $\tau_n = \frac{W\rho}{G_m}$ , где  $G_m$  – расход напыляемого материала (кг/с), следовательно:

$$C_\Gamma = \frac{W\rho}{G_m} \cdot V_\Gamma \cdot \lambda_\Gamma. \quad (5.7)$$

Стоимость потребления электроэнергии рассчитывается по формуле (5.8):

$$C_\varepsilon = N \cdot \tau_n \cdot \lambda_{\varepsilon\lambda} = N \cdot \frac{W\rho}{G_m} \cdot \lambda_{\varepsilon\lambda}, \quad (5.8)$$

где  $N$  – электрическая мощность установки (кВт);  $\lambda_{\varepsilon\lambda}$  – удельная стоимость электроэнергии (руб/кВт·ч).

Стоимость затрат на водяное охлаждение:

$$C_B = \frac{W\rho}{G_m} \cdot R_B \lambda_B, \quad (5.9)$$

где  $R_B$  – расход воды ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );  $\lambda_B$  – удельная стоимость воды (руб/ $\text{м}^3$ ).

По аналогии затраты на струйно-абразивную обработку единицы площади напыляемой поверхности рассчитываются по формуле (5.10):

$$C_{\text{асо}} = (C_{\text{эк}} + C_{\text{возд}}) \cdot S = \left( R_{\text{эк}} \lambda_{\text{эк}} + \frac{R_{\text{возд}}}{G_{\text{асо}}} \lambda_{\text{возд}} \right) \cdot S, \quad (5.10)$$

где  $R_{\text{эк}}$  – удельный расход электрокорунда ( $\text{кг}/\text{м}^2$ );  $\lambda_{\text{эк}}$  – удельная стоимость электрокорунда (руб/кг);  $R_{\text{возд}}$  – расход воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $G_{\text{асо}}$  – производительность струйно-абразивной обработки ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $S$  – площадь обрабатываемой поверхности.

Подставим полученные формулы (5.5, 5.7–5.10) в (5.1):

$$C = W\rho \lambda_m + \frac{W\rho}{G_m} \cdot R_B \lambda_B + \frac{W\rho}{G_m} \cdot V_\Gamma \cdot \lambda_\Gamma + N \cdot \frac{W\rho}{G_m} \cdot \lambda_{\varepsilon\lambda} + \left( R_{\text{эк}} \lambda_{\text{эк}} + \frac{R_{\text{возд}}}{G_{\text{асо}}} \lambda_{\text{возд}} \right) \cdot S.$$

Приведем полученное выражение к более удобному виду (5.11):

$$C = W\rho \left( \lambda_m + \frac{R_B \lambda_B}{G_m} + \frac{V_\Gamma \lambda_\Gamma}{G_m} + \frac{N \lambda_{\varepsilon\lambda}}{G_m} \right) + S \left( R_{\text{эк}} \lambda_{\text{эк}} + \frac{R_{\text{возд}}}{G_{\text{асо}}} \lambda_{\text{возд}} \right). \quad (5.11)$$

Данная методика, разработанная в 80-х годах XX в., является актуальной по сей день, несмотря на то, что цены на энергоресурсы и материалы сильно отличаются от цен прошлого столетия [162].

### 5.3.2. Расчет сумм единовременных затрат на нанесение защитного покрытия на рабочее колесо

Для расчета стоимости плазменного напыления изнашиваемых поверхностей рабочего колеса пожарного насоса будем использовать формулу (5.11). Для начала проведем расчет стоимости напыления на  $1 \text{ см}^2$  поверхности покрытия толщиной 1 мм. В таблице 5.1 указаны исходные данные для расчета.

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета стоимости напыления

| №  | Наименование показателя                         | Обозначение      | Ед. изм.                      | Значение             |
|----|-------------------------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------------|
| 1  | Объем напыляемого материала                     | $W$              | $\text{м}^3$                  | $10^{-8}$            |
| 2  | Кажущаяся плотность покрытия                    | $\rho$           | $\text{кг/м}^3$               | 12000                |
| 3  | Плотность напыляемого материала                 | $\rho_0$         | $\text{кг/м}^3$               | 6000                 |
| 4  | Коэффициент использования материала             | $k$              | —                             | 0,5                  |
| 5  | Расход напыляемого материала                    | $GM$             | $\text{кг/ч}$                 | 5                    |
| 6  | Удельная стоимость напыляемого материала        | $\lambda_m$      | $\text{руб/кг}$               | 15000                |
| 7  | Расход воды                                     | $R_v$            | $\text{м}^3/\text{ч}$         | 0,5                  |
| 8  | Удельная стоимость воды                         | $\lambda_v$      | $\text{руб/м}^3$              | 17                   |
| 9  | Электрическая мощность установки                | $N$              | $\text{кВт}$                  | 100                  |
| 10 | Удельная стоимость электроэнергии               | $\lambda_{эл}$   | $\text{руб/кВт}\cdot\text{ч}$ | 8                    |
| 11 | Удельный расход электрокорунда                  | $R_{эк}$         | $R_{эк}$                      | 5                    |
| 12 | Удельная стоимость электрокорунда               | $\lambda_{эк}$   | $\text{руб/кг}$               | 200                  |
| 13 | Расход воздуха                                  | $R_{возд}$       | $\text{м}^3/\text{ч}$         | 120                  |
| 14 | Производительность струйно-абразивной обработки | $G_{асо}$        | $\text{м}^2/\text{с}$         | 10                   |
| 15 | Удельная стоимость воздуха                      | $\lambda_{возд}$ | $\text{руб/м}^3$              | 0                    |
| 16 | Площадь обрабатываемой поверхности              | $S$              | $\text{м}^2$                  | $2,5 \times 10^{-4}$ |

Цена плазменного напыления с учетом затрат на общехозяйственные расходы, амортизацию, аренду помещения и прочие расходы представлена в таблице 5.2. Для проведения работ по напылению лопаток рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100 толщина покрытия составила 0,15 мм, площадь покрытия  $250 \text{ см}^2$ . Расчет цены плазменного напыления на рабочее колесо представлен в таблице 5.3.

Таблица 5.2 – Цена плазменного напыления покрытия толщиной 0,1 мм на площадь поверхности 1 см<sup>2</sup>

| № п/п | Наименование                         |                             | Кол-во | Цена, руб. | Стоимость, руб.                                         | Общая стоимость, руб. | % / мес. | Амортиз./мес. | Амортиз./ч | Руб./см <sup>2</sup> |
|-------|--------------------------------------|-----------------------------|--------|------------|---------------------------------------------------------|-----------------------|----------|---------------|------------|----------------------|
| 1.    | Себестоимость материалов             |                             |        |            |                                                         |                       |          |               |            | 1,92                 |
| 2.    | Стоимость плазменного оборудования   |                             |        |            | 15 000 000                                              |                       |          |               |            |                      |
|       |                                      |                             |        |            |                                                         | 15 580 000            | 2,78     | 432777,7778   | 2458,96    | 0,25                 |
| 3.    | Стоимость оборудования всего участка |                             |        |            | 580 000                                                 |                       |          |               |            |                      |
|       | Вращатель                            | 80 000                      |        |            |                                                         |                       |          |               |            |                      |
|       | Компрессор                           | 150 000                     |        |            |                                                         |                       |          |               |            |                      |
|       | Чиллер                               | 350 000                     |        |            |                                                         |                       |          |               |            |                      |
| 4.    | Аренда помещения, м <sup>2</sup>     |                             | 100    | 500        | 50000                                                   |                       |          |               | 284,09     | 0,03                 |
| 5.    | Зарплата                             |                             |        |            |                                                         |                       |          |               |            |                      |
|       | Мастер, оператор 2, грузчик          |                             | 4      | 50 000     | 200000                                                  | 286000                |          |               | 1625       | 0,16                 |
| 6.    | Налоги на ФОТ                        |                             | 43 %   |            | 86000                                                   |                       |          |               |            |                      |
| 7.    | ОХР % от 4+5+6                       |                             | 50 %   |            | 168000                                                  |                       |          |               | 954,55     | 0,10                 |
|       |                                      |                             |        |            |                                                         |                       |          |               |            |                      |
| 8     | ВСЕГО :                              | 1 см <sup>2</sup> + 100 мкм |        |            |                                                         |                       |          |               |            | 2,45                 |
|       | Рентабельность                       |                             | 100 %  |            |                                                         |                       |          |               |            | 2,45                 |
|       | Всего                                |                             |        |            |                                                         |                       |          |               |            | 4,90                 |
|       | НДС                                  |                             | 20 %   |            |                                                         |                       |          |               |            | 0,98                 |
|       | ИТОГО:                               |                             |        |            |                                                         |                       |          |               |            | 5,88                 |
|       |                                      |                             |        |            | Цена плазменного напыления руб./см <sup>2</sup> × 0,1мм |                       |          |               | 5,88       |                      |

Таблица 5.3 – Цена плазменного напыления покрытия толщиной 0,15 мм на площадь поверхности на 250 см<sup>2</sup>

| №  | Наименование                         | Кол-во                        | Цена, руб. | Стоимость, руб. | Общая стоимость            | %/мес. | Амортиз./мес. | Амортиз./ч | Руб./см <sup>2</sup> |
|----|--------------------------------------|-------------------------------|------------|-----------------|----------------------------|--------|---------------|------------|----------------------|
| 1. | Себестоимость материалов             |                               |            |                 |                            |        |               |            | 707,28               |
| 2. | Стоимость плазменного оборудования   |                               |            | 15 000 000      |                            |        |               |            |                      |
|    |                                      |                               |            |                 | 15 580 000                 | 2,78   | 432777,7778   | 2458,96    | 0,25                 |
| 3. | Стоимость оборудования всего участка |                               |            | 580 000         |                            |        |               |            |                      |
|    | Вращатель                            | 80 000                        |            |                 |                            |        |               |            |                      |
|    | Компрессор                           | 150 000                       |            |                 |                            |        |               |            |                      |
|    | Чиллер                               | 350 000                       |            |                 |                            |        |               |            |                      |
| 4. | Аренда помещения, м <sup>2</sup>     | 100                           | 500        | 50000           |                            |        |               | 284,09     | 0,03                 |
| 5. | Зарплата                             |                               |            |                 |                            |        |               |            |                      |
|    | Мастер, оператор 2, грузчик          | 4                             | 50 000     | 200000          | 286000                     |        |               | 1625       | 0,16                 |
| 6. | Налоги на ФОТ                        | 43 %                          |            | 86000           |                            |        |               |            |                      |
| 7. | ОХР % от 4+5+6                       | 50 %                          |            | 168000          |                            |        |               | 954,55     | 0,10                 |
|    | ВСЕГО :                              | 100 см <sup>2</sup> + 150 мкм |            |                 |                            |        |               |            | 707,81               |
|    | Рентабельность                       | 100 %                         |            |                 |                            |        |               |            | 707,81               |
|    | Всего                                |                               |            |                 |                            |        |               |            | 1415,62              |
|    | НДС                                  | 20 %                          |            |                 |                            |        |               |            | 283,12               |
|    | ИТОГО:                               |                               |            |                 |                            |        |               |            | 1698,75              |
|    |                                      |                               |            |                 | Цена плазменного напыления |        |               | 1698,75    |                      |

Стоимость работ по разборке-сборке пожарного насоса складывается из стоимости нормо-часа работы мастера и стоимости расходных материалов, так как при разборке насоса необходимо менять подшипники, сальники и прокладки (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Стоимость сборки-разборки пожарного насоса

| № | Наименование            | Кол-во   | Цена, руб./шт. | Общая стоимость, руб. |
|---|-------------------------|----------|----------------|-----------------------|
| 1 | Рабочее колесо исходное | 1 шт.    | 50 800         | 50 800                |
| 2 | Подшипник               | 2 шт.    | 1 500*         | 3 000                 |
| 3 | Сальник                 | 2 шт.    | 350*           | 700                   |
| 4 | Прокладки               | 1 компл. | 750*           | 750                   |
| 5 | Стоимость работ         | 7 ч      | 1 600**        | 11 200                |
|   | <b>Всего:</b>           |          |                | <b>66 450</b>         |
| 5 | Накладные расходы:      | 50 %     |                | 33 225                |
|   | <b>ИТОГО:</b>           |          |                | <b>99 675</b>         |

\* – цены актуальны на 31.05.2023 по данным завода-изготовителя АО «Пожгидравлика»;

\*\* – стоимость нормо-часа в автосервисе по ремонту пожарной техники.

Выход из строя насоса из-за рабочего колеса по статистике происходит один раз в три года. Таким образом, на одну пожарную машину за три года требуется ремонтных работ на общую сумму:

$$C_{\text{исх.}} = 99\,675 \text{ руб.}$$

Восстановление и упрочение поверхностей крыльчатки рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100 с использованием методов плазменного напыления увеличивает время работы колеса без износа до 9 лет. Следовательно, в результате проведения модернизации ремонтировать насос из-за сломанного колеса придется один раз в 9 лет вместо трех раз за тот же срок для немодернизированного колеса.

Учитывая, что стоимость плазменного напыления лопаток колеса составляет  $C_{\text{плаз.нап.}} = 1\,698,75$  руб., то стоимость ремонтных работ с модернизированным колесом составит (таблица 5.5):

$$C_{\text{м.}} = 102\,225 \text{ руб.}$$

Таблица 5.5 – Стоимость ремонтных работ пожарного насоса с модернизированным колесом

| № | Наименование                   | Кол-во | Цена, руб./шт. | Общая стоимость, руб. |
|---|--------------------------------|--------|----------------|-----------------------|
| 1 | Рабочее колесо<br>с напылением | 1 шт.  | 52 500         | 52 500                |
| 2 | Подшипник                      | 2 шт.  | 1 500          | 3 000                 |
| 3 | Сальник                        | 2 шт   | 350            | 700                   |
| 4 | Прокладки                      | компл. | 750            | 750                   |
| 5 | Стоимость работ                | 7 ч    | 1 600          | 11 200                |
|   | <b>Всего:</b>                  |        |                | <b>68 150</b>         |
| 6 | Накладные:                     | 50 %   |                | 34 075                |
|   | <b>ИТОГО:</b>                  |        |                | <b>102 225</b>        |

Рассчитаем экономию средств после модернизации насоса за девять лет.

$$\mathcal{E}_9 = C_{\text{исх}} \times 3 \text{ срока} - C_{\text{м}}$$

$$\mathcal{E}_9 = 99\,675 \text{ руб.} \times 3 - 102\,225 \text{ руб.} = 196\,800 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости единовременных затрат (в годах):

$$T_{\text{ок}} = C_{\text{плаз.нап.}} / (\mathcal{E}_9/9) = 1700/(196800/9) = 0,08 \text{ года.}$$

## Выводы по Главе 5

1. Проведена модернизация (восстановление и упрочнение) поверхностей крыльчатки рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100.

2. Рассчитана экономическая эффективность плазменного напыления лопаток данного колеса. Поскольку срок окупаемости единовременных затрат на напыление лопаток составляет около одного месяца, то проект модернизации рабочего колеса пожарного насоса с помощью плазменного напыления считается экономически обоснованным и может быть рекомендован к внедрению.

Следует отметить, что вначале будут напыляться уже готовые колеса в насосах, находящихся на складе. В случае успешного проведения испытаний экспериментальной партии колес можно будет ставить вопрос о нанесении защитного покрытия сразу на заводе-изготовителе рабочих колес. В этом случае экономическая эффективность будет больше (увеличится еще на 30 %).

3. Расчет проведен только на одну пожарную машину. В Свердловской области в подразделениях МЧС находятся порядка двух тысяч пожарных автомобилей, оборудованных насосами типа ПН, с рабочими колесами, изготовленными из алюминиевых сплавов, поэтому легко посчитать экономическую эффективность применения модернизации рабочих колес в пожарных насосах.

4. Помимо рабочих колес, технология плазменного напыления применима для любых деталей противопожарного оборудования и противопожарного водоснабжения, изготовленных из алюминия и его сплавов, поэтому внедрение данных технологий в процесс ремонта либо в процесс изготовления новых деталей принесет существенную экономическую выгоду.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложен способ повышения износостойкости и сроков эксплуатации деталей противопожарного оборудования и систем пожарного водоснабжения, выполненных из алюминиевого сплава АК7ч, путем технологической обработки поверхности деталей самофлюсующимися порошками на основе никеля.

Достижение цели исследования обеспечено решением комплекса задач научного и прикладного характера. Полученные в ходе исследования результаты позволили сделать следующие **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 получаются 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 ПГСР-2 и ПГСР-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 200 000 рублей на одно рабочее колесо. Срок окупаемости единовременных затрат на напыление лопаток составляет 1 месяц.

Таким образом, проведенное комплексное исследование состава и свойств самофлюсующихся порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-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.

Однако следует отметить, что имеется ряд других научных задач, требующих **проведения дальнейших исследований**. Необходимо обратить особое внимание на возможность использования других порошковых материалов и методики плазменного напыления для восстановления и упрочнения деталей, изготовленных из алюминия и его сплавов. С целью перехода к передовым интеллектуальным производственным технологиям и роботизированным системам, а также для автоматизации технологических процессов необходимо предусмотреть использование роботизированных установок, которые позволяют снизить влияние «человеческого фактора» при работе со сложным технологическим оборудованием и получить покрытия высокого качества. Для этого необходимы разработка и внедрение программного обеспечения и автоматизированных систем управления процессами нанесения покрытий.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

|      |   |                                                                                             |
|------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| HVAF | – | High Velocity Air Fuel (высокоскоростное газоплазменное напыление в воздушной атмосфере)    |
| HVOF | – | High Velocity Oxygen Fuel (высокоскоростное газоплазменное напыление в атмосфере кислорода) |
| ГП   | – | газоплазменное порошковое напыление                                                         |
| ГТН  | – | газотермическое напыление                                                                   |
| ДМ   | – | дуговая металлизация                                                                        |
| ДН   | – | детонационное напыление                                                                     |
| ДСК  | – | дифференциальная сканирующая калориметрия                                                   |
| ДТА  | – | дифференциально-термический анализ                                                          |
| МПУ  | – | многофункциональная плазменная установка                                                    |
| НЦПН | – | насос центробежный пожарный нормального давления                                            |
| ПН   | – | плазменное напыление                                                                        |
| РФА  | – | рентгеновский фазовый анализ                                                                |
| СТА  | – | синхронный термический анализ                                                               |
| СЭМ  | – | сканирующий электронный микроскоп                                                           |
| ТА   | – | термический анализ                                                                          |
| ТГ   | – | термогравиметрический анализ                                                                |
| ХГН  | – | холодное газодинамическое напыление                                                         |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасуй А. Техника напыления. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
2. Хасуй А., Мorigаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
3. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.
4. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов и др. Киев: Наукова Думка, 1987. 544 с.
5. Коробов Ю.С., Панов В.И., Разиков Н.М. Анализ свойств газотермических покрытий: учеб. пособие в 2 ч. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. Ч. 1. Основные методы и материалы газотермического напыления. 80 с.
6. Коробов Ю.С. Анализ свойств газотермических покрытий: учеб. пособие в 2 ч. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. Ч. 2. Оценка параметров покрытий. 92 с.
7. Дикусар А.И., Юрченко Е.В. Восстановление и упрочнение алюминиевых деталей наноконструированием поверхности с помощью ЭИЛ электродами из сплава Al–Sn // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 113. С. 354–363.
8. Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos. Thermal Spray Fundamentals. From Powder to Part. New York: Springer Science & Business Media, 2014. 1566 p.
9. Hartman S. The History of Thermal spraying – from Max Ulrich Schoop to the present time // HVOF Spraying: 9th Colloquium. Erding, 2012.
10. Fauchais P., Vardelle A. Thermal Sprayed Coatings Used Against Corrosion and Corrosive Wear // Advanced Plasma Spray Applications. Rijeka: InTech, 2012.
11. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 656 p.
12. Espallargas N. Introduction to thermal spray coatings // Future Development of Thermal Spray Coatings. UK: Woodhead Publishing Ltd, 2015. Pp. 1–13.

13. Ельцов В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. 335 с.
14. Спектор Ю.Е., Еромасов Р.Г. Технология нанесения и свойства покрытий. Красноярск, 2008. 271 с.
15. Структура и свойства алюминиевых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления / Л.И. Тушинский и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 1. С. 141–145.
16. Плазменное напыление покрытий. URL: [https://studbooks.net/2296889/matematika\\_himiya\\_fizika/plazmennoe\\_napylenie\\_pokrytiy](https://studbooks.net/2296889/matematika_himiya_fizika/plazmennoe_napylenie_pokrytiy) (дата обращения: 25.12.2023).
17. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 357 с.
18. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 406 с.
19. Лясников В.Н., Лясникова А.В., Дударева О.А. Плазменное напыление. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2016. 624 с.
20. Плазменное напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов / В.И. Кузьмин и др. // Вестник Югорского государственного университета. 2015. № 2 (37). С. 45–52.
21. Supersonic air-plasma spraying of carbide ceramic coatings / V. Kuzmin et al. // Materials Today: Proceedings. 2021. Part 4, Vol. 38. Pp. 1974–1979.
22. Математическая модель сверхзвукового воздушно-плазменного напыления / С.И. Головин и др. // Сварочное производство: научно-технический и производственный журнал. 2008. № 2. С. 16–22.
23. Лашенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. Киев: Екотехнологія, 2003. 64 с. URL: <https://clck.ru/3G4WWP> (дата обращения: 12.12.2023).
24. Воздушно-плазменное напыление функциональных покрытий / Т. И. Зайко и др. // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1–3 (43). С. 28–34.

25. The structure and characteristics of wear-resistant coatings, obtained by supersonic plasma spraying / V. Kuzmin et al. // *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 910. Pp. 1087–1095.
26. Никелевые и железные самофлюсующиеся сплавы для покрытий. URL: <http://www.polema.net/nikelevye-samofljusujushhiesja-splavy-dlja-pokrytij.html>82-83 (дата обращения: 22.12.2023).
27. Miguel J., Guilemany J., Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes // *Tribology International*. 2003. Vol. 36. Pp. 181–187.
28. Niranatlumpong P., Koiprasert H. Phase transformation of NiCrBSi–WC and NiBSi–WC arc sprayed coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 206. Pp. 440–445.
29. Failure mode and fatigue mechanism of laser-remelted plasma-sprayed Ni alloy coatings in rolling contact / X. Zhang et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 205. Pp. 3119–3127.
30. Tucker R. Jr. Introduction to Coating Design and Processing // *ASM Handbook*. 1994. Pp. 497–509.
31. Simunovic K., Saric T., Simunovic G. Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 1: General Facts, Wear and Corrosion Investigations // *Tribology Transactions*. 2014. Vol. 57 (6). Pp. 955–979.
32. Simunovic K., Saric T., Simunovic G. Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 2: Microstructure, Adhesive Strength, Cracking Behavior, and Residual Stresses Investigations // *Tribology Transactions*. 2014. Vol. 57 (6). Pp. 980–1000.
33. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials / E. Kornienko et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 567.
34. Modeling and Optimization in Investigating Thermally Sprayed Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings: A Review / K. Simunovic et al. // *Materials*. 2020. Vol. 13 (20).
35. Thermodynamics and Mechanics of Thermal Spraying of Steel EN 10060 Substrate with NiCrBSi Alloy after Milling / J. Valicek et al. // *Materials*. 2020. Vol. 13 (23).

36. Зимоглядова Т.А. Повышение износостойкости стали с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси самофлюсующегося никелевого сплава в сочетании с ниобием и бором: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2019. 189 с.

37. Microstructure and Phase Formation in a Rapidly Solidified Laser Deposited Ni–Cr–B–Si–C Hardfacing Alloy / I. Hemmati et al. // Metallurgical and materials transactions A. 2014. Vol. 45 (2). Pp. 878–892.

38. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко и др. Минск: Беларусь. Навука, 2011. 357 с.

39. Исследование механизма формирования с разработкой технологических основ нанесения износостойких градиентных газотермических покрытий / А.Ф. Ильющенко и др. // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сборник докладов 12-го Междунар. симпозиума в 2 ч. – Минск, 2021. – Ч. 2. – С. 211–221.

40. Шевченко О.И. Взаимосвязь структуры, фазового состава и служебных свойств рабочего слоя валков, полученного плазменно-порошковой наплавкой сплавом H73X16C3P3: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 1993. 160 с.

41. Shevchenko O., Trekin G., Farber V. Distribution of chemical elements in structural components of a facing of a self-fluxing nickel alloy // Met. Sci. Heat Treat. 1997. Vol. 39 (6). Pp. 233–235.

42. Ощепков Ю.П., Ощепкова Н.В. Особенности структурообразования сплавов системы Ni–Cr–B–C–Si при индукционной наплавке // Металловедение и термическая обработка. 1979. № 10. С. 14–17.

43. Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов / под ред. А.Т. Туманова и др. М.: Металлургия, 1972. 663 с.

44. Алюминий и его сплавы / сост. А.Р. Луц, А.А. Суслина. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 81 с.

45. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 640 с.

46. Шеметьев Г.Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение. СПб., 2012. Ч. 1. 155 с.
47. Денисова Э.И., Карташов В.В., Рычков В.Н. Прикладное материаловедение: металлы и сплавы. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 216 с.
48. Цветные металлы и сплавы / Т.В. Мальцева и др. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 176 с.
49. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. М.: Академкнига, 2005. 768 с.
50. Пожарное вооружение. URL: <http://www.rcsz-tcc.ru/pojvoorujenie/3.html> (дата обращения: 03.04.2023).
51. ПН-40, принцип действия, устройство, ТТХ. URL: <https://helpiks.org/3-22881.html> (дата обращения: 03.04.2023).
52. Марочник стали и сплавов. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (дата обращения: 11.11.2022).
53. Алюминий и его сплавы. URL: [https://extxe.com/8086/aljum inij-i-ego-splavy/?ysclid=lguqk2exmq38948720](https://extxe.com/8086/aljum%20inij-i-ego-splavy/?ysclid=lguqk2exmq38948720) (дата обращения: 11.11.2022).
54. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техніка, 1986. 223 с.
55. Сверхзвуковое воздушно-газовое плазменное напыление керметных покрытий системы карбид титана-хрома–нихром / Ю.С. Борисов и др. // Автоматическая сварка. 2015. № 2 (740). С. 21–27.
56. Харламов Ю.А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин // Тяжелое машиностроение. 2000. № 2. С. 10–13.
57. Балдаев Л.Х., Вахалин В.А., Ганноченко Г.И. Газотермическое напыление. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
58. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. М.: КХТ, 2004. 134 с.

59. Балдаев Л.Х. Газотермическое напыление порошковых материалов для получения защитных покрытий с заданными свойствами: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2010. 309 с.
60. Современные технологии производства. URL: <https://clck.ru/3G4rHh> (дата обращения: 16.10.2022).
61. Nestler M., Erning U. Characteristics and advanced industrial applications using the «Diamond Jet Hybrid» – the third generation of HVOF systems // Пленки и Покрытия – 98: Тр. 5 МНТК. СПб., 1998. С. 195–202.
62. Breitsameter M., Prosperini M. JP-5000, the HVOF of the 21st century // 4th HVOF Colloquium at Erding. Munchen – Bavaria, 1997. Pp. 119–125.
63. Verstak A., Baranovski V. Activated Combustion HVAF Coatings for Protection against Wear and High Temperature Corrosion // Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology. Florida. 2003. Vol. 1. Pp. 535–541.
64. Высокоскоростное распыление (HVOF). URL: <http://www.flamespraytech.ru/processes/HVOF> (дата обращения: 18.10.2022).
65. Коробов Ю.С. Сравнительный анализ газопламенных сверхзвуковых способов нанесения покрытий // Metallurg. 2006. № 3. С. 65–67.
66. Геращенко Д.А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом «холодного» газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al–Sn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 84 с.
67. Способ получения покрытий: патент № 1618778 / А.П. Алхимов и др. 1991.
68. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий / Д.А. Геращенко и др. // Вопросы материаловедения. 2014. № 2 (77). С. 87–96.
69. Косарев В.Ф. Экспериментальное исследование процесса «холодного» газодинамического напыления: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1991. 136 с.
70. Calculation of the Equilibrium State and Thermodynamic Characteristics of Plasma-Forming Gases and the Plasma–“Particle” System / S. Ilinykh et al. // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016. Vol. 57, No. 5. Pp. 509–514.

71. Thermodynamic modeling of Ni–Cr–B–C–Si system in «air+propane» atmosphere / N. Ilinykh et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1954.
72. Термодинамическое моделирование системы Ni–Cr–Si–B+TiC(WC) в атмосфере «воздух», «воздух + пропан», «воздух + метан». Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка / Н.И. Ильиных и др. // Материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: Беларусская навука, 2022. С. 489–495.
73. Белевитин В.А. Технологии напыления и металлизации деталей машин. Челябинск, 2023. 306 с.
74. Кузнецов Ю.А. Ресурсосберегающие технологии газотермического напыления при ремонте машин АПК // Вестник ОрелГАУ. 2009. № 1 (16). С. 13–15.
75. Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения / И.Н. Кравченко и др. // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15, № 3 (82). С. 19–27.
76. Строеение и свойства авиационных материалов / А.Ф. Белов и др. М.: Металлургия, 1989. 367 с.
77. Комплексная диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессе сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких покрытий / М.В. Радченко и др. // Сварка и диагностика. 2011. № 1. С. 54–58
78. Диагностика температурных характеристик сверхзвуковых газовых струй в аддитивных технологиях СГП-наплавки / В.С. Киселев и др. // Ползуновский вестник. 2017. № 4. С. 174–185.
79. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск: Наука, 1986. 217 с.
80. Износостойкие покрытия из никелевых сплавов, полученные с помощью сверхзвукового плазмотрона / В.И. Кузьмин и др. // Трение и износ. 2017. Т. 38, № 5. С. 467–474.
81. Защитные покрытия / М.Л. Лобанов и др. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 200 с.

82. Петров С.В. Технологическое использование плазмы продуктов сгорания и ее генерирование // Экотехнологии и ресурсосбережение. 1999. № 3. С. 73–80.
83. Процессы сгорания природного газа при высоких температурах / И.Н. Карп и др. Киев: Техника, 1967. 382 с.
84. Фролов В.А., Поклад В.А., Викторенков Д.В. Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (обзор) // Сварочное производство. 2006. № 11. С. 38–47.
85. Воздушно-плазменное напыление покрытий из самофлюсующихся порошковых материалов / Е.Е. Корниенко и др. // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. 2015. Т. 1, № 6. С. 229–237.
86. Влияние температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихся покрытий на основе никеля / Е.Е. Корниенко и др. // Обработка металлов. 2016. № 4 (73). С. 52–59.
87. Structural features of Ni–Cr–Si–B materials obtained by different technologies / E. Kornienko et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 156.
88. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. Минск: ФТИ, 2001. 148 с.
89. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П. Восстановление деталей машин. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
90. Шевченко О.И. Управление структурой, составом и свойствами покрытий при плазменной наплавке за счет технологических воздействий: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург. 2006. 347 с.
91. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
92. Григорьянц А.Г., Сафонов А.В. Лазерная техника и технологии. М.: Высшая школа, 1987. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки. 191 с.
93. Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. Минск: Высшая школа, 1988. 155 с.

94. Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1996. 304 с.
95. Yiwen Lei, Ronglu Sun and Ying Tang. Thermodynamic modeling and experimental study on the microstructure of laser clad Ni-base alloy coatings on 45 steel // *Journal of Materials Research*. 2013. Vol. 28 (09). Pp. 1189–1195.
96. Iždinská Z., Nasher A., Iždinský K. The structure and mechanical properties of NiCrBSi coatings prepared by laser beam cladding // *Materials Engineering*. 2010. Vol. 17, No. 1. Pp. 11–16.
97. Hemmati I., Ocelik V., De Hosson J. Th. M. Toughening mechanism for Ni–Cr–B–Si–C laser deposited coatings // *Materials Science & Engineering A*. 2013. Vol. 582. Pp. 305–315.
98. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Способ получения упрочненного никельхромборкремниевого покрытия на металлических деталях: патент на изобретение RU 2709550 C1, 18.12.2019; заявка № 2018142122 от 28.11.2018.
99. Влияние термического воздействия на микромеханические свойства хромоникелевого покрытия, полученного газопорошковой лазерной наплавкой / Н.Н. Соболева и др. // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22, № 2. С. 104–117.
100. Соболева Н.Н., Макаров А.В. Влияние условий высокотемпературной обработки на структуру и трибологические свойства наплавленного лазером покрытия на никелевой основе // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27, № 5. С. 67–77.
101. Microstructures of Metallic NiCrBSi Coatings Manufactured via Hybrid Plasma Spray and In Situ Laser Remelting Process / N. Serres et al. // *Journal of Thermal Spray Technology (JTTEE5)*. 2011. Vol. 20. Pp. 336–343.
102. Безбородов В.П., Ковалевский Е.А. Влияние ультразвуковой обработки на напряженное состояние газотермических покрытий из никелевых сплавов // *Физика и химия обработки материалов*. 2001. № 1. С. 67–69.

103. Кузнецов Ю.А. Перспективные способы высокоскоростного газотермического напыления покрытий. URL: [http://www.science-bsea.bgita.ru/2011/mashin\\_2011\\_1/kuznecov\\_perspekt.htm](http://www.science-bsea.bgita.ru/2011/mashin_2011_1/kuznecov_perspekt.htm) (дата обращения: 18.10.2022).
104. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Металлургия, 1994. 353 с.
105. Белов Г.В. Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы. М.: Научный мир, 2002. 184 с.
106. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г.Б. Синярев и др. М.: Наука, 1983. 263 с.
107. Воронин Г.Ф. Расчеты фазовых и химических равновесий в сложных системах // Физ. химия: соврем. пробл. 1984. С. 112–143.
108. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А. Термодинамическое моделирование: предмет, применение и проблемы // Доклады РАН. 1994. Т. 337, № 6. С. 775–778.
109. Синярев Г.Б., Трусов Б.Г., Слынько Л.Е. Универсальная программа для определения состава многокомпонентных рабочих тел и расчета некоторых тепловых процессов // Труды МВТУ. 1973. № 159. С. 60–71.
110. Кауфман Л., Бернштейн Х. Расчет диаграмм состояния с помощью ЭВМ. М.: Мир, 1972. 328 с.
111. Kattner U. The CALPHAD method and its role in material and process development // Technol. Metal. Mater. Miner. 2016. Vol. 13, No. 1. Pp. 3–15.
112. Cacciamani G. An introduction to the CALPHAD method and the compound energy formalism (CEF) // Technol. Metal. Mater. Miner., São Paulo. 2016. Vol. 13, No. 1. Pp. 16–24.
113. Andersson J., Jansson B., Sundman B. The THERMO-CALC Databank system // CALPHAD. 1985. Vol. 5, No. 2. Pp. 153–190.
114. THERMO-CALC & DICTRA, Computational Tools For Materials Science / J. Andersson et al. // CALPHAD. 2002. Vol. 26, No. 2. Pp. 273–312.

115. Andersson J., Jansson B., Sundman B. THERMO-CALC: a data bank for equilibria and phase diagram calculations // CODATA Bull. 1985. No. 58. Pp. 31–35.
116. PANDAT software with PanEngine, PanOptimizer and PanPrecipitation for multi-component phase diagram calculation and materials property simulation / W. Cao et al. // CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. 2009. Vol. 33. Pp. 328–342.
117. FactSage Thermochemical Software and Databases, 2010–2016 / C. Bale et al. // Calphad. 2016. Vol. 54. Pp. 35–53.
118. Eriksson G., Hack K., Petersen S. ChemApp – A Programmable Thermodynamic Calculation Interface // DGM Informationsgesellschaft mbH, Hamburger Allee 26. Frankfurt, 1997. 47 p.
119. HSC Chemistry: Official Webshop. URL: <https://www.hsc-chemistry.com> (дата обращения: 03.02.2023).
120. Агеев Н.Г., Набойченко С.С. Металлургические расчеты с использованием пакета прикладных программ HSC Chemistry. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 124 с.
121. Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л. Расчет и оптимизация технологий с использованием HSC Chemistry. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 212 с.
122. Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. № 1. С. 240–249.
123. Lambda Geeks. Thermodynamic Databases: A Comprehensive Guide for Engineers. URL: <https://lambdageeks.com/thermodynamic-databases/> (дата обращения: 03.02.2023).
124. Термодинамические базы данных. URL: [https://td.chem.msu.ru/uploads/files/-courses/special\\_selectedchapters/2011/ТД Базы данных.pdf](https://td.chem.msu.ru/uploads/files/-courses/special_selectedchapters/2011/ТД_Базы_данных.pdf) (дата обращения: 03.02.2023).
125. Кундас С.П., Тонконогов Б.А., Кашко Т.А. Компьютерное моделирование технологических процессов // Доклады БГУИР. 2004. № 3. С. 38–49.

126. Simulation and experimental studies of particles interaction with plasma jet in vacuum plasma spraying processes / S. Kundas et al. // *Journal of advanced materials*. 2000. Vol. 32, No. 3. Pp. 3–11.

127. Исследование особенностей движения и нагрева частиц порошка в плазменной струе с применением компьютерного моделирования / С.П. Кундас и др. // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В*. 2003. Т. 2, № 4. С. 136–139.

128. Kundas S., Ilyuschenko A. Computer simulation and control of plasma spraying processes // *Materials and Manufacturing Processes*. 2006. Vol. 17 (1). Pp. 85–96.

129. Многофункциональная плазменная установка МАК-100, работающая с порошками металлов и неметаллов / С.А. Ильиных и др. // *Актуальные проблемы порошкового материаловедения: мат. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения академика В.Н. Анциферова*. 2018. С. 116–118.

130. Modification of aluminum surfaces by supersonic plasma sputtering / S. Ilinykh et al. // *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 329.

131. Способ получения защитного покрытия: патент на изобретение 2741040 С1, 22.01.2021 / Б.Р. Гельчинский и др.; заявка № 2020120189 от 11.06.2020.

132. Modification of the surface of structural materials by concentrated energy flows in order to improve their performance properties / S. Ilinykh et al. // *Key Engineering Materials*. 2022. Т. 910. Pp. 507–513.

133. Formation of Protective Coatings Using an MAK-100 Plasma Spraying Installation / S. Ilinykh et al. // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024. Vol. 2023, No. 8. Pp. 1201–1207.

134. Bruker AXS (2019). In *DIFFRAC. EVA V5.1*. Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany.

135. Gates-Rector S., Blanton T. The Powder Diffraction File: A Quality Materials Characterization Database // *Powder Diffr.* 2019. Vol. 34 (4). Pp. 352–360.

136. Rietveld H. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures // *J. Appl. Crystallogr.* 1969. Vol. 2. Pp. 65–71.

137. Coelho A. TOPAS and TOPAS-Academic: an optimization program integrating computer algebra and crystallographic objects written in C++ // J. Appl. Crystallogr. 2018. Vol. 51. Pp. 210–218.

138. ГОСТ 2999–75 (СТ СЭВ 470–77). Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу (с Изм. № 1, 2). М.: Издательство стандартов, 1987. 31 с.

139. Влияние структуры и свойств покрытия и основы на поведение композиции «сталь 40Х13 – малоуглеродистая сталь» в условиях деформации сжатием / П.А. Витязь и др. // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5, № 1. С. 337–339.

140. Исследование особенностей развития деформации на мезоуровне и разрушения композиций с напыленными покрытиями при трехточечном изгибе / С.В. Панин и др. // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 2. С. 91–104.

141. ГОСТ 23.208–79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. 4 с.

142. ГОСТ 30479–97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования. Минск, 1997. 12 с.

143. ГОСТ Р 50740–95. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения. 12 с.

144. ГОСТ 25142–82 (СТ СЭВ 1156–78). Шероховатость поверхности. Термины и определения (с Изм. № 1). 16 с.

145. ГОСТ 34388–2023 (ISO 9227:2017). Трубы стальные. Метод испытаний коррозионной стойкости в соляном тумане. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 23 с.

146. ГОСТ 9.311–2021. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Метод оценки коррозионных поражений. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 16 с.

147. Ilinykh N., Krivorogova A. Thermodynamic modeling of fluxing alloys of Ni–C–Cr–Si–B system // The European Physical Journal. Special Topics. 2017. Т. 226, No. 5. Pp. 1115–1121.

148. Теоретическое и экспериментальное исследование самофлюсующихся материалов на основе никеля / А.С. Криворогова и др. // Расплавы. 2020. № 1. С. 87–97.
149. Theoretical and Experimental Study of Nickel-Based Self-Fluxing Materials / A. Krivorogova et al. // Russian Metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020, No. 8. Pp. 853–858.
150. Thermodynamic modeling of composition and propereties of self-fluxing materials based on the nickel / N. Ilinykh et al. // MATEC Web of Conferences. 2020. Vol. 329.
151. Исследование поведения самофлюсующихся сплавов Ni–C–Cr–Si–B в экстремальных условиях системы / А.С. Криворогова и др. // Многофазные системы. 2020. № 1–2. С. 56.
152. Thermodynamic modeling of Ni–Cr–B–C–Si system in «air+propane» atmosphere / N. Ilinykh et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1954 (1).
153. Повышение надежности противопожарного оборудования и систем пожарного водоснабжения / А.С. Криворогова и др. // Техносферная безопасность. 2023. № 1 (38). С. 72–86.
154. 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.
155. Диаграммы состояния двойных металлических систем / под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996–2000.
156. Термодинамическое моделирование линии ликвидус системы Ni–Si / О.В. Самойлова и др. // Вестник ЮУрГУ. 2012. № 24. С. 69–73. URL: <https://sciup.org/147160236> (дата обращения: 10.03.2023).
157. Оценка адгезионно-когезионных свойств плазмонапыленных Ni–Cr–B–Si–C покрытий на образцы из алюминиевого сплава АК7ч / А.С. Криворогова и др. // Вестник современных технологий. 2023. № 1 (29). С. 4–12.
158. Боднарук В.Б., Вертячих И.М., Сазонов В.К. Пожарное и аварийно-спасательное оборудование. Пожарные насосы. Гомель, 2011. 202 с.

159. Пожарная техника / М.Д. Безбородько и др. М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. 437 с.
160. Приказ № 737 от 01.10.2020 «Об утверждении руководства об организации материально-технического обеспечения министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».
161. ГОСТ ISO 17769-1–2014. Насосы жидкостные и установки. Основные термины, определения, количественные величины, буквенные обозначения и единицы измерения. Часть 1. Жидкостные насосы. М.: Стандартиформ, 2015. 63 с.
162. ГОСТ Р 58790–2019. Техника пожарная. Насосы пожарные. Классификация. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2020. 10 с.
163. Пожарные автомобили / А.И. Преснов и др. СПб., 2006. 507 с.
164. Локалов Г.А., Марковский В.М. Осевые и центробежные насосы тепловых электрических станций. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 140 с.
165. ГОСТ 27674–88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. 21 с.
166. Технология и экономика порошковой металлургии / А.А. Куклин и др. М.: Наука, 1989. 223 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Акт внедрения от 9 ПСЧ 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления МЧС России по Свердловской области

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Начальник 9 ПСЧ 1 ПСО ФПС ГПС  
Главного управления МЧС России  
по Свердловской области  
подполковник внутренней службы  
Е.В. Стариков  
«1» июня 2023 г.



#### АКТ

#### внедрения результатов научно-квалификационной работы Кривороговой Анастасии Сергеевны на тему «Повышение надежности противопожарного оборудования и систем противопожарного водоснабжения»

Настоящим актом внедрения подтверждаю, что в 9 ПСЧ 1 ПСО ФПС ГПС ГУ МЧС России по Свердловской области внедрены результаты научных исследований с использованием технологических режимов дозвукового и сверхзвукового плазменного напыления металлических порошковых материалов (ПГСР 4, ПН70Ю30 70%+ ПГСР-4 20%+медный порошок 10%) на рабочие поверхности деталей насосного оборудования:

- проведено восстановление уплотнительных бронзовых колец маховика пожарного насоса НЦПН-40/100 дозвуковым режимом напыления порошковым материалом ПН70Ю30 70%+ ПГСР-4 20%+медный порошок 10%
- проведено упрочнение лопастей рабочего колеса пожарного насоса НЦПН-40/100 сверхзвуковым режимом напыления порошковым материалом ПГСР 4.

Проведенные испытания детали: «рабочее колесо пожарного насоса НЦПН-40/100» с защитными износостойкими покрытиями показали высокую стойкость к интенсивному гидроабразивному и кавитационному износу.

Выполненные исследования позволили рекомендовать технологические приемы защиты различных металлических поверхностей.

Данная разработка позволяет продлить срок службы противопожарного оборудования, уменьшить расходы, связанные с ремонтом и в рамках импортозамещения не использовать дефицитные, дорогостоящие материалы.

Согласовано:

Старший водитель группы обслуживания  
9 ПСЧ 1 ПСО ФПС ГПС  
Главного управления МЧС России  
по Свердловской области  
прапорщик внутренней службы  
«1» июня 2023г. Партин И.А.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2****Акт внедрения от ООО НПФ «УМГ»**

Директор ООО НПФ «УМГ»

Д.В. Климанов

20.04.2023 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

по договору о сотрудничестве № 01/04/2017 от 15.02.2017 г.

Настоящий акт составлен в том, что на предприятии ООО НПФ «УМГ» внедрены технологические режимы дозвукового и сверхзвукового плазменного напыления металлических порошковых материалов (ПГСР 2, ПГСР 4) на рабочие поверхности деталей насосного оборудования.

Проведенные промышленные испытания детали: «рабочее колесо пожарного насоса ПН-40УВ» с защитным износостойким покрытием показали высокую стойкость к интенсивному гидроабразивному износу.

Был предложен способ модифицирования поверхностей различных машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях.

Выполненные исследования позволили рекомендовать технологические приемы защиты различных металлических поверхностей.

Данная разработка в рамках импортозамещения позволяет не использовать дефицитные, дорогостоящие материалы.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения данной разработки составляет 1,5 миллиона руб. в год.

**Исполнители:**

с. н. с., к.т.н.

ИМЕТ УрО РАН

С.А. Ильиных

м.н.с. ИМЕТ УрО РАН

А.С. Криворогова

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3****Акт промышленных испытаний от ООО НПФ «УМГ»**

Наименование Заказчика  
ООО НПФ «УМГ»  
456780, Россия, Челябинская обл.,  
г. Озёрск, ул. Гайдара 30-20

Наименование Исполнителя  
ИМЕТ УрО РАН  
620016, г. Екатеринбург,  
ул. Амундсена, 101

**А К Т**

Промышленных испытаний по договору о сотрудничестве  
№ 01/04/2017 от 15.02.2017 г.  
Составлен 20 марта 2023 г.

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Заказчика Д.В. Климанов, директор ООО НПФ «УМГ» с одной стороны, и представитель Исполнителя С.А. Ильиных, старший научный сотрудник ИМЕТ УрО РАН; Криворогова А.С., младший научный сотрудник с другой стороны, составили настоящий акт о том, что научно-техническая продукция: удовлетворяет условиям договора и в надлежащем порядке оформлена.

ООО НПФ «УМГ» проведены промышленные испытания детали: «рабочее колесо пожарного насоса ПН-40УВ» с защитным износостойким покрытием, полученным методом сверхзвукового пламенного напыления рабочих поверхностей изделия, подвергающихся интенсивному гидроабразивному износу. В результате испытаний с 3 октября 2022 г. по 24 марта 2023 г., напыленная рабочая поверхность – лопатки рабочего колеса показали хорошую работоспособность (4320 ч.) с незначительными следами износа.

Данная разработка позволяет проводить работы по упрочнению сложных рабочих поверхностей деталей непосредственно на оборудовании исполнителя с наименьшими временными и экономическими потерями.

Работу сдал:

с.н.с., к.т.н.

С.А. Ильиных

м.н.с.

А.С. Криворогова

Работу принял:

Директор ООО НПФ «УМГ»

Д.В. Климанов



## ПРИОЖЕНИЕ 4

## Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**  
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2741040

**Способ получения защитного покрытия**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук (ИМЕТ УрО РАН) (RU)*

Авторы: *Гельчинский Борис Рафаилович (RU), Ильиных Сергей Анатольевич (RU), Крашанинин Владимир Александрович (RU), Криворогова Анастасия Сергеевна (RU)*

Заявка № 2020120189  
Приоритет изобретения 11 июня 2020 г.  
Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 22 января 2021 г.  
Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 11 июня 2040 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.И. Ивлиев* Г.И. Ивлиев

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

### «Бронзовая медаль» XXIV Московского международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед – 2021»



## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

«Золотая медаль» Всемирного изобретательского форума  
Global Invention Forum in Cyprus (2021)

