

На правах рукописи



ПЛЕСОВСКИХ Алексей Юрьевич

**УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕМ И СВОЙСТВАМИ
ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ**

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Оренбург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Оренбургский государственный университет» (ОГУ)

Научный руководитель - **Крылова Светлана Евгеньевна**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Задорожный Владислав Юрьевич**,
доктор технических наук,
профессор кафедры физического материаловедения
НИТУ МИСИС, г. Москва

Якимов Николай Сергеевич,
кандидат технических наук
главный металлург ОАО «ЕПК Самара», г. Самара

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт металлургии имени академика
Н.А. Ватолина Уральского отделения Российской
Академии наук, г. Екатеринбург

Защита состоится 19 марта 2026 года в 12:00 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.352.01 на базе ФГБОУ ВО «Оренбургский
государственный университет» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13 ауд.
170215.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке
и на сайте (www.osu.ru) ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Ильгиз Халилович Хасанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Известно, что большинство ответственных деталей и узлов оборудования, функционирующего на дожимных компрессорных станциях нефтегазовых предприятий России выполнены из материалов и по технологиям зарубежных производителей. В условиях сложившихся внешнеэкономических отношений, приобретение и эксплуатация данного вида изделий затруднительна.

По результатам реверс-инжиниринговых изысканий отработанных штоков компрессоров Dresser-Rand, CPI Compressor Products International и Cameron Compression System, определена необходимость разработки рациональной технологии упрочнения подобных деталей с обоснованием влияния режимов нанесения покрытий на структуру и фазовый состав рабочей поверхности, с целью обеспечения безаварийной работы изделий в конкретных условиях эксплуатации.

В нефтегазовом машиностроении газотермические методы нанесения покрытий являются технологически прогрессивными и экономически эффективными в рамках улучшения эксплуатационных характеристик ответственных деталей и узлов оборудования. Современный уровень развития данной области характеризуется, как широким спектром материалов функционального назначения, так и разработкой надежного технологического оборудования и оптимальных параметров его использования. Однако, несмотря на достигнутые результаты, вопросы влияния гранулометрического и химического состава исходных порошков, а также комплексное воздействие параметров напыления на микроструктуру, фазовый состав, физико-механические свойства и напряженное состояние формируемого слоя для различных практических применений остаются недостаточно изученными, что определяет актуальность настоящего исследования.

Степень разработанности темы исследования. Способ восстановления и упрочнения рабочих поверхностей ответственных деталей методом нанесения газотермических покрытий был по достоинству оценен в производственной сфере, что нашло отражение в работах Ю.С. Коробова, А.Ю. Павлова и других исследователей. Значимые для теории и практики результаты исследований в области нанесения газотермических покрытий на поверхность металлов и сплавов приведены в работах отечественных (Р.М. Нуреев, С.И. Яресько и т.д.) и зарубежных (S. Kuroda, C. Moreau, L.M. Berger и т.д.) ученых.

Проведенный анализ научно-технической литературы свидетельствует, что решение проблемы восстановления изношенных поверхностей и повышения эксплуатационной стойкости деталей возможно на основе применения принципов комплексного легирования при разработке порошковых композиций. Исследования таких ученых, как О.Г. Девоино, А.Ю. Рудницкого и других демонстрируют, что достижение требуемого комплекса эксплуатационных характеристик изделий обусловлено не только композиционным составом порошковых материалов, но и совершенствованием технологических параметров газопламенного напыления. Получение новых научных представлений о процессах поверхностного структурного упрочнения при газопламенном напылении, включая механизмы карбидообразования в напыленных композициях, создает теоретическую основу для прогнозирования механических и эксплуатационных свойств рабочих поверхностей

тяжелонагруженного оборудования, что подчеркивает научную и практическую значимость настоящего исследования.

Объектом исследования является процесс упрочнения рабочей поверхности ответственных деталей нефтегазового оборудования методом газопламенного напыления.

Предмет исследования - механизм структурообразования и формирования функциональных свойств износостойких вольфрамсодержащих покрытий.

Цель работы - управление структурообразованием и комплексом механических свойств вольфрамсодержащих покрытий, полученных газотермическим напылением порошковых композиций системы Ni-Cr-B-Si-WC на поверхность ответственных деталей нефтегазового машиностроения.

Задачи исследования:

1. Разработка составов напыляемых композиций с оптимальным содержанием и формой карбида вольфрама в металлической матрице.
2. Оптимизация параметров газотермического напыления, обеспечивающих требуемое сочетание механических свойств.
3. Выявление закономерностей структурообразования при напылении и термическом упрочнении поверхности.
4. Оценка напряжённого состояния и эксплуатационных характеристик детали с вольфрамсодержащим покрытием; апробация технологии упрочнения рабочей поверхности в условиях ремонтного производства.

Содержание диссертации соответствует п. 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия, и влияние сварочного цикла на металл зоны термического влияния, их моделирование и прогнозирование», п. 3 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов» и п. 6 «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химико-термической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим или термомеханическим воздействием, цифровизация и автоматизация процессов, а также разработка информационных технологий систем сквозного управления технологическим циклом, специализированного оборудования» паспорта научной специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Научная новизна:

1. Научно и экспериментально обоснован новый (подтвержденный патентом) состав композиционного вольфрамсодержащего порошкового покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC (59,0% Ni; 28,9% W; 5,3% Cr; 1,7% Fe; 1,2% B; 2,5% Si; 1,4% C), отличающийся рациональным содержанием легирующих элементов (W, Cr, B) в никелевой матрице, дисперсностью карбидной фазы в пределах 15–30 мкм, что обеспечивает формирование износостойкого слоя на рабочих поверхностях деталей нефтегазового оборудования.

2. Впервые установлены зависимости между морфологическим составом

порошковых композиций и параметрами газотермического напыления вольфрамсодержащего покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC, позволяющие управлять структурой и свойствами формируемой поверхности.

3. Предложен механизм упрочнения, основанный на объемном приросте и межламельном перераспределении в γ -твердом растворе дисперсных фаз Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , $\text{Cr}_3\text{W}_3\text{C}$, Cr_5B_3 и B_4C , отличающийся формированием монолитной структуры, обладающей оптимальным упругопластическим состоянием и высокой степенью заполнения межламельных микропустот и обеспечивающий снижение пористости с 2,5 до 1 %, повышение микротвердости и износостойкости поверхности на 35-50%.

Практическая значимость работы состоит в разработке и внедрении импортозамещающей технологии поверхностного упрочнения штоков поршневых компрессоров нефтегазового оборудования, гарантирующей регламентированные значения микротвёрдости, износостойкости, адгезионной прочности покрытия, при соблюдении шероховатости и геометрической точности изделия в соответствии с отраслевыми стандартами.

Предложен метод формирования монолитного поверхностного слоя на основе вольфрамсодержащих композиций, включающий холодное газотермическое напыление с последующим оплавлением границ армированной карбидами никелевой металлической основы последующей высокотемпературной термической обработкой, в виде закалки с температуры 1100-1150 °С в водополимерную среду «Термат», формирующей спеченную ламельную структуру с выделением устойчивых дисперсных включений на основе хрома, вольфрама и бора.

Технологичность и эксплуатационная стойкость разработанного покрытия подтверждается актами внедрения:

- на Оренбургском газоперерабатывающем заводе ООО «Газпромпереработка» при промышленной эксплуатации, упрочненного порошковой композицией Ni-Cr-B-Si-WC штока компрессора марки 382K01;

- на предприятии ООО «Технология» г. Оренбурга успешно проведены промышленные испытания разработанных порошковых композиций, предназначенных для упрочнения штоков поршневых компрессоров дожимных компрессорных станций (ДКС) 1, 2 и 3 ступеней.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.

Методологическая база исследования сформирована на основе фундаментальных работ российских и зарубежных ученых, посвященных изучению структуры и свойств газопламенных покрытий металлических материалов. Теоретической основой послужили принципы классического материаловедения, методы металлографического анализа и технологии неразрушающего контроля, а также требования международных и российских нормативных документов. В исследовании применены методы математического моделирования экспериментальных процессов, инженерного анализа напряженно-деформированного состояния, теоретические положения трибологии и механизмов формирования ламельных структур в порошковых композиционных материалах. Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой задач, значительным массивом экспериментальных данных и применением современных металловедческих методик. Верификация результатов осуществлялась путем сопоставления с данными ведущих отечественных и зарубежных исследователей в данной области. Практическая значимость работы подтверждена успешной

апробацией разработанных решений в реальных производственных условиях.

Для достижения поставленной цели и задач диссертационной работы были использованы: металлографические исследования, микрорентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализ. Механические характеристики определялись посредством испытаний на адгезионную прочность, износостойкость и дюрометрические измерения. Особое внимание уделялось анализу пористости покрытий и контролю остаточных напряжений магнитоанизотропным методом. Полученные экспериментальные данные подвергались статистической обработке с использованием программного обеспечения Statistica V12.

Положения, выносимые на защиту:

1. Рациональный состав вольфрамсодержащего покрытия на основе порошковой композиции системы Ni-Cr-B-Si-WC дисперсностью 15-30 мкм, обеспечивающего износостойкость рабочей поверхности за счет формирования армированной никелевой металлической основы с равномерным распределением включений WC и устойчивых дисперсных фаз: Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , $\text{Cr}_3\text{W}_3\text{C}$, Cr_5B_3 и B_4C , повышающих микротвердость поверхности (п.2 паспорта научной специальности).

2. Закономерности структурообразования упрочняемого поверхностного слоя в процессе оптимизации параметров холодного газотермического напыления (п.3 паспорта научной специальности);

3. Зависимость структурно-фазового состояния и эксплуатационных характеристик покрытия от параметров термической обработки, (п.6 паспорта научной специальности), состоящая в формировании уплотненной ламельной структуры металлической матрицы с равномерным карбидным упрочнением за счет целенаправленного формирования в рабочем слое сложных дисперсных карбидных и боридных фаз: Cr_7C_3 , Cr_5B_3 и B_4C , армирующих вязкую матрицу твердого раствора на основе Ni.

4. Результаты распределения остаточных напряжений, формирующихся в изделии с покрытием системы Ni-Cr-B-Si-WC на этапах послойного нанесения и последующей термической обработки (п.6 паспорта научной специальности).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на следующих конференциях: XX-ой международной научно-технической Уральской школы-семинаре металловедов – молодых ученых (г. Екатеринбург, 2020 г.); LXIII-ой международной конференции, "Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы" (г. Тольятти, 2021 г.); международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (г. Севастополь, 2019 - 2020 гг.); научно-методических семинарах кафедры материаловедения и технологии материалов и научно-образовательного центра новых материалов и перспективных технологий ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (г. Оренбург, 2018 - 2024 гг.); XII Международной школы-конференции «Физическое материаловедение» (г. Тольятти, 2025 г.), Россия; VII Международной Школы-конференции «Перспективные многокомпонентные («высокоэнтропийные») материалы (г. Москва, 2025 г.).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы приняты к применению на машиностроительном предприятии сервисного обслуживания и ремонта ООО «Технология», а также на предприятиях: ООО «Газпром Добыча

Оренбург», ООО «Газпром Добыча Астрахань», ООО «Газпром Нефть Оренбург», в учебном процессе научно-образовательного центра новых материалов и перспективных технологий ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» при подготовке обучающихся по направлению «Материаловедение и технологии материалов».

Личный вклад автора заключается в постановке исследовательских задач, проведении теоретических и экспериментальных исследований с последующей обработкой данных, анализом и научной интерпретацией результатов; формулировании положений, выводов и заключения по работе, а также в подготовке публикаций и внедрении результатов в производство.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных статей, в том числе 2 – в изданиях из «Перечня...» ВАК, 4 – в изданиях, индексируемых в международных базах SCOPUS и Web of Science, 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, пять разделов с описанием результатов исследований, заключение, изложена на 192 страницах, содержит 100 рисунка, 26 таблицы и список использованных источников из 220 наименований, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены: обоснование актуальности темы исследования; цель и задачи исследования; объект и предмет исследования; научная новизна и практическая значимость работы; сведения об апробации и положения, выносимые на защиту. Дан краткий обзор структуры и содержания диссертационной работы.

В разделе 1 *«Анализ современного состояния технологий восстановления и повышения износостойкости деталей компрессорного оборудования»* проведен комплексный анализ литературных источников, соответствующих тематике диссертационной работы. Детально изучены специфические условия эксплуатации, основные причины возникновения дефектов и принципы упрочнения поверхностей ответственных элементов нефтегазоперерабатывающего оборудования. Особое внимание уделено систематизации сведений о композиционных порошковых материалах, обеспечивающих достижение требуемых эксплуатационных характеристик. Рассмотрено влияние различных независимых факторов на прочностные характеристики, износостойкость, адгезионную прочность и пористость при нанесении покрытий методом газотермического напыления. Проведенный комплексный аналитический обзор научных публикаций, патентных документов и технической документации позволил сформулировать цель и задачи диссертации.

В разделе 2 *«Разработка составов напыляемых композиций, получение покрытий и методы исследования»* представлены систематизированные сведения о разрабатываемых материалах, используемом лабораторном оборудовании и методических принципах проведения исследования. На основании анализа зарубежных прототипов методом обратного инжиниринга определены ключевые требования к упрочняющим покрытиям компрессорного оборудования, учитывающие как эксплуатационные механические свойства, так и технологические параметры процесса их нанесения.

Обработку режимов газотермического напыления проводили на термически

обработанной стали AISI 4140 (ASTM A331). Напыление опытных образцов осуществляли на установке Castodyn DS 8000 с давлением ацетилена 0,7 бар, сжатого воздуха до 6 бар.

Согласно требованиям к химическому составу, структуре и механическим свойствам изделия, учитывая состав и свойства основного материала, требования к эксплуатации оборудования, были выбраны несколько типов опытных порошковых композиций системы Ni-Cr-B-Si-WC с размером фракции металлической основы 80-120 мкм, карбида вольфрама в пределах 15-120 мкм, с соблюдением соотношения металлическая основа – карбид вольфрама 2:1. РЭМ-изображения и параметрический анализ порошков представлен на рисунке 1.

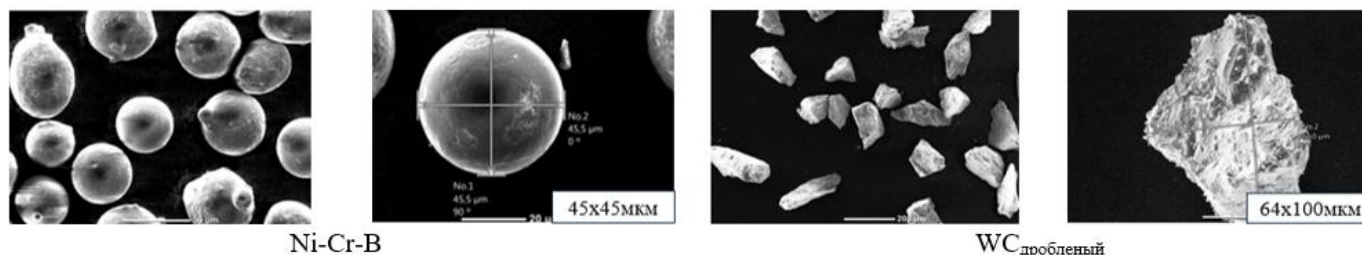


Рисунок 1 – РЭМ-изображения и размерные параметры порошковых композиций: а – компоненты металлической основы, б – карбид вольфрама

Разработка состава и морфологии композиционного упрочняющего покрытия осуществлялась путем реализации и обработки данных матрицы планирования 3^3 -факторного эксперимента. В качестве результирующих параметров рассматривались износостойкость (y_1), пористость (y_2) и степень усвоения карбида вольфрама (y_3) покрытия, управляемыми параметрами были приняты размер фракции, морфология и процентное содержание вольфрама в исходной порошковой смеси. В ходе регрессионного анализа определены уравнения зависимости, оптимальные контуры вариативности переменных, оценена вероятность выборки значений (рисунок 2).

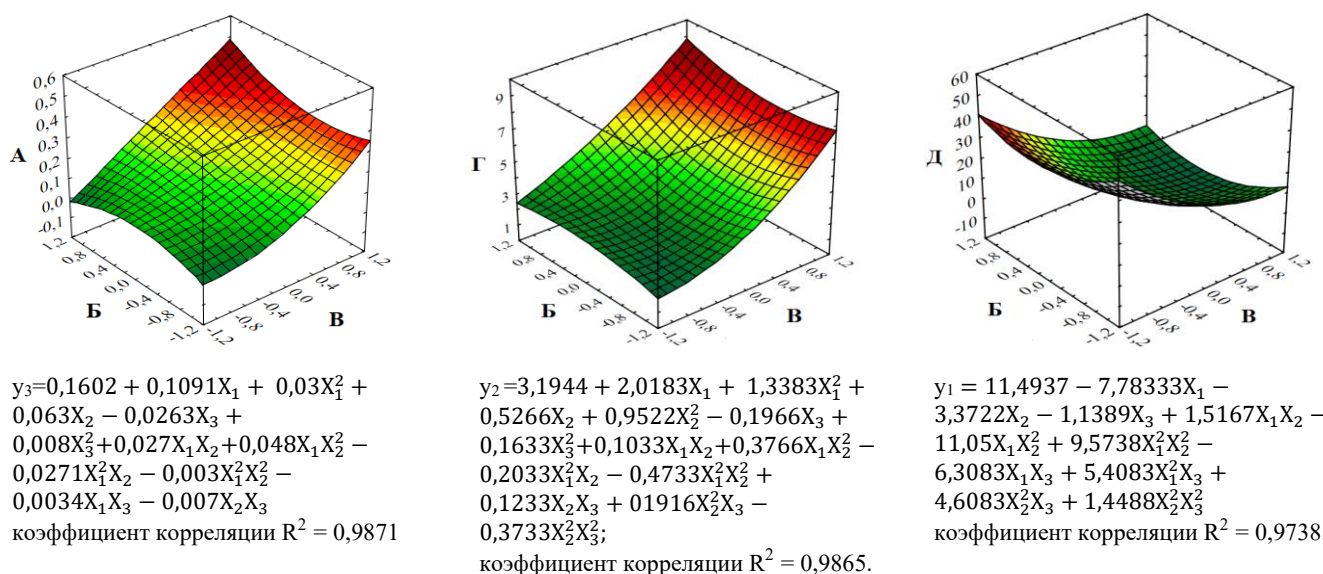


Рисунок 2 – Результаты статистической обработки данных для процесса оптимизации состава упрочняющего покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC: А – величина износа в условиях сухого трения, гр.; Б – процентное содержание WC (%); В – размер фракции, мкм; Г – пористость (%); Д – содержание карбидной фазы WC в покрытии (%)

Для выявления эффективного режима нанесения разработанного состава упрочняющего покрытия выполнена оптимизация технологических параметров процесса холодного газотермического напыления (ХГТН). Этап оптимизации технологических параметров нанесения упрочняющего покрытия включал реализацию 3^3 -факторного эксперимента, где в качестве варьируемых параметров приняты: расстояние от сопла до детали (мм), скорость линейного перемещения (мм/сек), скорость вращения заготовки (мм/мин), а выходными величинами являлась адгезионная прочность (y_1), содержание карбидной фазы WC в покрытии (y_2), рисунок 3.

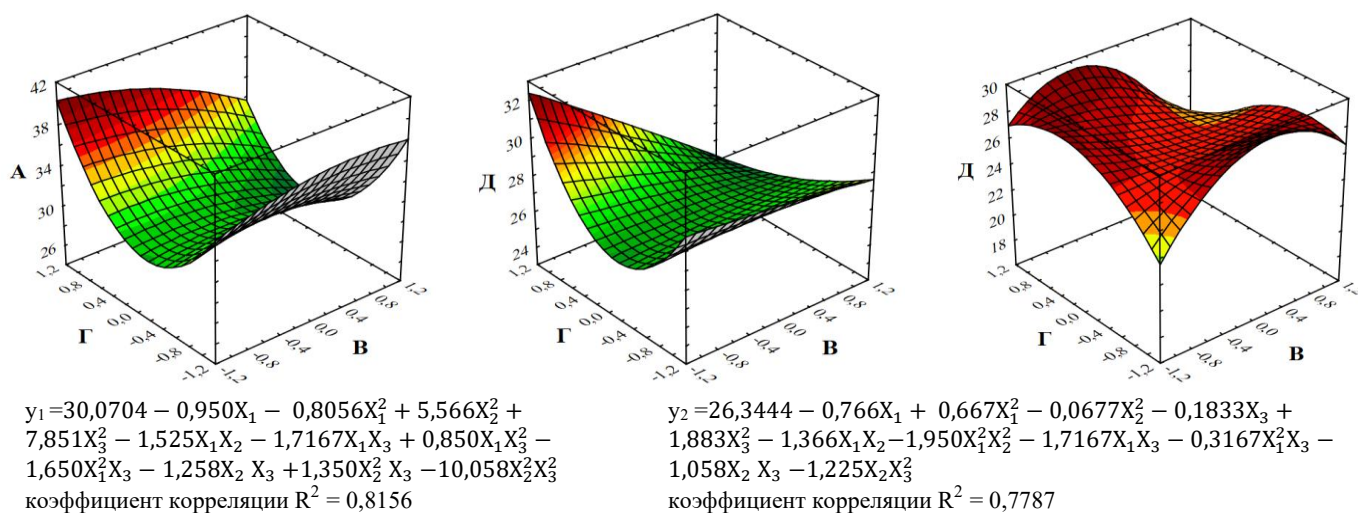


Рисунок 3 – Результаты статистической обработки данных для процесса оптимизации режима ХГТН упрочняющего покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC: а – адгезионная прочность (МПа); б – скорость линейного перемещения (мм/сек); в – расстояние от сопла до детали (мм); г – скорость вращения заготовки (мм/мин); д – содержание карбидной фазы WC в покрытии (%)

Исследования микроструктуры оптимального, с морфологической точки зрения, состава упрочняющего покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC показали, что в результате применения мелкодисперсных порошковых композиций WC сферической формы размером 15-30 мкм получены повышенные показатели плотности упаковки частиц между ламелями никелевой матрицы, уменьшен общий показатель пористости до 2,45%, снижено содержание окислов, как в объеме покрытия, так и на границе слоев.

В рамках проведенного исследования найдены ключевые составы для формирования покрытия, оптимальные параметры процесса их напыления, а также значения выходных характеристик (таблица 1).

Таблица 1 – Оптимальные параметры технологического процесса формирования упрочняющего покрытия системы

Буферный слой			Состав и морфология WC			Параметры напыления			Выходные характеристики		
Размер фракции, мкм	Температура термической активации, °C	Шероховатость поверхности (Ra), мкм	Размер фракции WC, мкм	Форма порошка	Содержание карбида в матрице, %	Расстояние сопла от детали, мм	Линейное перемещение сопла, мм/с	Скорость вращения заготовки, мм/мин	Содержание карбидной фазы WC в покрытии, %	Пористость, %	Адгезионная прочность, МПа
90	150	3,2	15	Сферическая	30	130	25	100	29,1	2,45	39,9

Спектральным методом определен химический состав поверхностного слоя на основе разработанного покрытия: 59% Ni; 28,9% W; 5,4% Cr; 1,7% Fe; 1,2% B; 2,4% Si; 1,4% C.

В разделе 3 «Исследование закономерностей структурообразования в поверхностном слое при напылении» представлены результаты структурных исследований после различных режимов напыления. Металлографические исследования выполняли на цифровом оптическом микроскопе Olympus DSX100 в соответствии с требованиями ГОСТ 5639, ГОСТ 10243. Для детального изучения морфологии поверхности применяли растровую электронную микроскопию на микроскопе JEOL JSM-6000, работающем в низковакуумном режиме. Фазовый состав покрытий, включая содержание карбидных фаз, определяли на минидифрактометре МД-10 при напряжении 25 кэВ. Оценку пористости проводили по стандартизированной методике ASTM E2109-01 (Метод А) с использованием микроскопа Nikon Eclipse, что обеспечило высокую точность измерений.

Сравнительный металлографический анализ структуры и пористости покрытия до и после оптимизации состава и режимов нанесения покрытия (рисунок 4), показал, что в результате реализации установленных режимов напыления были достигнуты улучшенные показатели содержания карбидной фазы WC в покрытии благодаря более плотному и равномерному распределению частиц в покрытии.

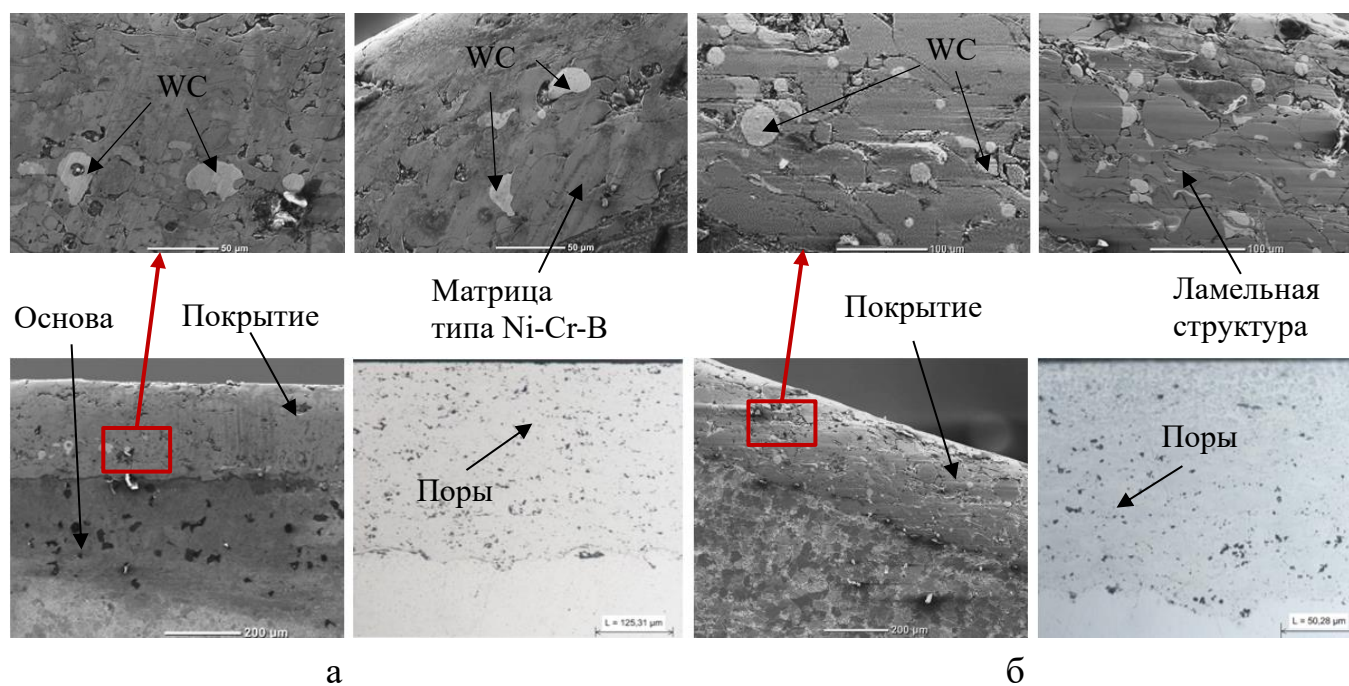
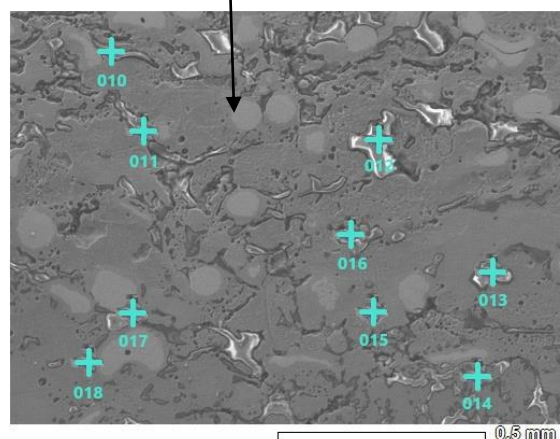
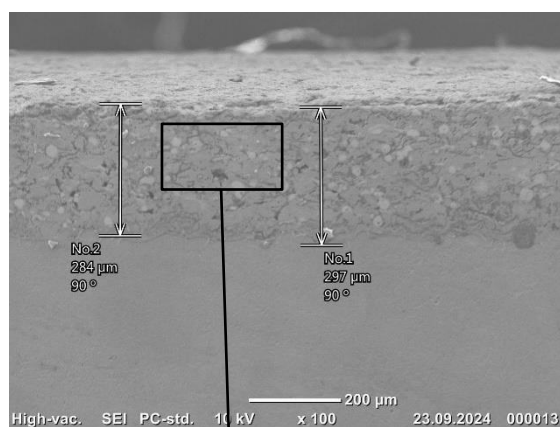


Рисунок 4 – Сравнительный анализ структуры и пористости до и после оптимизации процесса ХГТН разработанной порошковой композиции системы Ni-Cr-B-Si-WC: а – до оптимизации, б – напыление по оптимальным параметрам

Анализ структуры покрытия до оптимизации показал, что карбид вольфрама представлен дроблеными частицами с неравномерным распределением. Данные частицы формируют полости в карбидном пространстве, что способствует выкрашиванию карбида и повышению пористости покрытия. После процесса оптимизации WC представлен сферическими гранулами, имеющими размер, идентичный исходной фракции до 15 мкм. Это свидетельствует о том, что

напыляемые частицы при скоростном соударении с подложкой не испытывают пластической деформации критического уровня, вследствие чего их форма и размеры остаются неизменными, что не препятствует свободному формированию плотных ламелей вязкой никелевой составляющей покрытия. Карбиды вольфрама равномерно распределены в связке, не образуют свободных полостей на границе WC – связка. Пористость после оптимизации значительно снижается за счет уменьшения межламельных расстояний.

С целью установления распределения легирующих элементов в напыленном слое, выполнен микрорентгеноспектральный элементарный анализ, результаты представлены на рисунке 5.



№	Атомные доли элементов в %					
	C	Cr	Si	Ni	B	W
001	56,85	-	-	-	-	43,15
002	49,39	-	-	-	-	50,61
003	43,60	-	-	-	-	56,40
004	61,84	-	-	-	-	38,16
005	40,78	3,84	-	-	-	55,38
006	42,71	3,65	1,34	1,64	-	50,66
007	48,81	4,06	-	-	-	47,13
008	45,13	3,52	0,21	0,31	0,05	50,78
009	30,53	2,6	-	0,95	-	65,92
среднее	46,62	3,53	0,77	0,97	0,05	50,91
Стехиометрический состав: WC						
010	20,31	65,29	5,44	8,96	-	-
011	26,67	72,48	-	0,85	-	-
012	13,00	69,27	-	3,05	-	14,68
013	22,49	71,68	1,25	1,42	-	3,16
014	25,92	49,11	3,04	5,57	-	16,36
015	25,27	64,70	2,69	1,38	-	5,96
016	15,86	68,67	-	5,24	0,35	9,88
017	24,10	66,10	-	8,00	-	1,8
018	26,62	58,98	0,77	-	2,37	11,26
среднее	22,24	64,81	1,46	3,83	0,30	7,01
Стехиометрический состав: Cr ₃ C; Cr ₃ W ₃ C						

Рисунок 5 – Микроструктура напыленного слоя с указанием точек определения атомной доли элементов

Анализ покрытия после напыления без термической обработки показал, что состав порошковой композиции обеспечивает формирование структуры на основе ламелей никеля, армированных хромом и бором, по границам ламелей распределены частицы карбида вольфрама (WC), представляющие собой сферические гранулы, имеющие размер в пределах 15 мкм. Стехиометрический расчет установил наличие карбидных фаз WC, Cr₃C, Cr₃W₃C в стехиометрическом соотношении.

Анализ картограмм распределения основных элементов в покрытии показал (рисунок 6), что частицы вольфрама (W) преимущественно формируют контуры сферической формы, а дополнительные легирующие элементы, как (Cr и B) равномерно распределены по всему объёму напыленного слоя.

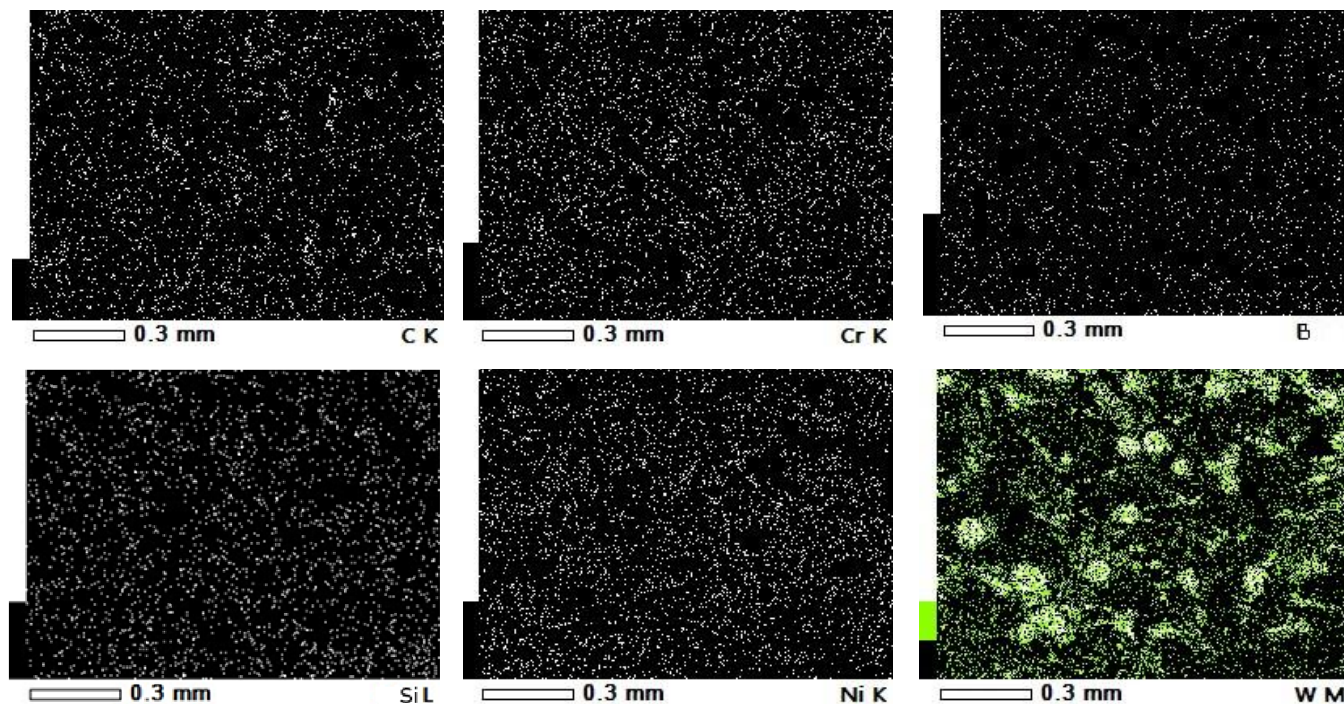
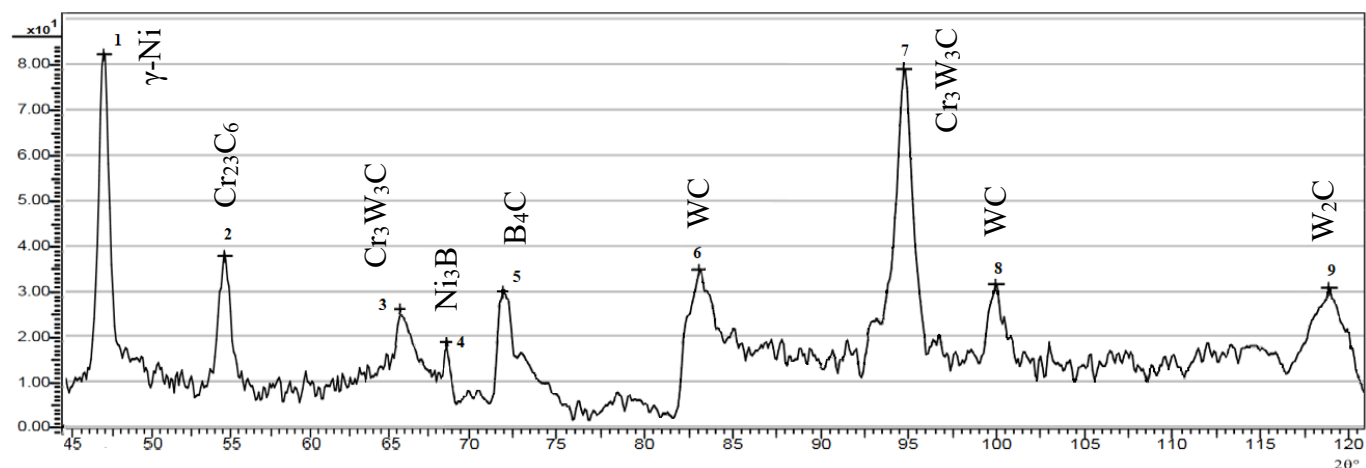


Рисунок 6 – Картограмма распределения основных элементов покрытия Ni-Cr-B-Si-WC

Образованные в процессе напыления и равномерно распределенные в структуре покрытия карбидные и боридные включения представляют собой устойчивые соединения, обеспечивающие повышение эксплуатационных характеристик материала.

Наличие данных фаз в матрице, определяет перспективность применения данного покрытия в условиях интенсивных абразивных и механических нагрузок.

На рисунке 7 представлена рентгенограмма и параметры пиков в напыленном покрытии системы Ni-Cr-B-Si-WC в соотношении 30% упрочняющей карбидной фазы вольфрама и 70% матрицы.



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2θ°	46,92	54,54	68,20	68,80	71,10	82,29	93,90	99,09	118,04
d	1,936	1,682	1,375	1,364	1,325	1,171	1,054	1,013	0,899
фаза	γ-Ni	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₃ W ₃ C	Ni ₃ B	B ₄ C	WC	Cr ₃ W ₃ C	WC	W ₂ C

Рисунок 7 – Рентгенограмма и параметры пиков покрытия

Наличие отдельных карбидных включений типа Cr₂₃C₆, Cr₇C₃, Cr₃W₃C, B₄C,

содержание которых является определяющим фактором дополнительного увеличения твердости, износостойкости напыленного покрытия подтверждены данными рентгенофазового анализа.

В разделе 4 «Анализ влияния режимов термической обработки на структуру и свойства материала с покрытием» продемонстрирована возможность управления фазовым составом и морфологией покрытия термическим воздействием. Термическая обработка покрытия Ni-Cr-B-Si-WC применялась с целью повышения эксплуатационных характеристик за счет увеличения адгезионной прочности, снижения внутренних напряжений и формирования более плотной lamellarной структуры.

Термическую обработку выполняли по режимам: нагрев в интервале температур 1000-1200 °С, выдержка и охлаждение в закалочных средах (термат, масло). Твердость, износостойкость и адгезионные характеристики покрытия до и после термической обработки оценивали в соответствии с требованиями отечественных и международных стандартов. Трибологические испытания осуществлялись на машине трения СМЦ-2 методом сухого трения согласно нормативным требованиям ASTM G65. В качестве контртела использовали ролик из закаленной инструментальной стали У8 с твердостью 60 HRC, контактирующий с испытуемым образцом при различных скоростях вращения: 500, 750 и 1000 мин⁻¹. Оценку адгезионной прочности покрытий проводили клеевым методом в полном соответствии со стандартом ASTM C633-13.

Таблица 3 – Режимы термической обработки материала с покрытием

Среднее значение	Температура нагрева под закалку, °С									
	1000		1050		1100		1150		1200	
	Термат	Масло	Термат	Масло	Термат	Масло	Термат	Масло	Термат	Масло
Убыль массы, грамм	0,08	0,09	0,08	0,7	0,01	0,02	0,01	0,01	0,07	0,1
Пористость, %	4,20	4,38	4,09	4,11	2,15	2,01	1	2,70	4,52	4,78
Адгезионная прочность, МПа	35,1	34,5	34,4	37,6	39,5	40,5	42,2	39,8	23,5	21,5

В результате применения термической обработки (закалка в водополимерную среду «Термат» с температуры 1150 °С), получены повышенные показатели адгезионной прочности за счет частичного переплавления подслоя с основным металлом. Микроструктура образцов с композиционным покрытием Ni-Cr-B-Si-WC до и после закалки с 1150 °С представлена на рисунке 8.

Структура системы Ni-Cr-B-Si-WC до термической обработки характеризовалась преимущественным содержанием γ -твердого раствора на основе Ni в виде протяженных ламелей, по границам которых усвоены частицы карбида WC, представляющие собой сферические гранулы, имеющие размер в пределах 10-15 мкм. Микротвердость основы покрытия (Ni-Cr-B) составила порядка 550 HV_{0,1}, включений типа WC - 2500 HV_{0,1}. После термической обработки наблюдается увеличение содержания карбидных фаз и протяженности переходной зоны благодаря частичному оплавлению и диффузии компонентов покрытия, преимущественно Ni и Cr в стальную основу. В переходном слое глубиной (15-25 мкм), наблюдается диффузия железа из основы в покрытие, а никеля, хрома и др. элементов из покрытия в основу.

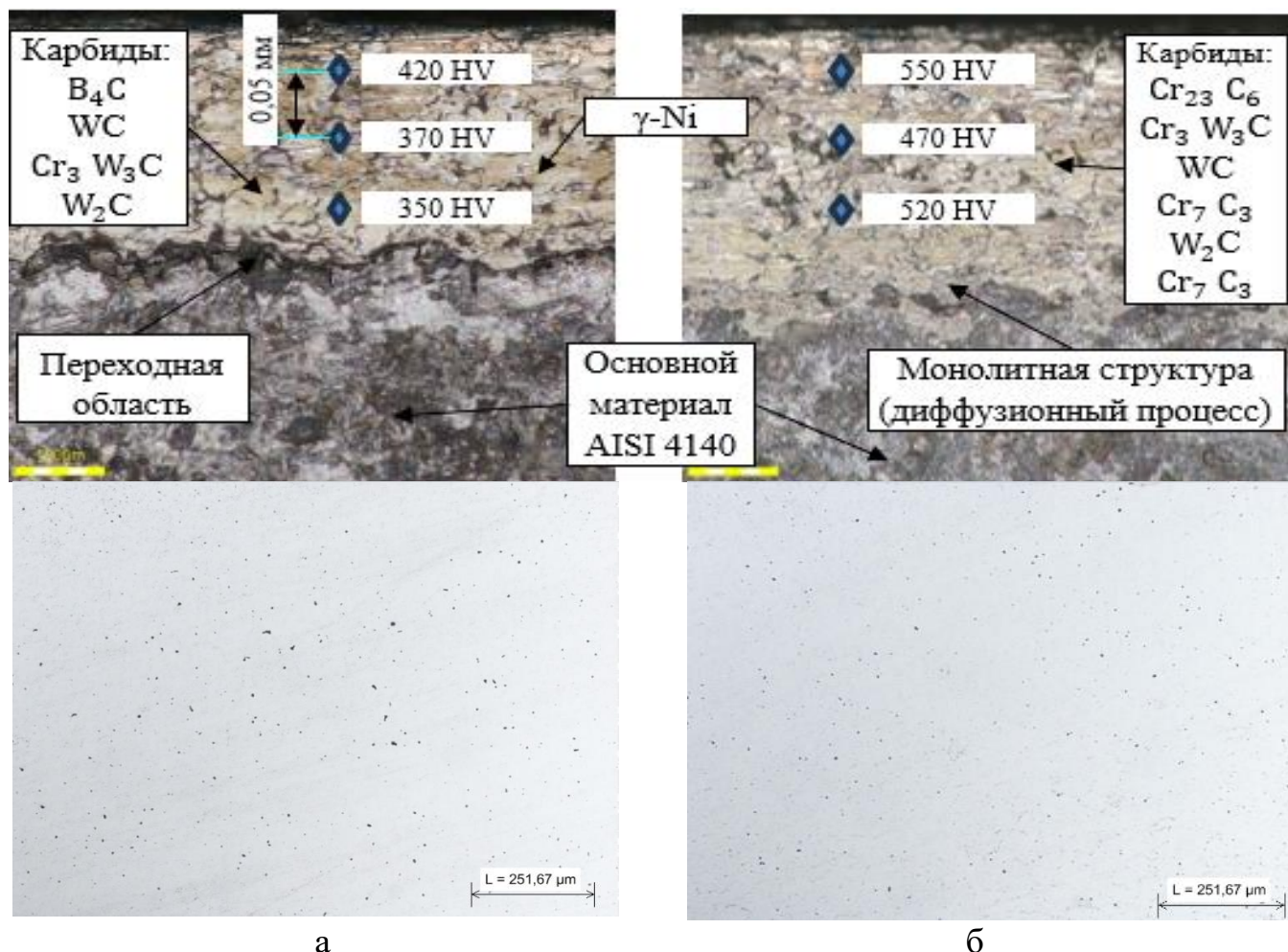
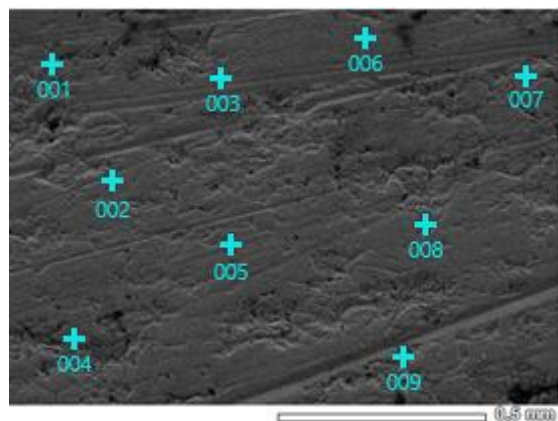
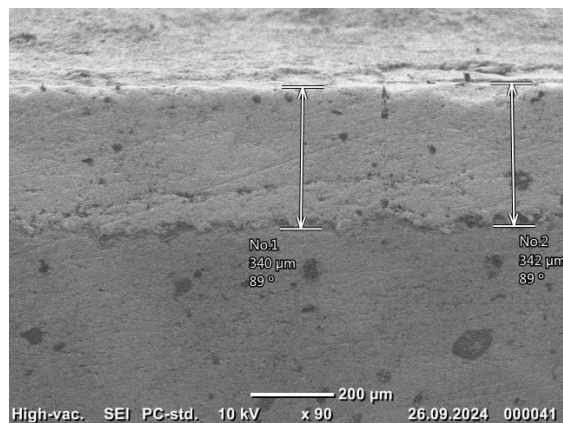


Рисунок 8 – Микроструктура и характер распределения пористости образцов с покрытием: а – до термической обработки, б – после закалки в «Термат» с 1150 °С

Термическая обработка оказала благоприятное влияние на снижение пористости покрытия. Данный факт подтверждает положительный эффект от процесса спекания компонентов матрицы покрытия, основанный на увеличении площади контакта и более полном «обрамлении» карбидов вольфрама никелевыми ламелями, а также дополнительном выделении из металлической основы мелких карбидных включений на основе хрома, армирующих никелевую матрицу и вносящих дополнительный вклад в повышение микротвердости покрытия на этапе термической обработки. В результате оплавления покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC при температуре 1150 °С существенно увеличилась плотность износостойкого слоя, слоистость отсутствует, мелкодисперсная карбидная фаза равномерно распределена по объему рабочего слоя. Граница раздела фаз размыта, наблюдается интенсивная диффузия легирующих элементов из покрытия в основу.

В процессе оплавления при термическом воздействии в микроучастках жидкого состояния сформировались метастабильные карбидные фазы, расширяющие область растворимости легирующих элементов в твердом состоянии и измельчающие элементы ламельной структуры. В данном случае причиной образования метастабильных фаз является насыщение кристаллизующегося γ - твердого раствора на основе Ni легирующими элементами (W, Cr, B) на этапе термической обработки, что подтверждено результатами микрорентгеноспектрального анализа, представленного на рисунке 9.



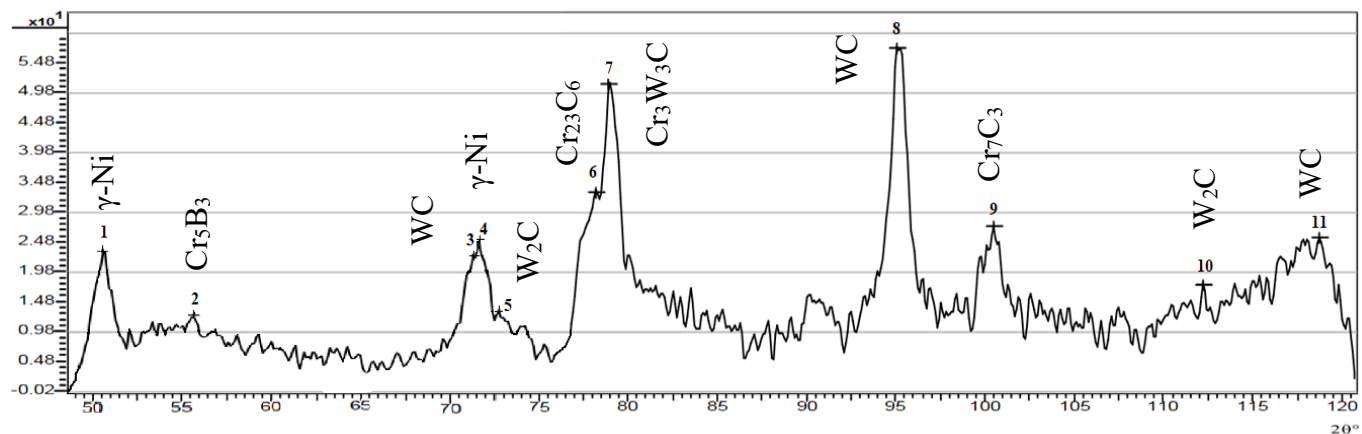
№	Атомная доля элементов в %						
	C	Si	Cr	Fe	Ni	B	W
001	24,81	1,99	5,55	3,19	21,8	-	42,66
002	18,01	2,27	4,29	3,59	27,5	-	44,34
003	24,23	2,56	5,34	-	15	1,11	51,76
004	26,46	2,17	5,19	4,24	12,7	-	49,24
005	19,39	3,37	4,79	1,02	34,1	1,34	35,99
006	28,04	2,54	5,20	1,03	14,2	-	48,99
007	24,84	2,31	4,70	1,04	35,0	-	32,11
008	19,58	2,11	5,67	-	35,1	-	37,54
009	22,48	2,14	5,65	-	20,9	-	48,83
среднее	23,31	2,38	5,15	1,56	24,0	0,27	43,27
Стехиометрический состав: W ₂ C							
010	33,36	2,17	5,00	1,08	23,0	1,11	34,28
011	17,22	3,38	4,91	1,74	35,1	-	37,65
012	29,49	2,44	5,46	-	34,1	1,28	27,23
013	39,77	1,85	6,38	-	23,2	1,09	27,71
014	30,81	2,05	15,0	1,03	23,8	-	27,31
015	22,91	1,93	4,28	1,09	36,0	1,29	32,50
016	26,32	1,81	5,16	-	34,0	1,27	31,44
017	24,55	1,84	5,08	1,04	43,0	1,12	23,37
018	26,41	1,71	4,76	-	27,4	-	39,72
среднее	27,87	2,13	6,22	1,19	31,1	1,19	31,24
Стехиометрический состав: WC; (Cr,W)C							

Рисунок 9 – Микроструктура напыленного слоя с указанием точек определения атомной доли элементов после закалки в «Термат» с 1150 °С

Термическая обработка обеспечила формирование монолитной структуры с растворением карбидных включений в исходной матрице. При толщине покрытия 0,34 мм дефектов не обнаружено. Стехиометрический расчет установил наличие карбидных фаз: W₂C; WC; (Cr,W)C.

Результаты рентгенофазового анализа покрытия системы Ni-Cr-B-Si-WC после термической обработки позволили зафиксировать множественные мелкие карбидные включения, состав которых соответствует сложным карбидам типа Cr₂₃C₆; Cr₇C₃; Cr₃W₃C; γ-Ni; Cr₅B₃; B₄C выделившимся на стадии термической обработки и повышающим износостойкость покрытия.

Известно, что наличие в напыленном слое никелевой матрицы в виде γ- твердого раствора способствует повышению вязкости разрушения и износостойкости покрытия, а наличие в металлической основе высокопрочных карбидных фаз должно обеспечить повышенную прочность и износостойкость покрытия в условиях граничного трения и трения без смазки. Для определения влияния термической обработки на износостойкость покрытия провели испытания на сопротивление сухому изнашиванию в паре трения металл-покрытие. Анализ зависимости массового износа от режимов термической обработки свидетельствует, что для покрытий с 30%-ным содержанием упрочняющей карбидной фазы WC, полученных методом газопламенного напыления; последующая термическая обработка в температурном диапазоне 1100-1150 °С обеспечивает следующие эксплуатационные характеристики: убыль массы - 0,01 г/см²; адгезионная прочность - 42,2 МПа; пористость – 1 %.



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2θ°	49,15	53,24	66,11	66,31	67,23	78,18	78,89	95,06	100,47	112,21	118,71
d	1,853	1,720	1,413	1,409	1,392	1,222	1,213	1,045	1,002	0,928	0,896
фаза	γ-Ni	Cr ₅ B ₃	WC	W ₂ C	B ₄ C	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₃ W ₃ C	WC	Cr ₇ C ₃	W ₂ C	WC

Рисунок 10 – Рентгенограмма и параметры пиков покрытия Ni-Cr-B-Si-WC после термической обработки

Сравнительные исследования износостойкости показали, что благодаря упругопластическим свойствам полученного композиционного покрытия, после термической обработки скорость изнашивания снижается в 1,2-1,3 раза. При этом, процесс оплавления газотермических покрытий не только усиливает эффект износостойкости, но и улучшает сцепление с подложкой за счет интенсификации диффузионных процессов на границе покрытия с основным металлом, а также благодаря релаксации неблагоприятных растягивающих напряжений, которые присутствуют в исходных покрытиях.

В разделе 5 «Оценка напряжённого состояния и эксплуатационных характеристик материала с вольфрамсодержащим покрытием» описан анализ распределения напряжений в готовом изделии «Шток компрессора», проведённый посредством прибора «Stressvision», в основе работы которого лежит метод магнитоанізотропного анализа механических напряжений. Схема измерения РГМН (разность главных механических напряжений) представлена на рисунке 11.

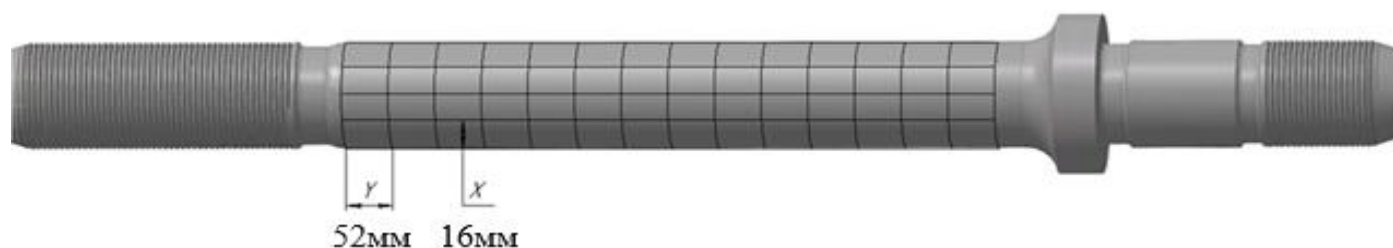


Рисунок 11 – Схема измерения разности РГМН

Результаты замеров разности главных механических напряжений, полученных с помощью сканера (индикатора) механических напряжений «Stressvision», приведены на рисунке 12.

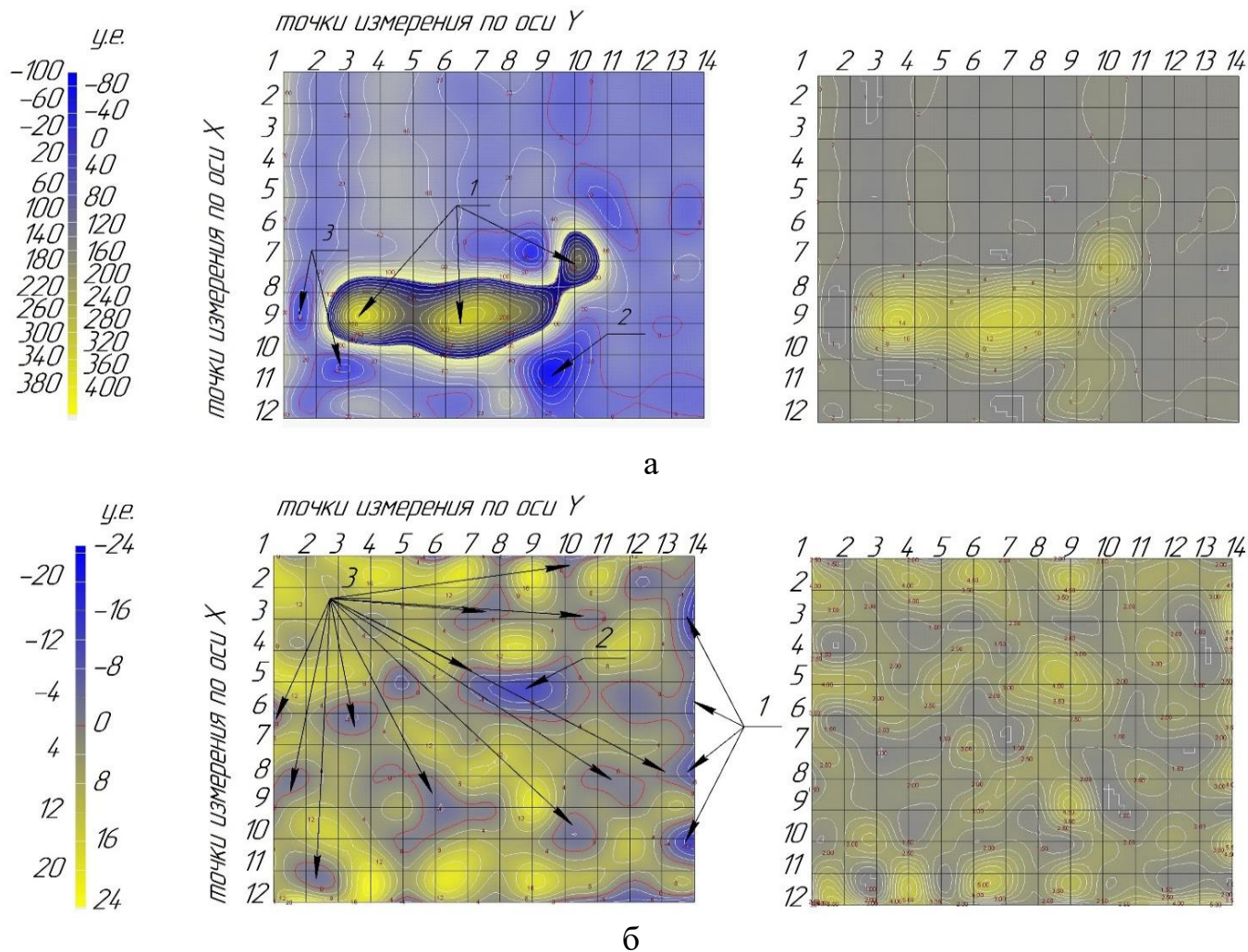


Рисунок 12 – Картограммы распределения РГМН: а – оригинальное изделие (шток Dresser Rand бывший в эксплуатации); б – экспериментального образца напыленного по оптимизированным режимам: 1 – зона краевых дефектов, 2 – зона сжимающих напряжений, 3 – компенсационные зоны

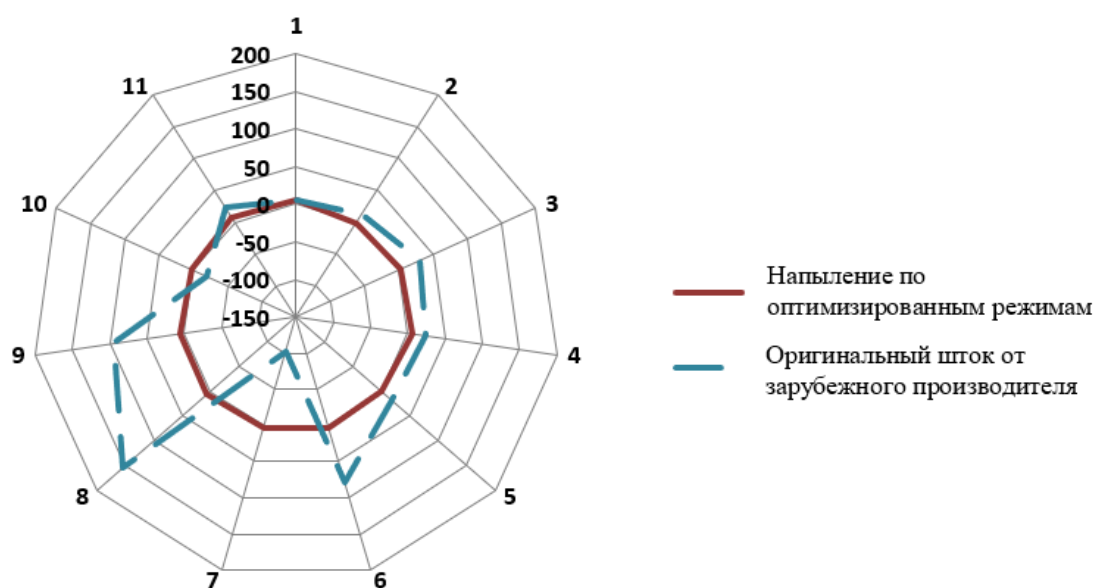


Рисунок 13 – Сравнительный анализ распределения средних остаточных напряжений в опытном и оригинальном изделии (шток Dresser-Rand)

Результаты обработки данных свидетельствуют о равномерном распределении разности главных механических напряжений по поверхности опытного изделия «Шток компрессора» с нанесением разработанного покрытия Ni-Cr-B-Si-WC. В оригинальном изделии идентифицированы две локальные зоны напряженного состояния: зона 8 с максимальным значением РГМН - 346,84 у.е. и зона 6 с РГМН - 225,5 у.е. При этом базовый уровень распределения напряжений сохраняет стабильность в диапазоне 10-20 у.е. Полученные данные свидетельствуют, что у опытного натурного изделия с поверхностным упрочнением методом холодного газопламенного напыления в процессе нанесения покрытия и последующей механической обработки формируются незначительные равномерные остаточные механические напряжения в зоне покрытия, не превышающие значения РГМН - 10 у.е., что позволяет обоснованно рекомендовать разработанный состав покрытия и способ его нанесения для проведения опытно-промышленных испытаний.

Математическое моделирование нагрузок в программном комплексе ANSYS позволило детально изучить поведение покрытия Ni-Cr-B-Si-WC в условиях эксплуатационных нагрузок. При моделировании нагружения соединения с полной затяжкой резьбового соединения «шток-гайка» установлено, что распределение напряжений равномерно по всей площади напыленного покрытия. Средние нормальные напряжения вдоль оси штока не превышают 32,46 МПа (рисунок 14).

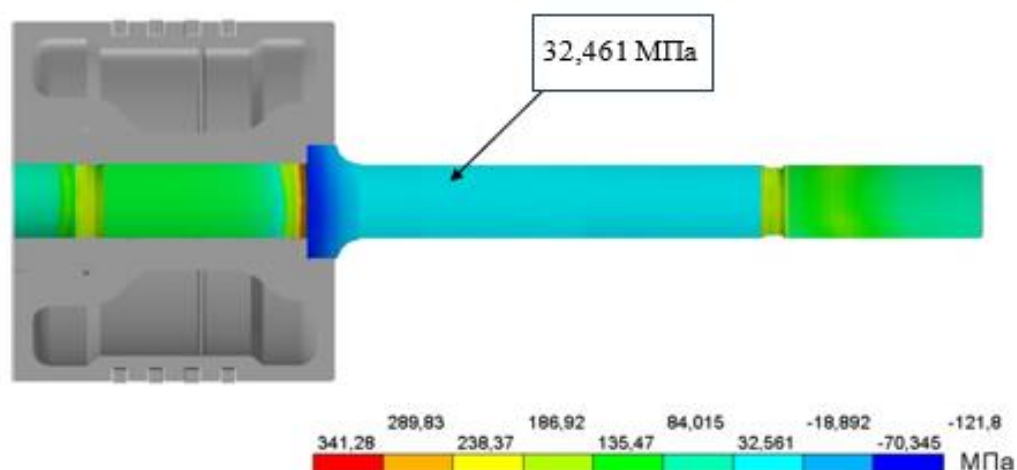


Рисунок 14 – Средние нормальные напряжения

Согласно нормативной документации (API, внутренними спецификациями CPI и Dresser-Rand) изделие с покрытием WC допускается к эксплуатации при контактной нагрузке 6,86 МПа, давлении 6,67 МПа и температуре 150 °С в среде, содержащей 2% H₂S, 2% CO₂ и до 1% водяного пара. Результаты разработки были успешно апробированы в данных условиях на предприятиях ООО «Технология» и ООО «Газпром переработка» (г. Оренбург). Опытная эксплуатация продемонстрировала не только соответствие всем техническим требованиям, но и значительный экономический эффект. Применение импортозамещающей технологии на предприятиях нефтегазового сектора позволило сократить продолжительность ремонтного цикла компрессорного оборудования с 270 до 45 рабочих дней, что подтверждает высокую эффективность предложенного состава покрытия и метода его нанесения (*подтверждено актами внедрения с предприятий*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработано вольфрамсодержащее покрытие порошковой композиции системы Ni-Cr-B-Si-WC (59,0% Ni, 28,9% W, 5,3% Cr, 1,7% Fe, 1,2% B, 2,5% Si, 1,4% C) дисперсностью 15-30 мкм. Сформирована армированная никелевая металлическая основа с равномерным распределением дисперсных карбидных включений WC и устойчивых карбидных и боридных фаз.

2. Определены основные оптимальные параметры газопламенного напыления (расстояние от сопла горелки до детали порядка 130 мм, скорость линейного перемещения - 25 мм/сек, скорость вращения заготовки - 100 мм/мин, угол установки сопла к напыляемой поверхности - 90°), обеспечивающие содержание карбидной фазы WC в покрытии в пределах 29,1 - 30 % и позволяющие достигнуть значений адгезионной прочности в пределах 36,0 - 39,9 МПа.

3. Выявлено, что с уменьшением размерности фракции карбида вольфрама (WC) с 120 до 15-30 мкм увеличивается общее содержание усвоенных карбидов в матрице. Установлено, что карбидное упрочнение никелевой матрицы частицами дисперсного сферического карбида вольфрама WC позволяет улучшить послойное формирование lamellar покрытия с образованием карбидов $Cr_{23}C_6$, Cr_3W_3C , WC, повысить плотность и однородность структуры, уменьшить объем свободных микропустот на границе WC-связка с 10 до 1 %.

4. Разработан оптимальный режим термической обработки опытной порошковой композиции Ni-Cr-B-Si-WC. Определено, что за счет закалки с температуры 1150 °C в водополимерную среду «Термат», происходит формирование уплотненной lamellar структуры металлической матрицы с равномерным карбидным упрочнением. Прирост износостойкости после термической обработки обеспечивается за счет упругопластического состояния lamellar структуры, целенаправленного формирования в рабочем слое сложных дисперсных карбидных и боридных: Cr_7C_3 , Cr_5B_3 и B_4C , дополнительно выделяющихся на этапе термического упрочнения и армирующих вязкую матрицу γ - твердого раствора на основе Ni.

5. Установлено, что фактические остаточные напряжения после реализации технологии получения и поверхностного упрочнения не влияют на работоспособность изделия, так как распределение разности главных механических напряжений на границе металл-покрытие не превышает 20 у.е., что соответствует остаточным напряжениям в пределах 1,3-9,1 МПа, при экспериментально подтвержденной адгезионной прочности покрытия 42,2 МПа.

6. Разработанный состав и способ нанесения покрытия Ni-Cr-B-Si-WC внедрен в ремонтное производство предприятия сервисного машиностроения ООО «Технология» с целью упрочнения деталей нефтегазовой отрасли предприятия «Оренбургский газоперерабатывающий завод». В результате применения импортозамещающей технологии упрочнения деталей компрессорного оборудования прогнозируется сокращение сроков ремонтных простоев с 270 до 45 рабочих дней для каждого элемента установки.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

- в рецензируемых научных журналах из «Перечня...» ВАК:

1. **Плесовских А.Ю.** Влияние термической обработки на структуру и свойства вольфрамсодержащего покрытия рабочей части нефтегазового оборудования / С. Е. Крылова, А. Ю. Плесовских, И. А. Курноскин, И. Ш. Тавтилов // Черные металлы, 2022. - № 12 (1092). - С. 36-42.

2. **Плесовских А.Ю.** Исследование структуры и свойств износостойкого газотермического покрытия с содержанием вольфрама / А. Ю. Плесовских, С. Е. Крылова // Frontier Materials & Technologies. – 2023. – № 2. – С. 89-101.

- в научных журналах, индексируемых в базах SCOPUS, WoS:

3. **Plesovskikh A.Y.** Import-substituting technology for manufacturing parts of the oil and gas industry with the application of tungsten based wear-resistant coatings (Импортозамещающая технология изготовления деталей нефтегазовой отрасли с нанесением износостойких покрытий на основе вольфрама) / S.E. Krylova, A. Y. Plesovskikh, I.A. Kurnoskin // Materials Today: Proceedings, 2021. - Pp. 1595-1598.

4. **Plesovskikh A.Y** The study of the structure and properties of a wear-resistant gas-thermal coating containing tungsten (Исследование структуры и свойств износостойкого газотермического покрытия, содержащего вольфрам) // Frontier Materials & Technologies. - 2023. - N. 2. - P. 89-101.

5. **Плесовских, А. Ю.** Technology of Obtaining and Mechanical Processing of Resistant Powder Coatings of Ni-Mo-AL System (Технология получения и механической обработки стойких порошковых покрытий системы Ni-Mo-AL) / A. Y. Plesovskikh, S. E. Krylova, V. I. Yurshev [et al.] // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910 KEM. – P. 464-471.

- охранный документ на результаты интеллектуальной деятельности:

6. Пат.2784024 С1 РФ. Способ получения вольфрамсодержащего покрытия на металлических деталях нефтегазового машиностроения / **А.Ю. Плесовских**, С.Е. Крылова, В.А. Завьялов и др.; заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Технология». - № 2022113804; заявл.24.05.2022; опубл. 23.11. 2022.

- в прочих изданиях:

7. **Плесовских А.Ю.** Импортозамещающая технология изготовления деталей нефтегазодобывающей отрасли с нанесением износостойких покрытий на основе вольфрама / А. Ю. Плесовских, С. Е. Крылова, С. П. Оплеснин // Вестник современных технологий. – 2019. – № 2(14). – С. 9-14. – EDN WJOBJF.

8. **Плесовских А.Ю.** Разработка металлургической порошковой композиции для восстановления деталей нефтегазодобывающей отрасли / А. Ю. Плесовских, С. Е. Крылова, С. П. Оплеснин // Уральская школа молодых металлургов : Сборник материалов XX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых, Екатеринбург, 03–07 февраля 2020 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Ключевой Центр превосходства «Материаловедение перспективных металлсодержащих материалов и технологий их обработки». – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2020. – С. 504-507.

9. **Плесовских, А. Ю.** Импортозамещающая технология изготовления деталей с нанесением износостойкого покрытия на основе вольфрама / А. Ю. Плесовских, С. Е. Крылова // Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности: Сборник материалов X Международной школы, посвященной 10-летию лаборатории "Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы" и LXIII Международной конференции, Тольятти, 13–17 сентября 2021 года. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2021. – С. 56-57.

10. **Плесовских, А. Ю.** Влияние гранулометрического состава и процентного содержания WC на свойства газопламенного покрытия / А. Ю. Плесовских // Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы: Сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Оренбург, 16–17 июня 2022 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2022. – С. 78-82