

На правах рукописи



Юргин Александр Борисович

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ, УПРОЧНЕННЫХ ТУГОПЛАВКИМИ
ЧАСТИЦАМИ**

Специальность: 2.6.17 – Материаловедение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Руктуев Алексей Александрович

Официальные оппоненты: **Астафурова Елена Геннадьевна**,
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики прочности
и материаловедения им. В.Е. Панина
Сибирского отделения Российской академии
наук, лаборатория физики иерархических
структур в металлах и сплавах, главный
научный сотрудник.

Юрченко Никита Юрьевич,
кандидат технических наук, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный морской
технический университет», отдел дизайна
металлических материалов, старший научный
сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный
индустриальный университет»
(г. Новокузнецк).

Защита диссертации состоится «17» декабря 2026 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета, а также на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «___» октября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент

Андрей Геннадиевич Тюрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Интенсивное развитие современного машиностроения и близких к нему отраслей промышленности сопровождается значительным повышением требований к деталям машин, работающим в условиях изнашивания, высоких механических нагрузок, агрессивных сред и повышенных температур. В процессе эксплуатации поверхностные слои многих деталей подвергаются различным видам воздействий, что приводит к их износу и, в результате, к преждевременному отказу оборудования. Одним из наиболее эффективных и экономически рациональных путей решения отмеченной проблемы является применение защитных покрытий, наплавляемых на поверхность более доступных конструкционных материалов. Такие покрытия могут обеспечить необходимый комплекс эксплуатационных свойств, тем самым значительно повысить долговечность и надежность всего изделия.

В последние два десятилетия одно из важных направлений материаловедения связано с активным развитием концепции высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС) – нового класса материалов, состоящих из пяти и более элементов, взятых в равных или близких к равным концентрациях. ВЭС характеризуются высокими показателями прочности и пластичности в широком диапазоне температур, в том числе криогенных, термической стабильностью, а также коррозионной и радиационной стойкостью. Отмеченный комплекс свойств обусловлен четырьмя фундаментальными эффектами, а именно: эффектом высокой энтропии, искажением кристаллической решетки, замедленной диффузией и «коктейльным» эффектом. Последний термин закрепился в зарубежной литературе, но по сути является синонимом синергетического эффекта.

Наиболее изученным составом среди сплавов на основе $3d$ -переходных элементов является сплав системы $CoCrFeMnNi$ (сплав Кантора). Однако его прочностные характеристики в отожженном состоянии (предел текучести ≈ 200 – 300 МПа) недостаточны для многих практических приложений.

Для достижения требований по уровню прочности, предъявляемых к ВЭС, применяют традиционные методы упрочнения. Одним из наиболее эффективных решений является упрочнение матрицы ВЭС тугоплавкими керамическими частицами карбидов, боридов или нитридов. Формирование композиционных материалов на основе пластичной матрицы, армированной керамическими частицами, может обеспечить сочетание высокой прочности, твердости и износостойкости.

Для нанесения композиционных покрытий с матрицей из ВЭС используют различные высокоэнергетические методы, в том числе лазерную, плазменную и электронно-лучевую наплавку, а также процессы газотермического напыления. Особый интерес представляет метод вневакуумной электронно-лучевой наплавки (ВЭЛН), обладающий рядом ключевых преимуществ. К их числу относится высокая производительность ($4,5 \text{ м}^2/\text{ч}$), возможность формирования покрытий значительной толщины (более $1,5 \text{ мм}$ за один проход) и снятие ограничений на размер обрабатываемых деталей (благодаря работе в воздушной атмосфере). Однако, несмотря на очевидные перспективы, потенциал отмеченного метода в отношении композиционных покрытий на основе ВЭС раскрыт в недостаточной степени. Количество систематических исследований в данной области остается ограниченным, а вопросы, связанные с влиянием параметров ВЭЛН на фазовый состав, структуру и конечные свойства композиционных покрытий, требуют детального изучения.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена практической необходимостью создания износостойких и жаростойких защитных покрытий для изготовления деталей машин ответственного назначения. Представленная к защите диссертационная работа обладает высокой научной значимостью, связанной с изучением фундаментальных основ формирования композиционных материалов на основе высокоэнтропийных сплавов методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки.

Диссертационная работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете в рамках гранта Российского научного фонда № 23-79-00066 «Разработка научных и технологических основ проектирования многофункциональных покрытий с использованием технологии наплавки мощным электронным пучком, выведенным в воздушную атмосферу» (<https://rscf.ru/project/23-79-00066/>). Отдельные этапы работы выполнены при поддержке гранта № 22-79-00189 «Исследование композиционных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов, упрочненных тугоплавкими частицами» и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект *FSUN-2024-0005*) «Структурные преобразования в тонких поверхностных слоях металлических сплавов при экстремальном тепловом и деформационном воздействиях». При выполнении исследования использовалось оборудование ЦКП НГТУ «Структура, механические и физические свойства материалов» (№ 13.ЦКП.21.003).

Степень разработанности темы исследования

В Российской Федерации исследования в области высокоэнтропийных сплавов представляют интерес для различных научных коллективов. Среди ключевых центров можно выделить НИУ БелГУ, Сибирский государственный индустриальный университет, Южно-Уральский государственный университет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Институт сильноточной электроники СО РАН, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН и ряд других организаций.

Фундаментальные исследования методов получения и свойств ВЭС выполняются А.А. Ремпелем (ИМЕТ УрО РАН), М.Н. Самодуровой и Е.А. Трофимовым (ЮУрГУ) с соавторами. В работах этих специалистов описываются задачи термодинамического анализа и практических методов синтеза многокомпонентных сплавов. В УрГПУ исследования проводятся Б.А. Русановым. Разработка объемных наноструктурированных материалов выполняется в СПбГМТУ при участии С.В. Жеребцова, Н.Д. Степанова, Н.Ю. Юрченко, Д.Г. Шайсултанова и в НПА «Технопарк АТ» Г.А. Салищевым.

Томская школа, представленная Ю.И. Чумляковым, З.В. Победенной и Д.А. Куксгаузенем (СФТИ ТГУ), специализируется на эффектах памяти формы в ВЭС. В ИСМАН РАН В.Н. Саниным для решения поставленных задач привлекаются методы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Эволюция структуры и фазового состава сплавов при внешних воздействиях изучается коллективом специалистов СибГИУ (Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Р.Е. Крюков) и Е.Г. Астафуровой (ИФПМ СО РАН).

Одно из актуальных научных направлений связано с изучением наплавленных слоев, полученных методами сварки и аддитивного производства сплавов систем $CoCrFeMnNi$ и $Al_xCoCrFeNi$. Исследования в этом направлении проводятся

Ю.А. Шляровой и С.В. Коноваловым (СибГИУ), а также М.Н. Самодуровой (ЮУрГУ).

За рубежом исследования ВЭС активно развиваются научными группами *J.W. Yeh* (Тайвань, автор термина «высокоэнтропийные сплавы») и *B. Cantor* (Великобритания). Систематизация подходов к разработке составов сплавов, анализ их механических свойств и перспективы применения представлены в обзорных работах *B.S. Murty, S. Ranganathan, D.B. Miracle* и *O.N. Senkov*. Обзорные исследования, посвященные фазовым равновесиям, критериям стабильности твердых растворов и деформационному поведению ВЭС, выполнены *M.C. Gao, R. S. Mishra*, а также коллективами под руководством *S. Kumar* и *A. Biswas*.

Большинство опубликованных в настоящее время работ связано с использованием методов получения и механических свойств сплавов типа *CoCrFeMnNi* и *Al_x-CoCrFeNi*. Среди способов формирования покрытий и пленок на основе данных ВЭС подробно изучены методы лазерной наплавки, детонационного напыления, плазменного осаждения. Однако механизмы формирования композиционных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки рассмотрены крайне ограниченно. Систематические исследования совместного влияния пониженного содержания железа и варьруемой концентрации алюминия на структуру, фазовый состав и свойства сплавов до сих пор не проводились.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы заключается в повышении комплекса свойств покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов *CoCrFeMnNi* и *Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni* введением упрочняющих карбидных частиц.

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

1. Методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки сформировать на поверхности углеродистых сталей композиционные покрытия из высокоэнтропийных сплавов *CoCrFeMnNi* и *Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni*, упрочненных карбидными частицами.
2. Исследовать влияние состава высокоэнтропийных сплавов, а также типа и концентрации карбидных частиц на структурно-фазовое состояние покрытий на различных масштабных уровнях.
3. Установить влияние типа и объемной доли упрочняющих частиц на комплекс механических и эксплуатационных свойств полученных материалов
4. Исследовать механизмы деградации наплавленных слоев при испытаниях на износо- и жаростойкость.
5. Разработать рекомендации по выбору составов порошковых смесей и режимов наплавки, обеспечивающих формирование покрытий с повышенными механическими, триботехническими характеристиками и жаростойкостью.

Научная новизна:

1. Подтверждена возможность формирования защитных композиционных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки непосредственно из порошков исходных элементов без их предварительной подготовки. Предложенные режимы наплавки обеспечивают формирование однородных по толщине слоев, в которых железо в необходимом количестве поступает из оплавленной электронным пучком низкоуглеродистой стали.

2. Выявлены различные механизмы структурообразования композиционных покрытий на основе сплавов *CoCrFeMnNi* и *Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni* при введении частиц *Cr₃C₂* и *NbC*. Установлено, что в процессе вневакуумной электронно-лучевой

наплавки частицы Cr_3C_2 полностью растворяются с последующей кристаллизацией карбидов Cr_7C_3 . Карбид NbC в структуре сплавов присутствует преимущественно в виде нерастворившихся частиц.

3. Установлены особенности высокотемпературного окисления наплавленных композиционных покрытий. Введение частиц Cr_3C_2 в систему $CoCrFeMnNi$ сопровождается формированием поверхностных пленок на основе оксидов хрома, обеспечивающих трехкратный рост жаростойкости по сравнению с матричным сплавом. В процессе окисления покрытия $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni + Cr_3C_2$ образуется пленка на основе оксидов алюминия и хрома, повышающая жаростойкость в 2,9 раза относительно стали 12X18H10T. Введение в сплав частиц NbC приводит к образованию оксидов на основе ниобия, легко отслаивающихся при перепадах температуры.

4. Показано, что тип и концентрация упрочняющих карбидных частиц в порошковых смесях определяют механизмы деградации наплавленных композиционных покрытий в процессе их изнашивания. Установлено, что введение частиц Cr_3C_2 в порошковую смесь системы $CoCrFeMnNi$ обеспечивает рост износостойкости в условиях сухого трения скольжения более чем на порядок, а в системе $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$ повышает стойкость к изнашиванию о закрепленные частицы абразива на 12,6 %. Независимо от материала матрицы, введение частиц NbC в наплавочные смеси приводит к их выкрашиванию и увеличению интенсивности изнашивания.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Полученные результаты расширяют представления о механизмах структурообразования высокоэнтропийных сплавов $CoCrFeMnNi$ и $Al_xCoCrFe_{0,2}Ni$ ($x = 0,1; 0,3; 0,5$) при введении в них карбидных фаз. Установлено влияние типа и концентрации упрочняющих частиц Cr_3C_2 и NbC на процессы кристаллизации, фазообразования и формирования текстуры в защитных слоях, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки. Систематизированы механизмы упрочнения сплавов $CoCrFeMnNi$ и $Al_xCoCrFe_{0,2}Ni$, определены рациональные концентрации карбидных частиц, обеспечивающие оптимальное сочетание твердорастворного и дисперсионного упрочнения.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Разработаны технологические режимы вневакуумной электронно-лучевой наплавки, обеспечивающие формирование покрытий, ориентированных на эксплуатацию в условиях интенсивного абразивного изнашивания и высокотемпературного окисления в воздушной атмосфере. Определен оптимальный состав композиционного покрытия $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni + Cr_3C_2$, сочетающий твердость на уровне $355 HV_{0,1}$ с повышенной жаростойкостью и износостойкостью при трении о закрепленные частицы абразива.

Результаты работы переданы для практического использования в ООО «Центр технологий литья». Упрочнение рабочих поверхностей пресс-форм для литья под давлением обеспечивает повышение стойкости поверхностного слоя в 1,5–2 раза по сравнению с серийными элементами, обработанными по стандартной технологии (закалка стали с низким отпускком). Разработанный экспериментальный прокатно-волочильный стан для изготовления порошковой проволоки из высокоэнтропийных сплавов создает экспериментальную базу для дальнейших исследований в области

формирования защитных покрытий. Материалы диссертации используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия» в лекционных курсах и лабораторных работах по дисциплинам «Композиционные материалы», «Физические методы исследования материалов», «Специальные стали и сплавы».

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач было использовано современное технологическое и аналитическое оборудование. При выполнении работы применен широкий спектр методов анализа структуры, фазового состава и свойств исследуемых материалов.

Эксперименты, связанные с формированием покрытий, проводились на уникальной научной установке – промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 производства Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, позволяющем выпускать в воздушную атмосферу пучки электронов с энергией 1,4–2,5 МэВ.

Аналитические исследования наплавленных покрытий выполнены на оборудовании центра коллективного пользования НГТУ «Структура, механические и физические свойства материалов», обеспечивающем возможность реализации широкого спектра методов изучения материалов.

Для проведения исследований полученных в работе материалов использовали метод просвечивающей электронной микроскопии на приборе *Tecnai G2 20 TWIN*, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа; метод растровой электронной микроскопии на приборах *Carl Zeiss EVO 50 XVP* с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа *Oxford Instruments X-Act* и *Carl Zeiss SIGMA 300* с приставкой *HKL CHANNEL 5* для анализа дифракции обратно рассеянных электронов; метод световой микроскопии с использованием микроскопов *Carl Zeiss AXIO Observer A1m* и *Carl Zeiss AXIO Observer Z1m*; рентгенофазовый анализ на рентгеновском дифрактометре *ADVIN PowDix 600*; микроиндентирование с применением микротвердомера *Wolpert Group 402 MVD*, а также методы измерения триботехнических свойств в условиях сухого трения скольжения на приборе *Bruker UMT-2* и в условиях трения о закрепленные абразивные частицы.

Пробоподготовка осуществлялась с использованием оборудования, обеспечивающего сохранность структуры исследуемых материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка является эффективным высокопроизводительным методом формирования защитных композиционных покрытий повышенной толщины с однородной структурой на основе высокоэнтропийных сплавов систем $CoCrFeMnNi$ и $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$.

2. В композиционных покрытиях на основе высокоэнтропийных сплавов реализуется два механизма упрочнения, связанные с полным растворением и перекристаллизацией упрочняющих карбидов и неполным растворением частиц, вводимых в наплавочные смеси. Механизм с полной перекристаллизацией обеспечивает комплекс более высоких свойств композиционных покрытий.

3. Повышение жаростойкости композиционных покрытий при введении в наплавочную смесь частиц карбида Cr_3C_2 обусловлено формированием сплошной оксидной пленки на основе хрома. Введение в порошковые смеси карбидов ниобия приводит к образованию хрупких оксидов ниобия, не обеспечивающих защитного эффекта в процессе высокотемпературного воздействия.

4. Частицы карбида хрома, введенные в матрицу высокоэнтропийного сплава, позволяют повысить износостойкость в условиях сухого трения скольжения более чем на порядок. Введение карбида ниобия не сопровождается существенным приростом износостойкости сплавов. Отмеченные особенности обусловлены характером связи «карбид-матрица» и строением карбидных частиц.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждается использованием современного испытательного и аналитического оборудования. Численные значения, представленные в работе, были получены с применением статистических методов обработки данных. Анализ структуры и фазового состава проводился с использованием взаимодополняющих методов. Результаты, полученные в диссертационной работе, хорошо согласуются с материалами, опубликованными в отечественной и зарубежной литературе.

Основные результаты исследований были представлены и обсуждены на международной конференции «*Progress through Innovations: 10th International Academic and Research Conference of Graduate and Postgraduate Students*» (г. Новосибирск, 2022 г.); международной молодежной научной конференции «Современные тенденции развития функциональных материалов» (г. Сочи, 2023 г.); международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (г. Томск, 2023 и 2024 гг.); международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции «Химические технологии функциональных материалов» (г. Новосибирск, 2023 г.); международной конференции и школе молодых ученых «*Advanced High Entropy Materials*» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Новосибирск, 2024 г.); международной научно-технической конференции «Уральская школа молодых металлосведов» (г. Екатеринбург, 2025 г.); международной научно-практической конференции «1 точка сборки: Россия – Китай» (г. Новосибирск, 2025 г.); международной школе-конференции «*Advanced multicomponent (high-entropy) materials*» (г. Москва, 2025 г.); конгрессе пользователей ЦКП СКИФ «Перспективные исследования с использованием синхротронного излучения» (г. Новосибирск, 2025 г.); XXVIII международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы физического металлосведения сталей и сплавов» (Уральская школа металлосведов-термистов) (г. Новосибирск, 2026 г.).

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключался в формулировании задач диссертационного исследования (совместно с научным руководителем), планировании и выполнении экспериментов по вневакуумной электронно-лучевой наплавке покрытий, проведении структурных исследований и испытаний по оценке износостойкости и стойкости к окислению при повышенных температурах, анализе и обработке экспериментальных данных и формулировании выводов по результатам исследований.

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 10 печатных научных работ, из них 3 – в рецензируемых научных изданиях, в которых излагаются и должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата наук (перечень ВАК РФ), в научных изданиях, индексируемых

базами *Scopus*, *Web of Science* – 2, а также в других журнальных рецензируемых изданиях, сборниках трудов конференций – 5.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют научной специальности 2.6.17 – «Материаловедение» в части пунктов 1, 11, 12, 16.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 153 наименований и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 172 страницы, включая 74 рисунка и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разработки композиционных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор результатов исследований высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), выполненных коллективами отечественных и зарубежных специалистов. Рассмотрены современные представления о высокоэнтропийных сплавах, включая критерии их формирования, классификацию, особенности структуры и комплекса физико-механических свойств. Проанализированы основные подходы к упрочнению сплавов системы *CoCrFeNi* и существующие методы формирования защитных покрытий. Показано, что механизмы формирования композиционных покрытий на основе ВЭС методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки (ВЭЛН) изучены ограниченно.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования. Электронно-лучевая наплавка выполнялась на УНУ «Стенд ЭЛВ-6» на базе промышленного ускорителя электронов (ИЯФ СО РАН). Энергия пучка электронов составляла 1,4 МэВ, ток 25–29 мА, скорость движения заготовки 15 мм/с. Схема процесса наплавки порошковых смесей представлена на рисунке 1.

Для формирования высокоэнтропийных матричных сплавов *CoCrFeMnNi* и *Al_x-CoCrFe_{0,2}Ni* методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки применяли порошковые смеси из *Co*, *Cr*, *Mn*, *Ni*, *NiAl*, наносимые на основу из стали 20 с плотностью насыпки 0,8 г/см². В используемые для наплавки смеси железо не добавляли, так как в процессе электронно-лучевой наплавки происходит оплавление поверхностного слоя стальной заготовки. Требуемая концентрация железа в составах достигалась путем варьирования технологических режимов, включая мощность электронного пучка и скорость движения заготовки под пучком, что сопровождалось изменением глубины проплавления стальной заготовки.

Упрочняющие частицы *Cr₃C₂* и *NbC* вводили в количестве от 5 до 50 масс. % от массы металлических

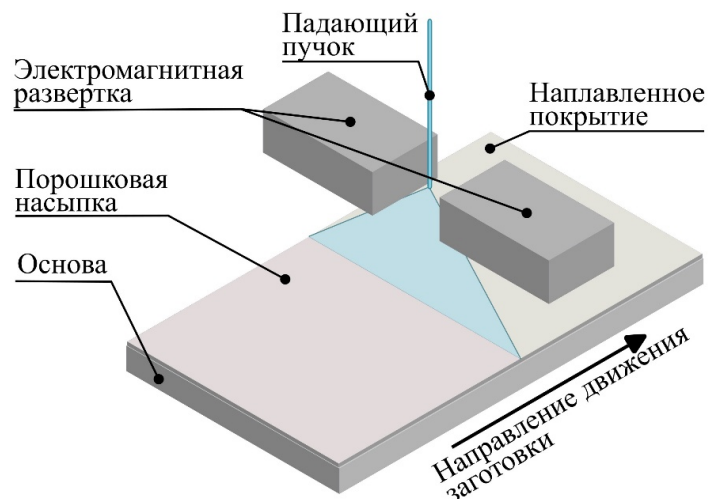


Рисунок 1 – Схема процесса наплавки порошковых смесей

порошков. Флюс CaF_2 в состав смеси вводили для защиты ванны расплава от атмосферных газов. Составы наплавочных порошковых смесей представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Составы наплавочных порошковых смесей на основе сплава $CoCrMnNi$

Доля карбидных частиц от массы металлических порошков, масс. %	Масса смеси $CoCrMnNi$, г	Масса Cr_3C_2/NbC , г	Масса CaF_2 , г
0	28,0	0	12
5	26,6	1,4	
10	25,2	2,8	
20	22,4	5,6	
30	19,6	8,4	
50	14,0	14,0	

Таблица 2 – Составы наплавочных порошковых смесей на основе сплава $Al_xCoCrNi$

x	Содержание карбидных частиц в металлических порошках, масс. %	Масса смеси $Al_xCoCrNi$, г	Масса Cr_3C_2/NbC , г	Масса CaF_2 , г
0,1	0	28,0	0	12
0,3				
0,5				
0,3	5	26,6	1,4	
	10	25,2	2,8	

Исследования структуры проводили методами оптической металлографии, растровой электронной микроскопии (*Carl Zeiss EVO 50 XVP*, *Carl Zeiss SIGMA 300*), просвечивающей электронной микроскопии (*Tecnai G2 20 TWIN*), рентгеноструктурного анализа (*ADVIN PowDix 600*, линия 8-А «Жесткая рентгеноскопия» источника ВЭПП-4), *EBSD*-анализа.

Комплекс механических и эксплуатационных свойства оценивали по уровню микротвердости (*Wolpert Group 402 MVD*), износостойкости в условиях сухого трения скольжения по схеме «шар – плоскость» (*Bruker UMT-2*) и трении о закрепленные частицы абразива (ГОСТ 17367-71). Для оценки жаростойкости наплавленных покрытий использовали весовой метод. Образцы выдерживали в муфельной печи в воздушной атмосфере при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 100 часов, периодически извлекая и взвешивая на лабораторных весах: спустя 5 и 10 часов от начала испытания, затем каждые 10 часов.

В третьей главе представлены результаты исследования структуры и свойств наплавленных покрытий на основе ВЭС $CoCrFeMnNi$. Методом ВЭЛН смеси порошков Co , Cr , Mn и Ni на стальную заготовку сформированы однофазные покрытия

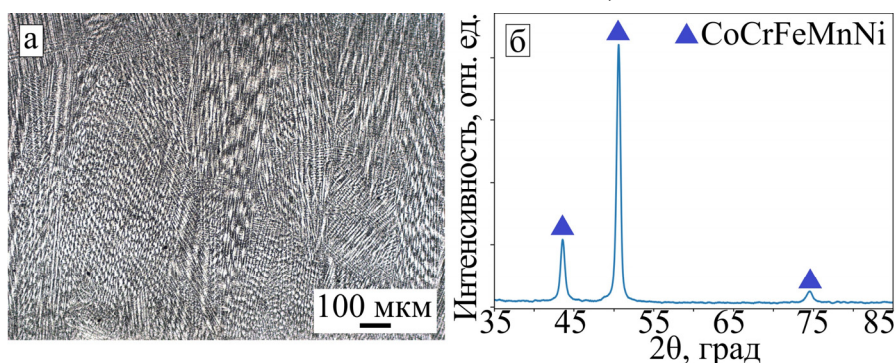


Рисунок 2 – Микроструктура (а) и фазовый состав (б) покрытия состава $CoCrFeMnNi$

$CoCrFeMnNi$ эквиатного состава с ГЦК-структурой и энтропией смешения $1,6R$ (R – универсальная газовая постоянная). Наплавленные слои толщиной $\approx 1,2$ мм характеризуются гомогенным строением, выраженной ориентацией кристаллитов в направлении теплоотвода и средней микротвердостью $190 \pm 10\text{ HV}_{0,1}$ (рисунок 2).

С целью формирования композиционных покрытий, в наплавочную порошковую смесь вводили частицы карбида хрома (Cr_3C_2) или ниобия (NbC).

Введение частиц Cr_3C_2 приводит к формированию двухфазной структуры (ГЦК-матрица + кристаллы Cr_7C_3). Установлено, что исходные частицы Cr_3C_2 полностью растворяются в ванне расплава, а при кристаллизации выделяются термодинамически более стабильные карбиды Cr_7C_3 . Объемная доля карбидной фазы в наплавленных покрытиях значительно превышает массовую долю вводимых частиц за счет участия хрома сплава матрицы в формировании карбидов (рисунок 3).

При содержании в порошковой смеси частиц Cr_3C_2 до 20 масс. % карбиды равномерно распределены в матрице. При повышении концентрации упрочняющих частиц до 50 масс. % в структуре покрытий образуются протяженные трещины, обусловленные термическими напряжениями (различие КТЛР матрицы и карбида).

Концентрация упрочняющих частиц в порошковой смеси в значительной мере определяет комплекс механических и эксплуатационных свойств формируемых композиционных покрытий. Микротвердость возрастает со 190 $HV_{0,1}$ (без карбидов) до $1070 \pm 115 HV_{0,1}$ при введении 50 масс. % Cr_3C_2 в наплавочную смесь (рисунок 4), что обусловлено реализацией дисперсионного механизма упрочнения. Увеличение доли упрочняющих частиц в наплавляемой смеси привело к росту износостойкости. Износостойкость покрытия, полученного из порошковой смеси с 50 масс. % Cr_3C_2 , в условиях сухого трения скольжения увеличивается в 26 раз относительно покрытия без упрочняющих частиц. Механизм изнашивания сменяется с адгезионного на адгезионно-окислительный, наблюдаются крупные карбидные кристаллы, выступающие над поверхностью износа (рисунок 5).

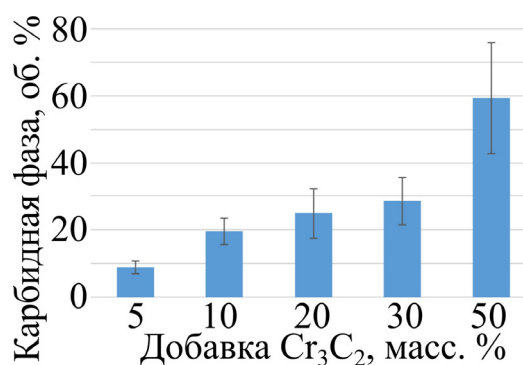


Рисунок 3 – Объемная доля фазы Cr_7C_3 в наплавленных покрытиях в зависимости от содержания Cr_3C_2 в порошковой смеси

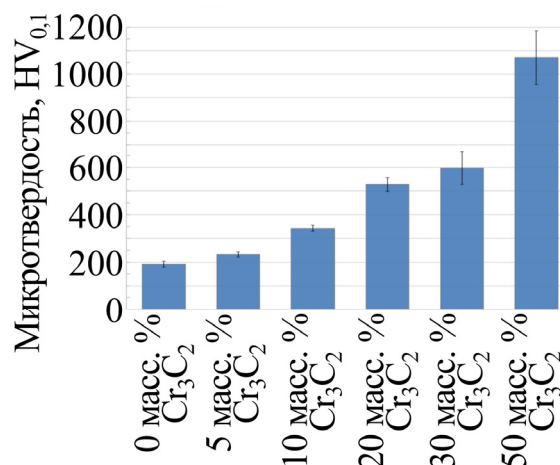


Рисунок 4 – Среднее значение микротвердости наплавленных покрытий, полученных из порошковых смесей с различным содержанием частиц Cr_3C_2

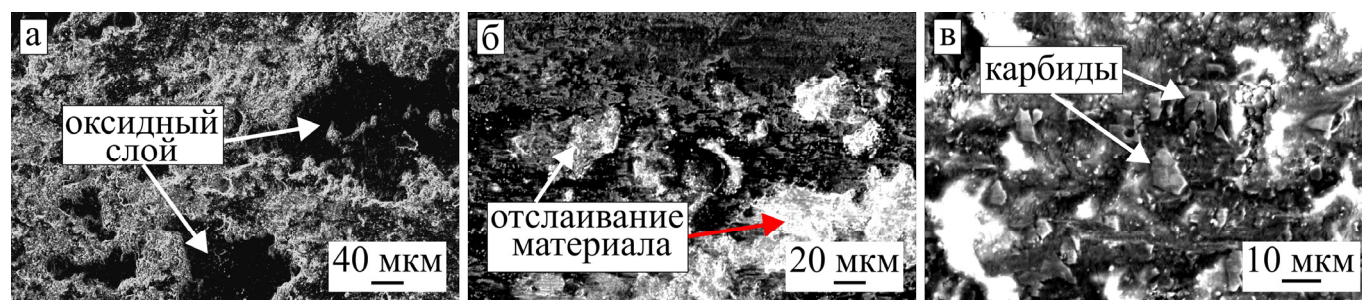


Рисунок 5 – Поверхности износа материалов, полученных наплавкой смесей с различным содержанием Cr_3C_2 : а – 5 масс. %; б – 20 масс. %; в – 50 масс. %

Для оценки жаростойкости наплавленных покрытий образцы подвергались высокотемпературному воздействию при 900 °C в течение 100 часов в воздушной

атмосфере. Кинетика окисления всех композиционных материалов описывается параболическим законом (рисунок 6). Введение 50 масс. % Cr_3C_2 снижает прирост массы с 25,5 до 8,25 г/м² (трехкратный рост жаростойкости) за счет формирования сплошной оксидной пленки на основе оксидов хрома.

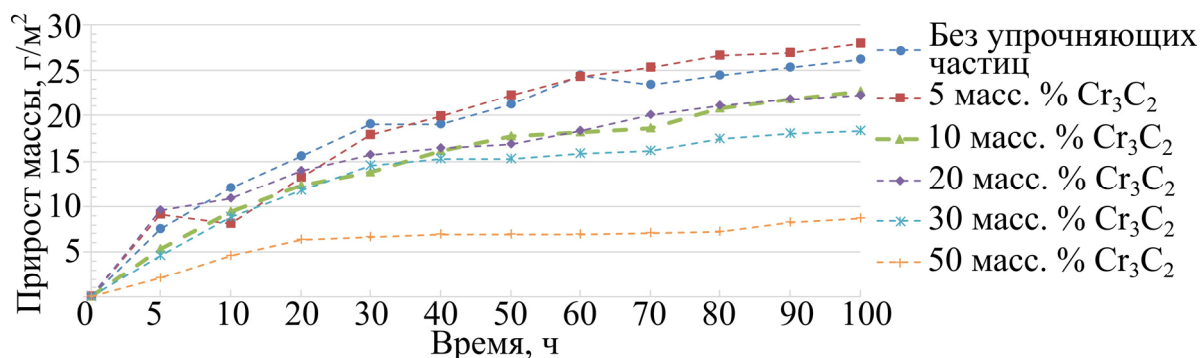


Рисунок 6 – Изменение массы образцов в ходе испытаний на стойкость к окислению при температуре 900 °С

Введение частиц NbC в сплав $CoCrFeMnNi$ приводит к формированию двухфазной структуры (ГЦК-матрица + NbC), однако карбид ниобия преимущественно сохраняется в виде нерастворившихся частиц и крупных агломератов (рисунок 7).

Низкая растворимость карбида NbC в матричном материале обусловлена его высокой температурой плавления (≈ 3500 °С), низкой энтальпией образования ($-140,1$ кДж/моль), химической инертностью по отношению к металлам матричного сплава и низкой смачиваемостью поверхности карбидных частиц.

Наличие карбидной фазы обеспечивает реализацию механизма упрочнения дисперсными частицами, повышая микротвердость наплавленных композиционных покрытий. Максимальная микротвердость (600 ± 150 $HV_{0,1}$) достигнута при введении 30 масс. % NbC в наплавочную смесь. Несмотря на рост микротвердости, износостойкость при трении в условиях сухого трения скольжения по схеме «шар – плоскость» существенно не

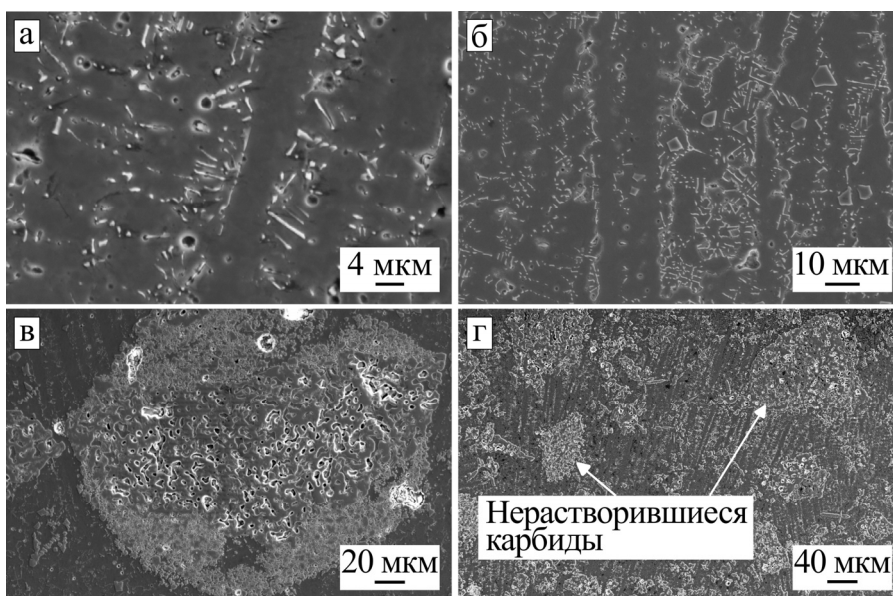


Рисунок 7 – Микроструктура образцов, полученных наплавкой порошковых смесей с различным содержанием NbC : а – 5 масс. %; б – 10 масс. %; в – 20 масс. %; г – 30 масс. %

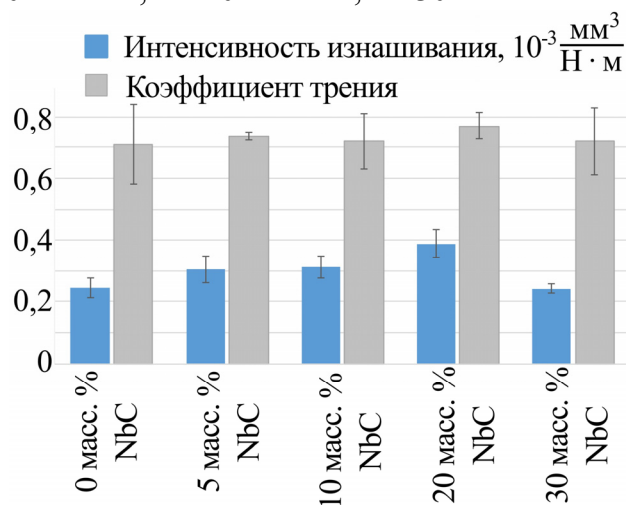


Рисунок 8 – Результаты испытаний покрытий с различной концентрацией NbC на износостойкость по схеме «шар – плоскость»

изменяется (рисунок 8) из-за интенсивного выкрашивания крупных агломератов карбидов, выступающих в роли абразивных частиц.

Добавка упрочняющих частиц карбида ниобия в порошковую смесь оказывает негативное влияние на жаростойкость наплавляемых композиционных покрытий. Введение более 10 масс. % частиц приводит к более чем двукратному приросту массы окисленного материала вследствие избирательного окисления карбидов и формирования хрупких оксидных соединений на основе ниобия. Данные соединения склонны к растрескиванию и отслоению при перепадах температур, вызванных промежуточными измерениями массы образцов, что увеличивает удельную площадь окисляемой поверхности и открывает пути для диффузии кислорода.

В четвертой главе представлены результаты исследования покрытий на основе сплава $Al_xCoCrFe_{0,2}Ni$, где $x = 0,1; 0,3; 0,5$ (далее по тексту соответствующие составы именуются $Al_{0,1}, Al_{0,3}, Al_{0,5}$). Корректировка состава матричного сплава путем замены Mn на Al и снижения концентрации Fe , направлена на повышение твердости за счет дополнительного упрочнения в результате образования ОЦК-фазы и улучшение жаростойкости за счет формирования оксидной пленки на основе алюминия.

Установлено, что концентрация алюминия в составе исходной порошковой смеси определяет фазовый состав и комплекс механических свойств наплавляемых покрытий. При $x = 0,1$ и $0,3$ сплавы имеют преимущественно ГЦК-структуру, а при $x = 0,5$ наблюдается формирование ОЦК-фазы (рисунок 9).

С увеличением концентрации алюминия микротвердость сплава матрицы возрастает от $230 \pm 5 HV_{0,1} (Al_{0,1})$ до $310 \pm 5 HV_{0,1} (Al_{0,5})$. Однако покрытие $Al_{0,5}$ характеризуется наличием протяженных трещин, формирующихся при кристаллизации, что обусловлено низкой пластичностью ОЦК-фазы. Кроме того, рост концентрации алюминия в порошковой смеси ведет к увеличению энергии дефектов упаковки, что, в свою очередь, затрудняет реализацию *TWIP/TRIP*-эффектов. Это ограничивает деформацию по механизму двойникования, вызывая снижение пластичности и, как следствие, падение износостойкости при сухом трении скольжения в паре «шар – плоскость».

Введение алюминия в состав исходной порошковой смеси является эффективным способом повышения жаростойкости за счет образования на поверхности оксидной пленки Al_2O_3 (рисунок 10). Кинетика окисления покрытий из сплава матрицы описывается логарифмическим законом, что является наиболее благоприятным характером с точки зрения обеспечения долгосрочной защиты в условиях

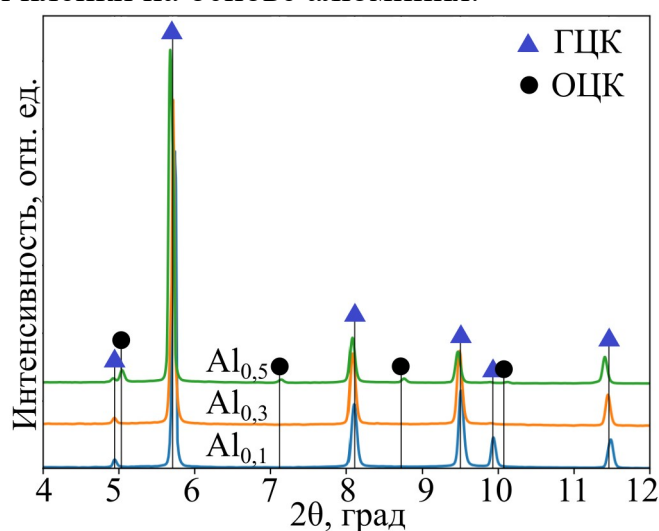


Рисунок 9 – Рентгенограммы покрытий, полученных при наплавке порошковых смесей с различным содержанием алюминия

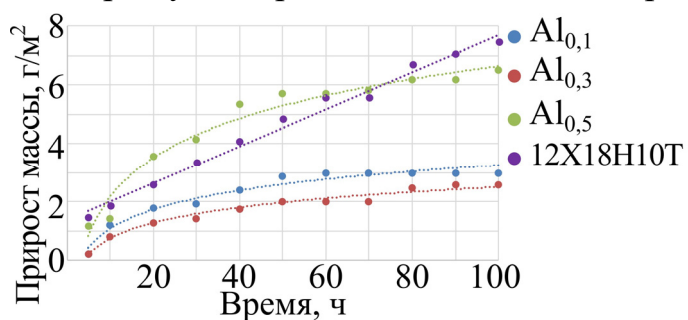


Рисунок 10 – Изменение массы образцов в ходе испытаний на стойкость к окислению при температуре 900 °C

высокотемпературного воздействия. Прирост массы окисленного материала покрытий $Al_{0,1}$ и $Al_{0,3}$ ($2,6\text{--}3,0\text{ г/м}^2$) в 2,9 раза ниже, чем у стали 12Х18Н10Т ($7,5\text{ г/м}^2$), что связано с формированием сплошных пленок на основе оксидов алюминия и хрома. Стоит отметить, что несмотря на увеличение алюминия до $x = 0,5$, жаростойкость данного покрытия значительно снижается, что обусловлено наличием описанных ранее протяженных трещин, которые увеличивают удельную площадь окисляемой поверхности.

На основании полученных результатов в качестве оптимального матричного сплава выбран $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$, характеризующийся значением микротвердости $280 \pm 5\text{ HV}_{0,1}$, однофазной структурой, высокой жаростойкостью и отсутствием макродефектов.

Исследование влияния карбидных частиц на механические и эксплуатационные свойства сплава $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$ проводилось на покрытиях, полученных из смесей с 5 и 10 масс. % упрочняющих частиц, так как более высокие концентрации, как показано в главе 3, приводят к формированию более неоднородной структуры и образованию дефектов.

Введение 10 масс. % Cr_3C_2 в наплавочную смесь обеспечивает повышение микротвердости на 64 % (до $455 \pm 5\text{ HV}_{0,1}$) относительно неупрочненного покрытия. Добавка 10 масс. % NbC привела к росту значения твердости до $420 \pm 10\text{ HV}_{0,1}$ (повышение на 54 %) (рисунок 11). Однако в условиях сухого трения скольжения по схеме «шар – плоскость» все упрочненные сплавы демонстрируют снижение износостойкости из-за абразивного действия выкрашивающихся карбидных частиц (рисунок 12 а).

В условиях трения о закрепленные частицы абразива максимальную износостойкость обеспечивает сплав с 5 масс. % Cr_3C_2 в исходной порошковой смеси (рост на 12,6 % по сравнению с сплавом матрицы), что согласуется с ростом микротвердости и свидетельствует об эффективном упрочнении дисперсными карбидами Cr_7C_3 (рисунок 12 б). Введение NbC приводит к снижению износостойкости на $\approx 20\%$ из-за слабой адгезионной связи кристаллов карбида ниобия с матрицей

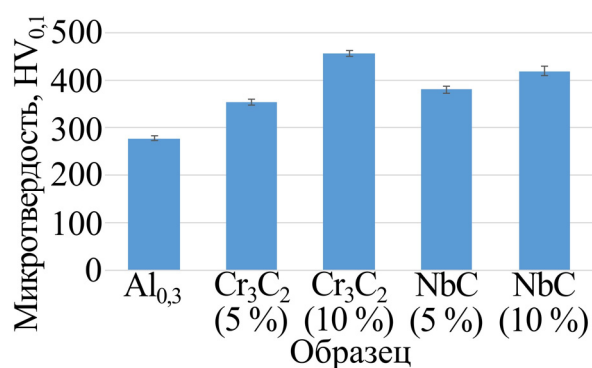


Рисунок 11 – Результаты измерения микротвердости наплавленных покрытий

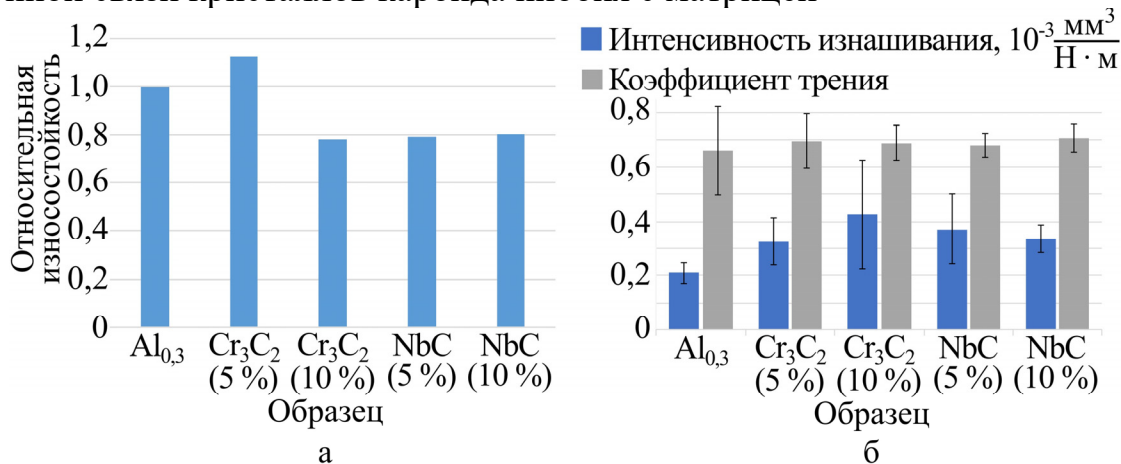


Рисунок 12 - Результаты испытаний наплавленных покрытий на износостойкость. а – по схеме «шар – плоскость»; б – по схеме трения о закрепленные абразивные частицы

Введение карбидных частиц повышает жаростойкость композиционных покрытий системы $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$. Максимальный уровень жаростойкости достигается при концентрации Cr_3C_2 или NbC в порошковой наплавочной смеси, равной 5 масс. %, обеспечивая прирост массы окисленного материала $\approx 1,5\text{--}1,8\text{ г/м}^2$ против $2,6\text{ г/м}^2$ для неупрочненного сплава (рисунок 13). Улучшение свойств обусловлено формированием оксидных пленок на основе алюминия и хрома. Повышение концентрации частиц NbC до 10 масс. % сопровождается избирательным окислением крупных карбидных кристаллов, нарушением сплошности оксидной пленки и ростом массы окисленного материала.

Анализ кристаллографической текстуры методом *EBSD* показал, что кристаллизация ванны расплава сопровождается формированием аксиальной текстуры типа $\langle 100 \rangle$ в ГЦК матрице. Направление текстурирования совпадает с возникающим в результате направленного теплоотвода. Увеличение доли карбидных частиц снижает соотношение длины зерен к ширине, что свидетельствует об изменении условий кристаллизации и ограничении роста зерен в направлении теплоотвода (рисунок 14).

В пятой главе представлены данные о практическом использовании результатов, полученных при выполнении диссертационной работы. Разработаны технологические режимы ВЭЛН, обеспечивающие формирование покрытий, ориентированных на эксплуатацию в условиях интенсивного абразивного изнашивания и высокотемпературного окисления. Определен оптимальный состав композиционного покрытия $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni + 5\text{ масс. \% } Cr_3C_2$, сочетающий высокую твердость с повышенной жаростойкостью и износостойкостью в условиях трения о закрепленные частицы абразива.

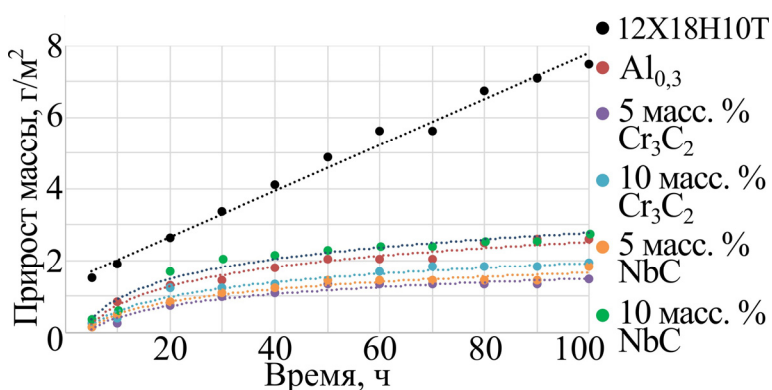


Рисунок 13 – Кинетика окисления наплавленных покрытий с различным типом добавки карбидных частиц

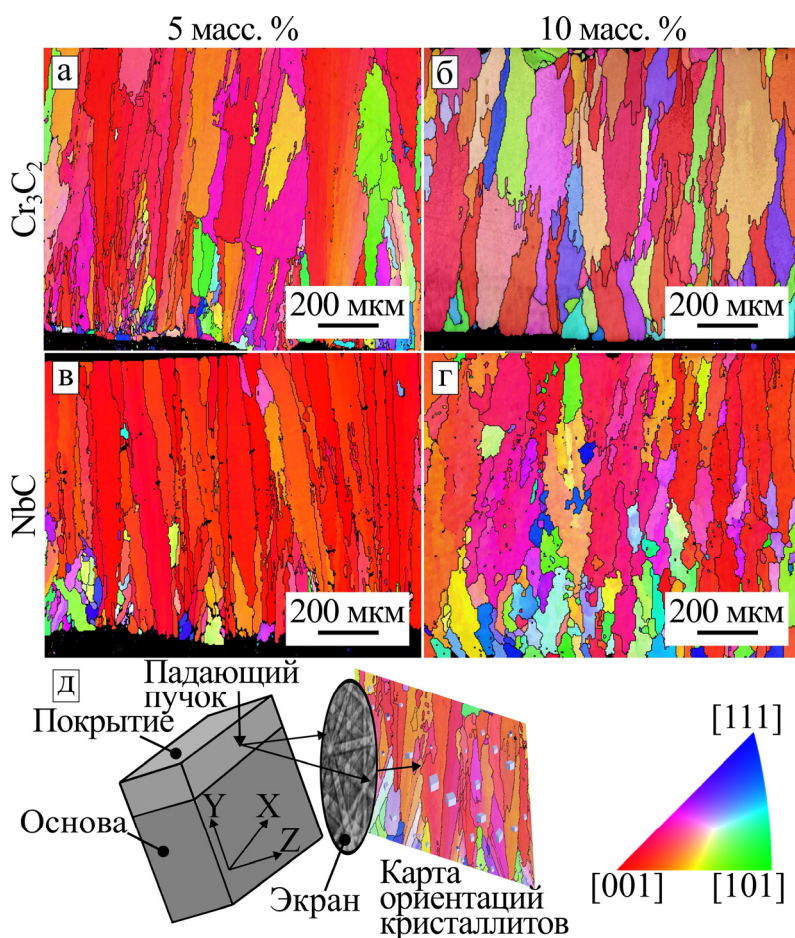


Рисунок 14 – Ориентация зерен в поперечном сечении наплавленных слоев. $Al_xCoCrFe_{0,2}Ni$ с добавкой карбидов хрома (а, б) и ниобия (в, г); д – схема съемки и цветовая кодировка

На примере пресс-формы для литья под давлением показано, что наплавка композиционного покрытия на основе сплава $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$, упрочненного частицами Cr_3C_2 , позволила повысить стойкость поверхностного слоя в 1,5–2 раза по сравнению с серийными элементами конструкции, обработанными по стандартной технологии. Результаты работы переданы для практического использования в ООО «Центр технологий литья».

В ходе исследований разработан экспериментальный прокатно-волочильный стан для лабораторного производства порошковой проволоки из высокоэнтропийных сплавов, что создает технологическую базу для формирования износостойких и жаростойких покрытий методом послойной наплавки.

Материалы диссертации используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия» в лекционных курсах и лабораторных работах по дисциплинам «Композиционные материалы», «Физические методы исследования материалов», «Специальные стали и сплавы».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа результатов исследований в области высокоэнтропийных сплавов и методов наплавки защитных покрытий обоснована целесообразность использования систем $CoCrFeMnNi$ и $Al_xCoCrFeNi$ в качестве матричных материалов для формирования посредством вневакуумной электронно-лучевой наплавки композиционных покрытий, упрочненных карбидными частицами.

2. Методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси порошков Co , Cr , Mn и Ni на стальную заготовку сформированы однофазные покрытия из высокоэнтропийного сплава $CoCrFeMnNi$. Установлено, что введение в порошковую смесь карбидов Cr_3C_2 или NbC приводит к формированию двухфазной структуры, состоящей из твердого раствора с ГЦК-решеткой и дисперсных кристаллов Cr_7C_3 или NbC соответственно. Содержание упрочняющих частиц в порошковой смеси свыше 30 масс. % вызывает зональную ликвацию, укрупнение кристаллов и образование трещин. Показано, что карбид Cr_3C_2 в процессе кристаллизации полностью растворяется с образованием Cr_7C_3 , обедняя матрицу хромом, тогда как NbC частично сохраняется в нерастворенном виде.

3. Максимальное упрочнение наплавленных покрытий на основе $CoCrFeMnNi$ и износостойкость при сухом трении скольжения достигается при введении 50 масс. % Cr_3C_2 . Упрочнение сплавов частицами карбида NbC менее эффективно. Несмотря на рост твердости, интенсивное изнашивание композиционного покрытия происходит по механизму выкрашивания крупных нерастворившихся частиц карбида.

4. Кинетика высокотемпературного окисления композиционных покрытий $CoCrFeMnNi + Cr_3C_2$ описывается параболическим законом. Добавка в наплавочную смесь 50 масс. % Cr_3C_2 снижает прирост массы окисленного материала в 3 раза по сравнению с неупрочненным сплавом за счет формирования сплошной оксидной пленки на основе хрома и марганца. Введение NbC в концентрациях свыше 10 масс. % приводит к более чем двукратному приросту массы вследствие избирательного окисления карбидов и последующего разрушения хрупкого оксидного слоя.

5. Установлено, что содержание алюминия в сплаве $Al_xCoCrFe_{0,2}Ni$ является фактором, определяющим фазовый состав и комплекс его механических и

эксплуатационных свойств. Максимальный уровень свойств достигается при $x = 0,3$. Увеличение содержания Al до $x = 0,5$ приводит к формированию ОЦК-фазы и повышению твердости сплава. Однако при этом в процессе кристаллизации возникают протяженные трещины и наблюдается снижение уровня износостойкости.

6. Введение в наплавочные смеси на основе сплава $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$ карбидов Cr_3C_2 или NbC обеспечивает формирование дисперсных упрочняющих фаз Cr_7C_3 и NbC соответственно. Эффект дисперсионного упрочнения и измельчение зерна, имеющие место при введении в порошковую смесь 10 масс. % Cr_3C_2 или NbC , приводят к росту микротвердости сплавов на 65 % и 54 % соответственно относительно неупрочненного материала матрицы. Упрочнение карбидами снижает износостойкость при сухом трении скольжения, но повышает ее при абразивном воздействии. Превышение в наплавочной смеси содержания карбида хрома свыше 5 масс. % улучшением триботехнических свойств не сопровождается.

7. Введение карбидных частиц в исходную наплавочную смесь повышает жаростойкость композиционных покрытий системы $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$ при длительном высокотемпературном воздействии воздушной среды. Максимальный уровень жаростойкости достигается при концентрации Cr_3C_2 или NbC в количестве 5 масс. %. Прирост массы композиционных покрытий на ≈ 60 % меньше по сравнению с неупрочненным ВЭС и в 2,9 раза меньше по сравнению со сталью 12Х18Н10Т. Улучшение свойств материалов обусловлено формированием оксидных пленок на основе алюминия и хрома. Повышение в наплавочной смеси концентрации частиц NbC до 10 масс. % сопровождается избирательным окислением крупных карбидных кристаллов, нарушением сплошности оксидной пленки и снижением жаростойкости.

8. С использованием метода *EBS*D-анализа установлено, что все исследованные в работе композиционные покрытия, сформированные методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки, характеризуются аксиальной текстурой типа $\langle 100 \rangle$, обусловленной направленным отводом тепла на стадии кристаллизации расплава. Введение карбидных частиц сопровождается повышением равноосности зеренной структуры. При введении в порошковую смесь 10 масс. % Cr_3C_2 или NbC отношение длины зерен к ширине в сплаве $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$ уменьшается от 6,5 до 4,1 и 3,1 соответственно.

9. Разработаны практические рекомендации по выбору составов и режимов вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых композиций для формирования защитных покрытий на стальных заготовках. Оптимальный состав наплавочного материала для работы в условиях высокотемпературного воздействия и абразивного изнашивания соответствует сплаву $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$ с 5 масс. % Cr_3C_2 . Результаты работы переданы для практического использования в ООО «Центр технологий литья». Предложенное техническое решение позволяет в 1,5–2 раза повысить стойкость рабочих поверхностей пресс-форм для литья под давлением. Разработана экспериментальная установка по формированию проволоки с порошковым наполнителем, соответствующим высокоэнтропийным сплавам. Материалы диссертации используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, позволяют рекомендовать полученные композиционные покрытия на основе высокоэнтропийных сплавов $Al_xCoCrFe_{0,2}Ni$ и $CoCrFeMnNi$, упрочненных карбидами Cr_3C_2 и NbC , для защиты рабочих поверхностей деталей, эксплуатирующихся при температурах до

900 °С в условиях абразивного изнашивания. К числу таких деталей относятся элементы трубопроводной арматуры, детали запорно-регулирующей аппаратуры, направляющие ролики печей сопротивления, а также узлы трения горнодобывающего и нефтегазового оборудования. Жаростойкость разработанных покрытий в 2,9 раз превышает показатели, соответствующие стали 12Х18Н10Т, что в сочетании с высокой микротвердостью позволяет существенно увеличить межремонтный ресурс оборудования и сократить затраты на восстановление рабочих поверхностей.

Выявленные в работе ограничения, характерные для разработанных материалов, в первую очередь хрупкость покрытий при высоких концентрациях карбидов, определяют целесообразность проведения дальнейших исследований, направленных на оптимизацию распределения упрочняющих фаз в металлической матрице и разработку эффективных градиентных структур.

При дальнейшем развитии темы исследования перспективными представляются экспериментальные работы по формированию защитных композиционных покрытий методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой проволоки на основе высокоэнтروпийных сплавов.

Особый интерес представляет изучение влияния отжига и гомогенизации наплавленных покрытий на эволюцию карбидной фазы, релаксацию остаточных напряжений и стабильность оксидных слоев при длительном высокотемпературном воздействии. Перспективным направлением является также исследование влияния повторного оплавления поверхности покрытия электронным пучком и нанесение многослойных покрытий с варьируемым составом слоев.

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Влияние добавок Cr_3C_2 на структуру и свойства покрытий из сплава Кантора / **А. Б. Юргин**, А. А. Руктуев, Д. В. Лазуренко, В. С. Шикалов, И. К. Чакин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2024. – № 7(829). – С. 13-21. – DOI 10.30906/mitom-2024-7-13-21

2. Структура и свойства композиционного покрытия на основе высокоэнтропийного сплава, упрочненного частицами CrB / А. А. Руктуев, **А. Б. Юргин**, В. С. Шикалов, А. В. Ухина, И. К. Чакин, Е. В. Домаров, Г. Д. Довженко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 87-103. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.3-87-103

3. Оценка остаточных напряжений в кристаллических фазах высокоэнтропийных сплавов системы $Al_xCoCrFeNi$ / И. В. Иванов, **А. Б. Юргин**, И. Е. Насенник, К. Э. Купер // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 181-191. – DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.4-181-191

Статьи в научных изданиях, индексируемых базами Scopus/Web of Science:

4. Влияние термической обработки на структуру и свойства покрытий $CoCrFeMnNi+NbC$, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / **А. Б. Юргин**, А. А. Руктуев, Н. В. Степанова, А. Е. Ризницкий, Д. В. Худяков, И. А. Батаев // Металлург. – 2025. – № 1. – С. 84-88. – DOI 10.52351/00260827_2025_1_84

Переводная версия: *Influence of heat treatment on the structure and properties of $CoCrFeMnNi + NbC$ coatings obtained by nonvacuum electron-beam surfacing /*

A. B. Yurgin, A. A. Ruktuev, N. V. Stepanova, A. E. Riznitsky, D. V. Khudyakov, I. A. Bataev // *Metallurgist*. – 2025. – Vol. 69. – № 1. – P. 110-117. – DOI: 10.1007/s11015-025-01921-8

5. *Heat Treatment Induced Structural Transformations and High-Temperature Oxidation Behavior of $Al_{21}Co_{22}Cr_{22}Fe_{13}Ni_{22}$ High-Entropy Coatings Produced by Non-Vacuum Electron Beam Cladding* / T. Ogneva, K. Emurlaev, Yu. Malyutina, E. Domarov, I. Chakin, A. Ruktuev, P. Ryabinkina, **A. Yurgin**, I. Batev // *Metals*. – 2023. – Vol. 13, No. 10. – P. 1689. – DOI 10.3390/met13101689.

В прочих изданиях:

6. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / З. Б. Батаева, А. А. Руктуев, И. В. Иванов, **А. Б. Юргин**, И. А. Батаев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 116-146. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146

7. **Yurgin, A. B.** *Structure and properties of a composite coating based on a high-entropy alloy reinforced with CrB particles* / **A. B. Yurgin**, A. A. Ruktuev // *Advanced High Entropy Materials : Abstracts of the V International Conference and School, Saint-Petersburg*, 09–13 октября 2023 г. – Saint-Petersburg, 2023. – P. 165-166.

8. **Юргин, А. Б.** Влияние термической обработки на структуру и свойства защитных покрытий на основе высокоэнтропийного сплава $CoCrFeMnNi$ / **А. Б. Юргин**, А. А. Руктуев // *Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии : тезисы докладов Международной конференции, Томск, 09–12 сентября 2024 года*. – Томск, 2024. – С. 631-632.

9. **Юргин, А. Б.** Исследование фазового состава покрытия $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$ с добавкой карбида хрома Cr_3C_2 , полученного методом вневакуумной электронно-лучевой обработки / А. Б. Юргин, А. А. Руктуев // *Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов : Сборник статей конференции XXVIII Международной научно-технической Уральской школы металловедов-термистов, посвященной 100-летию со дня рождения Леонида Иннокентьевича Тушинского - основателя школы материаловедения в НЭТИ, Новосибирск, 02–06 февраля 2026 года*. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2026. – С. 267-269.

10. **Юргин, А. Б.** Влияние частиц карбида хрома Cr_3C_2 на жаростойкость композиционных покрытий на основе $Al_{0,3}CoCrFe_{0,2}Ni$, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / **А. Б. Юргин**, А. А. Руктуев // *I точка сборки: Россия - Китай : Сборник тезисов Первой международной научно-практической конференции в области технических наук, Новосибирск, 22–26 декабря 2025 года*. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2026. – С. 85-89.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс: (383)346-08-57
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
заказ № 05799 подписано в печать 12.10.2026 г.