

На правах рукописи



Кучумова Иванна Денисовна

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ С АМОРФНОЙ ФАЗОЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ
ПОРОШКОВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Nb-B**

Специальность: 2.6.17 – Материаловедение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

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

Научный руководитель: **Дудина Дина Владимировна**,
доктор технических наук;

Официальные оппоненты: **Лернер Марат Израильевич**,
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), лаборатория физикохимии высокодисперсных материалов, заведующий лабораторией;

Базлов Андрей Игоревич,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра металловедения цветных металлов, старший преподаватель;

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук (г. Черноголовка).

Защита диссертации состоится «22» декабря 2022 г. в 13⁰⁰ 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, д. 20, I корпус, конференц-зал.

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

Автореферат разослан « » ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. тех. наук, доцент

Андрей Геннадиевич Тюрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Расширение номенклатуры конструкционных материалов и разработка технологий формирования покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками являются важными условиями научно-технического прогресса и развития промышленности. Совокупность свойств поверхностных слоев детали определяет ее надежность и срок службы, так как поверхность изделий зачастую подвержена воздействию многофакторных нагрузок, в том числе воздействию химически активной среды и изнашиванию в присутствии абразива. Одним из наиболее эффективных способов защиты рабочей поверхности изделий и отдельных элементов конструкций является формирование функциональных покрытий методами газотермического напыления. Данные методы активно используются в авиакосмической, нефтегазовой, энергетической, атомной и других отраслях промышленности. В зависимости от источника нагрева, воздействующего на порошковый материал, применяются следующие методы газотермического напыления: плазменное, высокоскоростное газопламенное, детонационное, электродуговое и холодное газодинамическое.

Среди высокотемпературных методов газотермического напыления детонационное напыление имеет ряд преимуществ. В процессе детонационного напыления частицы порошка, порционно подающиеся в ствол, нагреваются до температуры плавления за доли секунд и при соударении с подложкой быстро охлаждаются (скорость охлаждения $10^4 \dots 10^6$ K/c) за счет теплоотвода в ее объем. Современные установки для детонационного напыления с компьютерным управлением позволяют гибко варьировать состав взрывчатой смеси и ее количество (от объема ствола установки), что обеспечивает возможность подбора режимов напыления, исключающих окисление напыляемого материала и подложки, или уменьшающих влияние этого процесса. Прочность сцепления с подложкой покрытий, полученных методом детонационного напыления, значительно выше, а пористость ниже по сравнению с покрытиями, полученными другими методами газотермического напыления.

В настоящее время сплавы на основе железа с высокой стеклообразующей способностью рассматриваются как перспективные материалы для формирования покрытий благодаря их высокой прочности ($\sigma_b = 800 \dots 4500$ МПа), высокой коррозионной стойкости, износостойкости и относительно низкой стоимости. Использование данных сплавов в промышленности ограничено их малой пластичностью при комнатной температуре и небольшими габаритными размерами готовых изделий (диаметр стержней до 100 мм). Получение порошковых материалов из аморфных сплавов позволяет значительно расширить области их применения. Порошки аморфных сплавов могут использоваться для формирования функциональных покрытий и объемных материалов методами газотермического напыления и порошковой металлургии, соответственно. Основными критериями формирования покрытий с аморфной структурой являются: применение порошкового сплава с химическим составом близким к эвтектическому; использование режимов газотермического напыления, которые позволяют нагревать частицы порошка до температур, близких к температуре плавления;

быстрое охлаждение частиц при осаждении на подложку и ранее сформированные слои.

В данной работе проведены исследования процессов формирования структуры и изучение свойств материалов с аморфной фазой, полученных методом детонационного напыления порошков сплавов *Fe-Cr-Nb-B*. Актуальность работы обусловлена необходимостью расширения знаний о получении материалов с метастабильной структурой с помощью детонационного напыления. Полученные результаты могут использоваться в качестве основы для разработки технологий нанесения покрытий с перспективными эксплуатационными характеристиками.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты «Разработка коррозионностойких аморфных детонационных покрытий на основе железа», 19-43-543034, и «Структура и свойства покрытий и спеченных материалов, получаемых из порошковых многокомпонентных сплавов на основе железа в неравновесных условиях», 20-38-90069), программ НИОКР НГТУ (темы «Разработка композиционных детонационных покрытий из аморфной матрицы и армирующего порошка оксида алюминия» и «Влияние режимов термической обработки на трибологические свойства детонационных покрытий из сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ »), Фонда содействия инновациям (программа «УМНИК», проект «Разработка износостойких композиционных покрытий на основе железа и оксида алюминия методом детонационного напыления»), а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 075-15-2020-781) и АО «Объединённая двигателестроительная корпорация» (проект «Структура и свойства покрытий, получаемых из порошковых многокомпонентных сплавов на основе железа методом детонационного напыления»).

Степень разработанности темы исследования

Вклад советских и российских ученых в развитие методов газотермического напыления покрытий и исследование их свойств отражен в работах В.И. Калиты, Ю.С. Коробова, В.Ф. Косарева, В.Ю. Ульяницкого и других исследователей. Анализ проблем повышения стеклообразующей способности, прочности и трещиностойкости аморфных сплавов проведен И.Б. Кекало, В.В. Немощкаленко, А.М. Глезером, Д.В. Лузгиным, С.Д. Калошкиным, С.С. Бартеневым, А.И. Базловым и др.

Работы в области детонационного напыления покрытий различного функционального назначения проводятся в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск), Самарском государственном техническом университете, Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск) и Центральном научно-исследовательском институте конструкционных материалов «Прометей» (г. Санкт-Петербург).

Процессы фазо- и структурообразования покрытий из аморфных сплавов на основе железа активно исследуют в Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН (г. Черноголовка), Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС»

(г. Москва), Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск), Федеральном университете г. Сан-Карлоса (Бразилия), Государственном университете г. Сан-Паулу (Бразилия), Политехническом институте г. Гренобля (Франция), Технологическом институте Джорджии (г. Атланта, США), Университете Тохоку (г. Сендай, Япония) и в ряде других научных организаций в России и за рубежом. Анализ литературы показывает, что особенности формирования структуры и свойства покрытий с аморфной фазой из четверных сплавов на основе железа при детонационном напылении изучены недостаточно.

Цель диссертационной работы заключается в выявлении закономерностей структурообразования покрытий *Fe-Cr-Nb-B* с аморфной фазой, полученных методом детонационного напыления, и определении условий формирования покрытий с высокими коррозионной стойкостью и износостойкостью.

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

1) исследовать структуру и фазовый состав исходных порошков сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (состав, близкий к эвтектическому) и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ (состав, смещен относительно эвтектики) с различной стеклообразующей способностью, полученных методом газового распыления расплава;

2) провести расчет значений температуры и скорости частиц сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ в зависимости от объема и молярного соотношения компонентов ацетиленокислородной взрывчатой смеси в процессе детонационного напыления; определить параметры процесса, позволяющие формировать покрытия из расплавленных частиц; провести оценку скорости охлаждения частиц при соударении с подложкой;

3) получить низкопористые покрытия на подложках из сталей Ст3 и 12Х18Н10Т; исследовать структуру, фазовый состав, твердость и адгезионную прочность покрытий;

4) изучить поведение покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в условиях электрохимической и атмосферной коррозии;

5) исследовать триботехнические характеристики покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ в различных условиях изнашивания; сравнить характеристики покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и спеченного сплава того же состава;

6) исследовать возможность формирования композиционных покрытий «аморфная матрица - армирующие частицы» из порошковых смесей $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}-Al_2O_3$ с различным содержанием Al_2O_3 ;

7) разработать технологические рекомендации по детонационному напылению покрытий *Fe-Cr-Nb-B* с перспективным комплексом функциональных свойств.

Научная новизна

1. Впервые методом детонационного напыления порошков четверных сплавов системы *Fe-Cr-Nb-B* получены покрытия, в структуре которых присутствует аморфная фаза. Определены параметры детонационного напыления, обеспечивающие формирование низкопористых (1...3 %) покрытий из порошков сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ с содержанием аморфной фазы 86...99 масс. %.

2. Новыми являются результаты исследования покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, содержащих более 97 масс. % аморфной фазы, при воздействии электролитов 3,5 масс. % $NaCl$ (pH 3,0; 5,5 и 10,0) в условиях потенциодинамической поляризации. Разработанные покрытия имеют более высокую коррозионную стойкость по сравнению с покрытиями из сплавов $Fe-Cr-Nb-B$, полученных другими методами.

3. В условиях сухого трения скольжения износостойкость покрытий из сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ на порядок выше по сравнению со сталью 12X18H10T, что обусловлено присутствием аморфной фазы и низкой пористостью разработанных материалов.

4. Установлено, что электроискровое спекание порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в температурном диапазоне, соответствующем области переохлажденной жидкости, позволяет сохранить аморфную структуру исходного порошкового материала.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в расширении знаний о процессах структурообразования покрытий, содержащих аморфную фазу, формирующихся при детонационном напылении.

Практическая значимость работы заключается в:

1) определении технологических параметров детонационного напыления порошков сплавов $Fe-Cr-Nb-B$, которые обеспечивают формирование покрытий с высоким содержанием аморфной фазы, низкой пористостью и высокой адгезионной прочностью на стальных подложках;

2) разработке покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$, износостойкость которых по сравнению со сталью 12X18H10T в условиях сухого трения скольжения выше более чем в 5 раз, а в условиях абразивного изнашивания – на 30...35 %;

3) разработке композиций «аморфное покрытие - углеродистая сталь», характеризующихся перспективными свойствами.

Технологические решения по формированию покрытий с аморфной фазой из сплавов $Fe-Cr-Nb-B$ на стальных подложках переданы для использования в ООО «Сибирские технологии защитных покрытий» и ООО «НПО Спецпокрытия». Результаты проведенных исследований используются при реализации учебного процесса в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии новых материалов» и «Наноинженерия».

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач проведен анализ структуры, механических, коррозионных и триботехнических характеристик покрытий из сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$, полученных методом детонационного напыления при варьировании объема (от объема ствола) и молярного соотношения компонентов ацетиленокислородной взрывчатой смеси. Для детонационного напыления использовали порошки сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ с размером частиц 20...40 мкм и 45...75 мкм и порошок сплава $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ фракции 20...40 мкм. Покрытия формировали на пластинах из стали Ст3 и 12X18H10T разме-

ром $75 \times 25 \times 2$ мм³. Из порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ с размером частиц менее 45 мкм получали объемные материалы методом электроискрового спекания.

Напыление покрытий осуществляли на современном детонационном комплексе *CCDS2000*, разработанном и сконструированном в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Теоретический подбор параметров напыления проводили с использованием программного обеспечения *LIH*, разработанного в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Электроискровое спекание порошка $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ осуществляли с применением установки *Spark Plasma Sintering Labox 1575 (SINTER LAND Inc., Япония)* при скорости нагрева 100 °С/мин, давлении 40 МПа и времени выдержки 3 мин. Температура нагрева составляла 500 °С и 600 °С.

В рамках диссертационной работы проведены металлографические, электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования, а также адгезионные, дюрOMETрические и триботехнические испытания материалов в условиях сухого трения скольжения с возвратно-поступательным движением в соответствии с *ASTM G133 A*, а также в условиях трения о нежестко закрепленные частицы согласно *ASTM G65 D*. Коррозионные испытания покрытий проводили в условиях электрохимической коррозии и моделируемых условиях атмосферной коррозии. В качестве материалов сравнения использовали стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5582-75) и Ст3 (ГОСТ 380-2005). Содержание кристаллической фазы в исследуемых образцах определяли методом Ритвельда по рентгенограммам с использованием программного обеспечения *Topas 4.2 (Bruker AXS, Германия)*.

Положения, выносимые на защиту

1. Детонационное напыление порошков сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ позволяет формировать низкопористые покрытия с содержанием аморфной фазы более 86 масс. % из сплавов с различной стеклообразующей способностью.
2. Высокая коррозионная стойкость покрытий из порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, полученного методом детонационного напыления, обеспечивается высокой долей аморфной фазы и низкой пористостью материала.
3. Присутствие в структуре покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ более 86 масс. % аморфной фазы и их малая остаточная пористость обеспечивают увеличение износостойкости в условиях сухого трения скольжения в 5...10 раз по сравнению со сталью 12Х18Н10Т.
4. Различия в износостойкости покрытия $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и материала, полученного методом электроискрового спекания (того же сплава), обусловлены различием их когезионной прочности.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современного исследовательского оборудования, использованием взаимодополняющих методов анализа и статистической обработкой результатов измерений. Основные результаты работы представлены на Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции «Химические технологии функциональных материалов» (г. Новосибирск, 2019 г.), Всероссийской конференции с международным

участием «Горячие точки химии твердого тела: от новых идей к новым материалам» (г. Новосибирск, 2019 г.), Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2019-2020 г.г.), Международной Уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (г. Екатеринбург, 2020 г.), XIII симпозиуме с международным участием «Термодинамика и материаловедение» (г. Новосибирск, 2020 г.), Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (г. Екатеринбург, 2021 г.).

Личный вклад автора заключался в формулировании задач диссертационного исследования, подборе режимов детонационного напыления, проведении структурных исследований и испытаний на износостойкость и коррозионную стойкость, анализе и обобщении экспериментальных данных, сопоставлении и обработке результатов исследования, а также формулировании выводов на основании полученных результатов. Эксперименты по детонационному напылению покрытий проведены совместно с д.т.н. В.Ю. Ульяницким и И.С. Батраевым. Исследования электрохимической коррозии покрытий проведены совместно с к.ф.-м.н. М.А. Ереминой. Исследования износостойкости покрытий проведены совместно с д.ф.-м.н. В.Ф. Косаревым и В.С. Шикаловым.

Соответствие паспорту заявленной специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствуют пунктам 1, 2, 11 и 16 паспорта специальности 2.6.17 – Материаловедение.

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 20 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК) – 2, в журналах, входящих в иностранные базы цитирования *Scopus* и *Web of Science* – 6, в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций – 12.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и трех приложений. Текст работы изложен на 201 странице, включая 68 рисунков, 22 таблицы и библиографический список, состоящий из 258 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и теоретическая и практическая значимость, приведены защищаемые положения.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по теме исследования. Проведен анализ физико-химических и физико-механических свойств объемных металлических стекол на основе железа. Приведено описание основных методов газотермического напыления, используемых для формирования покрытий, содержащих аморфную фазу. Проанализировано влияние фазового состава и структуры покрытий с аморфной фазой на их износостойкость и коррозионную стойкость в различных условиях испытаний.

Во второй главе работы описаны технологии детонационного напыления и электроискрового спекания и методы, используемые для исследования фазового состава, структуры и свойств разработанных материалов. Отдельное внимание уделяется методологии выбора режимов детонационного напыления покрытий *Fe-Cr-Nb-B*.

Третья глава посвящена исследованию фазового состава и структуры исходных порошков сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$, а также покрытий и объемных материалов, полученных из порошков данных сплавов методами детонационного напыления и электроискрового спекания, соответственно.

Дифракционный анализ показал, что порошки сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ фракций 45...75 мкм, 20...40 мкм и < 45 мкм содержат ~ 31 масс. %, ~ 5 масс. % и < 5 масс. % кристаллической фазы, соответственно (рисунок 1 а). Установлено, что содержащиеся в данных порошках нанокристаллы, распределенные в аморфной матрице, соответствуют по фазовому составу α -Fe(Cr) (и Fe_2B для фракции 45...75 мкм). Порошок сплава $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ фракции 20...40 мкм имеет кристаллическую структуру (рисунок 1 б), что связано с низкой стеклообразующей способностью данного сплава.

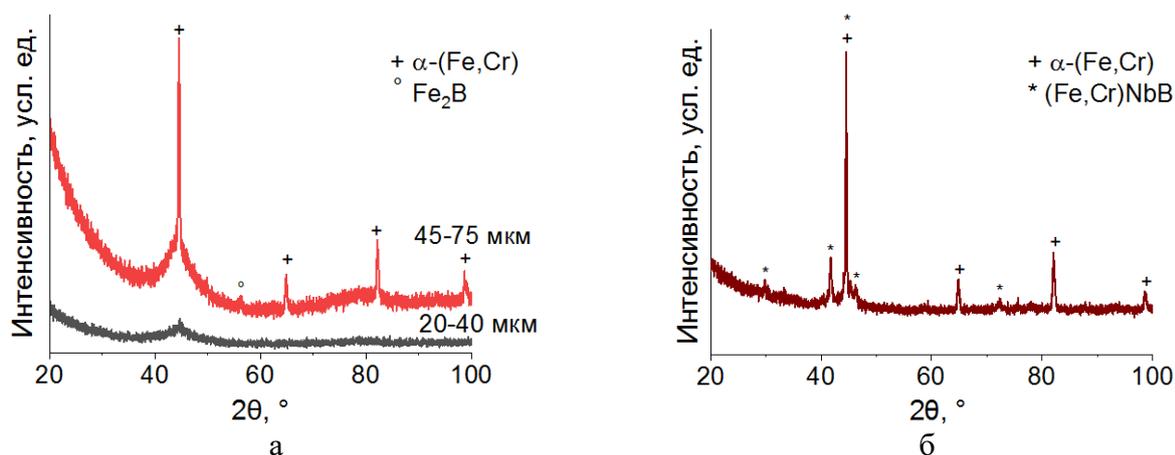


Рисунок 1 – Рентгенограммы исходных порошков сплавов: а – $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, фракции 45...75 мкм и 20...40 мкм; б – $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$, фракция 20...40 мкм

Результаты исследования фазового состава согласуются с результатами микроструктурных исследований частиц порошков. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) исследованы процессы стеклования и кристаллизации сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$. Для данного сплава температуры стеклования (T_g), кристаллизации (T_x) и плавления (T_s) были определены как 521 °C, 573 °C и 1169 °C, соответственно. Вследствие отсутствия аморфной фазы в порошке сплава $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ процессы стеклования и кристаллизации не наблюдались; сплав начинает плавиться при 1188 °C. Пикнометрическая плотность сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ составляет 7,58 г/см³ и 7,62 г/см³, соответственно.

Схема установки для детонационного напыления представлена на рисунке 2. Заряд (выраженный в процентах от объема ствола установки) и состав взрывчатой смеси являются основными параметрами детонационного напыления. Известно, что покрытия, формируемые из деформированных расплавлен-

ных частиц, по качеству выше, чем полученные из частиц, нагретых ниже или значительно выше температуры плавления, с точки зрения пористости, адгезионной и когезионной прочности.

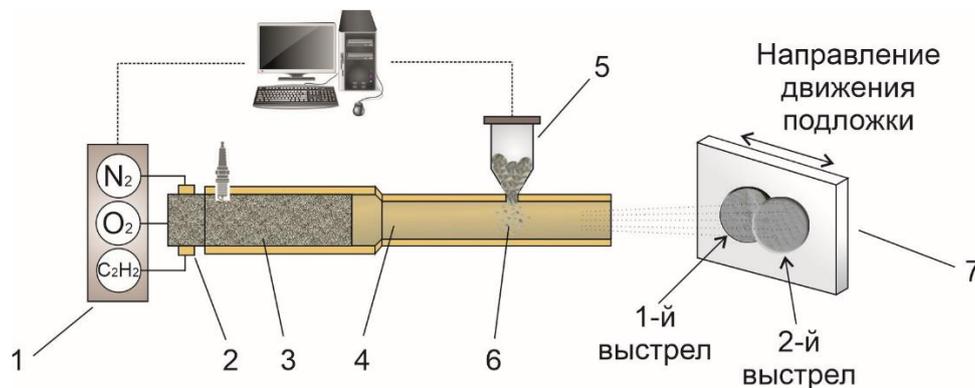


Рисунок 2 – Схема установки *CCDS2000*: 1 – газораспределитель; 2 – ствольный клапан; 3 – заряд взрывчатой смеси; 4 – ствол установки; 5 – порошок в дозаторе; 6 – порошковое облако; 7 – подложка

Результаты расчета температур частиц порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ размером 45 мкм, 60 мкм и 75 мкм при варьировании объема ацетиленокислородной взрывчатой смеси ($O_2/C_2H_2 \approx 1$) от 35 % до 70 %, полученные с применением программы *LH*, представлены на рисунке 3. Расчеты проводились с учетом плавления сплава при температуре 1442 К. Результаты расчетов показывают, что при заполнении ствола на 35...45 % частицы размером 60 мкм и 75 мкм на выходе из ствола находятся в нагретом состоянии, но не претерпевают плавления. Объем взрывчатой смеси, равный 50 %, соответствует максимуму скорости для всех частиц фракции 45...75 мкм; частицы размером 45 мкм имеют скорость, равную 470 м/с. Все частицы достигают температуры плавления при использовании объема взрывчатой смеси 55 %. При увеличении заряда свыше 60 % происходит нагрев частиц до температур, значительно превышающих температуру плавления. При соударении перегретых частиц с подложкой происходит разбрызгивание расплава, которое приводит к увеличению пористости покрытий.

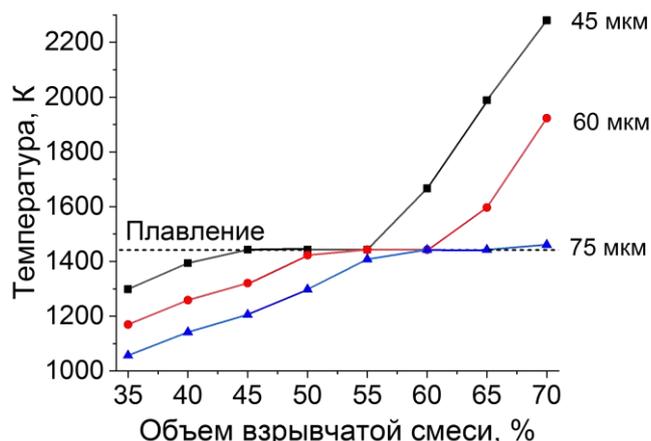


Рисунок 3 – Результаты расчета температур частиц сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ фракции 45...75 мкм в процессе детонационного напыления на выходе из ствола при варьировании объема взрывчатой смеси ($O_2/C_2H_2 \approx 1$)

Проведены расчеты скоростей и температур частиц при напылении сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ фракции 45...75 мкм при постоянном заряде взрывчатой смеси, равном 55 %, и варьировании молярного соотношения компонентов ацетиленокислородной взрывчатой смеси ($O_2/C_2H_2 = \approx 1; 1,5$ и $2,0$). При использовании соотношения $O_2/C_2H_2 \approx 1$ все частицы напыляемой фракции имеют темпе-

ратуру, близкую к 1442 К. Снижение скорости частиц наблюдается при использовании $O_2/C_2H_2 = 1,5$ и 2,0. При увеличении молярного соотношения O_2/C_2H_2 в продуктах детонации увеличивается количество атомарного кислорода, что может негативно сказываться на структуре и свойствах покрытий вследствие окисления частиц в процессе напыления. На основании расчетов температур и скоростей частиц сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ фракции 20...40 мкм можно рекомендовать следующие параметры напыления покрытий: молярное соотношение газов – $O_2/C_2H_2 \approx 1$; заполнение ствола установки – 40...60 %. Расчетная скорость охлаждения сплетов из сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ толщиной 15 мкм составляет $\sim 10^6$ К/с.

На рисунке 4 представлены рентгенограммы покрытий, полученных из порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ с размером частиц 45...75 мкм при варьировании объема взрывчатой смеси ($O_2/C_2H_2 \approx 1$) от 40 % до 70 % и при изменении молярного соотношения компонентов O_2/C_2H_2 от ≈ 1 до 2,0 и постоянном объеме взрывчатой смеси, равном 55 %. Характерной особенностью рентгенограмм покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ является наличие широкого дифракционного гало на углах $2\theta = 40...50^\circ$, которое указывает на наличие аморфной фазы. Присутствие аморфной фазы в покрытиях подтверждают результаты ДСК и просвечивающей электронной микроскопии. При увеличении молярного соотношения O_2/C_2H_2 содержание кристаллической фазы в покрытиях увеличивается (рисунок 4 б). Можно предположить, что взаимодействие аморфного сплава с кислородом в процессе напыления способствует его частичной кристаллизации.

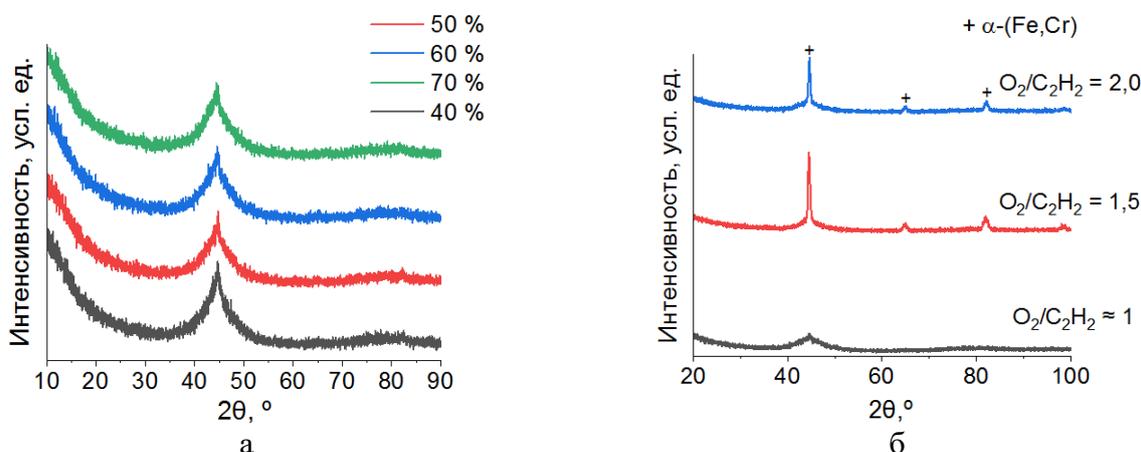


Рисунок 4 – Рентгенограммы покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (45...75 мкм): а – полученных при варьировании заряда взрывчатой смеси ($O_2/C_2H_2 \approx 1$) от 40 % до 70 %; б – полученных при варьировании молярного соотношения O_2/C_2H_2 от ≈ 1 до 2,0 и постоянном заряде 55 %

Результаты исследования фазового состава покрытий (рисунок 5), полученных из порошков $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ (20...40 мкм), показали, что использование параметров детонационного напыления, подобранных на основании результатов расчетов скоростей и температур частиц с помощью программы *LIN*, обеспечивает формирование покрытий с высоким содержанием аморфной фазы (в том числе из порошка $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$, имеющего низкую стеклообразующую способность).

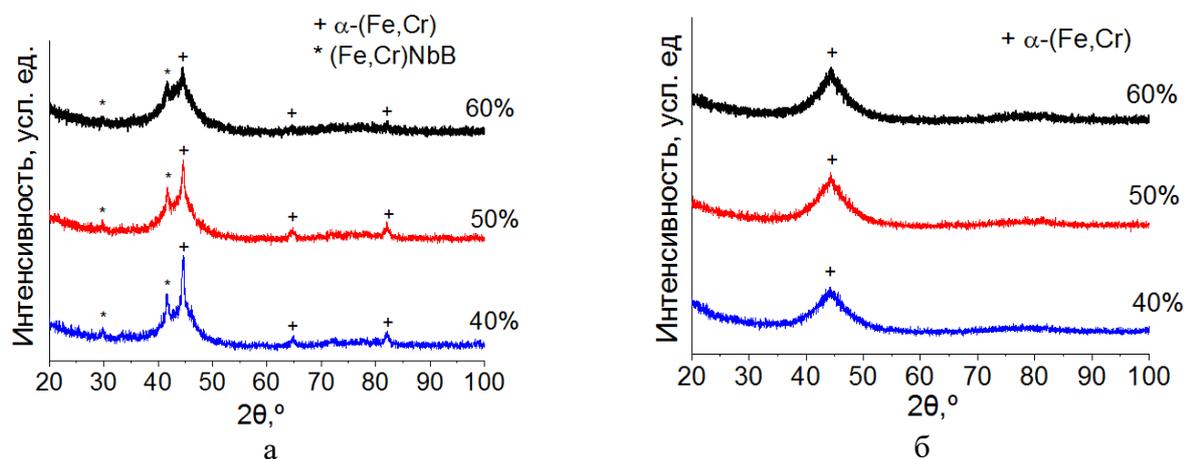


Рисунок 5 – Рентгенограммы покрытий, полученных из порошков с размером частиц 20...40 мкм при варьировании объема взрывчатой смеси от 40 % до 60 %:

а – $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$; б – $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$

На рисунке 6 приведены микрофотографии поперечного сечения покрытий, полученных из порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ фракции 20...40 мкм при варьировании объема взрывчатой смеси ($O_2/C_2H_2 \approx 1$) от 40 % до 60 %. Наблюдаемая микроструктура является характерной для покрытий, полученных в диссертационной работе.

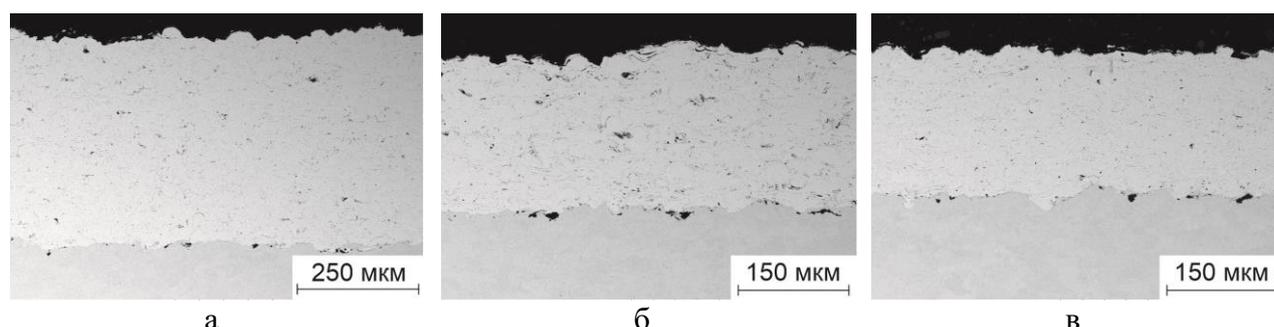


Рисунок 6 – Микрофотографии поперечного сечения покрытий, полученных из порошка справа $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (20...40 мкм) при варьировании заряда ацетиленокислородной смеси эквимольного состава: а – 40 %; б – 50 %; в – 60 %

Электроискровое спекание порошка $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (< 45 мкм) при 500 °C происходит в области переохлажденной жидкости для указанного сплава ($T_g...T_x$), так как температура в центре спекаемого образца обычно на $20...50$ °C выше, чем температура, измеренная термопарой, размещенной в стенке пресс-формы. При данной температуре формируется материал с низким содержанием кристаллической фазы за счет сохранения аморфной структуры исходного порошка (рисунок 7). Увеличение температуры спекания до 600 °C приводит к увеличению содержа-

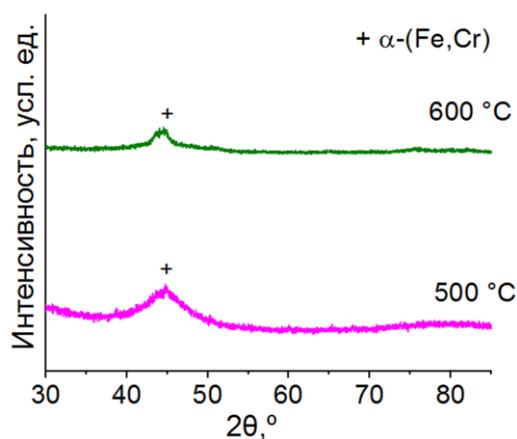


Рисунок 7 – Рентгенограммы объемных материалов, полученных из порошка $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (< 45 мкм) методом электроискрового спекания

ния кристаллической фазы в объемном материале вследствие частичной кристаллизации порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ ($T_x = 573$ °C). Образцы, спеченные при 500 °C и 600 °C, содержат 1 масс. % и 13 масс. % кристаллической фазы, соответственно. В таблице 1 представлены результаты оценки пористости и содержания кристаллической фазы в покрытиях $Fe-Cr-Nb-B$. При увеличении заряда взрывчатой смеси от 40 до 70 % значительных изменений в структуре покрытий, полученных из порошка $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ фракции 45...75 мкм, не наблюдалось (содержание кристаллической фазы составляет 1...2,5 масс. %). Пористость данных покрытий составляет менее 1 %.

Таблица 1 – Результаты оценки пористости и содержания кристаллической фазы в покрытиях $Fe-Cr-Nb-B$

Состав порошка и размер частиц	Молярное соотношение компонентов O_2/C_2H_2	Объем смеси $O_2+C_2H_2$, % от объема ствола	Пористость покрытий, %	Содержание кристаллической фазы, %
$Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 45...75 мкм	≈ 1	40	~ 1	$2,5 \pm 0,2$
		50	~ 1	$2,0 \pm 0,2$
		60	< 1	$1,5 \pm 0,2$
		70	< 1	$1,0 \pm 0,2$
$Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 45...75 мкм	≈ 1	55	~ 1	$1,0 \pm 0,2$
	1,5		~ 2	$3,0 \pm 0,2$
	2,0		~ 3	$5,0 \pm 0,2$
$Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 20...40 мкм	≈ 1	40	< 1	$2,0 \pm 0,2$
		50		$2,0 \pm 0,2$
		60		$3,0 \pm 0,2$
$Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ 20...40 мкм	≈ 1	40		$14,0 \pm 0,2$
		50		$14,0 \pm 0,2$
		60		$6,0 \pm 0,2$

При увеличении молярного соотношения O_2/C_2H_2 от ≈ 1 до 2,0 (при постоянном объеме взрывчатой смеси 55 %) увеличивается пористость $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и доля кристаллической фазы в покрытиях. Покрытия из порошков $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ фракции 20...40 мкм содержат 2...3 масс. % и 6...14 масс. % кристаллической фазы, соответственно.

При детонационном напылении порошковых смесей $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}-Al_2O_3$, содержащих 20...60 масс. % Al_2O_3 , большая часть керамических частиц рикошетирует при соударении с подложкой, что приводит к уменьшению содержания частиц оксида алюминия в покрытиях по сравнению с исходными порошковыми смесями и увеличению дефектности композиционных покрытий. Пористость покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}-Al_2O_3$ составляет ~ 3 %.

В четвертой главе представлены результаты исследования механических, коррозионных и триботехнических характеристик покрытий и объемных материалов $Fe-Cr-Nb-B$ в различных условиях испытаний.

Исследование электрохимического поведения покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (полученных из порошка фракции 45...75 мкм) проводилось в условиях естественной аэрации ячейки в электролитах, содержащих 3,5 масс. % $NaCl$, при pH

3; 5,5 и 10 при комнатной температуре. Так как покрытия $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, полученные с использованием зарядов 40...70 % взрывчатой смеси ($O_2/C_2H_2 \approx 1$), характеризуются близкими показателями пористости и содержания кристаллической фазы (таблица 1), их потенциодинамические кривые имеют схожий вид. В диссертационной работе представлены усредненные данные по покрытиям после электрохимических испытаний (рисунок 8). Аморфная природа и низкая пористость покрытий обеспечили формирование плотной пассивирующей пленки, поэтому вплоть до потенциала транспассивного растворения стабильной питтинговой коррозии не наблюдается. Образцы стали 12X18H10T так же переходят в пассивное состояние, но при потенциалах коррозии 600...1000 мВ наблюдается интенсивное растворение их поверхности (рисунок 8 а). Это связано с формированием питтингов коррозии, что подтверждается результатами исследования поверхности стали после электрохимических испытаний. Транспассивное растворение покрытий начинается при потенциалах коррозии 1100...1300 мВ. Образец из стали Ст3 не проявляет пассивирующего поведения (рисунок 8 б).

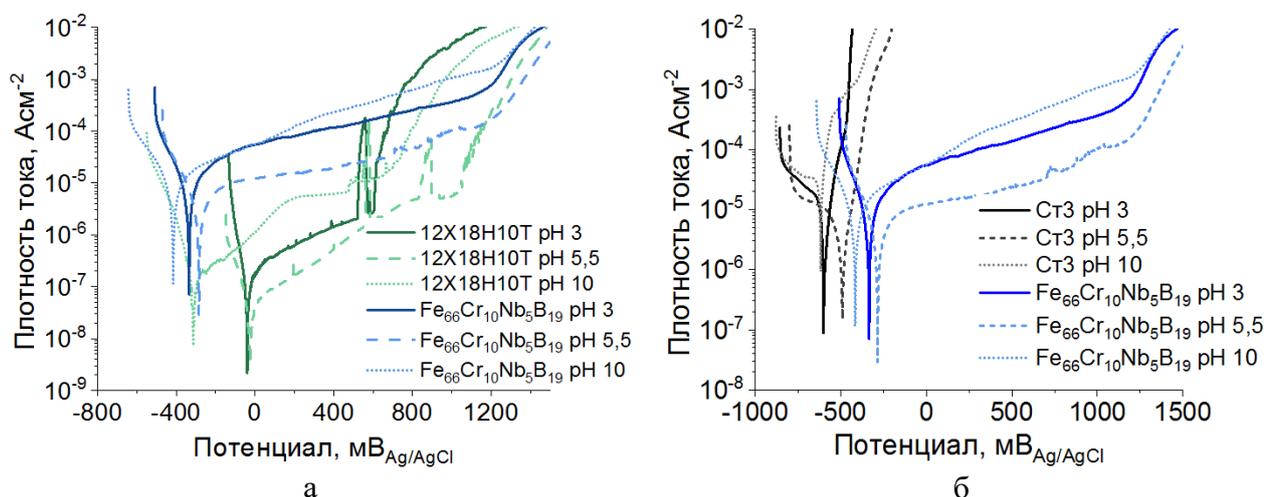


Рисунок 8 – Потенциодинамические поляризационные кривые покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в 3,5 масс. % растворе $NaCl$ с pH 3,0, 5,5 и 10,0 и материалов сравнения: а – покрытия и 12X18H10T; б – покрытия и Ст3. Показана одна кривая для всех образцов покрытий, полученных при варьировании заряда взрывчатой смеси 40...70 %, в качестве характерной кривой

На рисунке 9 представлены микрофотографии поверхности покрытия $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, полученного при объеме взрывчатой смеси 70 %, после испытаний в электролите с pH 5,5. Данные изображения являются характерными для всей серии образцов покрытий после электрохимических испытаний. Коррозии преимущественно подвержены частицы, которые не были расплавлены в процессе детонационного напыления (рисунок 9 б), и межсплетовые границы (рисунок 10), которые имеют нанокристаллическую структуру (подтверждено исследованиями тонкой структуры покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$). Присутствие кристаллов, распределенных в аморфной матрице, негативно сказывается на коррозионной стойкости покрытий, так как фазовая неоднородность способствует снижению стабильности пассивирующей пленки. Наличие сквозных пор (рису-

нок 9 в) может способствовать проникновению электролита с поверхности в объем покрытия. Результаты оценки стойкости покрытий, полученных из порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (45...75 мкм) с использованием зарядов взрывчатой смеси ($O_2/C_2H_2 \approx 1$), равных 50...70 %, к электрохимической коррозии согласуются с данными, полученными при испытаниях в распыляемом нейтральном соляном тумане. Следы коррозионных повреждений появляются на поверхности покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и стали 12X18H10T только спустя 150 часов испытаний.

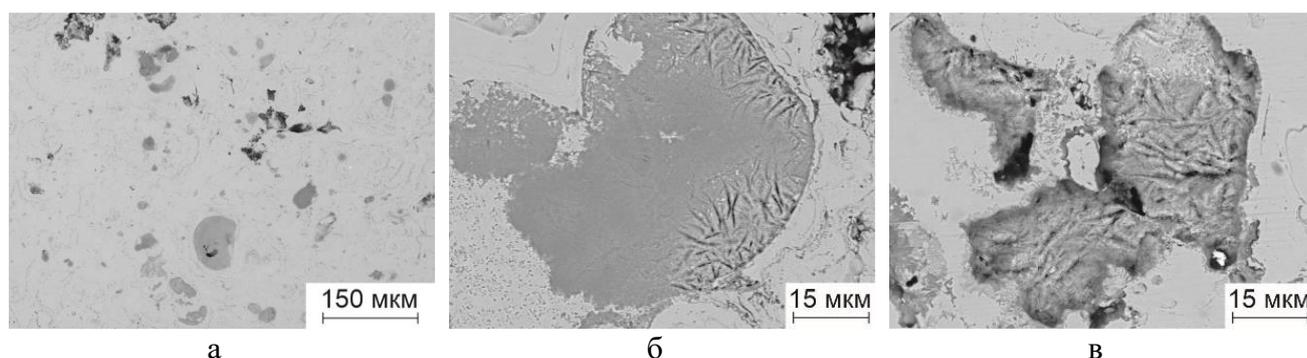


Рисунок 9 – Изображения поверхности покрытия $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, полученного при заряде взрыва 70 %, после электрохимических испытаний в электролите с pH 5,5: а – общий вид поверхности покрытия; б – увеличенное изображение области, подвергшейся коррозии; в – увеличенное изображение области на поверхности покрытия, содержащей поры

Как видно из таблицы 2, микротвердость покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, полученных из порошка фракции 45...75 мкм при варьировании заряда ацетиленокислородной газовой смеси эквимольного состава от 40 % до 70 %, находится на уровне $\sim 850 HV_{0,1}$. При увеличении молярного соотношения O_2/C_2H_2 от ≈ 1 до 2,0 (при постоянном заряде 55 %) увеличивается количество дефектов в покрытиях, что негативно сказывается на их микротвердости. Средние значения микротвердости покрытий, сформированных из порошков сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ (20...40 мкм), составляют $805 HV_{0,1}$ и $835 HV_{0,1}$, соответственно. Электроискровое спекание порошка $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (< 45 мкм) при температуре 600 °C позволяет получить компакты с бóльшей микротвердостью ($1260 \pm 130 HV_{0,1}$) по сравнению с объемным материалом, сформированным при 500 °C ($880 \pm 200 HV_{0,1}$). Стоит отметить, что микротвердость компакта $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, спеченного при 600 °C, выше, чем микротвердость детонационных покрытий, полученных из того же сплава, при близких значениях пористости (< 1 %), что связано с более высоким содержанием кристаллической фазы в спеченном материале. Увеличение количества пор и микротрещин в композиционных покрытиях $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}-Al_2O_3$, обусловленное введением частиц оксида алюминия, сопровождается снижением микротвердо-

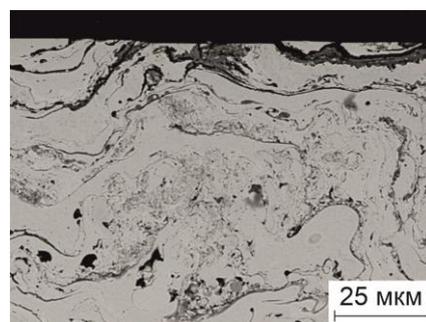


Рисунок 10 – Микрофотография поперечного сечения покрытия $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ после коррозионных испытаний при pH 10

сти материалов до 635...575 $HV_{0,3}$. Дальнейшие испытания покрытий и спеченных материалов, полученных из сплавов $Fe-Cr-Nb-B$, проводили в сравнении со сталью 12X18H10T ($\sim 200 HV$).

Таблица 2 – Микротвердость разработанных покрытий из сплавов системы $Fe-Cr-Nb-B$

Состав порошка и размер частиц	Молярное соотношение компонентов O_2/C_2H_2	Объем смеси $O_2+C_2H_2$, % от объема ствола	Микротвердость, $HV_{0,1}$
$Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 45...75 мкм	≈ 1	40	885±90
		50	870±65
		60	855±55
		70	840±80
$Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 45...75 мкм	≈ 1	55	920±95
	1,5		755±65
	2,0		540±75
$Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 20...40 мкм	≈ 1	40	885±65
		50	715±100
		60	810±75
$Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ 20...40 мкм	≈ 1	40	835±95
		50	820±125
		60	850±100

Для оценки адгезионной прочности покрытий использовали штифтовой метод. Полученные в работе покрытия $Fe-Cr-Nb-B$ характеризуются высокими значениями прочности сцепления со сталью Ст3 (125...150 МПа). Стоит отметить, что адгезионная прочность покрытий значительно выше по сравнению с покрытиями с аморфной структурой из сплавов на основе железа, сформированными другими методами газотермического напыления (~ 55 МПа).

Результаты испытаний покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, полученных при варьировании объема взрывчатой смеси 40...70 % ($O_2/C_2H_2 \approx 1$), в условиях трения о нежестко закрепленные абразивные частицы и царапания алмазным индентором Берковича (скретч тест) показали, что покрытия имеют близкие значения износостойкости. Износостойкость покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в условиях абразивного изнашивания на 30...35 % выше, чем у стали 12X18H10T.

При испытаниях разработанных материалов и стали 12X18H10T в условиях сухого трения скольжения с возвратно-поступательным движением в качестве контртела использовали твердосплавные шарики (ВК6) диаметром 6,35 мм. Испытаниям подвергались покрытия, полученные из порошков сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ с размером частиц 45...75 мкм и 20...40 мкм, порошка сплава $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ с размером частиц 20...40 мкм и спеченный при 600 °С сплав $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$. Спеченный сплав и покрытия $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ имеют близкие значения пористости, поэтому представляло интерес сравнить триботехнические свойства данных материалов. Определение объема лунки трения после испытаний проводили с помощью оптического профилометра. Средние значения коэффициентов трения в стационарном режиме и объем изношенного материала нержавеющей стали, спеченного сплава и покрытий из сплавов $Fe-Cr-Nb-B$, представлены в таблице 3. Средние значения коэффициента трения в стацио-

нарном режиме для покрытий и спеченного сплава выше (0,64...0,78) по сравнению с нержавеющей сталью (0,57), что связано с различиями в физико-механических свойствах материалов. Износостойкость покрытий, полученных из порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ с размером частиц 45...75 мкм с использованием объемов взрывчатой смеси ($O_2/C_2H_2 \approx 1$), равных 50...70 %, находится на одном уровне и на порядок выше по сравнению со сталью 12X18H10T. Существенный износ покрытия, полученного при напылении порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (45...75 мкм) с использованием заряда, равного 40 %, связан с низкой когезией между сплетами, из которых состоит покрытие. Износостойкость спеченного при 600 °С сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в значительно ниже, чем покрытий того же состава, что обусловлено низкой когезионной прочностью спеченного материала. Введение порошка оксида алюминия в покрытия $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ негативно отражается на их износостойкости.

Таблица 3 – Средние значения коэффициента трения в стационарном режиме и объема изношенного материала покрытий, полученных из порошков сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$, спеченного при 600 °С сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и нержавеющей стали. ДН – детонационное напыление, ЭИС – электроискровое спекание.

Материал	Коэффициент трения	Среднее значение объема изношенного материала, мм ³
ДН $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 45...75 мкм, 40 %	0,64	0,160±0,031
ДН $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 45...75 мкм, 50 %	0,69	0,040±0,014
ДН $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 45...75 мкм, 60 %	0,67	0,040±0,005
ДН $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 45...75 мкм, 70 %	0,69	0,030±0,005
ДН $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 20...40 мкм, 40 %	0,72	0,080±0,026
ДН $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 20...40 мкм, 50 %	0,71	0,060±0,007
ДН $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ 20...40 мкм, 60 %	0,78	0,110±0,034
ДН $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ 20...40 мкм, 40 %	0,72	0,080±0,025
ДН $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ 20...40 мкм, 50 %	0,72	0,050±0,009
ДН $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ 20...40 мкм, 60 %	0,66	0,060±0,012
ЭИС $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ < 45 мкм, 600 °С	0,67	0,420±0,124
12X18H10T	0,57	0,360±0,043

В пятой главе приведены примеры возможного практического применения результатов работы. Проведенные исследования позволили выбрать режимы детонационного напыления порошков $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ различных фракций, обеспечивающие формирование низкопористых покрытий с высоким содержанием аморфной фазы. На основании результатов диссертационного исследования были разработаны технологические рекомендации по оптимизации режимов детонационного напыления порошков сплавов $Fe-Cr-Nb-B$. Разработанные рекомендации используются в ООО «Сибирские технологии защитных покрытий» и ООО «НПО Спецпокрытие».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Детонационное напыление порошков четверных сплавов $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ позволяет формировать на подложках из сталей Ст3 и 12X18H10T низкопористые покрытия с высоким содержанием аморфной фазы

(более 86 масс. %) и высокими коррозионной стойкостью и износостойкостью. Рекомендуемые параметры детонационного напыления порошков указанных сплавов: молярное соотношение газов – $O_2/C_2H_2 \approx 1$; заполнение ствола установки – 40...60 % (для порошков фракции 20...40 мкм) и 50...70 % (для порошков фракции 45...75 мкм).

2. С использованием программы *LIN* определены параметры детонационного напыления, обеспечивающие расплавление частиц порошковых сплавов *Fe-Cr-Nb-B* и способствующие формированию тонких сплетов. Оценочный расчет показал, что скорость охлаждения сплетов толщиной 15 мкм составляет $\sim 10^6$ К/с.

3. Повышение соотношения O_2/C_2H_2 от ≈ 1 до 2,0 (при постоянном заряде 55 % от объема ствола) при детонационном напылении порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ фракции 45...75 мкм приводит к увеличению дефектности и содержания кристаллической фазы в покрытиях и снижению их микротвердости (от 920 $HV_{0,1}$ до 540 $HV_{0,1}$).

4. Метод детонационного напыления обеспечивает возможность формирования на заготовках из стали Ст3 низкопористых покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ с высокой адгезионной прочностью (125...150 МПа). Микротвердость покрытий, полученных из порошков $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$, при соотношении $O_2/C_2H_2 \approx 1$ составляет 800...850 $HV_{0,1}$.

5. Результаты определения стойкости покрытий, полученных из порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, к электрохимической коррозии согласуются с данными, полученными при испытании в нейтральном соляном тумане. Широкие области пассивности, наблюдаемые на поляризационных кривых покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в электролитах, содержащих 3,5 масс. % $NaCl$ при pH 3, 5,5 и 10, свидетельствуют об их высокой коррозионной стойкости в условиях потенциодинамической поляризации. Следы коррозии на поверхности покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и образца 12X18Н10Т в условиях распыления нейтрального соляного тумана появляются только после 150 часов испытаний.

6. В условиях сухого трения скольжения износостойкость покрытий *Fe-Cr-Nb-B* более чем в 5 раз выше по сравнению со сталью 12X18Н10Т. В условиях трения о жестко закрепленные абразивные частицы стойкость покрытий из порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ на 30...35 % выше, чем у хромоникелевой аустенитной стали. Формирование в покрытии $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ нанокристаллов ($FeCr$) NbB приводит полуторакратно увеличению износостойкости по сравнению с покрытиями, полученными из порошка сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ с тем же размером частиц.

7. Материал, полученный электроискровым спеканием при 600 °С порошка $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$, имеет частично кристаллическую структуру (содержание кристаллической фазы 13 масс. %) с низкой остаточной пористостью и характеризуется высокой микротвердостью (1260 $HV_{0,1}$). Микротвердость покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ (805 $HV_{0,1}$) ниже микротвердости спеченного сплава при близких значениях пористости (< 1 %). Износостойкость спеченного при 600 °С материала в условиях сухого трения скольжения в 7 раз ниже, чем у покрытий с тем же элементным составом, и на 15 % ниже по сравнению со сталью 12X18Н10Т.

8. Было исследовано влияние введения порошка оксида алюминия на структуру и свойства композиционных покрытий, сформированных при напылении порошковых смесей $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}-Al_2O_3$, содержащих 20...60 масс. % керамического порошка. Установлено, что композиционные покрытия состоят из аморфной матрицы и распределенных в ней частиц Al_2O_3 . Введение порошка оксида алюминия негативно сказывается на микротвердости и триботехнических свойствах композиционных покрытий по сравнению с покрытиями $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ без добавок.

9. Проведенные исследования позволили определить режимы детонационного напыления порошков $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ и $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$, позволяющие формировать низкопористые покрытия с высоким содержанием аморфной фазы и перспективными свойствами. Разработанные технологические рекомендации переданы в компании, специализирующиеся на нанесении покрытий методом детонационного напыления (ООО «Сибирские технологии защитных покрытий» и ООО «НПО Спецпокрытие»). Результаты работы используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии новых материалов» и «Наноинженерия».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

При дальнейшем развитии темы исследования следует обратить особое внимание на возможность армирования покрытий с аморфной структурой керамическими частицами. Необходимо провести исследование влияния предварительной обработки порошковых смесей в мельницах различного механизма воздействия и различных энергий на структуру, фазовый состав и функциональные свойства покрытий, получаемых детонационным напылением данных смесей.

Интересным представляется исследование влияния дополнительного отжига покрытий с аморфной структурой (для частичной и полной кристаллизации сплава) на их износостойкость в различных условиях изнашивания.

Список основных научных публикаций по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК

1. Коррозионная стойкость детонационных покрытий $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ в условиях воздействия соляного тумана / И. Д. Кучумова, И. С. Батраев, Н. Ю. Черкасова [и др.]. // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 95–105.

2. Износостойкость детонационных покрытий с аморфной структурой в условиях трения о нежестко закрепленные абразивные частицы / И. Д. Кучумова, В. А. Батаев, Б. Е. Гринберг [и др.]. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2021. – № 9. – С. 3–8.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных

Web of Science/Scopus

3. *Formation of Metallic Glass Coatings by Detonation Spraying of a $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$ Powder* / I. D. Kuchumova, I. S. Batraev, V. Y. Ulianitsky [et al.]. // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, iss. 8. – Art. 846.

4. *Processing of Fe-Based Alloys by Detonation Spraying and Spark Plasma Sintering* / I. D. Kuchumova, I. S. Batraev, A. V. Ukhina [et al.]. // *Journal of thermal spray technology*. – 2021. – Vol. 30, iss. 6. – P. 1692–1702.

5. *The influence of the O₂/C₂H₂ ratio on the structure and properties of Fe₆₆Cr₁₀Nb₅B₁₉ detonation coatings* / I. D. Kuchumova, I. S. Batraev, N. Y. Cherkasova [et al.]. // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 25, iss. 3. – P. 384–386.

6. *Wear-Resistant Fe-Based Metallic Glass-Al₂O₃ Composite Coatings Produced by Detonation Spraying* / I. D. Kuchumova, N. Yu. Cherkasova, I. S. Batraev [et al.]. // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2022. – Vol. 31, iss. 4. – P. 1355–1365.

7. *Structural Features and Corrosion Resistance of Fe₆₆Cr₁₀Nb₅B₁₉ Metallic Glass Coatings Obtained by Detonation Spraying* / I. D. Kuchumova, M. A. Eryomina, N. V. Lyalina [et al.]. // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2022. – Vol. 31, iss.1. – P. 622–630.

8. *Interaction between Fe₆₆Cr₁₀Nb₅B₁₉ metallic glass and aluminum during spark plasma sintering* / D.V. Dudina, B.B. Bokhonov, I.D. Kuchumova [et al.] // *Materials Science & Engineering. A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*. – 2021. – Vol. 799. – P. 140165.

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 № 1430 подписано в печать 18.10.2022 г.