

На правах рукописи



Ерёмина Ксения Петровна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ,
СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ
ИЗ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тихоокеанский государственный университет»

Научный руководитель: **Химухин Сергей Николаевич,**
доктор технических наук, доцент,
заместитель директора по научной работе ФГБУН
Институт материаловедения Хабаровского научного
центра Дальневосточного отделения Российской
академии наук, г. Хабаровск

Официальные оппоненты: **Рахимьянов Харис Магсуманович,**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии машиностроения
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск

Козырь Аркадий Валентинович,
кандидат технических наук, доцент,
декан инженерно-физического факультета, ФГБОУ
ВО «Амурский государственный университет»,
г. Благовещенск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный университет
путей сообщения», г. Хабаровск

Защита состоится «08» октября 2020 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013 Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, корпус 3, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на официальном сайте организации по ссылке https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/142. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.092.01
к.т.н.



Проценко
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из основных задач современного материаловедения является разработка новых и совершенствование известных технологий обработки материалов, которые позволяют обеспечить повышение физико-механических и эксплуатационных свойств деталей машин и механизмов в агрессивных средах. При этом часто нет необходимости создавать деталь целиком из функционального материала, достаточно получить на ней покрытие. Из большого числа методов, позволяющих получать покрытия, повышенное внимание уделяется методам, основанным на использовании концентрированных потоков энергии. К числу таких методов относится электроискровая обработка, которая традиционно называется электроискровым легированием (ЭИЛ). Метод ЭИЛ основан на импульсном электроэрозионном процессе между анодом (обрабатываемым электродом) и катодом (деталью). Процесс формирования покрытия связан с увеличением массы катода и уменьшением массы анода. Высокая скорость охлаждения расплава (до 10^{-6} К/с) способствует формированию метастабильных микроструктур в зависимости от используемых материалов.

Широко известен опыт использования ЭИЛ для создания покрытий с улучшенными физико-механическими и технологическими свойствами, такими как твердость, износостойкость, жаростойкость и др. Однако, несмотря на ряд преимуществ метода, у него имеются недостатки, наиболее существенными из которых являются малая толщина и повышенная шероховатость покрытия. Электроискровые покрытия, сформированные фактически закалкой, являются хрупкими, и поэтому актуальным является вопрос по изучению их способности к пластическому деформированию. Малая распространенность метода ЭИЛ в условиях промышленного производства обусловлена недостаточной изученностью механизма протекания электроискрового процесса и формирующихся структур покрытия. В большинстве случаев структура электроискровых покрытий сложно выявляется методами металлографии. Однако совершенствование методов исследования и более широкое распространение современного исследовательского оборудования позволяет получить новые данные о структурном строении электроискровых покрытий.

В качестве анодных материалов для нанесения покрытий методом ЭИЛ используются металлы и сплавы, карбиды, бориды, интерметаллиды. Интерметаллидные сплавы на основе системы Ni-Al представляют большой научный и практический интерес, благодаря своим уникальным свойствам – коррозионной стойкости, жаростойкости и жаропрочности. Указанные сплавы используют, в том числе и при изготовлении лопаток для высокотемпературного тракта газотурбинных установок. В последние десятилетия разработано большое количество интерметаллидных сплавов, включающих до 20 легирующих элементов, но в настоящее время наблюдается тенденция к снижению количества легирующих элементов в сплаве. Все большее количество работ связано с использованием сплавов на основе системы Ni-Al с основными фазами NiAl и Ni₃Al, которые во всем мире используются, как жаростойкие и жаропрочные, что предопределяет их использование в качестве материалов для получения жаростойких покрытий.

Актуальность работы подтверждается выполнением ее в соответствии с планами научно-исследовательских работ ФГБУН Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (2013–2020 гг.) по теме ФНИ «Новые материалы и покрытия, в том числе нано-

структурные, на основе металлических, тугоплавких, оксидных систем с повышенными эксплуатационными свойствами». Номер госрегистрации АААА-А19-119011590011-7.

Степень разработанности темы исследования

Одним из основных преимуществ технологии ЭИЛ, при соблюдении ряда условий, является высокая адгезия между покрытием и основой, что предполагает успешное использование ЭИЛ для создания жаростойких покрытий. В качестве перспективных жаростойких материалов используются сплавы на основе системы Ni-Al, имеющие в составе жаростойкие фазы (NiAl и Ni₃Al). Наиболее существенный вклад в это направление исследований внесли работы отечественных и зарубежных ученых, таких как Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И., Верхотуров А.Д., Левашов Е.А., Бурумкулов Ф. Х., Химухин С.Н., Николенко С.В., Коротаев Д.Н., Каблов Е.Н., Михайлюк А.И., Гитлевич А. Е., Тарельник В. Б., Johnson R.N., Reynolds J.L., Heard D.W., Brochu M., Radek N.

Цель работы

Повышение жаростойкости сталей 20X13 и 30 посредством получения жаростойких покрытий, сформированных методом электроискрового легирования из интерметаллидных сплавов.

Задачи исследования

1. Разработать технологию выплавки интерметаллидных сплавов с различным соотношением компонентов для последующего использования их в качестве анодных материалов при получении жаростойких покрытий на сталях методом электроискрового легирования.
2. Определить оптимальные составы анодных материалов и режимы электроискровой обработки для формирования жаростойких покрытий, в том числе с подслоем, установить термовременные параметры испытаний на жаростойкость.
3. На основе результатов исследования процесса структурообразования в покрытиях после термоциклирования установить основные факторы, влияющие на жаростойкость интерметаллидных покрытий.

Научная новизна

1. Установлено, что (электроискровые) покрытия, полученные сплавами на основе алюминидов никеля (NiAl, Ni₃Al) на сталях (20X13 и 30), состоят из столбчатых кристаллитов преимущественно системы Ni_x-Al_y-Fe_z, в составе которых концентрация компонентов катода (Fe, Cr при использовании стали 20X13) увеличивается от поверхности покрытия к катоду, а концентрация компонентов анода (Ni, Al) напротив – уменьшается.
2. Экспериментально обосновано использование полученных интерметаллидных сплавов на основе NiAl или Ni₃Al в качестве анодных материалов для формирования электроискровых покрытий на сталях (30 и 20X13), которые позволяют повысить жаростойкость до 1,5 и 3-х раз соответственно при термоциклированиях (12 циклов с нагревом до 900 °С). Нанесение покрытий (на основе NiAl) с подслоем из Cu на сталях (30 и 20X13) увеличивает жаростойкость более 2-х и 3,5 раз соответственно.
3. В зависимости от состава анода (NiAl, Ni₃Al) и катода (стали 20X13 и 30), материала подслоя (Ni, Cu) и параметров электроискровой установки выявлены закономерности формирования структуры и распределения элементов (Ni, Al, Fe, Cr, Cu) в покрытиях и подслое после термоциклирования.

Практическая значимость работы

1. Разработана технология по получению интерметаллидных сплавов, имеющих однородное, мелкозернистое строение и минимальное количество пор. Сплавы предназначены для формирования покрытий на сталях методом электроискровой обработки. Определены режимы и условия нанесения жаростойких покрытий из интерметаллидных сплавов на стали (20Х13 и 30), включая покрытия с подслоем (Ni, Cu).

2. Показана перспектива уменьшения шероховатости полученных покрытий, (NiAl, Ni₃Al) обусловленная способностью к пластическому деформированию столбчатых кристаллитов в покрытиях при выглаживании методом ультразвукового пластического деформирования.

3. Используя разработанную технологию и полученные анодные материалы, сформированы покрытия на турбинных лопатках (направляющих лопаток статора и рабочих лопаток ротора) установки ГТТ-3М ПАО «Дальэнергомаш». В результате технологических испытаний газовой турбины в рабочем режиме установлено отсутствие признаков окисления и отслаивания участков с покрытиями на поверхности лопаток.

Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» и используются при подготовке бакалавров по направлению 29.03.04 «Технология художественной обработки материалов».

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовали комплекс традиционных и новых методов и методик, позволяющих выявлять закономерности тонкого структурного строения и распределения компонентов в структурных составляющих литых анодных материалов и электроискровых покрытиях. Экспериментальные исследования проводились с использованием аналитического и испытательного оборудования центра коллективного пользования «Прикладное материаловедение» при Тихоокеанском государственном университете. Использовался аналитический исследовательский комплекс на базе растрового электронного микроскопа с микрорентгеноспектральными приставками и атомно-силовой микроскоп. Для выявления микроструктуры электроискровых покрытий применяли ионное травление.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерности структурообразования и распределения концентрации компонентов катода и анода в структурных составляющих электроискровых интерметаллидных покрытий;
- результаты исследований жаростойкости при термоциклировании образцов сталей (20Х13 и 30) с интерметаллидными покрытиями, включая покрытия (NiAl, Ni₃Al) с подслоем (Ni, Cu);
- кинетические закономерности массопереноса электродов различного состава при электроискровой обработке сталей;
- влияние состава анодных и катодных материалов на изменение структуры и состава структурных составляющих электроискровых покрытий на жаростойкость после термоциклирования.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов подтверждается использованием хорошо известных в материаловедении методов; применением современных методик физических измерений, сертифицированной аппаратуры, современной вычислительной техники и про-

граммных средств автоматизации и обработки полученных результатов; согласованностью полученных результатов с экспериментальными данными, полученными автором и другими исследователями.

Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждались на научных семинарах, конференциях, конкурсах, на Всероссийских и международных конференциях как в виде устных, так и стендовых докладов. Среди них: XV Международная научно-практическая конференция (12 ноября 2012 г., Новосибирск); XVI Международная научно-практическая конференция (10 декабря 2012 г., Пенза); 2-я Международная научно-практическая конференция (25 декабря 2012 г., Курск); III Международная научно-практическая конференция (30 января 2013 г., Краснодар); Международный научно-техническая конференция (21–22 июня 2013 г., Комсомольск-на-Амуре); International Sino-Russian Symposium (22 October 2013, Khabarovsk); XVI краевой конкурс молодых ученых и аспирантов (17–24 января 2014 г., Хабаровск); «Sino-Russian Symposium on Advanced Materials and Processing Technology» (from Jun 3rd to Jun 5th 2014, in Qingdao, P.R. China.); 3 Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов (17–19 сентября 2014 г., Комсомольск-на-Амуре); 22-я Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия» (22–24 октября 2014, Минск, Беларусь); I Международная научная конференция молодых ученых (2–6 декабря 2014 г., Новосибирск); Международная научно-техническая конференция (12–16 мая 2015 г., Комсомольск-на-Амуре); 7-я Международная научно-практическая конференция (29–30 июля 2018 г., Курск); XVIII Международная конференция по науке и технологиям Россия-Корея-СНГ (26–28 августа 2018 г., Москва); Международная научно-техническая конференция, посвящённая 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана (22–23 апреля 2019 г., Москва); 7-й Международная молодежная научная конференция (25–26 апреля 2019 г., Курск).

Публикации по теме диссертации

Основное содержание диссертации изложено в 29 публикациях, из них 5 статей опубликовано в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 2 статьи в рецензируемых изданиях, входящих в библиографическую и реферативную базу данных Scopus.

Личный вклад автора

В диссертационной работе обобщены результаты исследований, которые автором получены лично и в соавторстве. Основная роль в получении и обобщении результатов работы принадлежит автору. Планирование, обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающей 244 источника, и приложений. Общий объем работы – 153 страницы, включая 34 рисунка и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность выбранной темы исследования, установлена степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, приведена научная новизна и практическая значимость работы, описаны методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, отмечены степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе представлены результаты аналитического обзора отечественных и зарубежных литературных источников, относящихся к теме исследования.

Приведены литературные данные по материалам, которые используют для изготовления лопаток газотурбинных установок, показана необходимость улучшения физико-механических свойств этих материалов с целью повышения эффективности работы установок. Основное внимание уделено интерметаллидным сплавам, которые обладают высокой жаростойкостью при высоких рабочих температурах. Указаны основные технологии получения интерметаллидных сплавов, которые имеют как достоинства, так и недостатки. Основным недостатком интерметаллидных сплавов на основе алюминидов никеля является низкая трещиностойкость наиболее жаростойкой фазы NiAl. Рассмотрены различные методы, используя которые получают покрытия, обеспечивающие защиту основного металла при высоких температурах. Показано, что для повышения жаростойкости материалов необходимо нанесение слоистых покрытий с созданием диффузионных барьеров для кислорода. Рассмотрены преимущества и недостатки покрытий, сформированных методом ЭИЛ. Одним из существенных недостатков таких покрытий является шероховатость поверхности. При этом известно, что покрытия, полученные методом ЭИЛ, имеют, как правило, небольшую толщину (20–100 мкм) и обладают повышенной хрупкостью, что затрудняет их обработку традиционными методами выглаживания с целью уменьшения шероховатости поверхности. Отдельное внимание уделено особенностям микроструктурного строения электроискровых покрытий, которое существенным образом определяется механизмом ЭИЛ.

Во второй главе приведены материалы и методы исследования, использованные в работе. В качестве катодов применяли сталь 20Х13 и сталь марки 30. Для формирования покрытий применялись различные анодные материалы из чистых металлов (Cu, Ni) и интерметаллидных сплавов, полученных с использованием установки «Аверон УЛП 2.2». Покрытия наносились в защитной атмосфере при использовании установок «Элитрон-22А», «Корона-1103», далее по тексту – установка 1 и 2 соответственно. Одним из основных параметров оценки эффективности анодного материала является коэффициент массопереноса K , который определялся как отношение измененной массы анода и катода. Масса катода и анода измерялась гравиметрическим методом с точностью $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г на аналитических весах «AW-220» фирмы SHIMADZU.

Исследования жаростойкости осуществлялись в режиме термоциклирования при атмосферном давлении в воздушной среде двумя методами. В первом методе использовали дериватограф «Q-1000» фирмы MOM, в этом случае проводили три цикла испытаний, каждый из которых состоял из нагрева образца в тигле со скоростью 10 °С /мин до температуры 900 °С (± 10 °С), последующей выдержке продолжительностью 120 мин и охлаждения до комнатной температуры в печи установки. Размеры используемых для исследований образцов составляли 5x5x5 мм, которые покрывали соответствующим анодным материалом со всех сторон. Во втором методе испытания, проводимом в соответствии с ГОСТ 6130-71, применяли печи сопротивления «СНОЛ-3,5» с нагревом до 900 °С. Каждый цикл испытания включал нагрев длительностью 120 мин, выдержку 120 мин и последующее охлаждение в печи до комнатной температуры. Суммарная продолжительность испытаний за 12 циклов составляла 84 часа. Для этих испытаний использовали образцы размерами 10x10x10 мм.

Макро- и микроструктурные параметры электродных материалов и покрытий исследовали с помощью оптических микроскопов «МБС 10» и «MICRO 200», сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) «Ntegra Prima» фирмы НТ-МДТ, растро-

вого электронного микроскопа «SU-70» Hitachi с микрорентгеноспектральными энергодисперсионной (EDX) и волнодисперсионной (WDX) приставками. Фазовый состав изучали, используя метод рентгеновской дифракции на дифрактометре «ДРОН-7» и метод дифракции отраженных электронов (EBSD) на приставке аналитического исследовательского комплекса на базе FE-SEM Hitachi «SU-70». Микротвердость структурных составляющих определяли с помощью микротвердомеров «ПМТ-3» и «НМV-G21» фирмы SHIMADZU. Элементный состав определялся с использованием спектрометра «Спектроскан МАКС-GV».

Для изучения возможности пластического деформирования столбчатых кристаллитов в полученных покрытиях проводили выглаживание поверхности этих покрытий с использованием установки «Безабразивная ультразвуковая финишная обработка» (БУФО), работа которой основана на методе ультразвукового пластического деформирования (УЗПД).

В третьей главе приведены результаты исследования структуры, состава и свойств анодных материалов, а также полученных электроискровых покрытий. Исследовали способность столбчатых кристаллитов в покрытии к пластическому деформированию.

В качестве анодных материалов использовали чистые металлы и интерметаллидные сплавы на основе системы Ni-Al. Для выплавки интерметаллидных материалов использовали чистые металлы, которые сплавляли в защитной атмосфере (аргон) в индукционной печи и разливали методом центробежной разливки в многоразовую графитовую форму (таблица 1). В таблицу 1 включены используемые анодные материалы из чистых металлов (№6 и №10) и промышленный сплав – нитинол (№7), использованный в качестве шихты при выплавке сплавов №8 и №9. Макроструктурным анализом установлено однородное и мелкозернистое строение литого металла и отсутствие в нем крупных пор и неметаллических включений.

Установление фазового состава структурных составляющих сплавов системы Ni-Al производили несколькими методами. Во-первых, проводили выявление фаз по результатам микрорентгеноспектрального анализа, исходя из концентрации компонентов с учетом диаграммы состояния. Во-вторых, для определения фазового состава полученных сплавов применяли рентгенофазовый анализ. В большинстве случаев полученные дифрактограммы состояли из ряда рефлексов, которые не соответствуют табличным данным, что позволяло использовать эти результаты только как ориентировочные. В-третьих, для подтверждения устанавливаемого фазового состава полученных сплавов измеряли микротвердость различных фаз в сплаве и сравнивали полученные результаты со значениями, приведенными в литературных источниках. В-четвертых, идентификацию фаз осуществляли методом дифракции отраженных электронов.

Как следует из полученных результатов (таблица 1), сплавы алюминидов никеля (№1–5) в основном состоят из 2-х фаз. Исключением являются два сплава: №1, состоящий из 3-х фаз, и монофазный сплав №2 с соотношением компонентов Ni/Al ~ 1/1. Сплав №3 также содержит NiAl, но переменного состава, в различных зернах с соотношения Ni/Al от 1,22/1 до 1/1,5. Кроме этого в сплаве №3 содержится фаза Ni₅Al₃.

Известно, что анодные материалы, предназначенные для получения покрытий методом ЭИЛ не должны быть хрупкими, что может быть предварительно оценено по виду излома. Поэтому из выплавленных анодных материалов были изготовлены поперечные изломы. По результатам исследований изломов сплавы №2 и №1 можно отнести к хрупким, состоящим из фасеток хрупкого излома. В изломах сплава №3 заметно увеличение доли вязкой составляющей, что позволяет, в целом, отнести изломы к

хрупко-вязким. Существенное изменение характера излома наблюдается при изучении изломов сплава №4, где отмечается преобладание вязкой составляющей, что, по-видимому, обеспечивается преобладающим содержанием фазы Ni_3Al , которая по литературным данным характеризуется пластическими свойствами.

Установление оптимальных режимов электроискровой обработки проводили в экспериментах, где определяли ряд показателей процесса и свойства покрытий (коэффициент массопереноса, толщина, однородность, минимальное количество окисленных участков поверхности и сплошность покрытия). Металлографический анализ поперечных шлифов образцов с покрытиями позволил провести сравнение по толщине, сплошности, однородности структурного строения и наличию дефектов в покрытии. Экспериментально было определено оптимальное время формирования покрытий с использованием полученных сплавов, которое составило 600 с. (10 мин) на площадь обработки 10 мм^2 .

Таблица 1 – Элементный и фазовый состав анодных материалов

Анодный материал, №	Компонент	Содержание, мас. %	Фазовый состав анодов
1	Ni	33	$Ni_2Al_3^*$, $NiAl_3$, Al
	Al	66	
2	Ni	58	NiAl*
	Al	41	
3	Ni	66	Ni_5Al_3 , NiAl*
	Al	33	
4	Ni	79	Ni_5Al_3 , Ni_3Al^*
	Al	20	
5	Ni	83	Ni_3Al^* , Ni_5Al_3
	Al	16	
6	Ni	99,9	Ni
7	Ni	49	NiTi*
	Ti	50	
8	Ni	82	$Ni_3(Ti, Al)^*$
	Al	8	
	Ti	9	
9	Ni	41	NiAlTi*
	Al	20	
	Ti	38	
10	Cu	99,9	Cu
* Превалирующая фаза в сплаве.			

Анализируя построенные зависимости Δ_k и Δ_a от времени установили, что они имеют в основном нарастающий и монотонный характер, что позволяет в качестве сравнительной оценки эффективности анодных материалов использовать коэффициент массопереноса K (таблица 2). Как ожидалось, использование сплава №2 не позволило сформировать покрытие из-за хрупкого разрушения материала анода, который состоит из монофазы NiAl. По литературным данным фаза NiAl обладает повышенной хрупкостью. Анодный материал №1 показал низкие значения K и поэтому, как и сплав №2, не может быть рекомендован для дальнейшего использования. Металлографическим анализом покрытий поперечных шлифов, полученных сплавом №8, выявлено наличие в структуре

большого количества пленочных оксидов и несплошностей, обусловленных высокой активностью Ti, содержащегося в составе анода. Покрытия, выполненные с использованием сплава №9, являются фрагментарными и тонкими. Для этого сплава с целью устранения имеющейся неоднородности структурного строения был проведен гомогенизирующий отжиг. Однако отжиг существенно не изменил характеристики покрытия. Таким образом, исходя из проведенных исследований, для работ по формированию жаростойких покрытий, где требуется получение сплошных покрытий, обладающих минимальным количеством дефектов, наиболее оптимально использовать сплавы №3–5, №8.

Таблица 2 – Коэффициенты массопереноса при ЭИЛ различными анодными материалами на сталях 30 и 20X13 и установках 1 и 2

Материал анода	Коэффициент массопереноса, K			
	Установка 1		Установка 2	
	Сталь 30	Сталь 20X13	Сталь 30	Сталь 20X13
№1	0,03	0,12	0,06	0,03
№2	0,05*	0,05*	0,24*	0,12*
№3	0,36	0,39	0,38	0,21
№4	0,57	0,67	0,58	0,39
№5	0,47	0,60	0,33	0,12
№6	0,40	0,55	-	0,07
№7	-	0,15	-	0,16
№8	0,58	0,79	-	-
№9	-	0,01	-	-
№10	0,59	-	0,58	0,32
№10+№3	0,42	0,50	-	-
№10+№4	0,67	0,58	-	-
* Хрупкое разрушение.				

Для повышения массопереноса и снижения количества трещин в покрытиях был проведен эксперимент с подогревом катода (80, 110, 130, 180, 250, 300 °С) в процессе ЭИЛ. В качестве анода использовали сплав №3 и №4, однако предварительными экспериментами было установлено, что подогрев катода заметное влияние оказывает на покрытия, сформированные сплавом №4. Поэтому дальнейшие эксперименты проводили с использованием сплава №4. Металлографическим анализом поперечных шлифов покрытий установлено резкое увеличение толщины покрытия до 120–150 мкм при нагреве катода до температуры 180 и 250°С (на установке 1). Но покрытия формируются неравномерные по толщине, с признаками хрупкого разрушения и большим количеством трещин и пор. Таким образом, нагрев катода при использовании интерметаллидных анодных материалов на основе сплавов системы Ni-Al не позволяет существенно увеличить массоперенос и обеспечить формирование бездефектных покрытий.

На рисунке 1, а приведена структура поверхности покрытия, которая сформирована столбчатыми кристаллитами, часть из которых имеет некоторое отклонение от вертикального положения, что объясняется вариацией направления теплоотвода при кристаллизации расплава. При этом все использованные в работе сплавы, а также технически чистые металлы (Cu, Ni) формируют покрытия, состоящие из столбчатых кристаллитов (рисунок 1, б).

Изучение результатов микрорентгеноспектрального анализа в точках, расположенных по длине кристаллитов, позволило установить общую закономерность изменения элементного состава. На рисунке 1, в приведена структура и точки микрорентгеноспектрального анализа столбчатых кристаллитов покрытия, полученного на стали 30 сплавом №3. Как следует из результатов, приведенных в таблице 3, по мере удаления от поверхности катода (сталь 30) содержание Fe уменьшается, а Ni и Al, наоборот, – увеличивается. При формировании покрытий на катоде 20X13, наряду с Fe по аналогичной зависимости изменяется концентрация Cr, который входит в состав этой стали (13 мас. %).

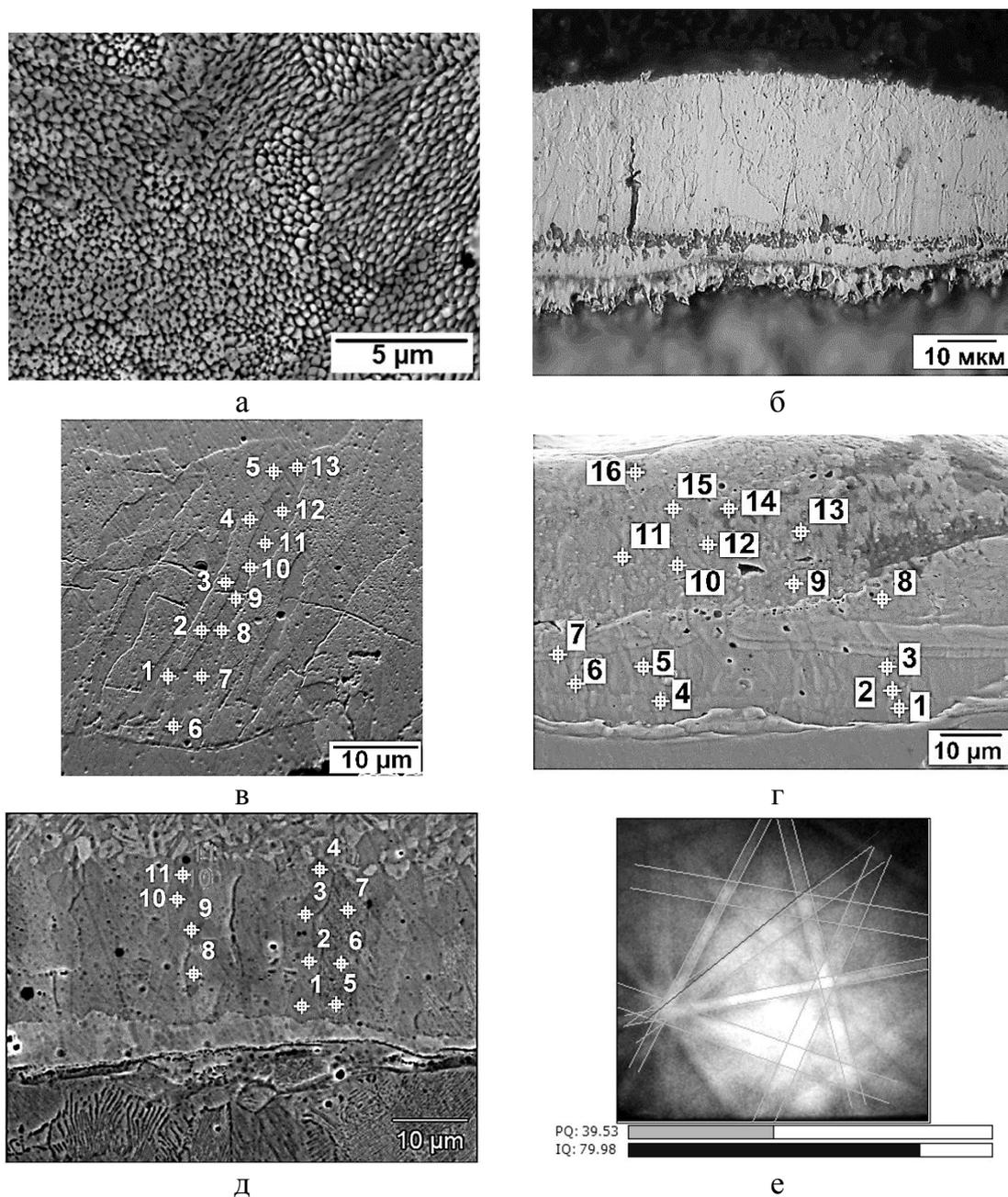


Рисунок 1 – Микроструктурное строение покрытий: а, б, д – сплавом №4 на стали 20X13, а – вид сверху участка покрытия после ионного травления, б – поперечный шлиф, химическое травление; в, г – поперечные шлифы покрытий с точками микрорентгеноспектрального анализа, в – сплавом №3 на стали 30, г – анодом №6 и затем сплавом №4 на стали 20X13; д – поперечный шлиф покрытия с точками, в которых проводился фазовый анализ; е – картина дифракции отраженных электронов

Структура покрытия, сформированного на стали 20Х13 последовательным использованием анодных материалов – №6 и затем №4, приведена на рисунке 1, г. Концентрация элементов этого покрытия представлена в таблице 3. Точки анализа с 1 по 8 находятся в покрытии, сформированном анодом №6 (Ni), и поэтому не содержат Al. При рассмотрении концентраций элементов по точкам, располагающимся примерно друг над другом по высоте (от поверхности катода), на рисунке 1, г видно, что в точках 1–3 (первый кристаллит), 4, 5 (второй кристаллит) и 6, 7 (третий кристаллит), концентрация Cr и Fe монотонно уменьшается, но увеличивается содержание Ni. Наиболее удаленная от катода точка (8) содержит его максимальное количество. Выше располагается часть покрытия, для получения которого использовали сплав №4 (точки 9–16). В этой части слоя отмечается такой же характер распределения концентраций элементов (точки 10–12 и 14–16), что свидетельствует об идентичности закономерностей распределения элементного состава, как в однослойных, так и в двухслойных покрытиях.

Необходимо отметить, что внутренняя микроструктура кристаллитов является однородной, хотя элементный состав кристаллитов по высоте существенно изменяется. Отсутствие четкой границы в области контакта подслоя с основой и покрытием объясняется перемешиванием расплава, а также высокой адгезией покрытия к основе.

Особенность структурного и элементного состава покрытий, заключающаяся в том, что элементы анода и катода формируют общие кристаллиты с монотонным изменением концентрации компонентов анода и катода, объясняет высокие адгезионные свойства электроискровых покрытий.

Таблица 3 – Содержание компонентов в точках (рисунок 1)

Номера точек	Содержание элементов в точках анализа, ат. %			Номера точек	Содержание элементов в точках анализа, ат. %				
	Al	Fe	Ni		Al	Si	Cr	Fe	Ni
	Рисунок 1, в				Рисунок 1, г				
1	57,32	1,99	40,69	1	-	0,38	8,46	48,48	42,68
2	57,29	1,58	41,12	2	-	0,26	5,49	30,77	63,48
3	57,58	1,54	40,88	3	-	-	4,34	25,03	70,63
4	57,97	1,31	40,72	4	-	0,29	8,93	52,85	37,93
5	57,71	1,27	41,02	5	-	0,35	4,64	26,82	68,19
6	57,32	1,85	40,83	6	-	0,28	4,90	28,85	65,98
7	57,34	1,70	40,96	7	-	-	4,15	25,54	70,32
8	57,76	1,62	40,62	8	-	-	1,81	11,94	86,25
9	57,92	1,48	40,60	9	3,00	-	1,50	9,35	86,14
10	58,21	1,47	40,32	10	3,59	-	1,46	8,64	86,32
11	57,86	1,36	40,78	11	3,45	-	1,43	8,75	86,37
12	57,58	1,27	41,15	12	0,90	-	1,41	8,82	88,86
13	57,90	1,09	41,01	13	5,91	-	1,23	7,42	85,45
				14	3,81	-	1,23	7,81	87,16
				15	1,61	-	1,30	8,07	89,02
				16	-	-	0,83	7,95	91,22

На рисунке 1, е показана картина дифракции отраженных электронов (линии Кикучи) со шкалой «PQ», отображающей качество линий идентификации, и шкалой «IQ», которая показывает степень (в процентах) соответствия кристаллографических параметров выявленной дифракционной картины табличным данным определяемой фазы.

Методом дифракции отраженных электронов установлено, что кристаллиты (рисунки 1, д) являются интерметаллидами переменного состава $Ni_x - Al_y - Fe_z$ (линии Кикучи на рисунке 1, е), которые дополнительно легированы Cr при использовании в качестве катода стали 20X13.

Исследовали состав и структуру электроэрозионных частиц, которые сопровождают процесс получения электроискровых покрытий. Электроэрозионные частицы в подавляющем большинстве имеют округлую форму, что указывает на их формирование преимущественно из жидкого состояния. При этом электроэрозионные частицы можно разделить по структуре и элементному составу на два типа. Большинство электроэрозионных частиц имеет относительно гомогенную структуру и состав, отличаясь только соотношением содержащихся компонентов. Остальные частицы неоднородны по строению и структуре. Структура и состав электроэрозионных частиц является отражением однократного процесса совместного расплавления материалов анода и катода. Тогда как процесс формирования покрытий заключается в многократном расплавлении и перемешивании материалов катода и анода, поэтому в покрытиях такой неоднородности состава и структуры не наблюдается.

Для исследования деформационной способности столбчатых кристаллитов без их разрушения и разработки рекомендаций по расширению области использования полученных покрытий необходимо проведение дополнительных экспериментов. Исследовать способность столбчатых кристаллитов в покрытии к пластическому деформированию можно с использованием метода УЗПД, который применяют для снижения шероховатости посредством выглаживания. Традиционные методы выглаживания основаны на механическом воздействии на поверхность покрытия деформирующими усилиями. Известна повышенная хрупкость (низкие пластические свойства) электроискровых покрытий, обусловленная физикой процесса ЭИЛ. Учитывая то, что структура полученных покрытий состоит из столбчатых кристаллитов, задача исследований сводится к определению возможности их пластического деформирования при проведении выглаживания поверхности.

Для проведения исследования деформационной способности столбчатых кристаллитов в покрытиях использовали установку БУФО, которая штатно устанавливается на токарный станок.

Выбор основных режимов обработки БУФО проводили с использованием образцов из стали и бронзы (БрАЖ-9-4). В качестве основных параметров были установлены: скорость вращения шпинделя станка (n , об/мин), в кулачковый патрон которого закреплялся обрабатываемый образец; скорость перемещения резцедержателя (S_b мм/об), в котором закреплялся поочередно резец для токарной обработки и устройство БУФО (поперечная подача); величина натяга (P), измеряемая в мм и характеризующая прижатие индентора БУФО к обрабатываемой поверхности, которое создавалось при помощи ручки перемещения верхних салазок.

В качестве материалов для выявления оптимальных параметров поверхности в результате выглаживания использовали бронзу (БрАЖ-9-4), сталь (20X13) как без покрытий, так и с покрытиями, сформированными анодными материалами №3–6, №10. Параметры обработки устанавливали, исходя из минимального количества дефектов поверхности и по измеренным параметрам шероховатости (R_a , R_z , R_{max}). Оптимальные характеристики выглаженной поверхности достигались в результате обработки с количеством проходов от 3 до 6.

Исследования выглаженной поверхности покрытий с использованием оптической и растровой микроскопии позволили выявить общие закономерности изменения

структуры в результате обработки БУФО. Установлено, что на обработанной БУФО поверхности покрытий (№3–6, №10) идентифицированы два различных типа структур. Первый тип структуры без признаков пластической деформации сформирован посредством срезания верхней части столбчатых кристаллитов (рисунок 2, а, б). Второй тип структуры имеет признаки пластического деформирования с образованием текстуры деформации (рисунок 2, в, г). Таким образом, столбчатые кристаллиты в полученных покрытиях обладают способностью к пластической деформации при выглаживании с использованием установки БУФО.

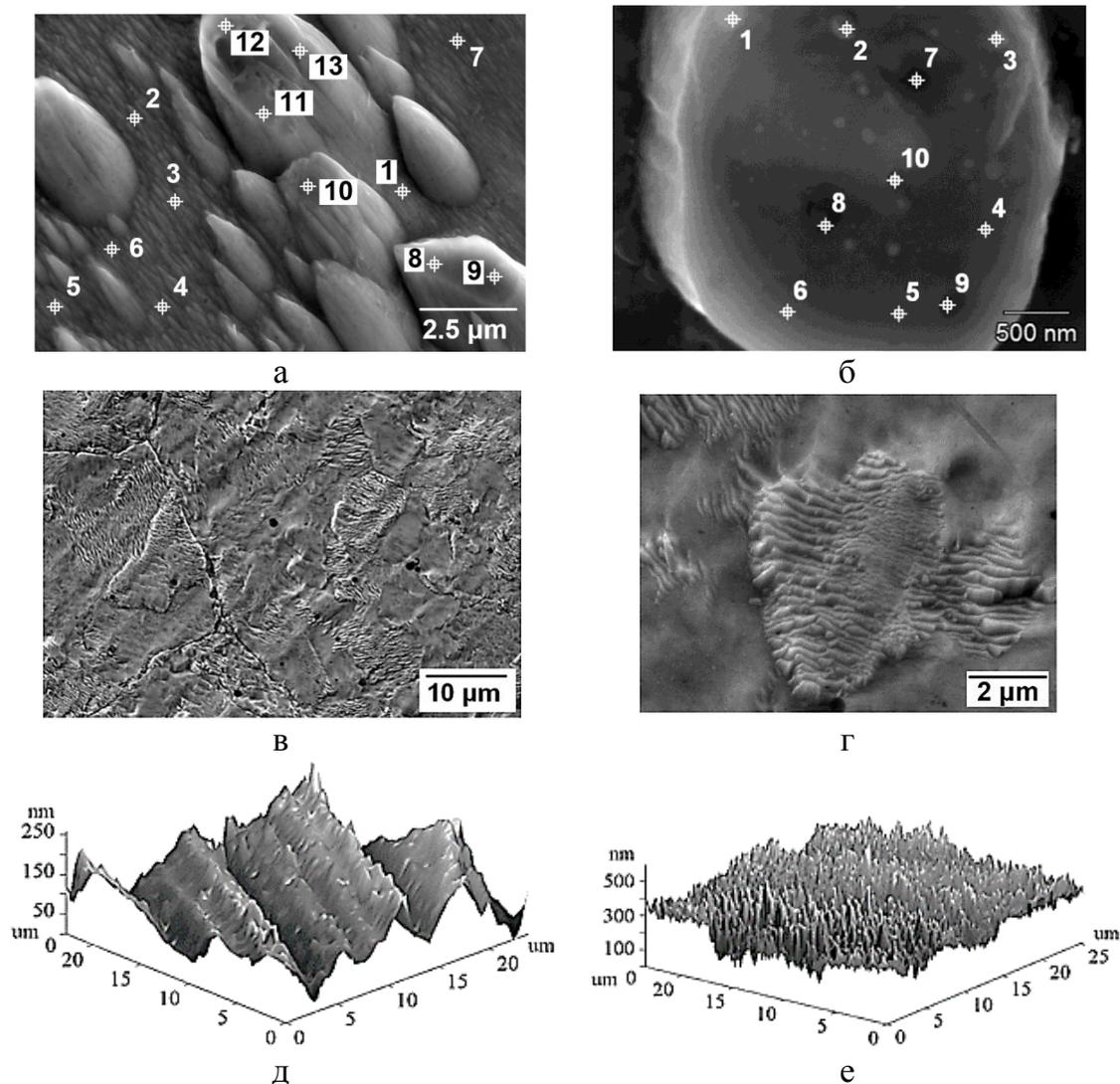


Рисунок 2 – Структура покрытий, сформированных на стали 20X13:
 а, б, д, е – сплавом №4; в, г – сплавом №3; а – г, е – после ионного травления;
 д – до ионного травления; а, б – структура и точки микрорентгеноспектрального
 анализа срезаемых столбчатых кристаллитов; в, г – покрытие с признаками
 пластического деформирования; д, е – трехмерная визуализация топографии
 выглаженной поверхности образцов с покрытием

Выглаженная поверхность покрытий состоит из столбчатых кристаллитов различного размера (от 100 нм до 10 мкм) и строения (рисунок 2, а, б). Столбчатые кристаллиты в поперечном сечении имеют однородный состав и структуру. Видимые в

структуре кристаллитов включения шаровидной формы, по типу относятся к литейным (рисунок 2, б).

Исследование шероховатости профильным методом показало, что параметры шероховатости несущественно зависят от материала анода, что указывает на перспективность использования метода УЗПД для выглаживания электроискровых покрытий. В исследуемых покрытиях (рисунок 2, д, е) размер столбчатых кристаллитов изменяется от 0,1 мкм до 3 мкм; углубления на поверхности покрытия после обработки БУФО составляют по ширине от 2 до 4 мкм и по высоте – до 250 нм. По этой причине измерение параметров структуры электроискрового покрытия только традиционным профильным методом нецелесообразно (размер шупа – индентора профилографа 2 мкм). Для исследования топографии поверхности был опробован метод атомно-силовой микроскопии. Трехмерное исследование поверхности расширяет возможности измерения параметров тонкой структуры и шероховатости поверхности в наноструктурном диапазоне. Этот метод позволяет при необходимости выделить и дополнительно исследовать профилограммы с различным количеством линий трасс сканирования (от 256 до 1024) в зависимости от необходимого разрешения кадра. Поэтому для получения наиболее достоверной информации о структуре выглаженной поверхности электроискровых покрытий рекомендовано рассматривать как двухмерные характеристики шероховатости поверхности, так и трехмерные, полученные методом атомно-силовой микроскопии.

В четвертой главе приводятся результаты исследования влияния термоциклических испытаний на жаростойкость покрытий, полученных с использованием выплавленных анодных материалов. Исследовали влияние термоциклирования на изменение состава и структуры в поперечных шлифах и на поверхности покрытий. Испытания на жаростойкость проводили с применением дериватографа и с использованием муфельной печи по ГОСТ 6130-71. Результаты, полученные с использованием дериватографа, позволили изучить скорость и характер изменения оксидообразования непосредственно в процессе термоциклических испытаний.

На первой стадии проводили испытания на жаростойкость выплавленных анодных материалов. Было установлено, что только при температуре испытаний 900 °С наблюдается заметный рост изменения массы анодных материалов, поэтому дальнейшие исследования проводили при этой температуре нагрева. Максимальной жаростойкостью обладают сплавы №3 и №5, меньшей жаростойкостью – сплавы №2, №4, №8 и №6. Минимально жаростойкие свойства показал материал №1, где отмечается самая высокая скорость окисления (530 г/м² после 12 циклов испытаний). Сплав №7 обладает немного большей жаростойкостью, чем сплав №1 (до 100 г/м² после 12 циклов испытаний).

На второй стадии была установлена температура испытаний образцов сталей с покрытиями. Испытания на жаростойкость для образцов с покрытиями проводили при различных температурах (500, 600, 700, 800 и 900 °С). Испытания показали, что нагрев образцов с покрытиями до 800 °С не приводит к заметному окислению (в исследуемом интервале выдержки – 3600 с (60 мин)), поэтому температура для последующих испытаний была выбрана 900 °С.

Изучение кинетики окисления образцов в дериватографе по кривым дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) проводили в режиме трехкратного термоциклирования с нагревом и выдержкой при температуре 900 °С. Как следует из полученных результатов, в большинстве случаев масса изменяется по зависимости близкой к линейной. Первый цикл испытаний, как правило, приводит к максимальному окислению, а

при втором и третьем скорость уменьшается из-за сформировавшейся оксидной пленки, которая затрудняет доступ атомов кислорода в зону реакции.

На рисунке 3 приведены кривые ДТГ, характеризующие процесс окисления. При первом цикле испытаний стали 20Х13 без покрытия (рисунок 3, а) происходит интенсивное окисление со скоростью $4,7 \cdot 10^{-3}$ г/с в начале выдержки, что обусловлено формированием трещин на гранях образца. При втором цикле испытаний скорость окисления снижается ($3,4 \cdot 10^{-3}$ г/с), происходит дополнительное формирование плотной оксидной пленки Cr_2O_3 , и к третьему циклу скорость окисления становится минимальной ($2,5 \cdot 10^{-3}$ г/с).

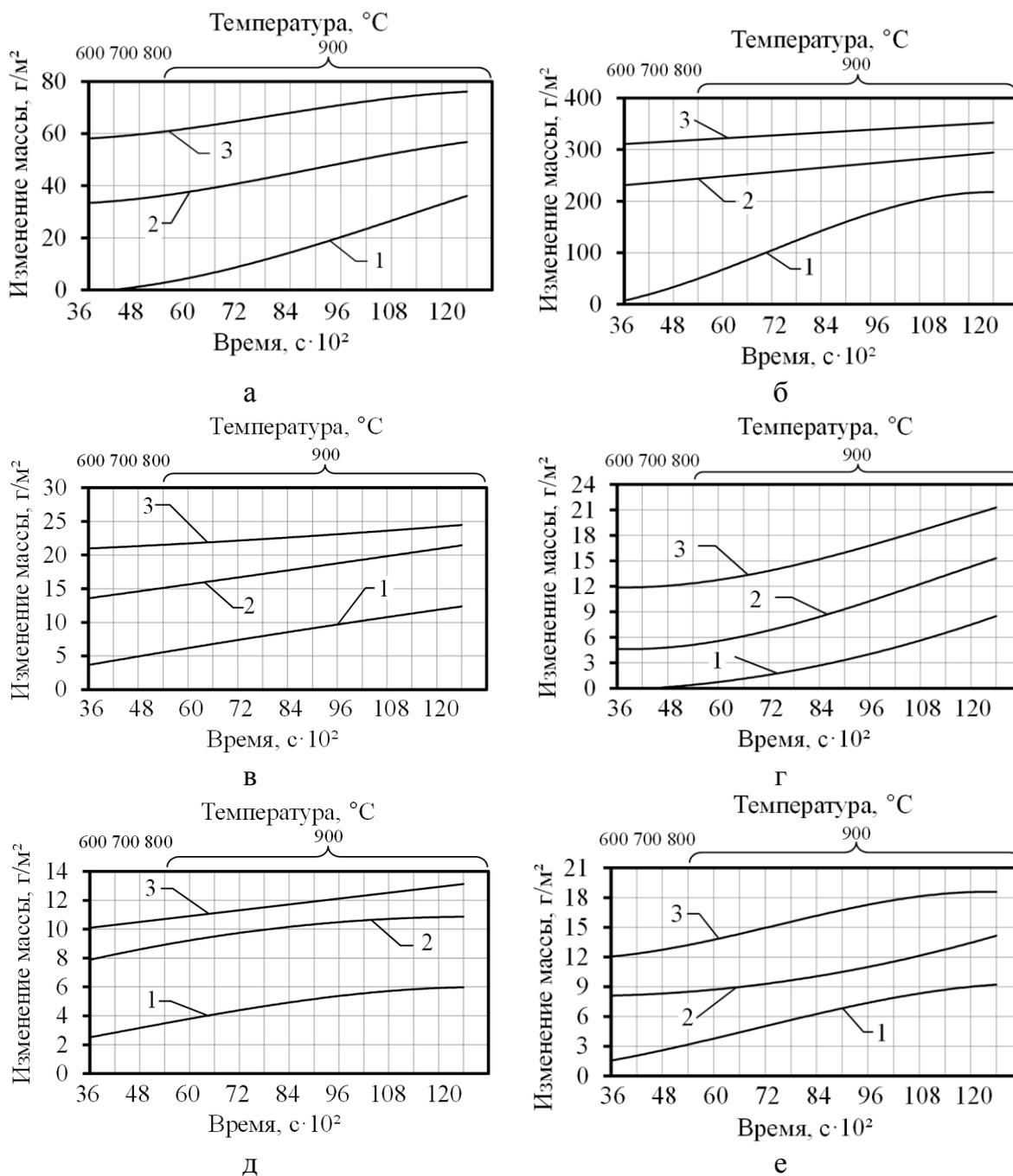


Рисунок 3 – Изменение массы образцов сталей с покрытиями и без в процессе соответствующего цикла (1, 2, 3) испытаний: а, в, д – сталь 20Х13; б, г, е – сталь 30; а, б – без покрытия; в, г – с покрытием сплавом №3; д, е – с покрытием сплавом №4

Ранее установленная (на стали 20X13) закономерность окисления отмечается и при испытаниях образцов стали 30 без покрытия (рисунок 3, б), но при первом цикле скорость окисления более высокая ($3,1 \cdot 10^{-2}$ г/с). Это объясняется тем, что сталь 30 содержит Cr, который диффундирует на поверхность и создает защитную пленку. Металлографическим анализом поверхности установлено, что высокая скорость окисления обусловлена интенсивным формированием оксидов по всей поверхности и в образовавшихся трещинах на гранях образца.

При испытании образцов из стали 20X13 с нанесенным покрытием из сплава №3 (рисунок 3, в) в процессе первого цикла испытаний, скорость окисления снижается в 3 раза ($1,6 \cdot 10^{-3}$ г/с) по сравнению с первым циклом для образца без покрытия (рисунок 3, а). Покрытие, сформированное сплавом №4 (рисунок 3, д), способствует снижению скорости окисления в 5 раз ($0,8 \cdot 10^{-3}$ г/с) по сравнению с образцом из стали 20X13 без покрытия. Металлографическим анализом поверхности образцов с покрытиями после термоциклирования установлено, что окисление происходит в основном по несплошностям и трещинам.

Электроискровые покрытия, нанесенные сплавами №3 и №4 на сталь 30, способствуют значительному снижению скорости окисления (до 30 раз при первом цикле ($\sim 1 \cdot 10^{-3}$ г/с) и до 9 раз при третьем цикле ($\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ г/с)) по сравнению с соответствующими циклами для образца из стали 30 без покрытия (рисунок 3, г, е).

На рисунке 4 приведены результаты изменения масс образцов с покрытиями и без покрытий по завершении очередного цикла термоциклических испытаний. Результаты термоциклических испытаний на стали 30 (рисунок 4, б) по характеру соотносятся с результатами на 20X13 (рисунок 4, а), но отличаются показателями более низкой жаростойкости. Установлено, что максимальная жаростойкость наблюдается при использовании покрытий, полученных анодами №3 и №4.

Испытания на жаростойкость позволяют получить сравнительные зависимости изменения жаростойкости покрытий в условиях термоциклирования. Однако, установить степень влияния на жаростойкость различных структурных составляющих, в том числе и формирующихся при различных термических циклах, можно только методами металлографии. Поэтому для установления степени влияния структурных составляющих покрытий на уменьшение жаростойкости были проведены микроструктурные исследования поверхности образцов с покрытиями после нагрева. Как следует из анализа полученных результатов, на поверхности покрытий после нагрева заметно образование оксидов, трещин и оксидов в области трещин. При этом исследовалось изменение состава формирующихся на поверхности образцов оксидов и их рост в результате различных циклов нагрева. Максимальный рост размеров оксидов происходит при первом нагреве. Установлено, что скорость роста и элементный состав оксида определяется местом его расположения. В местах несплошностей (локальное отсутствие покрытия) оксид преимущественно состоит из компонентов катода (Fe, Mn и Cr в случае использования стали 20X13). Оксиды, образующиеся в трещинах покрытий, содержат существенное количество Ni и Al, причем, если трещина не сквозная, концентрация компонентов катода минимальна. Большая часть сквозных трещин образуется в области ребер образцов и обусловлена технологическими особенностями получения покрытий методом ЭИЛ в краевой зоне. Основное количество поверхностных трещин наблюдается в покрытиях, сформированных с использованием сплава №3, в котором преобладает фаза NiAl, известная своими хрупкими свойствами.

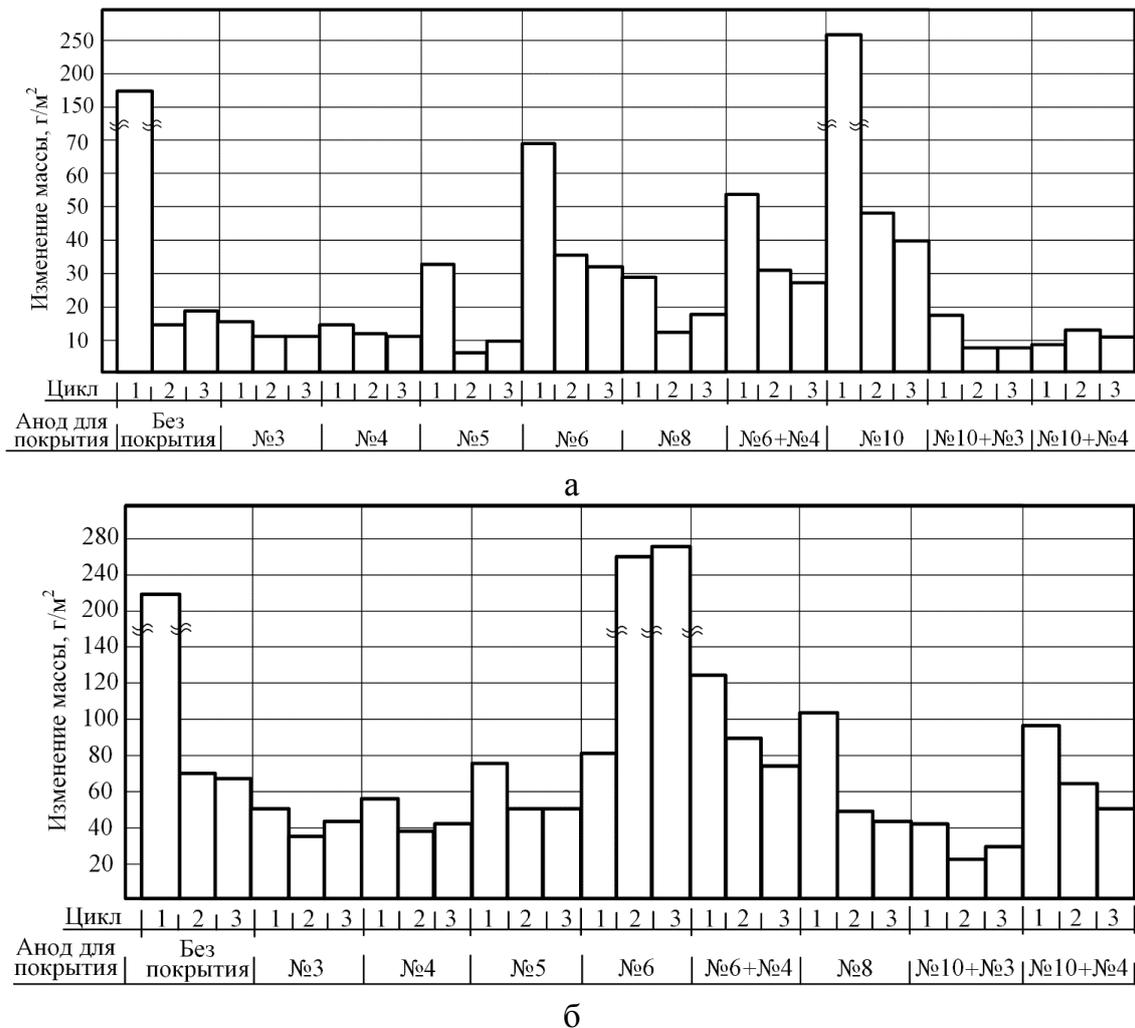


Рисунок 4 – Изменение массы образцов сталей (с покрытиями и без) в результате термоциклических испытаний: а – 20X13; б – сталь 30

Количественная оценка областей различных оксидов на поверхности катодов позволяет считать, что основными причинами уменьшения жаростойкости образцов при термоциклировании является наличие несплошностей, а затем формирование микротрещин. Для повышения сплошности и уменьшения образования трещин в покрытиях были проведены исследования по формированию подслоя, для чего использовали Ni или Cu. Выбор для подслоя Ni обусловлен его высокими диффузионными свойствами и положительным опытом его использования в более ранних работах по формированию покрытий методом взрыва.

Использование для подслоя Cu обусловлено положительным опытом применения этого металла при ЭИЛ. Медь обладает высокой пластичностью, электропроводностью и способностью формировать при ЭИЛ покрытия, обладающие высокой сплошностью. Кроме этого из литературы известно, что медный подслоя способствует уменьшению величины растягивающих напряжений, которые характерны для электроискровых покрытий.

Как следует из результатов, приведенных на рисунке 4, покрытия, полученные с использованием подслоя из Ni и Cu, имеют различную жаростойкость. Жаростойкость двухслойных покрытий, полученных с никелевым подслоем ниже, чем у покрытий, сформированных непосредственно интерметаллидными сплавами. Но использование Cu в качестве подслоя способствует увеличению жаростойкости покрытий, значение

которой приближается к значениям жаростойкости покрытий, полученных интерметаллидными сплавами.

Испытания покрытий на жаростойкость с использованием дериватографа позволили установить зависимость изменения жаростойкости в процессе нагрева, а исследованием структуры поверхности покрытий была определена основная причина уменьшения жаростойкости. Однако, эксперименты с испытаниями на жаростойкость в дериватографе не полностью соответствуют реальным условиям из-за размеров используемых образцов (5x5x5 мм) и условий эксперимента с ограниченным доступом воздуха к поверхности образца в приборе. Поэтому были проведены испытания на жаростойкость по ГОСТ 6130-71. Количество циклов увеличили до 12, при этом практически все покрытия с использованием сплавов №3, №4, №5, №8 и с подслоем из Cu и Ni имеют высокую жаростойкость (рисунок 5).

Максимальная жаростойкость (более чем в 3,5 раза) достигнута при сочетании медного подслоя и сплава №3 на стали 20X13 (рисунок 5, а). Несколько меньшее (около трёх раз) увеличение жаростойкости наблюдается у покрытий, сформированных медным подслоем и сплавом №4, а также у покрытий, полученных анодными материалами №3, №4, №5. С использованием катода из стали 30 (рисунок 5, б) максимальное повышение значения жаростойкости достигнуто также при сочетании подслоя из Cu и сплава №3 (около двух раз).

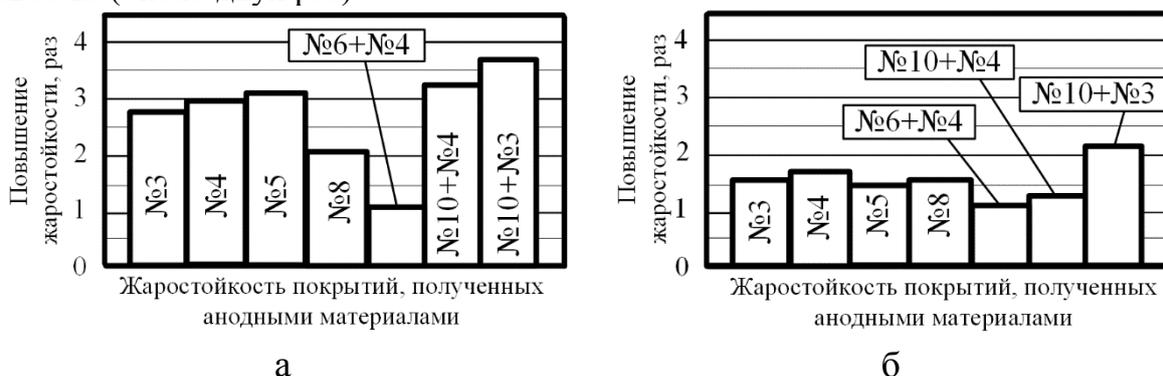


Рисунок 5 – Относительная жаростойкость образцов с покрытиями различными анодами после 12 циклов испытаний: а – на стали 20X13; б – на стали 30

Испытания покрытий с подслоем из Ni показали их более низкую жаростойкость. При исследовании микроструктуры на границах «основа – подслоя» и «подслоя – покрытие» обнаружены окисленные участки (рисунок 6).

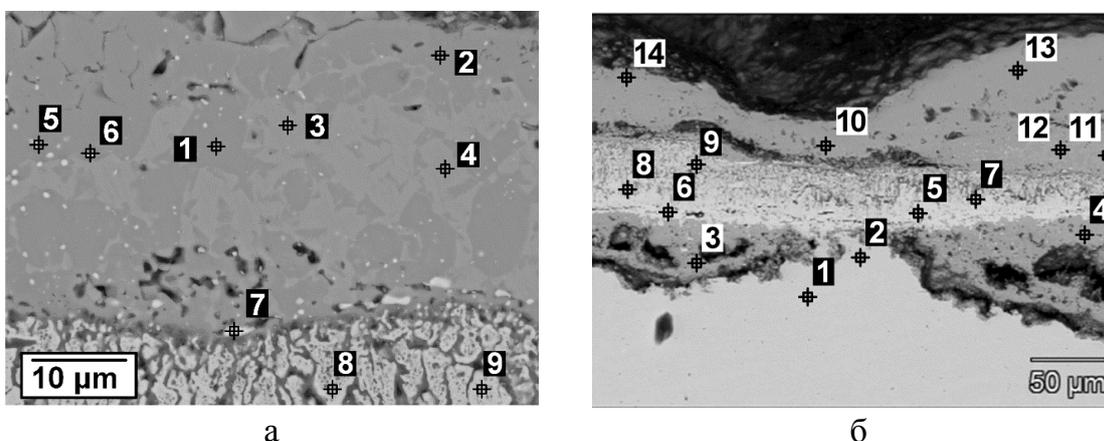


Рисунок 6 – Структура и точки микрорентгеноспектрального анализа в поперечных шлифах покрытий анодом №4 с подслоем из Ni на стали 30

В подслое заметны крупные вертикально ориентированные межкристаллитные границы (рисунок 6, а), что способствует диффузии кислорода. При этом необходимо отметить наличие участков, где отсутствует оксидная пленка, и в точках основы (1, 2) содержится Ni, это свидетельствует о его диффузии в основу, что способствует увеличению адгезии покрытия к основе (рисунок 6, б). Учитывая столбчатую структуру подслоя и покрытия, резервом повышения жаростойкости является дополнительное формирование диффузионного барьера на границе подслоя – покрытие.

Более высокое качество подслоя обнаружено при использовании Cu. При этом подслоем для образцов стали 30 был получен на установке 1, а при использовании стали 20X13 применялась установка 2. На рисунке 7 видно различие в структурах покрытия с подслоем при использовании различных установок для формирования подслоя.

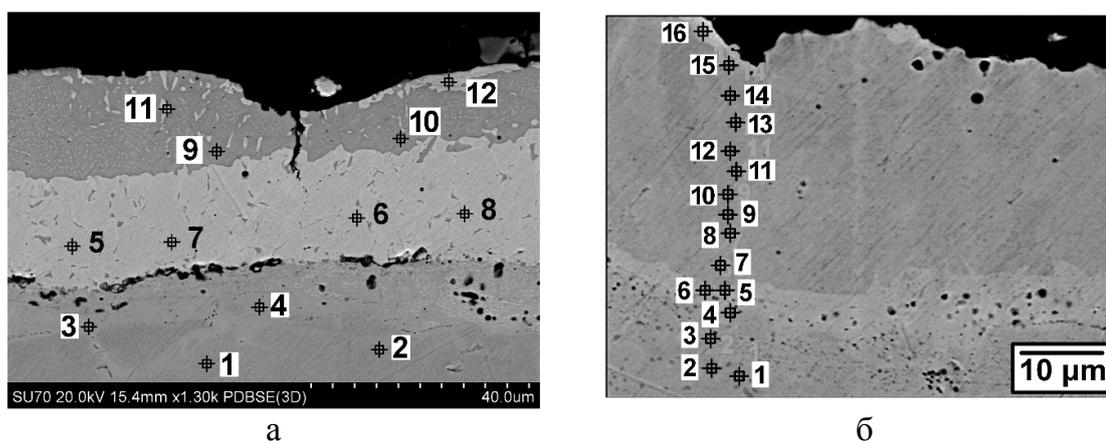


Рисунок 7 – Структура и точки микрорентгеноспектрального анализа в поперечных шлифах покрытий: а – анодом №3 с подслоем из Cu на стали 30 на установке 1; б – анодом №4 с подслоем из Cu на стали 20X13 на установке 2

При этом вне зависимости от катода (сталь 30 или 20X13) в режиме отраженных электронов подслоем Cu структурно выделяется при использовании установки 1, это объясняется большим массопереносом и меньшим его перемешиванием (в сравнении с установкой 2). На рисунке 7, а видна трещина, которая не распространяется далее подслоя, что указывает на функции подслоя Cu, как барьера для трещин. Подслоем Ni такими функциями не обладает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана технология получения анодных материалов предназначенных для формирования покрытий методом ЭИЛ на основе интерметаллидных сплавов с различным содержанием компонентов, которая заключается в выплавке и последующей центробежной разливке в многоразовую графитовую форму, что в совокупности обеспечило минимальное количество дефектов литого металла, мелкозернистое строение структурных составляющих и заданный фазовый состав.

2. Исследованием микроструктуры поперечных шлифов образцов сталей (30 и 20X13) с покрытиями, сформированными анодными материалами на основе алюминидов никеля ($NiAl$, Ni_3Al) установлено, что покрытия состоят из столбчатых кристаллитов преимущественно системы $Ni_x-Al_y-Fe_z$, в которых концентрация компонентов ка-

тода (Fe и дополнительно Cr при использовании стали 20X13) увеличивается от поверхности покрытия к катоду, а концентрация компонентов анода (Ni, Al) напротив – уменьшается.

3. Показано, что для повышения жаростойкости (в условиях 12 циклов термоциклирования с нагревом до 900 °С) сталей (30 и 20X13) необходимо получать покрытия методом ЭИЛ с использованием сплавов, преимущественно состоящих из фаз NiAl и Ni₃Al. При этом жаростойкость (по сравнению с образцами без покрытий) увеличивается в 1,5 и 3 раза на сталях 30 и 20X13 соответственно.

4. Исследованием изменения структуры поверхностей жаростойких покрытий (NiAl, Ni₃Al) на сталях (30 и 20X13) после термоциклических испытаний установлена взаимосвязь между снижением жаростойкости и параметрами формирующихся оксидов в области исходных несплошностей и микротрещин на поверхности покрытий. Для повышения жаростойкости покрытий (NiAl, Ni₃Al) использовали подслои (Ni, Cu). Экспериментально установлено, что использование подслоя Cu способствует повышению жаростойкости покрытия (NiAl) на сталях (30 и 20X13) от 2 до 3,5 раз соответственно по сравнению с образцами без покрытий.

5. В результате исследования структурного строения поверхности интерметаллидных покрытий (NiAl, Ni₃Al), нанесенных на сталь 20X13 и выглаженных методом ультразвукового пластического деформирования, обнаружены признаки пластического деформирования столбчатых кристаллитов, что уменьшает шероховатость и расширяет область применения полученных покрытий. Экспериментально установлено, что для комплексной оценки структурных параметров шероховатости (в микрометровом и нанометровом диапазонах) выглаженных методом УЗПД электроискровых интерметаллидных покрытий (NiAl, Ni₃Al), наряду с профилометром необходимо использовать атомно-силовую микроскопию.

6. Результаты исследований реализованы в производственных условиях, где покрытия интерметаллидными сплавами (NiAl, Ni₃Al) нанесли на турбинные лопатки (направляющие лопаток статора и рабочие лопатки ротора) установки ГТТ-3М. Испытания газовой турбины в рабочем режиме показали отсутствие признаков окисления и отслаивания участков с покрытиями на поверхности лопаток, что позволяет рекомендовать использование интерметаллидных сплавов для создания жаростойких покрытий.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В рецензируемых изданиях, входящих в библиографическую и реферативную базу данных Scopus:

1. Khimukhin S.N., Eremina K.P., Ri H. Nickel aluminides coatings on steel C1030 after thermal cycling// Materials Today: Proceedings. – 2019. – №11. – P. 240–246.

2. Khimukhin S.N., Eremina K.P., Ri H. The structure of the intermetallic coating after ultrasonic burnishing process//Materials Today: Proceedings. – 2019. – №19. – P. 2413–2416.

В рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Ерёмкина К.П. Интерметаллидные сплавы для получения покрытий методом электроискрового легирования/ Ерёмкина К.П., Астапов И.А., Химухин С.Н., Теслина М.А., Гостищев В.В., Ри Х., Ри Э.Х.//Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 10 (106). – С. 8–12.

2. Астапов И.А. Структура и свойства функциональных покрытий, полученных электроискровой обработкой стали 20X13/ Астапов И.А., Ерёмкина К.П., Теслина М.А., Химухин С.Н., Гостищев В.В. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – №4 (61). – С. 12–18.

3. Ри, Х. Получение и финишная обработка электроискровых интерметаллидных покрытий/ Ри Хосен, Ерёмина К.П., Химухин С.Н. // Вестник ТОГУ. – 2014. – №3 (34). – С. 89–94.

4. Химухин С.Н. Поверхностное пластическое деформирование электроискровых покрытий/ Химухин С.Н., Ерёмина К.П., Ри Х., Ри Э.Х., Черномас В.В. // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2016. – Т.1. – №2 (26). – С. 76–81.

5. Химухин С.Н. Структура интерметаллидных покрытий после термоциклирования/ Химухин С.Н., Ерёмина К.П., Ри Э.Х., Ри Х. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – №9 (70). – С. 26–32.

В других изданиях:

1. Ри Х. Повышение качества электроискровых интерметаллидных покрытий/ Ри Х., Астапов И.А., Химухин С.Н., Теслина М.А., Ерёмина К.П. // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – Т. 4. – №4. – С. 1025–1030.

2. Химухин С.Н. Электроискровая обработка поверхностей материалов при вращении и вибрации анода/ Химухин С.Н., Кочетова И.В., Ерёмина К.П., Ри Х., Ри Э.Х., Гончаров А.В., Щекин А.В. // Информационные технологии XXI века. Сборник научных трудов. – 2015. – С. 256–261.

3. Химухин С.Н. Получение интерметаллидных сплавов никеля и алюминия методом металлургии/ Химухин С.Н., Ерёмина К.П., Ри Х., Ри Э.Х., Астапов И.А., Гончаров А.В., Щекин А.В. // Информационные технологии XXI века. Сборник научных трудов. – 2015. – С. 434–438.

4. Химухин С.Н. Дуплекс-технология получения интерметаллидных покрытий/ Химухин С.Н., Ерёмина К.П., Ри Х., Ри Э.Х., Гончаров А.В. // Металлургия машиностроения. – 2016. – №2. – С. 41–44.

5. Химухин С.Н. Формирование покрытий с последовательным использованием электроискрового легирования и поверхностного пластического деформирования/ Химухин С.Н., Ерёмина К.П., Хосен Ри, Ри Э.Х., Гостищев В.В., Дзюба Г.С., Кисломед И.В. // Информационные технологии XXI века. Сборник научных трудов. – 2016. – С. 348–352.

6. Ерёмина К.П. Термоциклирование образцов стали с интерметаллидным покрытием/ Ерёмина К.П., Гостищев В.В., Щекин А.В., Щекочихина Е.А. // Ученые заметки ТОГУ. – 2018. – Т.9. – №1. – С. 708–713.

7. Гостищев В.В. Композиционные материалы на основе никелидов алюминия/ Гостищев В.В., Ерёмина К.П., Дзюба Г.С., Беседин А.А. // Ученые заметки ТОГУ. – 2018. – Т. 9. – №1. – С. 714–719.

В материалах конференций:

1. Химухин С.Н. Формирование жаростойких покрытий методом электроискрового легирования с использованием интерметаллидных сплавов Ni-Al/ Химухин С.Н., Астапов И.А., Теслина М.А., Безматерных К.П. // «Технические науки – от теории к практике»: материалы XV международной научно-практической конференции, (12 ноября 2012 г., Новосибирск); [под ред. Я.А.Полонского]. Новосибирск: Изд. «СибАК», 2012. – №15. – С. 91–98.

2. Безматерных К.П. Жаропрочные интерметаллидные покрытия, полученные методом ЭИЛ/ Безматерных К.П., Теслина М.А., Астапов И.А., Химухин С. Н. // «Современные технологии в машиностроении»: сборник статей XVI Международной научно-практической конференции, (10 декабря 2012 г., Пенза). – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2012. – С. 6–9.

3. Безматерных К.П. Электродный материал для создания жаростойких интерметаллидных покрытий/ Безматерных К.П., Химухин С.Н., Астапов И.А., Теслина М.А.// «Современные материалы, техника и технология»: материалы 2-й Международной научно-практической конференции, (25 декабря 2012 г., Курск); Ответственный редактор: Горохов А.А. – 2012. – С. 67–71.

4. Безматерных К.П. Интерметаллидное покрытие, полученное методом ЭИЛ/ Безматерных К.П., Химухин С.Н., Астапов И.А., Теслина М.А.// «Теория и практика актуальных исследований»: материалы III Международной научно-практической конференции, (30 января 2013 г., Краснодар): Сборник научных трудов. – Краснодар, 2013. – С. 240–242.

5. Ерёмина К. П. Влияние состава электрода из интерметаллидных сплавов на жаростойкость и микротвердость покрытий / Ерёмина К. П., Химухин С.Н., Астапов И. А., Теслина М.А., Ри Хосен// «Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы и решения. Школа-семинар по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий»: материалы Международной научно-техн. конф., (21–22 июня 2013 г., Комсомольск-на-Амуре) В 2 частях Ч. 1 / редкол. : А.М. Шпилёв (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», – 2013. – С. 137–139.

6. Ерёмина К. П. Исследование влияния состава электрода из интерметаллидных сплавов на качество покрытий, полученных методом электроискрового легирования/ Ерёмина К. П., Химухин С.Н., Астапов И. А., Теслина М.А., Заев В. В., Ри Э.Х.// «Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы и решения. Школа-семинар по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий»: материалы Международной научно-техн. конф., (21–22 июня 2013 г., Комсомольск-на-Амуре) В 2 частях Ч. 1 / редкол. : А.М. Шпилёв (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», – 2013. – С.140–143.

7. Eremina K.P. Improving the coatings quality obtained by the method of electrospark deposition/ Eremina K.P., Yakuba D.D., Khimukhin S.N., Ri Kh., Teslina M.A., Astapov I.A.// «Modern materials and technologies»: International Sino-Russian Symposium (22 October 2013, Khabarovsk) – 2013. – №1. – P.41–43.

8. Ерёмина К.П. Повышение качества электроискровых интерметаллидных покрытий/ Ерёмина К.П.// «Молодые ученые – Хабаровскому краю»: материалы XVI краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, (17–24 января 2014 г., Хабаровск) – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, – 2014. – С. 320–326.

9. Ри Х. Синтез тройных сплавов системы Ni-Al-Ti для использования их в качестве анодного материала при электроискровой обработке / Ри Х., Ерёмина К.П., Химухин С.Н., Астапов И.А.// «Литье и металлургия»: Труды 22-й международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия», (22–24 октября 2014, Минск, Беларусь) - Минск: Изд-во Белорусского национального технического университета, – 2014. – №3. – С. 95–99.

10. Ерёмина К.П. Получение сплавов на никелевой основе для использования их в качестве анодного материала при формировании электроискровых покрытий на сталях/ Ерёмина К.П., Ри Х., Химухин С.Н.// «Электротехника. Энергетика. Машиностроение»: сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых в трех частях, (2–6 декабря 2014 г., Новосибирск). Часть 3. Секция «Машиностроение». Новосибирск: Изд-во НГТУ, – 2014. – С. 288–291.

11. Химухин С.Н. Формирование интерметаллидных покрытий на стали методом электроискровой обработки/ Химухин С.Н., Ерёмина К.П., Ри Х., Астапов И.А., Гонча-

ров А.В., Ри Э.Х., Дзюба Г.С.// «Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения» : материалы Междунар. науч.-техн. конф., (12–16 мая 2015 г., Комсомольск-на-Амуре) / редкол. : О.Ю. Еренков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», – 2015. – С. 283–284.

12. Ерёмина К.П. Формирование оксидов в Ni-Al покрытиях, полученном электроискровым легированием стали 20Х13/ Ерёмина К.П., Химухин С.Н. // «Техника и технологии: пути инновационного развития»: сборник научных трудов 7-й Международной научно-практической конференции (29–30 июля 2018 г., Курск). Ответственный редактор А.А. Горохов, – 2018. – С. 98–101.

13. Ри Х. Покрытия алюминидами никеля на стали 30/ Ри Х., Ерёмина К.П. // XVIII Международная конференция по науке и технологиям Россия-Корея-СНГ: труды конференции (26–28 августа 2018 г., Москва) – Новосибирск: Изд-во НГТУ, – 2018. – С. 303–310.

14. Ри Э.Х. Микроструктура алюминидов никеля полученных центробежной разливкой/ Ри Э.Х., Ерёмина К.П., Беседин А.А.// «Инновационные технологии в литейном производстве»: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана (22–23 апреля 2019 г., Москва) / под общ. ред. К. А. Батышева, К. Г. Семенова. – М.: ИИУ МГОУ, – 2019. – С. 232–235.

15. Ерёмина К.П. Интерметаллидные покрытия после поверхностного пластического деформирования/ Ерёмина К.П., Ри Х. Головкин Е.А.// «Будущее науки–2019»: Сборник научных статей 7-й Международной молодежной научной конференции (25–26 апреля 2019 г., Курск), в 6-х томах, Том 6, Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Изд-во Юго-Зап. гос. ун-т., – 2019. – С. 37–39.