

На правах рукописи



ИГНАТЬЕВ ЗАХАР ЕВГЕНЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ГТД ПРИ НАНЕСЕНИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ
ПОКРЫТИЙ**

Научная специальность

2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Рыбинск, 2026 г.

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение, литье и сварка» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Шатульский Александр Анатольевич

Официальные оппоненты: – **Самойленко Василий Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет гражданской
авиации», заведующий кафедрой

– **Овчинников Виктор Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет», заведующий кафедрой

Ведущая организация: – ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»

Защита диссертации состоится «25» июня 2026 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 в ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3. ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте: https://mai.ru/upload/iblock/9ff/2pa701zrikrffjq0dp054z4pzuthhh8b/Dissertatsiya-Ignatev-_MAI.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Повышение температуры газового потока в современных турбинах и вследствие этого повышение рабочей температуры на поверхности охлаждаемых лопаток до 1000—1150 °С, а также необходимость увеличения рабочего ресурса двигателей потребовали разработки более жаростойких и долговечных покрытий для турбинных лопаток вместо имевших широкое распространение термодиффузионных покрытий. Последние в большинстве своем перестают удовлетворять новым, более жестким требованиям эксплуатации ввиду того, что ряд основных легирующих элементов литейных никелевых сплавов, полезных с точки зрения жаропрочности (молибден, вольфрам, ванадий, тантал, рений, рутений) оказывает отрицательное действие на жаростойкость.

Обеднение поверхностного слоя сплавов в условиях высокотемпературного нагрева или эксплуатации титаном, алюминием, хромом ухудшает эксплуатационные свойства деталей. Катастрофическое разрушение жаропрочных сплавов наблюдается в условиях высокотемпературной коррозии в области 760—950 °С, когда в продуктах сгорания содержится незначительное количество солей щелочных металлов, в особенности Na_2SO_4 в результате попадания морской воды или сгорания топлива, содержащего микропримеси натрия и серы.

В более полной мере удовлетворяют современным требованиям многокомпонентные жаростойкие и коррозионностойкие покрытия на основе никеля и кобальта с содержанием хрома и алюминия. Подобные покрытия, создающие прочно сцепленные с осажденным слоем оксидные пленки на основе Al_2O_3 , обеспечивают надежную защиту жаропрочных сплавов от агрессивной окружающей среды и увеличивают рабочий ресурс лопаток турбин в 3—5 раз в зависимости от условий эксплуатации. Повысить защитный эффект таких покрытий позволяет нанесение внешнего керамического слоя.

Системы таких покрытий на лопатках обычно получают путём плазменного нанесения защитных слоев из керамики, обладающей низкой теплопроводностью. Наиболее подходящим материалом для этих целей является диоксид ZrO_2 . Однако особенности структуры керамических и металлических покрытий при данном методе нанесения, а именно

горизонтально ориентированная пористость, несплавление частиц порошка и наличие трещин, параллельных поверхности нанесения, не всегда обеспечивают требуемого ресурса долговечности покрытий.

Особого внимания в области технологии защиты лопаток ГТД представляют теплозащитные покрытия, получаемые электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме. Получаемые таким способом керамические покрытия обладают сегментированной столбчатой структурой в отличие от произвольно слоистой структуры, характерной для плазменного напыления. Столбчатая структура теплозащитных покрытий обладает более высокими характеристиками прочности (величина предельных скалывающих напряжений), чем слоистая (при плазменном напылении).

Дальнейшее ужесточение требований к двигателям привели к тому, что однослойные многокомпонентные покрытия $Me - Cr - Al - Y$, получаемые конденсацией в вакууме, все же исчерпывают свой защитный ресурс за весьма ограниченное время (300—6000 ч). Получение металлических покрытия в два этапа, с градиентным изменением химического состава по кобальту или алюминию, равномерное введение небольших количеств оксидной фазы в матрицу металлического покрытия, и другие усовершенствования в технологии нанесения металлических покрытий, не разрешили вопросов, связанных с повышением сопротивляемости высокотемпературной газовой эрозии и коррозии. Необходимость защиты охлаждаемых лопаток от воздействия теплового потока требует, чтобы современные защитные покрытия обладали не только высокой жаростойкостью и коррозионной стойкостью, но и служили термическим барьером по отношению к тепловому излучению продуктов сгорания топлива.

Степень разработанности темы исследования. Исследования по разработке теплозащитных покрытий проводятся в настоящее время во многих российских вузах и исследовательских организациях (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, МАИ (национальный исследовательский университет), МГТУ имени Н.Э. Баумана, СПбГТУ, НИИЭМИ, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московский Политехнический университет, Юго-Западный государственный университет, МГТУ гражданской авиации, и др.). Однако, несмотря на многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых, до настоящего времени

недостаточно внимания уделялось изучению особенностей формирования структуры керамических покрытий, наносимых электронно-лучевым испарением в вакууме, а также комплексному влиянию структуры и фазового состава покрытий на их защитные свойства.

Цель диссертационной работы - повышение ресурса рабочих лопаток ГТД на основе разработки и внедрения методов обеспечения структуры и фазового состава поверхностного слоя при нанесении теплозащитных покрытий.

Для достижения вышеуказанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Установить степень влияния подготовки поверхности детали перед нанесением покрытий.
2. Определить влияние параметров процесса нанесения на структуру и свойства покрытий.
3. Определить влияние химического состава покрытий на сопротивление высокотемпературному окислению.
4. Определить влияние химического состава покрытий на сопротивление высокотемпературной солевой коррозии.
5. Разработать альтернативные технологии нанесения теплозащитных покрытий и проанализировать свойства полученных по этим технологиям покрытий.

Научная новизна:

1. Выявлен механизм влияния на структуру и свойства керамических теплозащитных покрытий основных технологических параметров установки при электронно-лучевом осаждении в вакууме, в частности установлено, что:

– при снижении тока подогрева в интервале 0,4 А до 0,1 А происходит формирование слоистой текстуры керамического слоя с сохранением столбчатой структуры кристаллов с одновременным снижением количества сквозных и увеличением количества закрытых вертикальных пор, а также повышение скорости роста толщины покрытия до 17%;

– при снижении числа оборотов штока установки на 75 % (с 12 до 3 оборотов в минуту) наблюдается формирование плотной микроструктуры у подложки с развитием столбчатых кристаллов у поверхности покрытия с ярко выраженной слоистой текстурой, а при увеличении числа оборотов на 67 %

(с 12 до 20 оборотов в минуту) плотной столбчатой микроструктуры по всем сечениям покрытия со сквозными вертикальными порами;

– совместное варьирование значений тока подогрева и скорости вращения штока позволяет в широком диапазоне изменять микроструктуру покрытия, а, следовательно, и эксплуатационные свойства лопаток ГТД.

2. Предложен новый состав теплозащитного покрытия для рабочих лопаток ГТД, отличающийся формированием дополнительного микрослоя на основе моноалюминида никеля между основным жаростойким и керамическим слоями или на поверхности керамического покрытия, что позволяет повысить долговечность теплозащитного покрытия в условиях высокотемпературных циклического (в среднем на 78 %) и коррозионного (в среднем на 18 %) воздействий. Также применение микрослоя на поверхности керамики привело к увеличению адгезионной прочности всей системы покрытия (уменьшению площади скола покрытия) в среднем на 80 %.

3. Предложена математическая зависимость, описывающая взаимосвязь технологических параметров нанесения керамических покрытий и толщины керамического слоя при электронно-лучевом осаждении в вакууме, которая позволяет выбрать оптимальные режимы, обеспечивающие повышение производительности процесса и стойкости покрытия.

4. Установлено, что одной из причин снижения ресурса монокристаллитных рабочих лопаток ГТД является протекание рекристаллизационных процессов в поверхностном слое при эксплуатации, из-за остаточных напряжений, возникающих при пескоструйной очистке поверхности перед нанесением покрытий, внедрение нового способа подготовки поверхности, включающего механическую очистку с электролитической полировкой, позволило устранить этот недостаток и значительно повысить стойкость покрытий.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлены закономерности изменения макро- и микроструктуры, фазового и химического состава поверхностного слоя лопатки в зависимости от параметров технологического процесса нанесения покрытия;

2. Разработан и опробован в условиях производства технологический процесс нанесения теплозащитных покрытий, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками;

3. Разработан экспериментально-аналитический метод контроля толщины

покрытий, основанный на математической зависимости параметров процесса, который был опробован в условиях производства.

4. Предложена и опробована в условиях производства методика выбора параметров процесса нанесения покрытия на рабочие лопатки ГТД.

Методология и методы исследования:

Выплавка образцов производилась с использованием промышленной вакуумной индукционной плавильной установки. Нанесение покрытий проводилось на ионно-плазменной установке МАП-1 и электронно-лучевой установке Л-8. Высокотемпературные испытания проводились в муфельной печи. Для исследования микроструктуры использовались методы растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа. Исследование адгезионных характеристик проводилось с использованием скрэтч-тестера. Получение математической зависимости влияния параметров нанесения на толщину покрытий проводилось с использованием корреляционного и регрессионного анализов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования влияния технологических параметров (тока подогрева поверхности, скорости вращения штока) нанесения керамических покрытий на их микроструктуру.
2. Состав теплозащитного покрытия, полученного технологией электронно-лучевого осаждения в вакууме с дополнительным микрослоем на основе моноалюминида никеля.
3. Математическая зависимость, отражающая взаимосвязь технологических параметров нанесения керамических покрытий и толщины керамического слоя при электронно-лучевом осаждении в вакууме.
4. Результаты анализа влияния технологии подготовки лопатки перед нанесением покрытий на формирование фазового состава и структуры поверхностного слоя.
- 5.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов достигалась путем применением современных методов исследований и обработки экспериментальных данных, полученных на сертифицированном исследовательском оборудовании;

– корреляцией расчетных данных с результатами производственного опробования;

– корректным применением положений физического металловедения и

теории жаропрочности и жаростойкости.

Личный вклад автора состоит в теоретическом обосновании поставленных целей и задач, планировании и проведении экспериментальных исследований, интерпретации и обобщении полученных результатов, формулировании выводов, разработке технологии получения новых теплозащитных покрытий и методик испытаний и исследований теплозащитных покрытий, разработке математической модели и методики расчета характеристик теплозащитных покрытий, уточнении нормативной документации, апробации созданных систем покрытий.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на: международном проекте «TheBarCode» при участии ПАО «ОДК-Сатурн» и научно-исследовательских институтов Technological Educational Institute of StereaEllada (Греция), PlasmaJets.r.l. (Румыния), NUMECA International S.A (Бельгия) и др.; VI Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство»; III Всероссийской научно-технологической конференции «Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия» в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ; Всероссийской научно-технической конференции «Прогрессивные материалы и технологии изготовления заготовок», Рыбинск; конкурсе «Авиастроитель года» по итогам 2021 года, 2022 г.; Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство», 2024 г.; II Всероссийском научно-техническом форуме по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова, 2024 г.; конкурсе на соискание премии имени Б.И. Тихомирова, 2024 г.; конкурсе «Человек Ростеха» в номинации «Будущее промышленности», 2025 г., XXVI Всероссийском конкурсе «Инженер года», 2025 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 6 статей в изданиях из перечня ВАК. Получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений. Материалы изложены на 202 страницах машинописного текста, содержат 144 рисунка, 34 таблицы и список литературы из 77 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы, дана общая характеристика работы, сформулированы цель и задачи исследований, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дана характеристика теплозащитных покрытий. Показано, что выполнение требований, предъявляемых к современным двигателям, связано как с развитием жаропрочных никелевых сплавов и технологий изготовления ответственных деталей из них, так и с применением теплозащитных покрытий. Отмечено, что в настоящее время существует и активно используется несколько технологий нанесения покрытий, однако при их реализации выявляется множество проблем, связанных с обеспечением размерной точности и прогнозированием их свойств. Многие вопросы, связанные с формированием поверхностного слоя деталей, с технологиями получения и свойствами керамических теплоизоляционных слоёв, до сих пор остаются нерешёнными. Поэтому развитие теоретических аспектов нанесения теплозащитных покрытий наряду с разработкой новых материалов и технологий являются актуальными задачами для современного двигателестроения. Перечисленные выше факторы определили цель и задачи исследований.

Во второй главе дано описание используемых в работе материалов и методов исследования. Исследования проводили на отливках, изготовленных из монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов ЖС32-ВИ и СЛЖС5-ВИ, а также поликристаллическом сплаве ЧС88У-ВИ. В качестве материалов, используемых при формировании теплозащитных покрытий согласно серийной технологии, были использованы: для формирования жаростойкого металлического подслоя, сформированного ионно-плазменным методом, - катод марки СДП-1 (Ni - основа, 18...22 % Co, 18...22 % Cr, 11...13 % Al, 0,2...0,6 % Y); для внешнего теплоизоляционного слоя, сформированного электронно-лучевым осаждением - 8YSZ (ZrO₂ - основа, Y₂O₃ - 6...8 %). Предложенные жаростойкие микрослои на основе Ni-Al были нанесены электронно-лучевым испарением. Оценка термоциклических и изотермических характеристик теплозащитных покрытий, а также их устойчивость солевой коррозии, были проведены с помощью высокотемпературной муфельной печи при температурах до 1200°С. Для исследования адгезионных свойств теплозащитных покрытий был применен метод

склерометрии - формирование царапин на поверхности материала или системы покрытия с последующим сканированием и анализом изображений полученных отпечатков. Исследования микроструктуры материала образцов и покрытий проводились на микрошлифах с использованием оптического и растрового электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионной приставкой.

Третья глава посвящена анализу дефектов теплозащитных покрытий, получаемых по серийной технологии электронно-лучевым осаждением в вакууме, а также способам их устранения. Рассмотрены основные виды производственных дефектов теплозащитных покрытий (таблица 1).

Таблица 1 – Производственные дефекты теплозащитных покрытий, сформированных электронно-лучевым методом в вакууме

Дефект	Причины	Способ устранения дефекта
Разнотолщинность теплозащитного покрытия	Самозатенение (перекрытие лопаток в оснастке по отношению к потоку испаряемого вещества)	Использование оснастки с планетарным вращением; уменьшение количества лопаток в камере; соосность штока и лопаток
Выплески керамического покрытия на поверхности лопатки	Нестабильность работы электронных пушек нагрева керамических штабиков; наличие пустот в керамическом штабике	Своевременное техническое обслуживание электронных пушек установки; равномерный прогрев керамического слитка с формированием ванны расплава; ужесточение требований к качеству керамических штабиков
Сегментация керамического покрытия	Высокая шероховатость поверхности подложки; нестабильность работы электронных пушек подогрева	Обеспечение требуемой шероховатости поверхности; своевременное техническое обслуживание электронных пушек установки
Изменение цвета покрытия после вакуумного отжига	Натекание кислорода в вакуумной камере печи	Контроль вакуумной системы печи
Загрязнение поверхности материала перед нанесением теплозащитных покрытий	Внедрение абразивных материалов в поверхностный слой материала при подготовительных операциях перед нанесением покрытий	Своевременная замена абразивных материалов (корунда) при пескоструйной обработке; Использование методов обработки поверхности, исключая механическое воздействие на поверхность материала

Исходя из результатов проведенного анализа, производственные дефекты теплозащитных покрытий можно условно разделить на две группы:

- дефекты, образовавшиеся при нанесении покрытий;
- дефекты, образовавшиеся при вспомогательных операциях изготовления покрытий.

Дефекты, выявленные визуальным контролем, поддаются устранению, несмотря на увеличение сроков выпуска продукции и её удорожание. Однако наибольшую опасность представляют скрытые дефекты, выявление которых невозможно на этапе изготовления и контроля. Такие дефекты проявляются только при испытаниях или эксплуатации, ставя под угрозу работоспособность всего двигателя в целом.

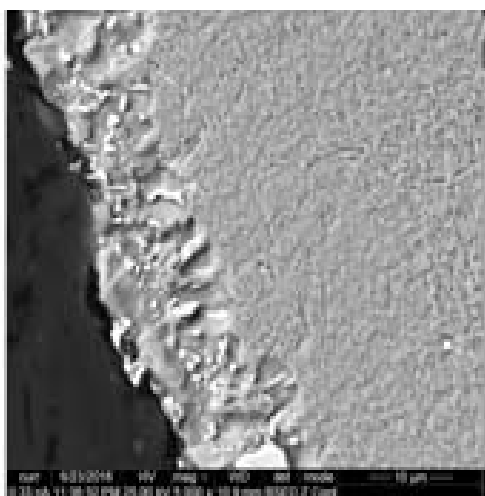
Четвертая глава посвящена оценке влияния подготовительных операций перед нанесением теплозащитных покрытий на структуру и свойства материала лопаток турбин. Показано, что лопатки перед нанесением покрытия проходят несколько технологических операций, включая обрезку литников, пескоструйную очистку поверхности, травление, механическую обработку пера лопатки для обеспечения требуемых размеров. Установлено, что, в результате пескоструйной и механической обработок на поверхности лопатки образуется наклепанный слой. Для монокристаллических лопаток это создает опасность появления на поверхности «паразитных» зёрен, что зачастую приводит к снижению их эксплуатационных свойств. Исследование влияния параметров пескоструйной обработки на возникновение и глубину рекристаллизованного слоя в монокристаллическом сплаве ЖС32-ВИ при высокотемпературной выдержке показало, что растворение упрочняющей γ' -фазы является фактором, способствующим распространению рекристаллизованных зёрен. Степень механического воздействия (на примере пескоструйной обработки – минимальное давление на выходе сопла в 1,5 атм.) приводит к формированию рекристаллизованных зёрен на поверхности при температуре выше 1000°C и времени выдержки более 2 часов (рисунок 1).

Исследование влияния других методов подготовки поверхности лопаток перед нанесением теплозащитных покрытий (таблица 2) позволили установить, что оптимальным методом является электролитно-плазменная полировка поверхности, обеспечивающая: получение требуемой шероховатости поверхности, отсутствие микроструктурных изменений в поверхностном слое материала и остаточных напряжений. Электролитно-плазменная полировка также отличается высокой технологичностью и производительностью.

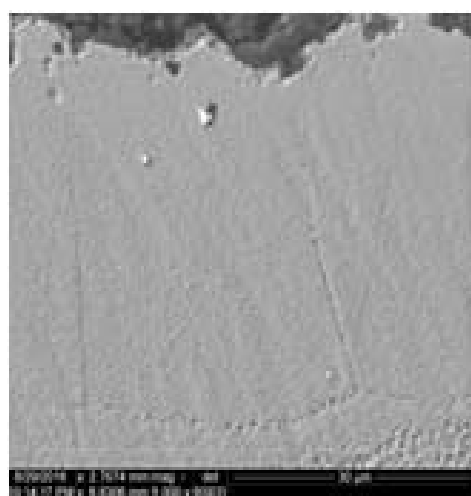
На основе проведенных исследований были разработаны новые технологии подготовки поверхности лопаток:

– комбинированный метод подготовки поверхности для поликристаллических лопаток, сочетающий пескоструйную обработку поверхности с последующей электрохимической обработкой для обеспечения оптимальных показателей производительности, низкой шероховатости и минимального загрязнения поверхности деталей;

– электрохимический метод для монокристаллических лопаток, а именно электролитно-плазменная полировка ввиду его технологичности.



а)



б)

Рисунок 1 – Поверхностная рекристаллизация сплава ЖС32-ВИ после пескоструйной обработки ($p=1,5$ атм.) и высокотемпературной выдержки ($T=1200^{\circ}\text{C}$) при времени выдержки: а – $\tau=2$ часа; б – $\tau=24$ часа

Таблица 2 – Сравнение методов подготовки поверхности перед нанесением покрытий

Метод подготовки поверхности	Шероховатость R_a , мкм	Недостатки
Виброгалтовка	0,4...0,6	Возможность отслоения металлического подслоя
Химическое травление	6,2	Растрав поверхности; формирование на поверхности продуктов реакции
Ионное травление	0,8	Низкая производительность процесса; неприменимость метода в электронно-лучевых установках
Сухая электрополировка	0,2	Трудноудаляемые фрагменты реактива на поверхности материала
Электролитно-плазменная полировка	0,3...0,7	Отсутствуют

В пятой главе выполнен анализ технологических факторов, влияющих на структуру и свойства теплозащитных покрытий, сформированных электронно-лучевым методом с осаждением в вакууме. Установлено, что ток нагрева испаряемого керамического штабика при электронно-лучевом нанесении влияет на количество испаряемого вещества, а значение тока подогрева поверхности защищаемого материала оказывает влияние на структуру конденсированного керамического слоя.

Установлено, что снижение тока подогрева поверхности при формировании покрытий позволяет получить:

- слоистую текстуру керамического слоя с сохранением столбчатой структуры кристаллов керамики;
- повышение скорости роста толщины керамического покрытия приблизительно на 17 %;
- снижение количества сквозных вертикальных пор в керамическом покрытии;
- увеличение количества закрытых вертикальных пор.

Изменение скорости вращения штока относительно стандартного значение (12 оборотов в минуту) при формировании керамических покрытий позволило получить:

- при скорости 3 оборота в минуту – плотную микроструктуру у подложки с развитием столбчатых кристаллов у поверхности покрытия с ярко выраженной слоистой текстурой;
- при скорости 20 оборотов в минуту – плотную столбчатую микроструктуру во всем сечении покрытия со сквозными вертикальными порами.

Совместное варьирование значений тока подогрева и скорости вращения штока позволило получить плотную столбчатую микроструктуру керамического покрытия с незначительным развитием осей дендритов второго порядка.

Показано влияние расположения лопаток в вакуумной камере установки на микроструктуру при формировании керамических покрытий. Расположение лопатки на одной оси со штоком установки позволило получить однородное по толщине керамическое покрытие с вертикально ориентированными столбчатыми кристаллами керамического покрытия.

На основании обработки производственных данных была разработана

математическая зависимость, позволяющая оценить влияние параметров нанесения на толщину покрытий, сформированных электронно-лучевым осаждением в вакууме. В результате анализа было установлено, что основными технологическими параметрами, формирующими теплозащитные покрытия при электронно-лучевом нанесении, являются ток подогрева изделий (I_n , А), время подогрева изделий (τ_n , мин), ток нагрева испаряемого вещества (I_n , А) и время нагрева испаряемого вещества (τ_n , мин). Для оценки степени влияния технологических параметров установки на толщину керамических покрытий (δ , мкм), были проанализированы данные процессов напыления теплозащитных покрытий из керамического материала $ZrO_2-8\% Y_2O_3$ для 20 лопаток. При помощи прикладного пакета STATISTICA с учетом интервалов изменения параметром (таблица 3) была получена матрица корреляций при доверительной вероятности $P = 0,95$ (таблица 4).

Анализ показал, что параметры I_n , I_n , τ_n и τ_n являются значимыми. Получение регрессионной модели также было проведено с помощью пакета STATISTICA. Численные значения коэффициентов находились методами регрессионного анализа при условии минимизации средних квадратичных отклонений. Были рассмотрены несколько видов математической модели, но по значениям коэффициентов корреляции и детерминации наиболее удовлетворительной являлась линейная зависимость вида:

$$\delta = -19,6 - 40 \cdot I_n - 0,65 \cdot \tau_n + 56,73 \cdot I_n + 1,06 \cdot \tau_n \quad (R=0,90; R^2=0,81).$$

Таблица 3 – Интервалы изменения параметров

Характеристика	Обозначение	I_n , А	τ_n , мин	I_n , А	τ_n , мин	δ , мкм
Основной уровень	X0	0,59	11,00	0,99	29,5	74,5
Интервал варьирования	$\pm \Delta X$	0,18	6,00	0,06	27,00	18,3
Верхний уровень	+	0,68	14,00	1,02	43,00	83,3
Нижний уровень	-	0,50	8,00	0,96	16,00	65,0

Таблица 4 – Матрица парных корреляций между параметрами, описывающими зависимость толщины покрытий

Параметры	I_n	τ_n	I_n	τ_n	δ
I_n	1,00	0,28	0,00	0,47	0,59
τ_n	0,28	1,00	-0,09	-0,01	-0,69
I_n	0,00	-0,09	1,00	0,38	0,50
τ_n	0,47	-0,01	0,38	1,00	0,73
Δ	0,59	-0,69	0,50	0,73	1,00

Для оценки адекватности полученной модели было проведено сравнение между экспериментальными и расчетными значениями толщины покрытия δ . Среднее значение относительной погрешности составляет 10,9 %, что является допустимым в условиях нанесения теплозащитных покрытий на изделия сложной геометрии типа "рабочая лопатка".

В шестой главе рассмотрены технологии улучшения эксплуатационных свойств теплозащитных покрытий, нанесенных электронно-лучевым испарением в вакууме.

Для снижения окисления жаростойкого слоя и обеднения его алюминием были рассмотрены различные технологии повышения фазовой стабильности поверхностного слоя сплавов. Наиболее эффективной оказалась технология нанесения теплозащитных покрытий с дополнительными слоями алюминид никеля, при которой на жаростойкий и на теплозащитный слой наносился металлический слой Ni–Al (рисунок 2). Дополнительный слой Ni–Al на поверхности жаростойкого слоя способствовал сохранению фазовой стабильности основного жаростойкого слоя и, в конечном счете, обеспечил повышение фазовой стабильности защищаемого сплава в результате снижения диффузии Al из сплава в покрытие в условиях длительной эксплуатации.

Эффективность разработанных систем теплозащитных покрытий была подтверждена при высокотемпературных коррозионных и термоциклических испытаниях (таблицы 5 и 6). В условиях термоциклических воздействий наиболее эффективными свойствами обладает система покрытия Ni–Co–Cr–Al–Y / Ni–Al / ZrO₂–Y₂O₃, в которой в результате высокотемпературного

воздействия на границе раздела слоёв Ni–Co–Cr–Al–Y и ZrO₂–Y₂O₃ формируется стабильный барьерный слой на основе α-Al₂O₃, не ухудшающий адгезионные свойства керамического слоя.

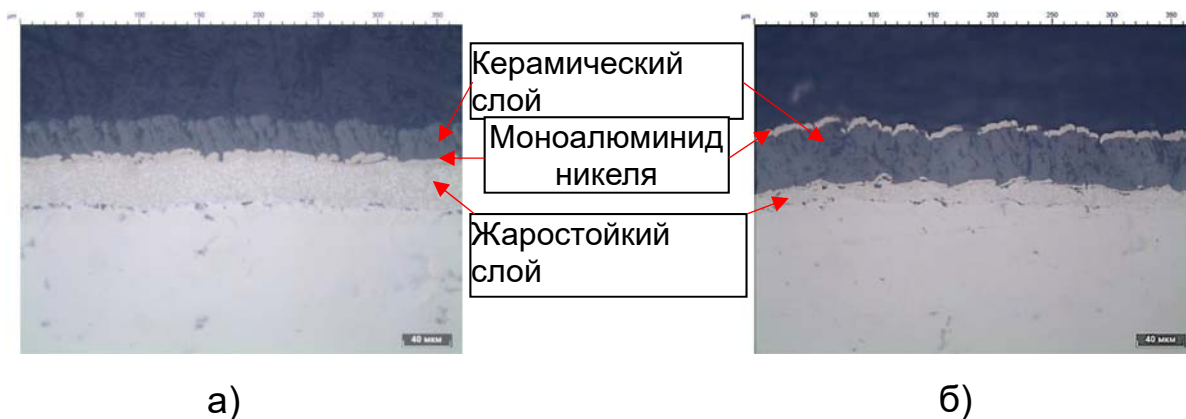


Рисунок 2 – Микроструктура предлагаемого теплозащитного покрытия с дополнительными слоями: а – с промежуточным слоем алюминид никеля; б – с внешним слоем алюминид никеля

В условиях солевой коррозии наиболее эффективными свойствами обладает система покрытия Ni–Co–Cr–Al–Y / ZrO₂–Y₂O₃ / Ni–Al, на поверхности которой, под воздействием внешних факторов, формируется оксидный слой, снижающий диффузию «агрессивной» среды к поверхности сплава.

Испытания на адгезионную прочность методом склерометрии показали, что наиболее эффективным с данной точки зрения является система теплозащитного покрытия Ni–Co–Cr–Al–Y / ZrO₂–Y₂O₃ / Ni–Al. Одновременно с этим система теплозащитного покрытия Ni–Co–Cr–Al–Y / Ni–Al / ZrO₂–Y₂O₃ показала большую целостность покрытия на близлежащих поверхностях к царапине по сравнению с теплозащитным покрытием, изготовленным по серийной технологии (таблица 7).

Таблица 5 – Оценка эффективности коррозионной стойкости систем покрытий в водном растворе 10% NaCl + 90% Na₂SO₄

Система покрытия	Марка сплава	Критерии оценки		
		Целостность покрытия	Коррозионная стойкость покрытия	Точность воспроизведения параметров покрытия
Ni–Co–Cr–Al–Y / Ni–Al / ZrO ₂ –Y ₂ O ₃	ЧС88У-ВИ	++	+	++
	СЛЖС5-ВИ	++	++	++
Ni–Co–Cr–Al–Y / ZrO ₂ –Y ₂ O ₃ / Ni–Al	ЧС88У-ВИ	++	+++	++
	СЛЖС5-ВИ	+++	+++	++
Ni–Co–Cr–Al–Y / ZrO ₂ –Y ₂ O ₃	ЧС88У-ВИ	+	+	+++
	СЛЖС5-ВИ	+	–	+++

Примечание – «+++» наивысшая оценка; «++» средняя оценка; «+» удовлетворительная оценка; «–» неудовлетворительная оценка.

Таблица 6 – Оценка эффективности термоциклической стойкости систем покрытий

Система покрытия	Марка сплава	Критерии оценки		
		Целостность покрытия	Количество циклов до начала разрушения	Точность воспроизведения параметров покрытия
Ni–Co–Cr–Al–Y / Ni–Al / ZrO ₂ –Y ₂ O ₃	ЧС88У-ВИ	+++	1 000	++
	СЛЖС5-ВИ	+++	1 000	++
Ni–Co–Cr–Al–Y / ZrO ₂ –Y ₂ O ₃ / Ni–Al	ЧС88У-ВИ	++	1 000	++
	СЛЖС5-ВИ	++	1 000	++
Ni–Co–Cr–Al–Y / /ZrO ₂ –Y ₂ O ₃	ЧС88У-ВИ	+	646	+++
	СЛЖС5-ВИ	+	400	+++

Примечание – «+++» наивысшая оценка; «++» средняя оценка; «+» удовлетворительная оценка; «–» неудовлетворительная оценка.

Таблица 7 – Оценка адгезионной прочности систем покрытий

Покрытие	Марка сплава	Критерии оценки			
		Целостность покрытия вблизи царапины	Толщина покрытия, мкм	Критическая нагрузка разрушения покрытия, Н	Глубина вдавливания индентора в покрытие, мкм
Ni–Co–Cr–Al–Y / Ni–Al / ZrO ₂ –Y ₂ O ₃	ЧС88У-ВИ	+++	От 70 до 74	От 15 до 21	11
		++	От 90 до 104	От 30 до 38	От 16 до 18
	СЛЖС5-ВИ	+++	От 72 до 79	От 22 до 26	От 13 до 16
		++	От 92 до 104	34	От 24 до 26
Ni–Co–Cr–Al–Y / ZrO ₂ –Y ₂ O ₃ / Ni–Al	ЧС88У-ВИ	+++	От 72 до 78	30	От 14 до 18
		++	От 98 до 106	50	От 20 до 25
	СЛЖС5-ВИ	+++	От 71 до 78	38	От 17 до 18
		+++	От 82 до 87	От 70 до 78	От 23 до 25
Ni–Co–Cr–Al–Y / ZrO ₂ –Y ₂ O ₃	ЧС88У-ВИ	+	От 86 до 92	От 43 до 47	От 18 до 20
		+	От 103 до 117	От 61 до 87	От 25 до 30
	СЛЖС5-ВИ	+++	От 77 до 85	От 28 до 35	От 14 до 17
		–	От 121 до 125	От 78 до 84	От 25 до 31
<p>Примечание – «+++» наивысшая оценка; «++» средняя оценка; «+» удовлетворительная оценка; «–» неудовлетворительная оценка.</p>					

Седьмая глава посвящена производственному опробованию разработанных систем теплозащитных покрытий. Испытания разработанных систем теплозащитных покрытий были проведены на установке, имитирующей поток продуктов сгорания углеводородного топлива в условиях высокотемпературной солевой коррозии при температуре $1\,000 \pm 50$ °С. Образцы с нанесенными на их поверхности системами покрытий прошли испытания на

базе 100 циклов. Введение дополнительного слоя Ni–Al, сформированного электронно-лучевым испарением с конденсацией из паровой фазы, повышает защиту основного жаростойкого слоя в условиях, схожих с условиями работы ГТД по сравнению с традиционной системой теплозащитного покрытия (таблица 8).

Таблица 8 – Характеристики микроструктуры покрытий после испытаний

Система покрытия	Доля β -фазы, %	Глубина обедненного слоя, мкм	Толщина оксидной пленки, мкм
Ni–Co–Cr–Al–Y	38,8...43,2	3,0...5,0	1,0...2,0
Ni–Co–Cr–Al–Y/ZrO ₂ –Y ₂ O ₃	42,4...44,6	1,0...2,7	0,6...1,5
Ni–Co–Cr–Al–Y/Ni–Al/ZrO ₂ –Y ₂ O ₃	58,4...58,7	1,0...1,3	1,6...1,8
Ni–Co–Cr–Al–Y/ZrO ₂ –Y ₂ O ₃ /Ni–Al	46,9...50,4	1,0...2,7	1,9...2,5

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Рассмотрены способы подготовки поверхности деталей из защищаемого сплава перед нанесением покрытий. Установлено влияние каждого из способов на долговечность покрытий, предложен наиболее оптимальный из них – электролитно-плазменная полировка ввиду отсутствия негативного влияния с точки зрения поверхностных напряжений и микроструктуры материала подложки.

2. Проанализированы технологические параметры нанесения керамических покрытий, сформированных электронно-лучевым осаждением в вакууме. Выявлены закономерности, влияющие на микроструктуру и свойства керамических покрытий, а именно установлено влияние тока подогрева поверхности и скорости вращения штока на микроструктуру керамических покрытий.

3. Установлено влияние расположения покрываемых деталей относительно оси вращения штока: совмещение оси вращения детали и оси вращения штока позволило получить равномерное керамическое покрытие с вертикально ориентированными кристаллами, что является критерием качества

процесса нанесения керамических покрытий электронно-лучевым методом в вакууме.

4. Разработана математическая модель, описывающая взаимосвязь технологических параметров нанесения керамических покрытий и толщины керамического слоя при электронно-лучевом осаждении в вакууме. На основании математической модели предложен метод контроля толщины покрытий, позволяющий:

- повысить точность контроля толщины покрытий;
- корректировать показания весового датчика установки;
- отказаться от проведения разрушающего контроля для определения толщины покрытия при достаточной степени достоверности прогнозируемых данных.

5. Разработаны способы получения теплозащитных покрытий, сформированных электронно-лучевым осаждением в вакууме, основанные на создании дополнительного микрослоя на основе моноалюминиды никеля:

- между основным жаростойким и керамическим слоями;
- на поверхности керамического слоя.

Применение дополнительных микрослоев позволило повысить долговечность системы теплозащитных покрытий в условиях высокотемпературных циклического (в среднем на 78 %) и коррозионного воздействия (в среднем на 18 %). Также применение микрослоя на поверхности керамики привело к увеличению адгезионной прочности всей системы покрытия (уменьшению площади скола покрытия) в среднем на 80 %.

Повышение долговечности систем теплозащитных покрытий с микрослоями на основе моноалюминиды никеля в условиях высокотемпературного воздействия связано с сохранением фазовой стабильности основного жаростойкого слоя (присутствие микрослоя на поверхности керамического покрытия увеличило количество β -фазы на 12 %; в случае промежуточного расположения между металлическим и керамическим слоями – на 35 % за счет образования пленки α - Al_2O_3).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ:

Список публикаций в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК

1. Шатульский А.А. О механизме протекания процесса рекристаллизации в поверхностном слое отливки после пескоструйной обработки / А.А. Шатульский, З.Е. Игнатъев // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2016. № 1 (36). С. 72–75. (ВАК).

2. Серебряков С.П. Анализ технологических факторов предупреждения точечных поверхностных дефектов при жаропрочном литье по выплавляемым моделям / С.П. Серебряков, А.А. Берстнев, З.Е. Игнатъев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т. 15, № 12. – С. 534-536. (Белый список, К2, ВАК).

3. Шатульский А.А. Применение защитных слоев на основе Al_2O_3 в термобарьерных покрытиях, полученных электронно-лучевым осаждением из паровой фазы / А.А. Шатульский, З.Е. Игнатъев // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2018. № 1 (44). С. 104-108. (ВАК).

4. Шатульский А.А. Влияние расположения деталей в рабочей камере установки на микроструктуру керамических покрытий, нанесенных методом электронно-лучевого испарения с конденсацией из паровой фазы / А.А. Шатульский, С.П. Серебряков, З.Е. Игнатъев // Вестник РГАТА имени П.А. Соловьева. 2024. №3 (70). С.82-86. (ВАК).

5. Игнатъев З.Е. Исследование влияния различных способов подготовки на качество поверхности монокристаллических рабочих лопаток турбины из жаропрочных никелевых сплавов / Игнатъев З.Е., Шатульский А.А // Заготовительные производства в машиностроении. – 2025. – Т.23. – №8. – С.369-377. (Белый список, К2, ВАК).

6. Игнатъев З.Е. Анализ и разработка методов устранения производственных дефектов теплозащитных покрытий, получаемых электронно-лучевым испарением / Игнатъев З.Е., Шатульский А.А // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. 2025. – том 15. – №2. – С. 45-62. (Белый список, К2, ВАК).

Список публикаций в сборниках трудов

7. Шатульский А.А. Влияние параметров пескоструйной обработки поверхности и выдержки на глубину рекристаллизованного слоя в монокристаллитных отливках жаропрочных никелевых сплавов / А.А. Шатульский, З.Е. Игнатьев // Современные электрохимические технологии и оборудование: материалы конференции, Минск, 24-25 ноября 2016 г. Белорусский государственный технологический университет. – Минск : БГТУ, 2016. – С. 67–69.

8. Шатульский А.А. О механизме протекания процесса рекристаллизации в поверхностном слое отливки после пескоструйной обработки / А.А. Шатульский, З.Е. Игнатьев // Прогрессивные литейные технологии. Труды IX Международной научно-практической конференции. Под редакцией Д. Белова, А.И. Батышева. 2017. С.167–170.

9. Шатульский А.А. Управление микроструктурой термобарьерных покрытий, нанесенных электронно-лучевым методом / А.А. Шатульский, З.Е. Игнатьев // Материалы Всероссийской НТК Прогрессивные материалы и технологии изготовления заготовок. Рыбинск. – РГАТУ. – 2018. – С. 19–22.

10. Шатульский А.А. Развитие теории и технологии нанесения теплозащитных покрытий, сформированных электронно-лучевым методом в вакууме, на турбинные лопатки газотурбинных двигателей / А.А. Шатульский, З.Е. Игнатьев // Материалы Всероссийской НТК Прогрессивные материалы и технологии изготовления заготовок. Рыбинск. – РГАТУ – 2024. – С. 8–10.

Свидетельства, патенты и др. результаты интеллектуальной деятельности, зарегистрированные в установленном порядке:

11. Патент 2753846, Российская Федерация, МПК G01B5/02, Способ контроля толщины покрытий / Игнатьев З.Е.; заявитель и правообладатель ПАО «ОДК-Сатурн». – 2020137938, заявлено 18.11.2020, опубликовано 24.08.2021).