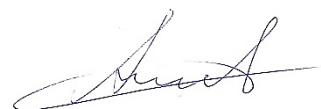


На правах рукописи



Андронов Артем Андреевич

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СИНТЕЗ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ
КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ
В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ**

1.3.5 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск-2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **Юшков Юрий Георгиевич** доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией пучково-плазменной модификации диэлектриков ФГАОУ ВО Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

Официальные оппоненты: **Паперный Виктор Львович**, профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Егоров Иван Сергеевич кандидат технических наук, научный сотрудник ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится «16» сентября 2026 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.415.03 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская 146, а также на официальном сайте ТУСУР: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/sppu3uit>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А.В. Казаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Теплозащитные керамические покрытия на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия ($ZrO_2 + Y_2O_3$), широко применяются для защиты от перегрева деталей машин, подверженных воздействию высоких температур. Одним из перспективных направлений применения теплозащитных покрытий являются детали горячего тракта современных газотурбинных двигателей. Поскольку дальнейшее развитие этих двигателей требует соответствующего повышения рабочей температуры турбины, создание оборудования и технологии получения эффективных теплозащитных покрытий на деталях горячего тракта двигателя является важной научно-технической задачей.

Среди промышленных методов формирования керамического слоя теплозащитных покрытий наибольшее предпочтение отдают электронно-лучевому испарению твердотельной керамической мишени. Такой метод обеспечивает высокие скорости нанесения и позволяет получать покрытия с уникальной столбчатой структурой и требуемой тетрагональной фазой. Применение электронно-лучевого испарения в рабочей области давлений источников электронов с термокатодом (10^{-3} – 10^{-2} Па) затруднено процессами зарядки ускоренным электронным пучком диэлектрической мишени. Для решения этой проблемы необходимо принимать специальные меры, например, повышать мощность электронного пучка до нескольких сотен киловатт.

Активно развиваемые в настоящее время форвакуумные плазменные источники электронов обеспечивают возможность генерации электронных пучков в области повышенных давлений форвакуумного диапазона (1–100 Па). Благодаря наличию плотной пучковой плазмы в области транспортировки пучка ускоренных электронов использование форвакуумных плазменных источников электронов позволяет избежать зарядку электронным пучком поверхности испаряемой диэлектрической мишени.

Возможность использования форвакуумных плазменных источников электронов для непосредственного электронно-лучевого воздействия на высокотемпературные диэлектрические материалы (керамики, стекла и др.) была убедительно продемонстрирована ранее в работах научного коллектива кафедры физики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Достигнутый уровень развития форвакуумных плазменных источников электронов и перспективы их практического применения стимулировали постановку исследований, направленных на использование электронных источников такого типа в процессах формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия ($ZrO_2 + Y_2O_3$), в результате электронно-лучевого испарения твердотельной керамической мишени в форвакуумной области давлений. Исходя из вышеизложенного, тематика диссертационной работы представляется, несомненно, актуальной.

Цель работы заключалась в комплексном исследовании особенностей электронно-лучевого синтеза теплозащитных керамических покрытий на основе диоксида циркония с использованием форвакуумного плазменного источника

электронов, а также оптимизации условий функционирования и параметров электронного пучка и пучковой плазмы для достижения необходимой скорости осаждения покрытий, их характеристик и свойств, в наиболее полной степени удовлетворяющих современным требованиям тепловой защиты деталей и агрегатов газотурбинных двигателей, подверженных высоким температурным нагрузкам.

Научная новизна работы

1. Предложено и реализовано конструкторско-техническое решение, повышающее стабильность функционирования форвакуумного плазменного источника электронов в условиях интенсивного электронно-лучевого испарения твердотельной керамической мишени, снижающее влияние испаряемого материала на электрическую прочность ускоряющего промежутка электронного источника без существенной потери мощности пучка на испаряемой мишени.

2. Определены и реализованы условия электронно-лучевого синтеза керамических покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, обеспечивающие в форвакуумной области давлений формирование субмиллиметровых теплозащитных покрытий со столбчатой структурой и тетрагональной фазой.

3. Предложен и реализован метод измерения степени ионизации паров материалов, испаряемых электронным пучком в форвакуумной области давлений, основанный на использовании конденсационного зонда с поперечным магнитным полем, разделяющего ионный и атомарный компоненты испаряемого материала.

Научная и практическая значимость

1. Результаты проведенных исследований вносят вклад в понимание особенностей функционирования форвакуумного плазменного источника электронов в процессе интенсивного испарения электронным пучком керамической мишени на основе диоксида циркония, а также обеспечивают возможность генерации в этих условиях электронного пучка со стабильными параметрами.

2. Показана принципиальная возможность создания на основе использования форвакуумных плазменных источников электронов научных основ электронно-лучевого синтеза керамических покрытий на основе диоксида циркония, обеспечивающих эффективную тепловую защиту различных изделий в экстремальных условиях их эксплуатации.

3. Метод измерения степени ионизации в плазме на основе применения конденсационного зонда с поперечным магнитным полем может быть использован в широкой номенклатуре процессов электронно-лучевого и ионно-плазменного методов модификации различных материалов.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечивается комплексным характером исследований, согласованием результатов с данными из литературных источников, а также верификацией параметров полученных теплозащитных покрытий на образцах реальных изделий.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. При электронно-лучевом испарении керамической мишени на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, с исполь-

зованием форвакуумного плазменного источника электронов в атмосфере гелия при рабочем давлении 2–5 Па удаление источника электронов от испаряемой мишени на расстояние ≈ 1 м позволяет исключить влияние паров испаряемого материала на снижение электрической прочности ускоряющего промежутка. При этом потери мощности электронного пучка на мишени, обусловленные его транспортировкой в продольном магнитном поле, не превышают 10 %.

2. В процессе электронно-лучевого испарения керамической мишени на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, в форвакуумной области давлений электронный пучок обеспечивает в области его транспортировки интенсивную ионизацию молекул остаточного газа и паров испаряемого материала мишени. При этом состав ионизированного компонента испаряемых паров соответствует элементному составу мишени, а вклад ионизованных паров в процесс осаждения покрытий достигает 70 %.

3. Электронно-лучевое испарение керамической мишени на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, с использованием форвакуумного плазменного источника электронов обеспечивает формирование покрытий толщиной до 150 мкм, соответствующих по своему элементному составу материалу испаряемой мишени. При этом скорость осаждения покрытий составляет 1–70 мкм/мин. Образующаяся столбчатая структура покрытия тетрагональной фазы обладает низким коэффициентом теплопроводности уровня 1,3–1,6 Вт/(м·К).

Апробация

Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на I Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Передовые инженерные школы: материалы, технологии, конструкции», г. Пермь (2023 г.); Международной молодежной научной конференции «XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых)», г. Казань (2023 г.); XV Международной школе-конференции молодых учёных «КоМУ-2023», г. Ижевск (2023 г.); Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-27), г. Екатеринбург (2023 г.); V научно-техническом Семинаре по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «Объ-2024», г. Новосибирск (2024 г.); Первой всероссийской межотраслевой конференции «Высокотемпературные керамические композиционные материалы», г. Москва (2024 г.); 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, г. Томск (2024 г.); 17-й международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (17th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications (GDP-2025)"), г. Екатеринбург, а также на ряде молодежных научных мероприятий, проводимых в г. Томске.

Личный вклад

Участие в создании экспериментального и аналитического оборудования. Соискатель самостоятельно выбирал методики эксперимента, проводил исследования, анализировал полученные результаты и дал рекомендации, на основании которых оптимизированы параметры синтеза покрытий. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и содержание выносимых на защиту научных положений, получены автором лично. Формулировки научных

положений обсуждались с научным руководителем. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д-ру техн. наук Юшкову Юрию Георгиевичу, сотрудникам научных лабораторий плазменной электроники и пучково-плазменной модификации диэлектриков кафедры физики ТУСУРа, а также сотрудникам лаборатории плазменных источников Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. Автор признателен сотрудникам кафедры технологии машиностроения Уфимского университета науки и технологии за помощь в проведении термических испытаний получаемых покрытий.

Публикации

Результаты, входящие в структуру диссертации, были опубликованы в 9 статьях, индексируемых в базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus и изданий ВАК РФ, 19 публикаций – в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-практических конференций. По результатам работы получены 3 патента РФ на полезную модель, 2 патента на изобретение и 2 программы ЭВМ, издана 1 монография (в соавторстве).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа написана на 150 страницах, в том числе содержит 101 рисунок, 6 таблиц и 134 источника литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность, цель, научная новизна, научная и практическая ценность работы. Излагается краткое содержание диссертации, формулируются выносимые на защиту научные положения.

Первый раздел *«Теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония: методы формирования, характеристики и применение»* носит обзорный характер и представляет собой анализ методов формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония для тепловой защиты деталей машин, функционирующих в области высоких рабочих температур. Особое внимание уделено ионно-плазменным и электронно-лучевым технологиям синтеза таких покрытий. Проведен сравнительный анализ структуры, толщины и методики формирования таких покрытий на промышленных установках. Выявлены недостатки и преимущества каждого метода.

Показано, что форвакуумные плазменные источники электронов, функционирующие в области повышенных давлений от единиц до сотни паскалей, обеспечивают возможность непосредственного электронно-лучевого воздействия на высокотемпературные диэлектрические материалы. При этом, как показал анализ ранее проведенных исследований, для эффективного электронно-лучевого синтеза покрытий требуются существенно меньшие мощности электронного пучка по сравнению с термокатодным электронным источником, функционирующим при более высоком вакууме. Сделан вывод, что эти преимущества фор-

вакуумных плазменных источников электронов делает целесообразным постановку исследований, направленных на использование электронных источников такого типа в процессах электронно-лучевого синтеза теплозащитных покрытий.

В заключении главы сформулированы выводы и задачи исследования.

Второй раздел «Оборудование для электронно-лучевого синтеза YSZ-покрытий и исследования пучковой плазмы» посвящен экспериментальному и диагностическому оборудованию.

Фотография экспериментальной установки, основными компонентами которой являются: форвакуумный источник электронов (1), система откачки (2), вакуумная камера (3), регулятор расхода газа (4), вакуумметр (5), блоки разряда и ускоряющего напряжения (6), представлена на рисунке 1.

Определено, что при увеличении скорости испарения керамической YSZ-мишени в результате повышения мощности электронного пучка пары испаряемой керамики проникали в область ускоряющего промежутка электронного источника и снижали его электрическую прочность, вызывая нестабильную работу источника. Для повышения стабильности работы форвакуумного плазменного источника электронов в условиях интенсивного испарения мишени и исключения образования диэлектрических покрытий на электродах ускоряющего промежутка источник был максимально удален от мишени и установлен на протяженную трубу дрейфа (рисунок 2). Труба была выполнена из немагнитной нержавеющей стали, длина трубы составляла 0,7 м при её внутреннем диаметре 14 см.

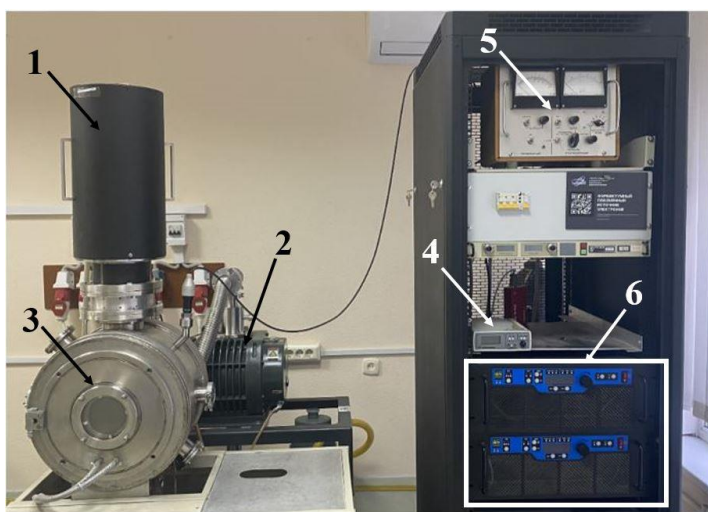


Рисунок 1 – Экспериментальная установка



Рисунок 2 – Модернизированная установка

Для измерения вклада ионной и атомарной составляющих в покрытие был разработан и собран прибор – конденсационный зонд с поперечным магнитным полем (рисунок 3). Принцип действия конденсационного зонда с магнитным полем заключается в следующем. Пары испаряемого электронным пучком материала твердотельной металлической или диэлектрической мишени попадают в область транспортировки и сепарации зонда. В этой области под действием поперечного магнитного поля электронная составляющая плазмы намагничивается. Плазма с намагниченными электронами, двигаясь вдоль

силовой линии магнитного поля, осаждается на стенки внутри зонда. Поток нейтральных частиц испаряемого материала мишени, не подверженный влиянию магнитного поля, достигает подложки, формируя на ее поверхности покрытие. Подложка предварительно взвешивается на высокоточных весах. По приращению массы ΔM подложки определяется количество осажденного на нее материала испаряемой мишени за счет нейтральной составляющей потока испаряемого материала.

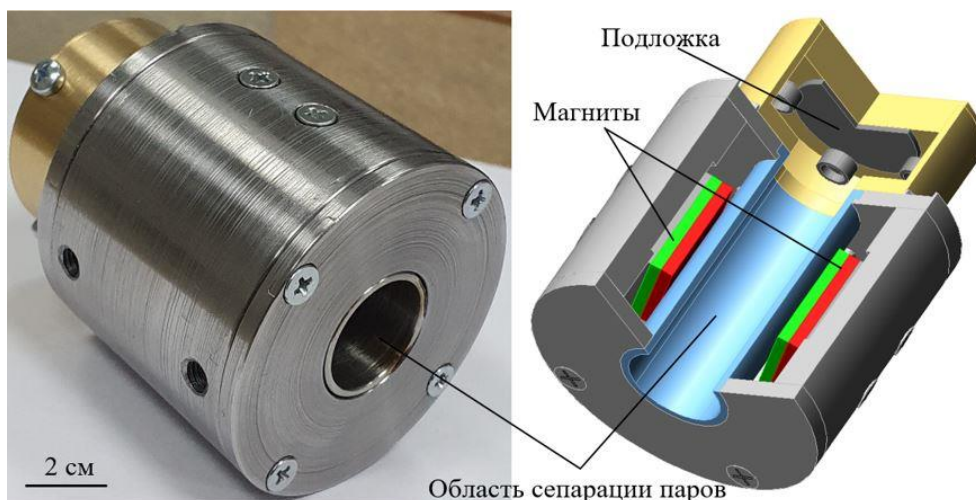


Рисунок 3 – Конденсационный зонд с поперечным магнитным полем

Для исследования масс-зарядового состава пучковой плазмы использовался модернизированный квадрупольный масс-спектрометр RGA 300 (Residual Gas Analyzer, Stanford Research Systems, Саннивейл, Калифорния, США).

Для подготовки образцов и исследования свойств покрытий, полученных электронно-лучевым методом в форвакуумной области давлений, использовалось современное аналитическое оборудование Томского материаловедческого центра коллективного доступа, Томского политехнического университета, Института физики и прочности материалов СО РАН, Института сильноточной электроники СО РАН, Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Третий раздел «Функционирование источника электронов при электронно-лучевом синтезе YSZ-покрытий» посвящен результатам исследований влияния процесса испарения твердотельной керамической мишени на функционирование форвакуумного источника электронов. Проведены измерения масс-зарядового состава пучковой плазмы при испарении керамической мишени на основе диоксида циркония. Сделаны оценки ионизации керамических паров мишени и показан вклад ионов в формируемые покрытия. Показано, что при интенсивном испарении керамической YSZ-мишени электронным пучком в форвакуумной области давлений пары керамической мишени осаждаются на электроды разрядной и ускорительной системы источника электронов, что неизбежно приводит к нарушению электрической прочности ускоряющего промежутка, и, как следствие, к нерабочему режиму самого источника электронов (рисунок 4).

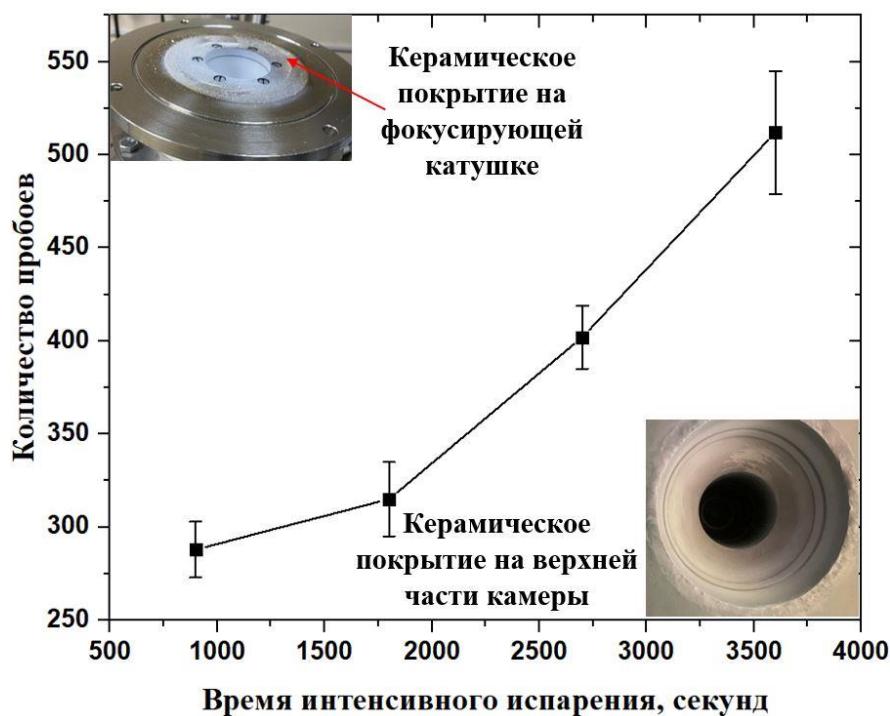


Рисунок 4 – Пробои в ускоряющем промежутке при интенсивном испарении YSZ-керамики

Увеличение расстояния между областью генерации электронов и областью испарения керамической мишени позволило устранить эту проблему и повысить стабильность работы источника. Но увеличение расстояния приводит к потерям энергии электронного пучка вследствие рассеяния электронов на молекулах газа, генерации пучковой плазмы, расфокусировки пучка. Для определения потерь мощности при увеличении расстояния были выполнены калориметрические измерения. Суть экспериментального исследования состояла в определении мощности пучка через скорость нагрева полого танталового тигля с отверстием, внутри которого размещалась термопара. В качестве изменяемых параметров использовались давление рабочего газа (рисунок 5,а), ток разряда (рисунок 5,б) и ускоряющее напряжение (рисунок 5,в)

На основе анализа калориметрических измерений был сделан вывод, что использование дополнительной трубы дрейфа приводит к умеренному спаду мощности пучка, но, несмотря на потери в дополнительной трубе дрейфа, значения мощности и тока пучка остаются достаточно высокими для нагрева, испарения YSZ-керамики и осаждения из нее покрытий.

Известно, что ионный состав пучковой плазмы в процессе электронно-лучевого испарения оказывает влияние на процесс формирования и параметры такого рода покрытий, поскольку подачей отрицательного либо знакопеременного смещения на подложку можно управлять свойствами получаемых покрытий. Именно поэтому критически важны достоверные измерения масс-зарядового состава ионов в пучковой плазме. Типичный спектр ионов пучковой плазмы при испарении керамической мишени на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, представлен в качестве примера на рисунке 6.

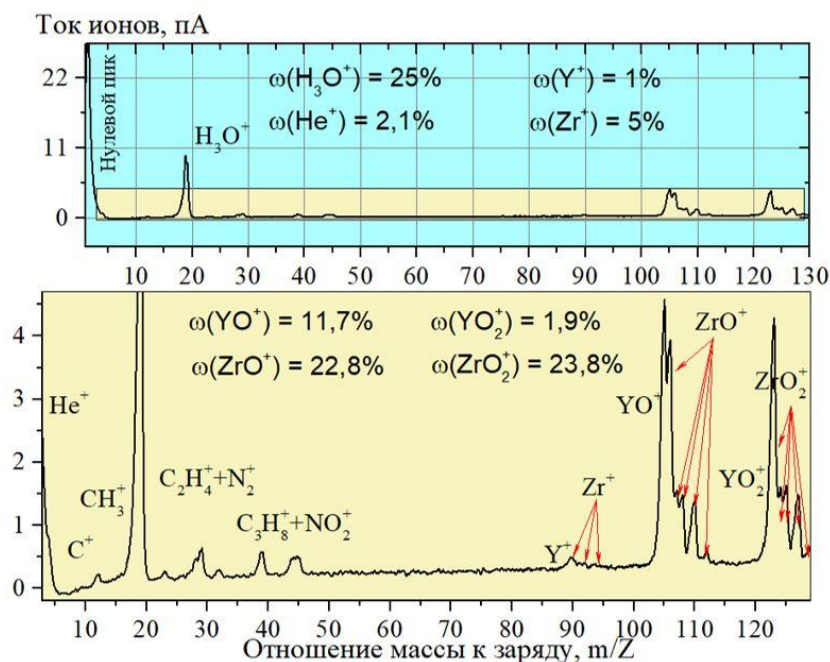
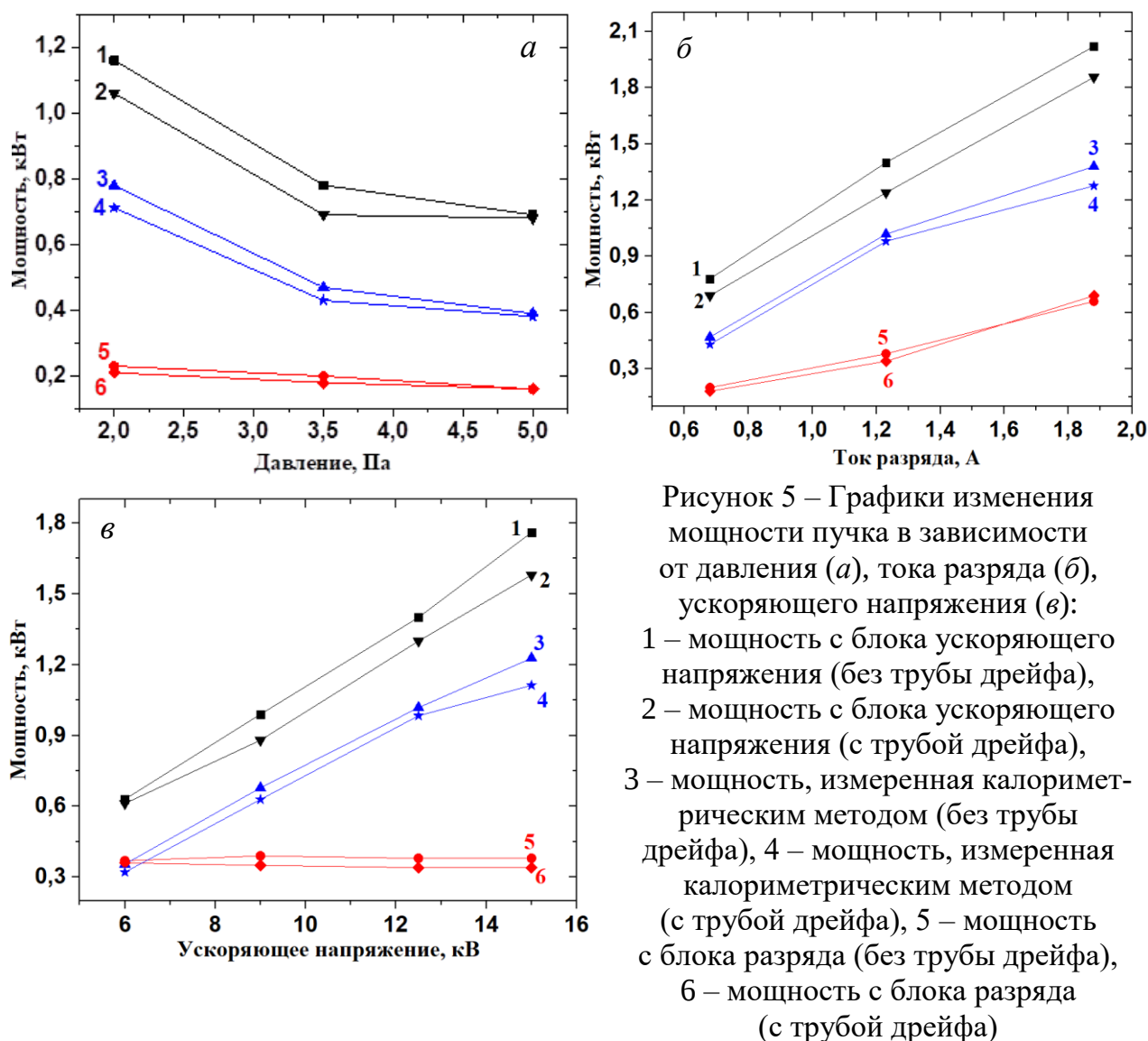


Рисунок 6 – Спектр ионов пучковой плазмы при интенсивном испарении керамической мишени в гелии

В полученном спектре регистрируются однозарядные ионы рабочего газа (гелий, He^+), паров воды (H_3O^+) и остаточной атмосферы из углерода C^+ , соединений углеводородов (CH_3^+ , C_2H_4^+ , C_3H_8^+) и азота (N_2^+ , NO_2^+). На начальной стадии испарения керамической мишени, сопровождающейся появлением небольшой ванны расплава на поверхности керамической мишени (при $U_a = 11$ кВ, $I_e = 50$ мА), в спектре (см. рисунок 6) начинают появляться пики, соответствующие ионам единственного изотопа иттрия $^{89}\text{Y}^+$ и ионам пяти стабильных изотопов циркония ($^{90}\text{Zr}^+$, $^{91}\text{Zr}^+$, $^{92}\text{Zr}^+$, $^{94}\text{Zr}^+$ и $^{96}\text{Zr}^+$, $m/Z=89-96$ а.е.м.), а также ионам оксидов ($m/Z=105-112$ а.е.м.) и диоксидов ($m/Z=121-128$ а.е.м.) этих элементов. При последующем увеличении мощности пучка электронов происходит интенсивное испарение материала мишени, сопровождающееся увеличением видимой площади ванны расплава, интенсивности свечения фрагмента керамики, а также ростом амплитуд ионов компонентов мишени. При этом доля ω ионов воды в плазме снижается с 71,6 до 25 % как за счет более эффективной десорбции и откачки паров воды, так и за счет появления и роста пиков материала мишени.

Как показали масс-спектрометрические исследования, при испарении твердотельной мишени электронным пучком осуществляется эффективная ионизация паров материала мишени. При этом в области испарения мишени в пучковой плазме доминируют именно ионы материала мишени. Параметры и свойства покрытий во многом определяются соотношением количества ионов и атомов материала, формирующего покрытие. Для оценки вклада ионов в покрытие использовался конденсационный зонд, схема и принцип работы которого были представлены выше.

На рисунке 7 представлен график изменения ионной и атомарной составляющей в зависимости от рабочего давления в вакуумной камере. Из полученных зависимостей был сделан вывод, что вклад ионной составляющей паров керамической мишени в покрытие выше, чем их концентрация в плазме. Это происходит из-за более высоких скоростей ионов в плазме по сравнению со скоростями атомарного компонента пароплазменной фазы. Положительный потенциал образованной плазмы направляет ионы к заземленной поверхности, тем самым увеличивая их скорость. Рост степени ионизации и, соответственно, вклада ионной составляющей в покрытие увеличивается с ростом давления из-за увеличения концентрации пучковой плазмы и, как следствие, увеличения числа столкновений электронов пучка с частицами материала мишени, что в свою очередь приводит к увеличению актов ионизации.

Определено, что при подаче отрицательного постоянного смещения на оба зонда вклад ионов в покрытие увеличился более чем в 2 раза (рисунок 8) и достиг 70 %, при этом зонды были изолированы от коллектора и электрически соединены друг с другом. Это позволило равномерно направить поток испаряемого материала на приемную часть зонда.

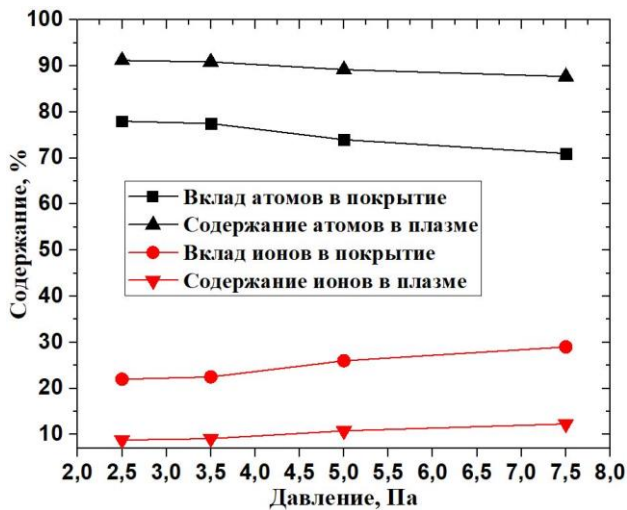


Рисунок 7 – Количество атомов и ионов в покрытии и степень ионизации при разном давлении газа в камере

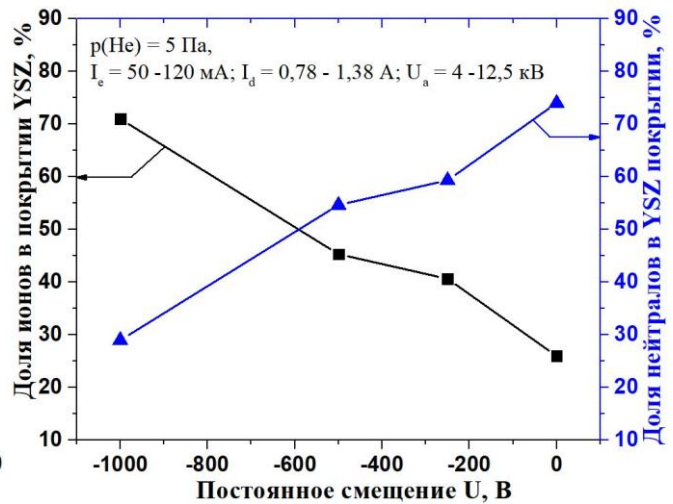


Рисунок 8 – Изменение доли ионов и нейтралов в покрытии при подаче отрицательного потенциала на зонды

Четвертый раздел «Характеристика теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония» посвящен исследованию свойств получаемых покрытий путем испарения керамической мишени электронным пучком в форвакуумной области давлений. Приведены результаты растровой электронной микроскопии, подтверждающие образование столбчатой структуры, которая схожа со структурой покрытий (рисунок 9), полученных в высоком вакууме на промышленных установках. Структура покрытия имеет столбчатый вид с явно выраженными границами между столбами (каналами), при этом рост кристаллитов направлен перпендикулярно поверхности подложки. Внутри кристаллов видна характерная для такого рода покрытий дендритная микроструктура со множеством микропор, главные дендритные ветви также направлены от подложки к поверхности. Типичные скорости формирования таких покрытий в форвакуумной области давлений варьируются от единиц до десятков мкм/мин, при этом оптимальной скоростью считается значение до 5–10 мкм/мин. Согласно рентгенофазовому анализу в получаемых покрытиях наблюдается именно тетрагональная фаза, которая способна выдерживать высокие тепловые нагрузки. Это подтверждает наличие рефлекса на угловом интервале $2\theta = 43,01^\circ$ на полученных рентгеновских дифрактограммах.

Теплофизические характеристики покрытий измерялись на установке для исследования теплофизических свойств материалов в температурном ходе DLF-1200. Результаты измерения теплопроводности представлены на рисунке 10. Полученные зависимости показали, что коэффициент теплопроводности покрытий практически не зависит от температуры, при которой осуществлялось осаждение покрытий и от температуры в камере при исследовании образцов на теплопроводность. Значение коэффициента теплопроводности покрытий варьируется от 1,3 до 1,6 Вт/(м·К).

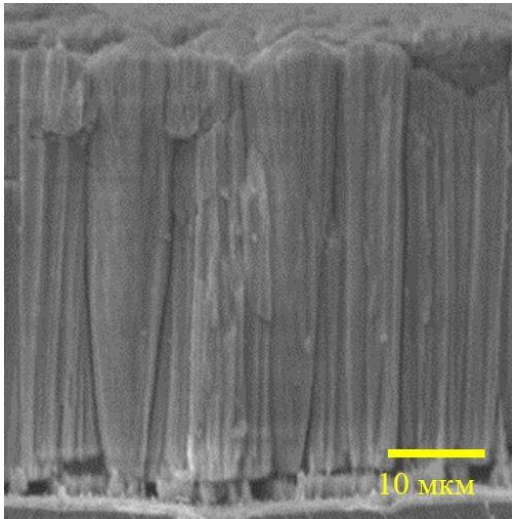


Рисунок 9 – Типичный скол получаемого покрытия

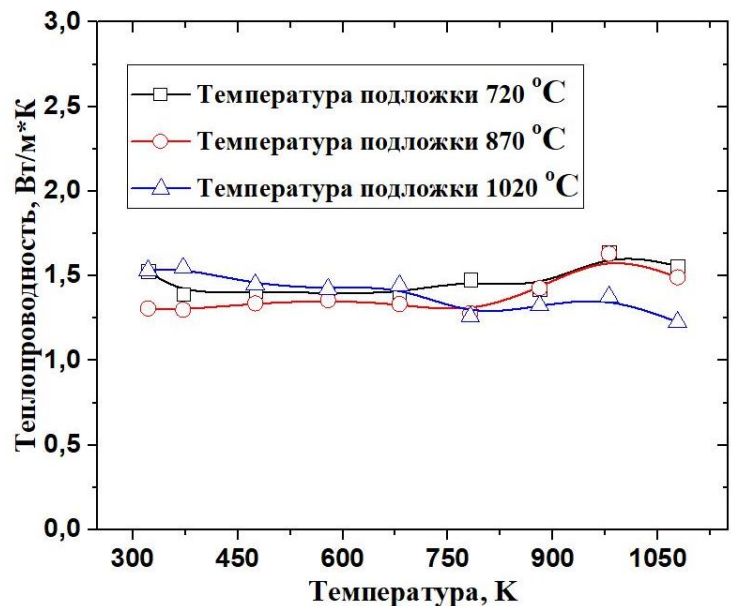


Рисунок 10 – Зависимость теплопроводности для различных температур подложки

Для подтверждения высоких функциональных свойств полученного керамического покрытия выполнялись испытания на термические нагрузки на сертифицированном оборудовании ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УУНиТ», в муфельной печи при температуре 1100 °C в течение 100 часов. В качестве образцов, подвергающихся термическим нагрузкам, использовался жаропрочный сплав со связующим жаростойким слоем ВСДП-11, поверх которого наносился керамический слой на основе $ZrO_2-Y_2O_3$.

В результате термических испытаний (рисунок 11,б) при температуре 1100 °C в течение 100 часов было показано, что покрытие на основе YSZ, сформированное при испарении форвакуумным плазменным источником электронов керамической мишени, выступало в качестве эффективной защиты основы жаропрочного сплава от окисления, а также от воздействия высокой температуры, что подтверждается отсутствием изменений самой основы: покрытие сохранило свою целостность, отслоения и трещины отсутствовали. Особо отметим, что образец без керамического слоя (рисунок 11,а) претерпевал термическую деформацию, что будет способствовать сокращению срока службы таких деталей в реальных условиях.

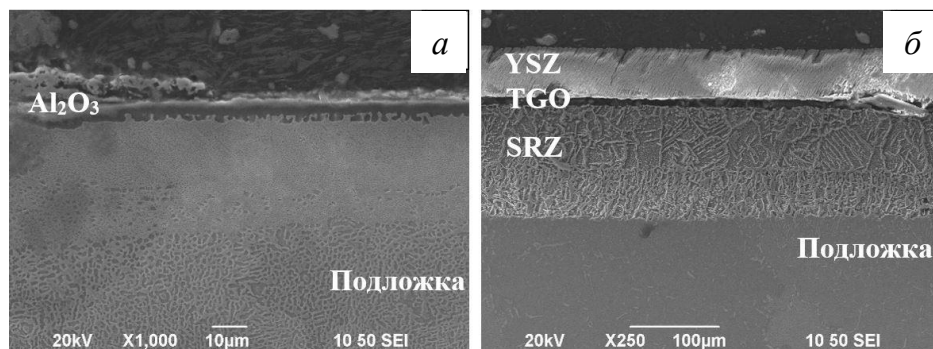


Рисунок 11 – Поперечный срез образца без покрытия (а) и образца с покрытием ВСДП-11+YSZ (б) после 100 часов испытаний при температуре 1100 °C

В пятом разделе «Применение теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония» представлены результаты по формированию керамического слоя теплозащитных покрытий на образцах, имитирующих реальные детали горячего тракта газотурбинных двигателей, а также исследованию равномерности и толщины полученных покрытий. На рисунке 12 представлен образец, имитирующий лопатку газотурбинного двигателя с осажденным на него керамическим покрытием на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия.

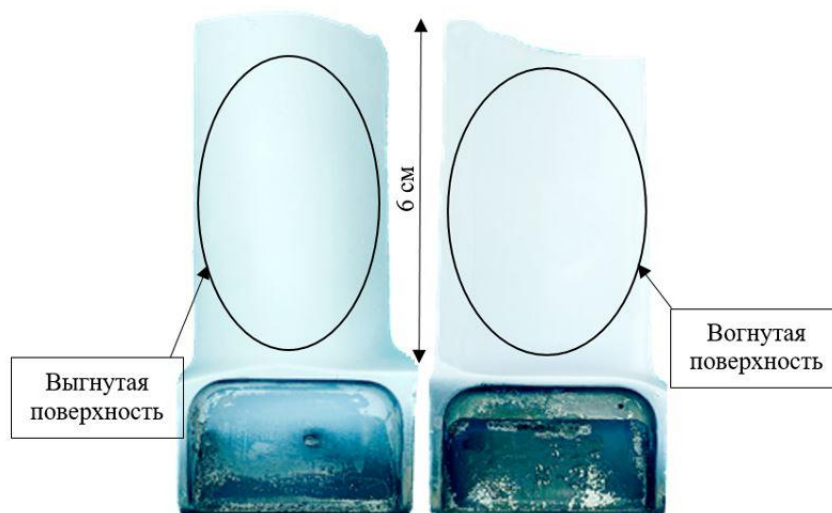


Рисунок 12 – Образец, имитирующий лопатку газотурбинного двигателя

Поскольку профиль лопатки имеет сложную геометрическую форму, необходимо обеспечить равномерность покрытия и равномерный прогрев всей поверхности лопатки. Одним из способов повышения равномерности покрытия является изменение расстояния между областью испарения керамической мишени (ванны расплава) и центром оси вращения образца. На рисунке 13 представлены двумерные распределения толщин покрытия по выпуклой (а) и вогнутой (б) поверхности лопатки при расстоянии 4 см от центра оси вращения до области испарения керамических паров.

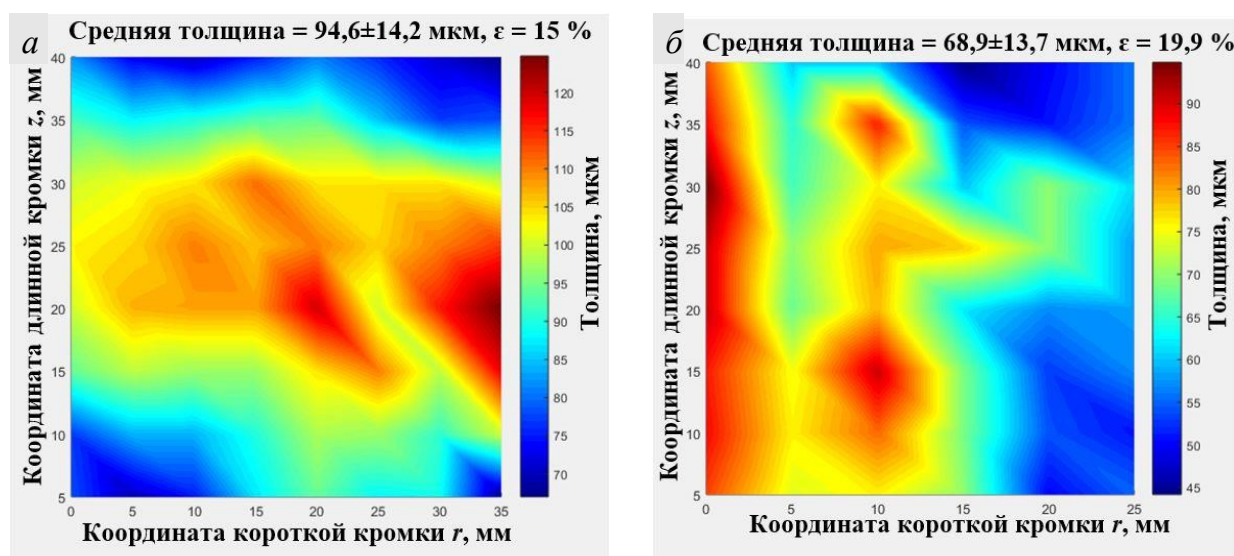


Рисунок 13 – Двумерное распределение толщины покрытия по выпуклой (а) и вогнутой (б) поверхности макета лопатки

В результате оценки распределения толщин был сделан вывод, что при большом расстоянии между макетом лопатки и испаряемой мишенью неоднородность превышает допустимые значения в 10 %. Так, для данного эксперимента при расстоянии 4 см неоднородность составила по выпуклой поверхности 15 %, а по вогнутой – почти 20 %.

На рисунке 14 показаны двумерное распределение толщин покрытия по выпуклой (а) и вогнутой (б) поверхности макета, расположенного на расстоянии 10 см от мишени.

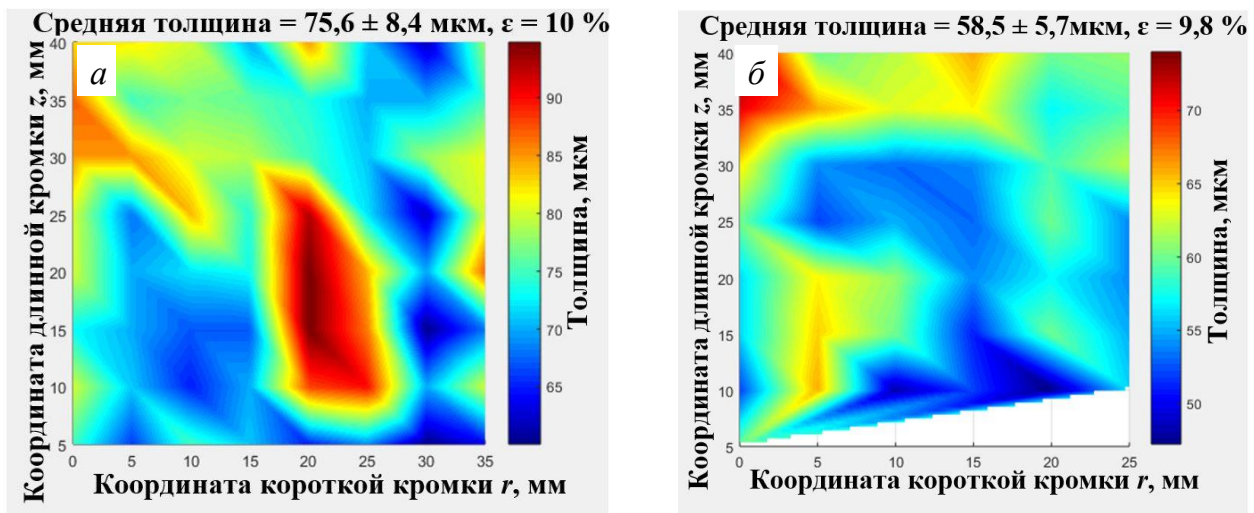


Рисунок 14 – Двумерное распределение толщины покрытия по выпуклой (а) и вогнутой (б) поверхности макета лопатки

Из распределений (рисунок 14) следует, что неоднородность покрытия на выпуклой стороне (10 %) при расстоянии 10 см оказалась меньше, чем при расстоянии 4 см до мишени, а неоднородность для вогнутой стороны уменьшилась до 9,8 %. Сделан вывод, что при увеличении расстояния между центром лопатки и мишенью неоднородность покрытия уменьшается.

Процесс формирования покрытия и пример скола с угла лопатки представлены на рисунке 15. Приведенная фотография подтверждает, что толщина покрытия превышает 100 мкм, при этом структура покрытия имеет столбчатую форму.

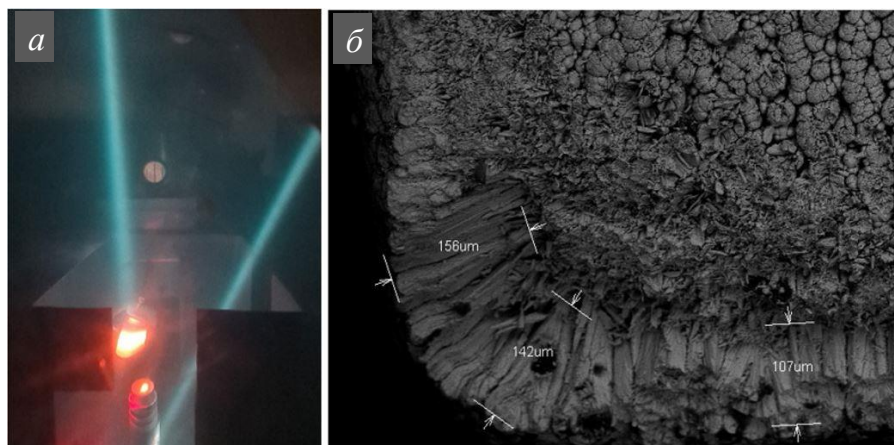


Рисунок 15 – Процесс формирования покрытия и нагрева лопатки (а), скол с угла лопатки (б)

В заключении изложены основные результаты работы, обоснована достоверность результатов исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы, обуславливающие достижение ее целей, заключаются в следующем:

1. Осуществлена модернизация экспериментальной установки, обеспечивающая стабильное функционирование электронно-лучевого оборудования в условиях интенсивного испарения электронным пучком твердотельной керамической мишени и использования химически активных газовых сред.

2. На основе созданного в процессе выполнения работы конденсационного зонда с поперечным магнитным полем определен вклад в процесс осаждения покрытий ионного и атомарного компонентов керамической мишени, испаряемой электронным пучком в форвакуумной области давлений. Показано, что доля ионной составляющей в образовании покрытия достигает 70 %.

3. Предложено и реализовано техническое решение, обеспечивающее кратное повышение потока ионов испаряемой электронным пучком в форвакуумной области давлений керамической мишени на вход квадрупольного масс-спектрометра, позволяющее выделить и определить в измеренном спектре практически все ионные компоненты испаряемого материала мишени.

4. Установлено, что при электронно-лучевом синтезе в форвакуумной области давлений теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, генерируемое пароплазменное образование состоит из ионов материала мишени, рабочего газа и ионов остаточной атмосферы. При использовании химически активных рабочих газов изменяется масс-зарядовый состав пучковой плазмы, что в свою очередь оказывает влияние на параметры, характеристики и свойства покрытий.

5. В результате исследования пространственного распределения паров испаряемой электронным пучком в форвакуумной области давлений керамической мишени, а также измерения скорости осаждения YSZ-покрытий определена степень влияния мощности электронного пучка, рабочего давления и расстояния от мишени до напыляемой подложки на скорость осаждения и равномерность толщины покрытия. При этом скорость осаждения покрытий толщиной 100–200 мкм варьируется от 0,5 до 15 мкм/мин, а неравномерность толщины покрытий, включая покрытия на образцах реальных промышленных изделий со сложным геометрическим сечением, не превышает 10 %.

6. Показано, что при электронно-лучевом испарении в форвакуумной области давлений керамической мишени на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, формируемые покрытия обладают необходимой столбчатой структурой и метастабильной тетрагональной фазой, что обеспечивает теплопроводность 1,3–1,6 Вт/(м·К), микротвердость до 9 ГПа, модуль упругости до 150 ГПа и термическую стойкость более 100 часов при температуре 1100 °С.

Совокупность изложенных в диссертационной работе результатов исследований, технических и технологических решений представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, обеспечивающую эффективное решение проблемы электронно-лучевого синтеза теплозащитных керамических покрытий, имеющей существенное значение для машиностроения и ряда других отраслей отечественного промышленного производства.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, соответствующих требованиям ВАК, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science с учетом категорирования:

1. Tyunkov A.V. Electron-beam synthesis of ceramic- and boron-based coatings / A.V. Tyunkov, A.A. Andronov, D.B. Zolotukhin, Yu.G. Yushkov // *Physica Scripta*. – 2023. – Vol. 98, N 6. – P. 065930. – DOI: 10.1088/1402-4896/acd08d.
2. Zolotukhin D.B. Ion composition of beam plasma formed by electron beam evaporation of YSZ ceramic in medium vacuum / D.B. Zolotukhin, A.A. Andronov, A.V. Tyunkov, Y.G. Yushkov // *Vacuum*. – 2025. – Vol. 234. – P. 114102. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114102>.
3. Determination of the degree of ionization of vapors of conducting and dielectric materials during electron-beam evaporation in the forevacuum range of pressure / A.V. Tyunkov, A.A. Andronov, E.M. Oks [et al.] // *Vacuum*. – 2023. – Vol. 208. – P. 111722. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111722>.
4. Effects of the substrate rotation speed on the structure and uniformity of YSZ coatings fabricated by electron-beam synthesis in the forevacuum pressure range / A.A. Andronov, A.A. Zenin, D.B. Zolotukhin [et al.] // *High Temperature Material Processes*. – 2025. – Vol. 29, N 1. – P. 89–98. – DOI: 10.1615/hightempmatproc.2024054462.
5. The effect of substrate roughness on the morphology and adhesive strength of YSZ coatings deposited with a forevacuum plasma-cathode electron source / A.A. Andronov, D.B. Zolotukhin, A.V. Tyunkov [et al.] // *High Temperature Material Processes*. – 2026. – Vol. 30, № 1. – P. 39-46. – DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2025058338.
6. Optimization of electron-beam deposition of YSZ coatings: the effect of the substrate rotation speed / A.A. Andronov, D.B. Zolotukhin, A. V. Tyunkov [et al.] // *High Temperature Material Processes*. – 2026. – DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2025059247.
7. Механизм ионизации пучковой плазмы, генерируемой электронным пучком в среднем вакууме / А.В. Тюньков, А.А. Андронов, Ю.Г. Юшков, Д.Б. Золотухин // *Письма в Журнал технической физики*. – 2023. – Т. 49, № 10. – С. 13–16. – DOI: 10.21883/PJTF.2023.10.55427.19539.

Прочие публикации в рецензируемых изданиях:

1. Электронно-лучевое осаждение покрытий из циркониевой керамики форвакуумным плазменным источником электронов / **А.А. Андронов**, Д.Б. Золотухин, А.Ю. Назаров [и др.]. // Прикладная физика. – 2023. – № 5. – С. 91–96. – DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-91-96.

2. Тюньков А.В., **Андронов А.А.**, Золотухин Д.Б. и др. Методы формирования теплозащитных покрытий лопаток турбин (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2024. – № 4 (77). – Ст. 10. DOI: 10.18577/2713-0193-2024-04-140-168.

Патенты:

1. Патент на полезную модель № 227238 U1 Российская Федерация. Конденсационный зонд с поперечным магнитным полем : № 2024106368 : заявл. 12.03.2024 : опубл. 11.07.2024 / **Андронов А.А.**, Юшков Г.Ю., Зенин А.А. [и др.].

2. Патент на полезную модель № 227582 U1 Российская Федерация. Конденсационный зонд с поперечным магнитным полем, экранированный тепловым экраном : № 2024117462 : заявл. 25.06.2024 : опубл. 25.07.2024 / **Андронов А.А.**, Юшков Г.Ю., Зенин А.А. [и др.].

3. Патент на полезную модель № 238619 U1 Российская Федерация. Устройство извлечения ионов испаряемой мишени из пучковой плазмы : № 2025117150 : заявл. 21.06.2025 : опубл. 05.11.2025 / А. В. Тюньков, **А. А. Андронов**, Д. Б. Золотухин, Ю. Г. Юшков.

4. Патент № 2851904 С1 Российская Федерация. Способ формирования теплозащитных покрытий на основе YSZ-керамики в форвакуумной области давлений : заявл. 25.01.2025 : опубл. 01.12.2025 / **Андронов А.А.**, Рамазанов К.Н., Назаров А.Ю. [и др.].

5. Патент № 2851919 С1 Российская Федерация. Система для формирования теплозащитных покрытий на основе YSZ-керамики в форвакуумной области давлений : заявл. 25.01.2025 : опубл. 01.12.2025 / **Андронов А.А.**, Рамазанов К.Н., Назаров А.Ю. [и др.].