

Минобрнауки России

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии
наук
(ИЯФ СО РАН)

«УТВЕРЖДАЮ» и. о. директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Института ядерной физики им.
Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук



Логанов Павел Владимирович

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г.
Новосибирск, 630090

телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63
<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su
ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136
ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

« 5 » июня 2026 г.

от 05 ИЮН 2026 № 15311 – 44/11-38/1467

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерной
физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук»
на диссертацию

Андропова Артема Андреевича

**«Электронно-лучевой синтез теплозащитных керамических покрытий на основе
диоксида циркония в форвакуумной области давлений»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 1.3.5 – «Физическая электроника»

Актуальность работы:

Развитие современных газотурбинных двигателей требует повышения рабочей температуры турбины. Для защиты деталей горячего тракта турбины от перегрева широко применяются теплозащитные керамические покрытия. Развитие технологий и создание оборудования для нанесения таких покрытий является актуальной научно-технической задачей. В диссертации Андропова Артема Андреевича рассматривается покрытие на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия ($ZrO_2 + Y_2O_3$ или YSZ). В качестве метода нанесения покрытия выбрано электронно-лучевое испарение твердотельной керамической мишени, так как данный метод обеспечивает высокие

скорости формирования покрытий и позволяет получать покрытия с низким коэффициентом теплопроводности.

Испарение диэлектрических керамик с применением источников электронных пучков с термокатодом в рабочей области давлений $10^{-3} - 10^{-2}$ Па затруднено процессами зарядки мишени и требует повышения мощности электронного пучка до ~ 100 кВт. Использование же плазменных источников электронов позволяет генерировать электронный пучок в области давлений форвакуумного диапазона, а наличие пучковой плазмы в области транспортировки пучка дает возможность избежать зарядки диэлектрической мишени. В рамках данной диссертации было проведено комплексное исследование особенностей формирования покрытий на основе электронно-лучевого испарения в форвакуумной области давлений (1 – 10 Па), а также оценена возможность практического применения данного метода для формирования теплозащитных покрытий на промышленных изделиях. Представлено конструктивное решение, позволяющее исследовать состав пучковой плазмы при испарении керамической мишени в процессе синтеза теплозащитных покрытий. Экспериментально доказано, что в получаемых покрытиях содержатся все элементы испаряемой мишени, при этом вклад ионов материала мишени в формирование покрытия может достигать 70%. Продемонстрировано, что получаемые теплозащитные покрытия в форвакуумном диапазоне давлений имеют более низкий коэффициент теплопроводности (относительно покрытий, полученных в высоком вакууме) и способны выдерживать высокие тепловые и термоциклические нагрузки. В ходе работы был разработан макет промышленной установки, которая может быть использована на предприятии, что показывает успешное решение актуальной задачи по развитию методов нанесения теплозащитных покрытий на теплонагруженные детали машин.

Научная новизна диссертационной работы:

Научная новизна работы состоит в реализации конструктивно-технологического решения, повышающего стабильность работы форвакуумного плазменного источника электронов при интенсивном испарении керамической мишени и использовании активных газов. Решение было реализовано на основе проведенных автором исследований условий электронно-лучевого синтеза теплозащитных покрытий на основе $ZrO_2 + Y_2O_3$ с тетрагональной фазой и столбчатой структурой. В ходе выполнения исследовательской работы был предложен и реализован метод измерения степени ионизации паров испаряемого материала, позволяющий определить вклад ионной и атомарной составляющих в покрытие.

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов:

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов, сформулированных в диссертационной работе Андропова А.А., подтверждается систематическим характером исследований, внутренней непротиворечивостью полученных результатов, их практической реализацией при разработке, модернизации и применении экспериментального и диагностического оборудования, а также формированием теплозащитных покрытий, способных выдерживать высокие термические нагрузки, что показали независимые испытания. Результаты диссертации прошли апробацию в открытых печатных рецензируемых изданиях и докладах на международных и всероссийских конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, а также в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России. Получено 3 патента РФ на полезную модель, 2 патента на изобретение и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, в соавторстве издана 1 монография.

Научная и практическая значимость полученных результатов:

Практическая значимость диссертации обусловлена созданием научно-обоснованной технологической основы для электронно-лучевого синтеза теплозащитных покрытий, которая может быть непосредственно использована в промышленности. На основании проведенных исследований:

1. Определены оптимальные параметры процесса нанесения, обеспечивающие формирование покрытий на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, субмиллиметровой толщины со столбчатой структурой и тетрагональной фазой, необходимой для термоциклической стойкости.
2. Выполнена модернизация форвакуумного плазменного источника электронов, позволяющая повысить стабильность его функционирования при длительном и интенсивном испарении керамической мишени на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, в том числе в среде активных газов.
3. Предложен метод, позволяющий разделить ионные и атомарные составляющие керамических паров в процессе формирования покрытия и определять вклад таких компонентов в покрытие.

Связь диссертационной работы с научными программами и темами:

Результаты получены при выполнении следующих научных проектов:

1. Грант РФФИ № 25-19-00029 «Электронно-лучевой синтез высокотемпературных теплозащитных керамических покрытий на основе цирконата гадолиния: особенности физических процессов и актуальные применения» (2025-2027 гг.).
2. Грант РФФИ № 24-79-10026 «Электронно-лучевой синтез в пучковой плазме теплозащитных керамических покрытий с использованием форвакуумных плазменных источников электронов» (2024–2026 гг.).
3. Грант РФФИ № 21-79-10035 «Электронно-лучевой синтез многослойных покрытий на основе керамики и металла форвакуумным плазменным источником электронов» (2021–2024 гг.).
4. Грант РФФИ № 24-29-00392 «Электронно-лучевой синтез кремний-углеродных покрытий с использованием форвакуумного плазменного источника электронов» (2024–2025 гг.).
5. Программа Приоритет 2030 ТУСУР: «Пилотная технологическая установка электронно-лучевого синтеза керамических и борсодержащих покрытий для упрочнения деталей машин и инструмента» (2023–2026 гг.).
6. Проекты госзадания Минобрнауки РФ: FEWM-2021-0013 «Физические основы электронно-лучевой и ионно-плазменной модификации диэлектрических материалов, а также синтеза диэлектрических покрытий в форвакуумной области давлений» (2021–2023 гг.), FEWM-2024-0006 «Физические аспекты электронно-лучевого синтеза и ионно-плазменной модификации диэлектрических покрытий и материалов в форвакуумной области давлений» (2024–2026 гг.).

Содержание диссертации и ее завершенность:

Диссертация изложена на 150 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, содержит 101 рисунок, 6 таблиц и список литературы из 134 наименований, а также приложения.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая значимость, представлены методология, положения, выносимые на защиту, личный вклад Андропова А.А. и обоснована достоверность результатов.

В первой главе выполнен обзор литературы по методам формирования теплозащитных покрытий на основе YSZ, проведен достаточно подробный анализ существующих технологий, показаны их преимущества и недостатки, обоснована перспективность использования форвакуумных плазменных источников электронов, а также сформулированы задачи исследования.

Во второй главе описано экспериментальное и диагностическое оборудование, используемое в процессе электронно-лучевого синтеза теплозащитных покрытий в форвакуумной области давлений. Представлены две установки, оборудованные одним и двумя форвакуумными плазменными источниками электронов и схема источника электронов с напуском газа в полый катод. Продемонстрировано диагностическое оборудование, позволяющее исследовать масс-зарядовый состав ионов пучковой плазмы и определить вклад ионной и атомарной компонент керамических паров в покрытие.

В третьей главе описаны результаты исследований влияния интенсивного испарения YSZ-мишени и химически активных газов на стабильность работы источника электронов. Показано, что при испарении керамики в пучковой плазме присутствуют ионы, относящиеся к основным элементам материала мишени. Установлено, что при использовании химически активного кислорода в области испарения ионы материала мишени окисляются, что приводит к изменению спектра ионов пучковой плазмы. В результате измерения вклада ионной и атомарной составляющих керамических паров в формирование покрытия обнаружено, что при подаче отрицательного смещения на оба зонда вклад ионов может достигать 70%.

В четвертой главе представлены результаты электронно-лучевого синтеза керамических покрытий. Показаны основные характеристики синтезированных покрытий: исследовано влияние параметров процесса нанесения, а также приведены результаты термических испытаний.

В пятой главе продемонстрирована возможность практического применения разработанной технологии для нанесения теплозащитных покрытий на макеты лопаток газотурбинных двигателей со сложной геометрической формой. Представленные образцы покрытий были получены при использовании двух источников электронов, установленных на пилотной технологической установке.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы, подтверждающие достижение поставленной цели.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации:

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке и совершенствовании технологий формирования теплозащитных покрытий на деталях газотурбинных двигателей, энергетических установок и высокотемпературного оборудования. Полученные данные о процессах электронно-лучевого испарения керамических материалов в форвакуумном диапазоне давлений, а также результаты исследования масс-зарядового состава плазмы представляют практический интерес для

оптимизации режимов осаждения покрытий и повышения эффективности процессов ионно-плазменной и электронно-лучевой обработки материалов. Полученные результаты могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и на промышленных предприятиях, занимающихся разработкой функциональных покрытий и электронно-лучевых технологий обработки материалов. Результаты работы также представляют интерес для образовательного процесса при подготовке специалистов в области материаловедения, плазменных и вакуумных технологий. Полученные экспериментальные данные могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на повышение эксплуатационных характеристик теплозащитных покрытий и расширение областей применения форвакуумных источников электронных пучков.

Замечания и пожелания:

1. В первом разделе диссертации приведен хорошо проработанный обзор различных методов нанесения теплозащитных покрытий, отмечены их преимущества и недостатки. Были рассмотрены подходы с применением лазерных источников, которые, на первый взгляд, являются серьезными конкурентами электронно-лучевого синтеза при нанесении диэлектрических материалов (к которым относится керамика, обсуждаемая в работе). В качестве недостатка применения лазерного источника отмечена невозможность получения покрытия с нужной фазой и структурой, однако причины этого не обсуждаются.

2. В диссертационной работе подробно исследованы особенности распределения керамических паров и изменения масс-зарядового состава пучковой плазмы при использовании различных рабочих газов. Однако в работе отсутствуют какие-либо данные по влиянию добавок аргона и кислорода на структурные и эксплуатационные характеристики формируемых покрытий.

3. В работе представлены результаты формирования керамических покрытий на подложках из нержавеющей стали, это позволяет исследовать особенности процессов электронно-лучевого осаждения и определять структуру получаемого слоя. Однако в условиях практического применения теплозащитные покрытия формируются на многокомпонентных жаростойких связующих слоях, нанесенных на жаропрочные никелевые сплавы. В тексте диссертации отсутствует информация о параметрах покрытий и их свойствах на таких материалах.

4. Во втором разделе диссертационной работы представлен способ исследования масс-зарядового состава ионов пучковой плазмы с использованием модернизированного квадрупольного масс-анализатора остаточной атмосферы RGA-300. Вместе с тем при проведении измерений в форвакуумном диапазоне давлений наличие

повышенного давления в области дрейфа ионов может приводить к дополнительным столкновениям частиц и, как следствие, к частичной диссоциации молекулярных соединений, что будет влиять на точность измерения.

5. При обсуждении влияния потенциала подложки на свойства покрытий (раздел 4.3) отмечено, что покрытия, нанесенные в случае наибольшего отрицательного смещения, обладают наибольшей плотностью. Тем не менее, наиболее плотные покрытия подвергаются наибольшему износу. Это наблюдение выглядит неочевидным, и в тексте не хватает обсуждения возможных причин.

Отмеченные недостатки не затрагивают сущность научных положений, а также не снижают ценности работы, носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Андропова А.А.

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат в полном объеме отражает суть выполненного исследования и основные защищаемые положения. Существенных замечаний по содержанию и оформлению автореферата нет.

Заключение семинара плазменных лабораторий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по материалам диссертации Андропова Артема Андреевича на соискание ученой степени кандидата наук:

Диссертация Андропова Артема Андреевича «Электронно-лучевой синтез теплозащитных керамических покрытий на основе диоксида циркония в форвакуумной области давлений» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника» является научно-квалификационной работой, в которой были получены важные результаты для развития методов электронно-лучевого синтеза теплозащитных керамических покрытий. Полученные в работе Андропова А.А. результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью. Проведен комплекс экспериментальных исследований процессов формирования пучковой плазмы, испарения керамических материалов и осаждения покрытий, а также показана возможность практического применения разработанных технологий: был проделан путь от лабораторной установки до прототипа промышленного устройства для нанесения керамического покрытия на лопатки газотурбинных двигателей. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее суть.

Диссертация отличается логичностью построения, достаточной степенью обоснованности научных положений и достоверностью полученных результатов, подтвержденных современными методами диагностики и апробацией результатов в

научных публикациях и докладах. Высказанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертации. Диссертационная работа «Электронно-лучевой синтез теплозащитных керамических покрытий на основе диоксида циркония в форвакуумной области давлений» соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Андронов Артем Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Отзыв составлен с учетом мнений и замечаний, высказанных на семинаре плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН, состоявшемся 5 мая 2026 г. Отзыв утвержден на заседании Ученого совета ИЯФ СО РАН, протокол № 21, 1 июня 2026 г.

Отзыв составил:

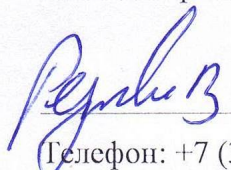
Научный сотрудник лаборатории 10 ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н. Черепанов Дмитрий Евгеньевич, специальность 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики»,
Проспект академика Лаврентьева, д. 11, г. Новосибирск, 630090
Электронная почта: D.E.Cherepanov@inp.nsk.su

подпись  Черепанов Дмитрий Евгеньевич
5 июня 2026 г.

Подпись Черепанова Дмитрия Евгеньевича заверяю:

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН

кандидат физико-математических наук

 Резниченко Алексей Викторович
Телефон: +7 (383) 329-47-99

Электронная почта: A.V.Reznichenko@inp.nsk.su

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук»

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, д. 11

Телефон: +7 (383) 329-47-60

Электронная почта: inp@inp.nsk.su