

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по ИРиР ТУСУР

и профессор

С.П. Кузнецко

«02» 02



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по результатам представления диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертация «Электронно-лучевой синтез теплозащитных керамических покрытий на основе диоксида циркония в форвакуумной области давлений» выполнена в лаборатории пучково-плазменной модификации диэлектриков на кафедре физики ТУСУР.

В период подготовки диссертации аспирант Андронов Артем Андреевич очно обучался в аспирантуре ТУСУРа. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов №Ас/1 от 23.01.2026 выдано Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель: Юшков Юрий Георгиевич, доктор технических наук, доцент, основное место работы: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», профессор кафедры физики, заведующий лаборатории пучково-плазменной модификации диэлектриков кафедры физики.

В итоге обсуждения доклада по результатам научного исследования Андропова А.А. на семинаре кафедры физики принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация Андропова Артема Андреевича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение процессов формирования теплозащитных керамических покрытий на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, при испарении керамической мишени электронным пучком в форвакуумной области давлений. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационных исследований, имеют важное значение для расширения представлений о применении форвакуумных плазменных источников электронов в области решения комплексных технических задач. Представленные в работе научные и научно-технологические решения позволяют эффективно реализовать процесс электронно-лучевого синтеза теплозащитных керамических покрытий, имеющих существенное значение для машиностроения и ряда других отраслей отечественного промышленного производства.

Актуальность диссертационной работы.

Современные тенденции развития энергетического машиностроения и авиационной техники характеризуются устойчивым повышением рабочих

температур узлов и агрегатов, функционирующих в условиях интенсивных тепловых нагрузок. В этих условиях обеспечение термостойкости и долговечности ответственных элементов конструкций становится одной из ключевых научно-технических задач. Существенную роль в её решении играют теплозащитные керамические покрытия, предназначенные для снижения теплового потока к материалу основы, уменьшения температурных градиентов и повышения эксплуатационного ресурса деталей. Перспективным методом формирования таких покрытий является применение форвакуумных плазменных электронных источников, способных формировать стабильные электронные пучки в области повышенных давлений порядка 1–10 Па. Наличие пучковой плазмы в зоне взаимодействия пучка с поверхностью мишени обеспечивает эффективную компенсацию поверхностного заряда на диэлектрических мишенях, что позволяет осуществлять прямое электронно-лучевое воздействие без существенного усложнения энергетических режимов процесса. Результаты ранее выполненных исследований подтвердили возможность испарения керамических материалов в таких условиях и продемонстрировали технологическую перспективность данного подхода. В связи с этим проведение комплексных исследований, направленных на разработку режимов электронно-лучевого испарения твердотельных керамических мишеней на основе $ZrO_2+Y_2O_3$ в форвакуумной области давлений, а также на изучение структуры и свойств формируемых теплозащитных покрытий, является актуальной научно-технической задачей. Полученные результаты могут способствовать совершенствованию технологий нанесения теплозащитных покрытий и расширению области их промышленного применения.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

1. Предложено и реализовано конструкторско-техническое решение в виде трубы дрейфа, 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, разделяющий ионный и атомарный компоненты испаряемого материала.

Практическая и научная ценность работы:

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

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

Личное участие автора в получении результатов.

Личный вклад автора состоит в участии создания 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.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечивается комплексным характером исследований, согласованием результатов с данными из других литературных источников, а также верификацией параметров полученных теплозащитных покрытий на образцах реальных изделий. Устойчивость полученных покрытий к воздействию высоких температур подтверждена актами о прохождении термических и термоциклических испытаний.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности.

Диссертационная работа Андропова Артема Андреевича по своему содержанию соответствует п. 1 паспорта специальности 1.3.5 – «Физическая электроника» по техническим наукам в части 1.4 «Плазменная электроника, включая: СВЧ-генераторы и усилители, плазменные (коллективные) ускорители, плазменно-пучковые разряды, плазменные источники электронов и источники ионов» и п. 3 паспорта специальности в части «Создание основ плазменных и пучковых технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур».

Ценность научных работ соискателя определяется получением новых научных результатов в области электронно-лучевого испарения твердотельных керамических мишеней на основе $ZrO_2+Y_2O_3$ в форвакуумной области давлений. Установлены закономерности влияния параметров электронного пучка на структуру и эксплуатационные свойства теплозащитных покрытий. Разработанные технологические режимы обладают практической значимостью для формирования покрытий на элементах высокотемпературных энергетических установок. Результаты, представленные в диссертационной работе, получены в том числе при выполнении следующих научных проектов: РНФ № 25-19-00029 «Электронно-лучевой синтез высокотемпературных теплозащитных керамических покрытий на основе цирконата гадолиния: особенности физических процессов и актуальные применения» (2025-2027 гг.), РНФ № 24-79-10026 «Электронно-лучевой синтез в пучковой плазме теплозащитных керамических покрытий с использованием форвакуумных плазменных источников электронов» (2024-2026 гг.). В проектах 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.). И программы Приоритет 2030

ТУСУР: «Пилотная технологическая установка электронно-лучевого синтеза керамических и борсодержащих покрытий для упрочнения деталей машин и инструмента» (2023-2024 гг.). Работы автора по теме диссертации были поддержаны стипендией Президента РФ для аспирантов, обучающихся в российских вузах и проводящих исследования в рамках приоритетов научно-технологического развития России (2025-2026 гг.), а также стипендией имени К. А. Валиева, предназначенной для аспирантов организаций высшего образования, обучающихся по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлениям, связанным с электронной промышленностью.

Полнота изложения материалов диссертации в печатных работах, опубликованных автором.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 8 статьях рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ и международные реферативные базы данных цитирования Web of Science и Scopus, предназначенных для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Результаты исследований по диссертационной работе представлены в виде 19 полнотекстовых докладов в сборниках международных и всероссийских конференций. По результатам работы получено 3 патента РФ на полезную модель, 2 патента на изобретение и 2 программы ЭВМ, 1 монография (в соавторстве).

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ и международные реферативные базы данных цитирования Web of Science и Scopus:

1. Tyunkov A.V., Andronov A.A., Zolotukhin D.B., Yushkov Yu.G. Electron-beam synthesis of ceramic- and boron-based coatings. *Physica Scripta*. Vol. 98. № 6. P. 065930. 2023. 10.1088/1402-4896/acd08d.

2. Zolotukhin D.B., Andronov A.A., Tyunkov A.V., Yushkov Y.G. Ion composition of beam plasma formed by electron beam evaporation of YSZ ceramic in medium vacuum. *Vacuum*. Vol. 234. P. 114102. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114102>.

3. Tyunkov A.V., Andronov A.A., Oks E.M., Yushkov Y.G., Zolotukhin D. B. Determination of the degree of ionization of vapors of conducting and dielectric materials during electron-beam evaporation in the forevacuum range of pressure. *Vacuum*. Vol. 208. P. 111722. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111722>.

4. Andronov A.A, Zenin A.A, Zolotukhin D.B [et al.]. Effects of the substrate rotation speed on the structure and uniformity of YSZ coatings fabricated by electron-beam synthesis in the forevacuum pressure range. *High Temperature Material Processes*. Vol. 29. № 1. P. 89-98. 2025. 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. *High Temperature Material Processes*. 2026. 10.1615/HighTempMatProc.2025058338.

6. Optimization of electron-beam deposition of YSZ coatings: the effect of the substrate rotation speed. *High Temperature Material Processes*. 2026. 10.1615/HighTempMatProc.2025059247.

7. Тюньков А. В., Андронов А. А., Юшков Ю. Г., Золотухин Д. Б. Механизм ионизации пучковой плазмы, генерируемой электронным пучком в среднем вакууме. *Письма в Журнал технической физики*. Т. 49. № 10. С. 13-16. 2023. 10.21883/PJTF.2023.10.55427.19539.

Диссертация «Электронно-лучевой синтез теплозащитных керамических покрытий на основе диоксида циркония в форвакуумной области давлений» Андропова Артема Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Заключение принято на семинаре научного семинара кафедры физики.

Присутствовало на заседании 19 чел., в том числе докторов наук – 5, кандидатов наук – 6. Результаты голосования: «за» – 19 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 53 от «30» января 2026 г.

Председатель семинара



Окс Ефим Михайлович,
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой физики

Секретарь семинара



Климов Александр Сергеевич,
д.т.н., профессор кафедры физики