



НИИЭФА  
РОСАТОМ

ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»  
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«Научно-исследовательский институт  
электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова»  
(АО «НИИЭФА»)

---

"УТВЕРЖАЮ"

Генеральный директор  
АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»  
Е.А. Сакадынец

М.П.

« 21 » марта 2021 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации

Акционерного Общества «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

на диссертацию Юшкова Юрия Георгиевича

«Электронно-лучевое нанесение многофункциональных диэлектрических покрытий форвакуумными плазменными источниками», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника

**Актуальность темы диссертации**

Диссертация Юшкова Ю.Г. посвящена проблеме создания функциональных диэлектрических покрытий на поверхности металлов и сплавов методом электронно-лучевого испарения керамики и других материалов с низкой электропроводностью и высокой температурой плавления. Керамические материалы, как правило, обладают высокими твердостью, электрическим сопротивлением, коррозионной и температурной стойкостью, однако, они хрупкие и легко разрушаются при импульсном механическом воздействии (ударе). Металлы и сплавы, напротив, имеют меньшую твердость, хорошую электропроводность, меньшую температуру плавления, больше подвержены коррозии, но более пластичны по сравнению с керамическими материалами. Развитие идеи получения функциональных керамических покрытий на металлах и сплавах для обеспечения возможности получения перспективных конструкционных материалов с уникальными

свойствами обосновывает актуальность данной диссертации.

Электронно-лучевой метод нанесения покрытий на различные детали и устройства широко применяется для практических задач модификации их поверхности. Как правило, в этом методе, в качестве испаряемой электронным пучком мишени используются различные материалы с относительно высокой электропроводностью. В случае мишени с высоким удельным сопротивлением (керамика) электронно-лучевой метод её нагрева работает значительно хуже. Это связано с зарядкой поверхности керамической мишени самим пучком, его отклонением этим поверхностным зарядом и невозможностью обеспечения фокусировки электронного пучка в малой поверхностной области мишени для достижения в ней высоких температур, которые необходимы для интенсивного испарения материала мишени и обеспечения высокой скорости нанесения керамических покрытий. Возможно применение различных приемов для нейтрализации поверхностного отрицательного заряда на поверхности непроводящей мишени, таких, например, как "ионный душ", но они технически сложны и требуют точного согласования параметров электронной пушки и нейтрализующего заряд устройства во время работы.

Оригинальность и новизна подхода диссертационной работы Юшкова Ю.Г. заключается в разработке технологии высокопроизводительного осаждения многофункциональных диэлектрических покрытий при использовании разработанной им мощной электронной пушки, способной функционировать в диапазоне давлений 1-100 Па.

При транспортировке такого пучка в атмосфере газа при указанном давлении за счет ионизации нейтралов электронами пучка образуется плотная плазма, концентрация которой пропорциональна току пучка и его энергии. Генерация такой плазмы обеспечивает интенсивный поток положительных ионов на поверхность мишени, что автоматически обеспечивает практически полную компенсацию отрицательного заряда, вносимого на мишень электронным пучком. Это, в свою очередь, позволяет обеспечить фокусировку пучка на мишень, нагрев её поверхности до высоких температур, достаточных для плавления и испарения любого типа диэлектрика, включая различные типы керамики или кристаллический бор, и создавать на их основе функциональные диэлектрические покрытия.

Использование полученных результатов исследований, выполненных как с участием автора, так и под его руководством, в создании и применении технологий и приборов подтверждает актуальность темы диссертации.

Созданные в рамках диссертационных исследований спектрометры используются в Институте сильноточной электроники СО РАН, результаты по формированию и транспортировке электронных пучков - в научно-производственной компании «Томские

электронные технологии», результаты по формированию электроизоляционных покрытий - в научно-производственном предприятии «Фотон», полученные борсодержащие покрытия применяются в электрореактивных двигателях MicroCAT, разрабатываемых в Университете Джорджа Вашингтона, США. Исследования автора диссертации по её тематике отмечены премией Правительства РФ в области науки и техники для молодых ученых 2019 г. По результатам работы опубликовано 34 статьи в ведущих научных журналах, из которых 18 в журналах первого и второго квартилей.

### **Научная новизна диссертации**

Научная новизна диссертации заключается в том, что впервые разработан метод нанесения многофункциональных диэлектрических покрытий на различные поверхности электронно-лучевым методом в форвакуумном диапазоне давлений. При проведении исследований были определены основные физические механизмы, обуславливающие процессы генерации пучковой плазмы форвакуумными плазменными источниками электронных пучков, а также нейтрализацию отрицательного заряда, вносимого ускоренными электронами на поверхность испаряемой диэлектрической мишени, что обеспечило возможность её эффективного электронно-лучевого испарения или нагрева поверхности при осуществлении электронно-лучевого азотирования. Для источников электронов с плазменным катодом, функционирующих в форвакуумном диапазоне давлений, выявлены особенности процессов электронно-лучевого осаждения диэлектрических покрытий, а также электронно-лучевого азотирования. В результате выполнения диссертационной работы определены и реализованы условия, обеспечивающие высокопроизводительное нанесение оксидных, боридных и нитридных покрытий с наилучшими функциональными характеристиками для их практического применения в технологиях модификации поверхности различных материалов, подверженных интенсивным механическим, тепловым и коррозионным воздействиям.

### **Практическая значимость диссертации**

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что в результате её выполнения решена крупная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке научных основ технологии высокопроизводительного электронно-лучевого осаждения многофункциональных керамических покрытий с использованием форвакуумных плазменных источников электронов. Осуществлена демонстрация применения такого подхода на примере создания покрытий на основе соединений оксидов, боридов и нитридов, имеющих высокие эксплуатационные параметры,

характеристики и свойства. Изучены свойства таких покрытий и даны рекомендации их использования для задач практики. Результаты проведенных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов генерации в форвакуумной области давлений пучковой плазмы, формирования в этой области давлений потоков заряженных частиц и нейтралов при осуществлении электронно-лучевого осаждения диэлектрических покрытий, а также при электронно-лучевом азотировании поверхности материалов. Существенно расширены возможности нанесения покрытий методом электронно-лучевого испарения за счет включения в номенклатуру испаряемых мишеней диэлектрических материалов, в том числе и высокотемпературных керамик. Полученные результаты нашли ряд применений и могут быть использованы для решения широкого круга задач науки и практики при нанесении функциональных покрытий на поверхность материалов с целью улучшения их физико-химических свойств.

### **Обоснованность и достоверность результатов и выводов**

При выполнении исследований по работе использовалось сочетание стандартных методов и подходов, гарантирующих получение надежных данных и оригинальных методик, позволяющих получать новые, ранее неизвестные результаты. Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, удовлетворительным совпадением расчетных зависимостей и моделей с полученными результатами, внутренней непротиворечивостью полученных результатов, их практической реализацией при модернизации и применении экспериментального и диагностического оборудования, а также созданием защитных и функциональных диэлектрических покрытий. Результаты диссертации прошли апробацию: они достаточно подробно опубликованы в открытой печати и докладывались на международных и всероссийских конференциях, успешно использовались для решения ряда технических задач производства.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные в работе результаты могут быть использованы в научных и научно-производственных организациях, занимающихся разработкой и применением электронных источников и нанесением функциональных покрытий на поверхность материалов. Это, прежде всего, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, федеральный исследовательский центр "Институт прикладной физики РАН",

Институт сильноточной электроники СО РАН, Институт электрофизики УрО РАН, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», предприятия Государственных корпораций «Росатом» и "Роскосмос".

### **Замечания по диссертации и автореферату**

1. В третьем научном положении при электронно-лучевом нагреве диэлектрических мишеней рассмотрены два основных процесса уноса энергии с поверхности: теплопроводность рабочего газа и тепловое излучение нагретой поверхности мишени. Вместе с тем, влияние одного из базовых процессов, отвода тепла от нагретого тела в результате конвективных потоков, из рассмотрения исключено, и обоснования этому в тексте диссертации не приводится.

2. Для испарения мишеней используется сфокусированный электронный пучок миллиметрового сечения. В тоже время, в главе 4 диссертации, исследования распределения потенциала, вносимого пучком на поверхность диэлектрической мишени, проведены для пучка сантиметровых размеров, а выполнение законов подобия при таком изменении сечения электронного пучка строго не доказано.

3. При изучении полученных в работе диэлектрических покрытий диссертант сосредоточился, в основном, на изучении их механических свойств. Вместе с тем, для того, чтобы показать, что в работе получены именно диэлектрические покрытия, следовало бы подробно изучить их свойства, присущие именно диэлектрикам: это удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь и другие.

4. При использовании любого оборудования для практических задач производства необходимо учитывать вопросы технической и технологической "наследственности" производственных процессов. В связи с этим, кроме рекомендаций по использованию результатов диссертации, следовало бы рассмотреть вопросы масштабирования предлагаемой технологии и оборудования, особенности включения их в существующие линии для нанесения покрытий.

5. Утверждение диссертанта об уменьшении скорости нанесения покрытий на порядок величины при применении магнитных фильтров в плазменном потоке, приведенное в разделе 1.4, не совсем верно, поскольку современные фильтры уменьшают скорость нанесения покрытий на 30 – 50%.

6. При обсуждении работы микрокатодных дуговых двигателей малой тяги точнее говорить не о пробое торцевой поверхности изолятора между катодом и анодом, а об электрическом взрыве электропроводящей пленки, предварительно нанесенной на поверхность изолятора, которая затем самовосстанавливается.

## Заключение

Указанные замечания не затрагивают сущность научных положений, а также полученных в работе основных результатов, носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Полученные в работе Юшкова Ю.Г. результаты соответствуют уровню диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук и паспорту специальности ВАК 01.04.04 – физическая электроника. Автореферат диссертации правильно и полно отражает её суть. Все основные результаты диссертации опубликованы и доложены научной общественности на научных мероприятиях.

В целом диссертация Юшкова Ю.Г. является научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных исследований, решена крупная научно-техническая проблема, заключающаяся в разработке научных основ технологии высокопроизводительного электронно-лучевого осаждения многофункциональных диэлектрических покрытий, включая покрытия на основе высокотемпературных керамик. Полученные результаты могут быть использованы для решения широкого круга задач при нанесении функциональных покрытий на поверхность материалов, важны и значимы для науки и практики.

Диссертационная работа соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.13 №842 (редакция от 20.07.2014), а ее автор, Юшков Юрий Георгиевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Отзыв на диссертационную работу утвержден на заседании секции научно-технического совета НТЦ «Синтез» № 01/2021 Акционерного общества «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» 25 февраля 2021.

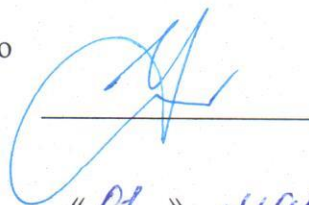
Отзыв составили:

доктор технических наук,  
начальник лаборатории КЛ-8  
НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА»



С.Л. Косогоров

доктор физико-математических наук,  
научный руководитель – заместитель генерального  
директора по технологиям электродвижения



О.Г. Филатов

« 01 » марта 2021 г.

Косогоров Сергей Леонидович, доктор технических наук, начальник лаборатории КЛ-8 направления «Плазменно-пучковые технологии» НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА»; тел.: +7(812)462-7614, электронная почта: kosogorov@niiefa.spb.su; почтовый адрес: 196641, гор. Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой д. 3.

Филатов Олег Геннадиевич, доктор физико-математических наук, научный руководитель - заместитель генерального директора по технологиям электродвижения АО «НИИЭФА»; тел.: +7(812) 464-44-59, электронная почта: filatovg@niiefa.spb.su; почтовый адрес: 196641, гор. Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой д. 3.

Контактные данные ведущей организации:

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» (гор. Санкт-Петербург), факс: +7(812)464-79-79; тел.: +7(812) 464-89-63, электронная почта: mail@niiefa.spb.su; почтовый адрес: 196641, гор. Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3.