

## ОТЗЫВ

официального оппонента  
на диссертационную работу Зайцева Андрея Николаевича  
«Исследование эксплуатационных характеристик плазменных электроизоляционных радиационностойких покрытий в узлах трения термоядерных реакторов»,

представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.02.04 – Трение и износ в машинах

Нанесение покрытий – один из наиболее распространенных способов модификации поверхностей, используемых для увеличения ресурса узлов трения. Проблема изучения износостойкости материалов с покрытиями, работающих в различных условиях фрикционного нагружения, является особенно актуальной. Работа А.Н. Зайцева «Исследование эксплуатационных характеристик плазменных электроизоляционных радиационностойких покрытий в узлах трения термоядерных реакторов» посвящена изучению фрикционного взаимодействия плазменных керамических покрытий в специфических условиях – в узлах трения термоядерных реакторов.

### **Актуальность темы диссертационного исследования.**

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью обеспечения достаточного ресурса узлов сухого трения нового термоядерного реактора в условиях радиационного излучения, высокого вакуума и циклически изменяющихся температур. Поверхности ряда узлов трения модифицированы путем нанесения электроизоляционных покрытий. Важной особенностью задачи является крайне затрудненный контроль состояния покрытий и замена аварийных узлов. В условиях дороговизны и большой длительности стендовых испытаний важной задачей является развитие альтернативных методов оценки ресурса и возможностей его увеличения, чему и посвящена рассматриваемая работа.

Структурно работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений, списка литературы и двух приложений.

**Введение** посвящено обоснованию актуальности темы диссертации, здесь сформулированы основные цели, задачи и научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** работы содержит обзор литературы по тематике исследования. Проанализированы основные требования и условия эксплуатации электроизоляционных радиационностойких покрытий в термоядерных реакторах, основные методы нанесения покрытий; проведено сравнение свойств материалов, используемые для их создания. Приведены публикации, посвященные влиянию ра-



диационного облучения, температуры и вакуума на триботехнические, электроизоляционные и прочностные свойства пар трения с покрытием.

**Вторая глава** посвящена обоснованию выбора и описанию материалов покрытий, технологии их нанесения, методов испытаний и оборудования для определения свойств покрытий: твердости и модуля упругости, триботехнических свойств, механизмов разрушения.

**Третья глава** содержит метод расчета и анализ результатов определения оптимальных толщин плазменных электроизоляционных покрытий как на основе имеющихся данных, так и по результатам триботехнических испытаний керамических покрытий в паре с аустенитной коррозионно-стойкой сталью и алюминиевой бронзой. Исследовано влияние температур на силу трения и интенсивность изнашивания. Использование методов микроскопии позволило проанализировать механизмы разрушения покрытий и контр-тел.

**Четвертая глава** представляет исследование сдвиговых напряжений, возникающих в условиях фрикционного взаимодействия. В главе представлены как экспериментальные, так и теоретические (расчетные) результаты. По результатам работы сделан важный вывод о необходимости нанесения на электроизоляционное покрытие дополнительного антифрикционного слоя.

**Пятая глава** посвящена использованию результатов, полученных в предыдущих главах, для разработки конструкции плазменных электроизоляционных покрытий деталей тяжело нагруженных узлов трения термоядерных реакторов.

**В заключительной части** работы приводятся основные выводы и результаты.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Научные положения и выводы, приведенные в диссертации А.Н. Зайцева, обоснованы и аргументированы, полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными других отечественных и зарубежных исследователей.

**Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций** диссертационной работы определяется использованием апробированных экспериментальных методик триботехнических испытаний, корректным анализом результатов, подтвержденным анализом поверхности методами микроскопии. Соотношения, использованные для моделирования, основаны на известных ранее инженерных методах расчета.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что получены минимальные толщины керамических электроизоляционных покрытий, позволяющие обеспечить достаточное электрическое сопротивление в течение заданного периода эксплуатации. Предложенные конструкторские решения



направлены на уменьшение касательных напряжений в материале покрытия и в контртеле.

### **Наиболее существенные научные результаты, полученные соискателем.**

Разработана методика расчета оптимальных рабочих толщин покрытий, учитывающая влияние радиационного облучения, износ материала покрытия и припуски на механическую обработку, необходимых для безаварийной работы реактора. Определена максимальная величина падения удельного объемного сопротивления покрытия, что важно для определения его оптимальной толщины. По результатам испытаний на трение и износ установлен основной механизм изнашивания керамического материала покрытия, использованный при моделировании износа. Разработаны и экспериментально обоснованы методы снижения максимальных значений напряжений, возникающих при фрикционном нагружении, что позволяет повысить ресурс деталей реактора с электроизоляционным покрытием.

### **Соответствие автореферата диссертации.**

Автореферат диссертации удовлетворяет требованиям ВАК России, полно и точно отражает основные научные положения, результаты и выводы, приведенные в диссертационной работе.

### **Апробация результатов исследования.**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах, международных и всероссийских конференциях. Приведенные в работе результаты достаточно освещены в публикациях в рецензируемых журналах.

### **По работе могут быть сделаны следующие замечания:**

1. В главе 2 отсутствуют схемы фрикционного контакта в изучаемых реальных узлах трения с диапазоном возможных нагрузок, скоростей, смещений. Без этой информации не ясны причины выбора условий лабораторных испытаний. Схема, не полная и противоречивая, появляется только в четвертой главе работы.
2. В диссертации очень мало внимания уделено тому факту, что объект исследования – не изолированный материал покрытия, а композит, в который входит и материал подложки. Какой материал подложки использовался в том или ином случае зачастую непонятно.
3. Автор использует решение контактной задачи Герца, формулы для расчета напряжений, не упоминая о том, что они справедливы для однородных, а не для слоистых тел. В данном случае нужно было обосновать возможность их использования.
4. Понятия «моделирование коэффициента трения», широко используемого в работе, не существует. Моделируют процесс трения. Коэффициент трения можно оценивать, прогнозировать, рассчитывать.

5. Не приведены источники рисунков 1.4 и 1.5 в обзоре литературы.
6. Цели и задачи исследования, изложенные во введении, дословно повторены в п.1.4.1, что является излишним.
7. Приведенный модуль упругости в разных главах имеет разные обозначения.
8. В работе, судя по схеме возвратно-поступательного движения при фрикционных испытаниях, использовался трибометр Cetr UMT-3, а не UMT-2.
9. В тексте диссертации имеется большое количество опечаток, плохо согласованных предложений, что затрудняет ее восприятие.

Перечисленные замечания не затрагивают основную сущность работы, не подвергают сомнению новизну и достоверность полученных результатов

**Заключение.** Диссертационная работа А.Н. Зайцева «Исследование эксплуатационных характеристик плазменных электроизоляционных радиационностойких покрытий в узлах трения термоядерных реакторов» выполнена на высоком научном уровне. Она является законченным исследованием, в котором получены новые важные результаты в области изучения трения и износа. Считаю, что диссертационная работа А.Н. Зайцева удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах, а её автор Зайцев Андрей Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах.

Официальный оппонент  
доктор физико-математических наук,  
профессор РАН,  
ведущий научный сотрудник лаборатории трибологии  
Института проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского  
Российской академии наук



Торская Елена Владимировна  
15 мая 2017 г.

Адрес: 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1  
Тел.: +7-495-434-36-92  
e-mail: [torskaya@mail.ru](mailto:torskaya@mail.ru)



Подпись д.ф.-м.н. Е.В. Торской подтверждаю.

ПОДПИСЬ <u>Е.В. Торская</u>	ЗАВЕРЯЮ:
Ученый секретарь ИГиМ РАН, к.ф.-м.н.	<u>Е.Я. Сысоева</u>
15	2017 г.