

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Санкт-Петербургского
политехнического университета
Петра Великого,
д.т.н., профессор,
член-корреспондент РАН



В. В. Сергеев

28 апреля 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого на диссертационную работу **Зайцева Андрея Николаевича** на тему *«Исследование эксплуатационных характеристик плазменных электроизоляционных радиационных покрытий в узлах трения термоядерных реакторов»*, представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах.

Актуальность темы диссертации

Исследования, представленные в диссертации Зайцева Андрея Николаевича лежат в русле актуального направления изучения триботехнических, прочностных характеристик плазменных электроизоляционных покрытий (ЭИП), являющихся обязательным конструктивным элементом большинства тяжело нагруженных узлов трения типа опор термоядерной техники, работа которых обусловлена экстремальными условиями эксплуатации. В научных работах Крагельского И.В., Дроздова Ю.Н., Буше Н.А., Проникова А.С. подчеркивается, что одним из главных факторов надежности агрегатов является износ подвижных сопряжений рабочих органов под влиянием сил трения. Специфика работы термоядерного реактора не позволяет ограничиваться только расчетами на прочность наиболее ответственных деталей, но и требует изучения поведения подвижных сопря-

жений на износостойкость, причем под влиянием жесткого воздействия эксплуатационных условий.

Автор в своей работе выделил особо нагруженные элементы модулей blankets термоядерного реактора ИТЭР – детали с газотермическим электроизоляционным покрытием ($MgAl_2O_4$, Al_2O_3) узлов трения, испытывающих комбинацию сжимающих и сдвигающих нагрузок при смешанном γ -нейтронном излучении, высоком вакууме, циклически изменяющихся температур и значительных ударных нагрузках, возникающих во время срыва плазмы. Важность понимания процессов трения и износа в контакте двух различных материалов (керамика–металл) диктуется условием длительной и безотказной работы реактора ИТЭР, исключающей какие-либо ремонтные вмешательства в активной зоне.

Принципиально значимо и своевременно для проектирования первого международного термоядерного реактора ИТЭР являются научные разработки, представленные в диссертационной работе, касающиеся вопросов прогнозирования надежности керамических покрытий и исследования свойств ЭИП при рабочих режимах термоядерной техники, создания математических моделей, позволяющих определять качественные характеристики покрытий в процессе их эксплуатации.

Следует отметить профессиональный подход автора к подтверждению надежности ЭИП с точки зрения оценки триботехнических свойств и прочности материала покрытия в условиях одновременного действия касательных и сжимающих напряжений. Малые амплитуды перемещений при высоких температурах в условиях отсутствия смазочных материалов способствуют повышению коэффициента трения и ускорению износа. Проведенные лабораторные триботехнические испытания ЭИП в паре с металлами в условиях, приближенных к реальным, позволяют произвести оценку правильности выбора конструкции покрытия.

В диссертации представлены методы расчета и способы повышения надежности плазменных электроизоляционных покрытий в тяжело нагруженных узлах сухого трения термоядерных реакторов, реализация которых несомненно будет полезна при проектировании и эксплуатации строящегося термоядерного реактора ИТЭР.

Исследовательская работа выполнялась в рамках подписанных соглашений между Российской Федерацией и Международной организацией ИТЭР о поставке компонентов blankets ИТЭР: № 1.6.P1A.RF.01 от 14

февраля 2014 г. – «Теплонапряженные панели первой стенки blankets ИТЭР» и № 1.6.P3.RF.01 от 19 декабря 2014 г. – «Соединители модулей blankets ИТЭР».

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация Зайцева А.Н. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 149 наименований, изложена на 215 страницах машинописного текста, включая 96 рисунка и 44 таблиц. Структуры работы логична, соответствует цели и задачам исследования. Диссертация оформлена на современном уровне с выделением в тексте важных результатов и выводов. Текст изложен грамотным научным языком. По структуре и объему работы, стилю ее изложения замечаний нет.

Во введении даны формулировки актуальности и степени разработанности выбранной темы исследования, приведены цель и задачи работы, представлены положения, выносимые на защиту, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов и указана их достоверность, приведены сведения о личном вкладе в публикациях автора, апробация работы, ее связи с научными направлениями и краткое содержание диссертации.

В первой главе в достаточной полноте изложена история вопроса. Приведен-аналитический обзор литературных источников, выявлены противоречивые сведения по способам нанесения керамических покрытий и об их работе, применительно к реакторной технике. Показано, что триботехнические свойства газотермических ЭИП в паре со сталью и бронзой при сухом трении недостаточно изучены. Обсуждены нерешенные спорные вопросы.

Во второй главе представлены методики экспериментальных исследований пар трения. Даны основные характеристики используемых лабораторных стендов, исследовательского оборудования, отвечающих современному научному и техническому уровню. Все исследования проводились в соответствии с требованиями российских и зарубежных стандартов.

В третьей главе показан метод расчета толщин ЭИП деталей узлов трения реакторов с учетом влияния триботехнических показателей, а также радиационного облучения, температуры и припуска на механическую обработку. Представлены уравнения, позволяющие производить вычисления

минимальных размеров и допусков заготовок для операции нанесения газотермического покрытия.

Установлена возможность применения результатов исследований влияния ионизирующего излучения, температуры на проводимость плазменных ЭИП в расчетах по определению изменения электрофизических свойств и параметров деталей с ЭИП модулей blankets ИТЭР. Приводятся вычисления предельной величины проводимости плазменных ЭИП в максимально жестких условиях модулей blankets. По результатам триботехнических испытаний выявлено сочетание абразивного и усталостного изнашивания поверхности ЭИП при циклических воздействиях сдвигающих сил трения. Показано, что хрупкое выкрашивание ЭИП, сопровождающееся ростом коэффициента трения, ведет к потере работоспособности деталей. Приведен широкий круг триботехнических испытаний пар трения ЭИП–металл (сталь, бронза) и определены диапазоны толщин плазменных ЭИП деталей узлов трения типа опор blankets.

Отмечены особенности изнашивания ЭИП в паре с бронзовыми контртелами (налипание и внедрение продуктов износа бронзовых контртел). Разработанные и обобщенные модели коэффициента трения скольжения, показали высокую степень сходимости на примере пар трения плазменного ЭИП–металл в условиях, дублирующих эксплуатационные режимы в ИТЭР.

В четвертой главе приведена разработанная методика оценки критического уровня сдвиговых напряжений в паре трения ЭИП–металл тяжело нагруженных узлов трения. Представленные эксперименты подтвердили необходимость снижения коэффициента трения пар ЭИП–металл в заданном диапазоне температур и контактных давлений деталей blankets, в связи с существующей опасностью отслаивания отрыва покрытия и потери электрической изоляции элементов опор модулей blankets.

Пятая глава посвящена результатам разработки конструкции плазменных ЭИП деталей узлов трения термоядерного реактора с повышенными триботехническими свойствами. Анализ данных триботехнических испытаний разнородных материалов в сочетании с различными способами снижения коэффициента трения в парах ЭИП–металл с учетом конструкций узлов трения, подтвердил невозможность применения способа нанесения дополнительного антифрикционного, износостойкого слоя на ЭИП. Показано, что при выборе способа снижения касательных напряжений в

ЭИП следует учитывать геометрию поверхности трения. Приведены данные триботехнических свойств модифицированных пластин из сплава ниобия, а также твердых смазочных покрытий на основе MoS_2 в паре с ЭИП. Предлагается рассматривать полученные результаты как основу для выбора рационального способа снижения коэффициента трения в тяжело-нагруженных узлах трения модулей бланкета ИТЭР.

Заключение содержит основные результаты и выводы диссертационной работы, подтверждающие достижение поставленной цели и задач исследования.

Научная новизна исследования

К основным результатам, полученным соискателем, определяющим научную новизну и значимость работы следует отнести:

- в работе построены модели интенсивности изнашивания плазменного ЭИП (Al_2O_3), описывающие физическую картину износа в паре со сталью и бронзой, обоснованность предложенных моделей подтверждена экспериментально;

- созданы математические модели коэффициента трения скольжения плазменного покрытия Al_2O_3 в паре со сталью и бронзой, учитывающие влияние механических свойств и геометрию контактируемых поверхностей;

- интересным считаем предложение использовать прочность сцепления на сдвиг при сжатии в качестве критерия оценки прочности газотермических покрытий изделий модулей бланкета;

- автором подчеркивается важность установления математической зависимости прочности сцепления на сдвиг при сжатии плазменного ЭИП от величины контактных нагрузок;

- при конструировании изделий модулей бланкета особенно значимо определение области физических параметров, при которых наступает разрушение плазменных ЭИП.

Научная и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в построении математических моделей интенсивности изнашивания и коэффициента трения скольжения, позволяющих прогнозировать триботехнические свойства плазменных ЭИП в паре с металлами. Впервые предложена методика рас-

чета толщин ЭИП изделий узлов трения термоядерной техники по критерию электрического сопротивления.

Практическая значимость работы определяется расчетом минимально допустимых толщин плазменных ЭИП изделий модулей blankets; введением авторской методики прогнозирования критического уровня сдвиговых напряжений в трибопарах ЭИП–металл и оригинальным конструкторским решением, направленным на снижение касательных напряжений в трибопарах до допускаемых значений при работе в экстремальных условиях термоядерного реактора.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Выводы, рекомендации и научные результаты диссертации Зайцева А.Н. могут быть полезны для дальнейших исследований в учреждениях: РОСАТОМ, РАН, РОСКОСМОС, ОАК, ЦНИИ КМ «Прометей», НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ МИФИ, ИМАШ им. А.А. Благонравова, ВИАМ, НПО «Сатурн», «РКК Энергия» и др.

Обоснованность и достоверность основных положений, выносимых на защиту, результатов и выводов работы

Полученные в работе математические модели, расчеты и методики подтверждены экспериментами, проведенными соискателем и сравнимы с опубликованными данными авторов, специализирующихся в данной области исследования. Содержание диссертационной работы, ее цель и задачи соответствуют пунктам 2, 5, 7, 10, 12 паспорта специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию, отражает актуальность темы исследования, ее цели и задачи, научную новизну, практическую значимость, обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

Публикации основных результатов диссертации в научной печати

Диссертация прошла апробацию на научных конференциях, совещаниях, семинарах различных рангов, а ее результаты опубликованы в 8 рецензируемых научных журналах, из которых 6 рекомендованы ВАК.

Замечания по диссертации

1. Коэффициенты уравнения прочности сцепления на сдвиг при сжатии плазменного покрытия Al_2O_3 получены в диапазоне контактных давлений 0,1 до 35 МПа, при этом автор утверждает, что линейная зависимость сохранится до достижения предела текучести материала покрытия (σ_T). Данное утверждение недостаточно обосновано и должно быть подтверждено экспериментально.
2. Триботехнические испытания ЭИП следует расширить экспериментами в условиях воздействия радиационного облучения и вакуума, что позволит более обоснованно прогнозировать коэффициент трения и износ покрытия при работе сопряжения ЭИП–металл.

Сделанные замечания не умоляют общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертация **Зайцева Андрея Николаевича** логична по своему построению, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, несомненен и личный вклад автора в науку.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» считает, что диссертация Зайцева Андрея Николаевича «Исследование эксплуатационных характеристик плазменных электроизоляционных радиационных покрытий в узлах трения термоядерных реакторов» является научно-квалификационной работой, в которой содержатся исследования по актуальной тематике изучения триботехнических прочностных характеристик ЭИП и проектирования на их базе тяжело нагруженных узлов типа опор термоядерной техники, удовлетворяющих требованиям по электрическому сопротивлению изоляции в условиях жесткого излучения, высокой температур и вакуума, что соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – Трение и износ в

машинах, а ее автора Зайцев Андрей Николаевич заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв на диссертацию обсужден на заседании кафедры «Машиноведение и основы конструирования» Института «Металлургии, машиностроения и транспорта» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого («27» апреля 2017 г., протокол № 06).

Зав. кафедрой «Машиноведение и основы конструирования», института «Металлургии, машиностроения и транспорта» СПбПУ, доктор технических наук, профессор



Скотникова
Маргарита
Александровна

Адрес: 195197, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29
Телефон: +7 (921) 987-87-52
e-mail: Skotnikova@mail.ru

Подпись Скотниковой М. А. заверяю

