

На правах рукописи



УДК 621.795.4:621.891:621.039.63

Зайцев Андрей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННЫХ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАДИАЦИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ В УЗЛАХ
ТРЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Акционерном Обществе "Ордена Ленина Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники имени Н.А. Доллежала" (АО "НИКИЭТ"), предприятие госкорпорации "Росатом"

Научный руководитель:

Доктор технических наук
Фадин Юрий Александрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор РАН, ст. научный сотрудник
лаборатории трибологии ФГБУН
Институт проблем механики им. А.Ю.
Ишлинского Российской академии наук
(ИПМех РАН)

Торская Елена Владимировна

кандидат технических наук, ст. научный
сотрудник ФГУП Центральный научно-
исследовательский институт
конструкционных материалов
"Прометей" имени И.В. Горынина,
Национальный исследовательский центра
"Курчатовский институт" (НИЦ
«Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ
«Прометей»)

Герашенков Дмитрий Анатольевич

Ведущая организация:

ФГАОУ ВПО "Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого"

Защита состоится "___"_____ 2017 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки "Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)" по адресу: 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой пр., д. 61.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу: 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой пр., д. 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института проблем машиноведения и на сайте [http:// www.ipme.ru](http://www.ipme.ru).

Телефон для справок 8(812)-272-81-83

Автореферат разослан "___"_____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



доктор технических наук

Владимир Васильевич Дубаренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

За десятилетия опыта работ по созданию термоядерных энергетических реакторов в нашей стране и за рубежом выявлен ряд нерешенных научных и конструкторских проблем, одними из которых являются обеспечение безотказной и долговечной работы узлов сухого трения с электроизоляционным покрытием (ЭИП) в экстремальных условиях эксплуатации.

Развитие термоядерной энергетики связано с обеспечением доступной электроэнергии потенциальных потребителей с одновременным снижением выброса углекислого газа, являющейся важнейшей экологической проблемой. Реализация проекта по строительству международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР), одним из учредителей (исполнителей) которого является Российская Федерация, столкнулась с решением нетривиальных конструкторских и технологических задач, связанных с экстремальными условиями эксплуатации внутриреакторных компонентов.

В 2014 году Российская Федерация подписала с Международной организацией ИТЭР два соглашения о поставке компонентов бланкета ИТЭР: № 1.6.P1A.RF.01 от 14 февраля – «Теплонапряженные панели первой стенки бланкета ИТЭР» и № 1.6.P3.RF.01 от 19 декабря – «Соединители модулей бланкета ИТЭР». Соглашение № 1.6.P1A.RF.01 включает в себя изготовление, испытание и поставку на площадку ИТЭР 179 теплонапряженных панелей первой стенки, воспринимающих тепловой поток из плазмы до $4,7 \text{ МВт/м}^2$.

Одними из наиболее нагруженных элементов бланкета ИТЭР являются детали с газотермическим электроизоляционным покрытием (MgAl_2O_4 , Al_2O_3) узлов трения типа опор, испытывающих одновременно высокие сжимающие (до 500 МПа) и сдвигающие (100–400 МПа) нагрузки в условиях жестких нейтронного и γ -излучений ($P_\gamma=2,3 \cdot 10^3 \text{ Р/с}$, $\Phi=2,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$), высокого вакуума (10^{-6} – 10^{-5} Па) и циклически изменяющихся температур (20–400 °С). Накопленный опыт эксплуатации плазменных ЭИП (MgAl_2O_4 , Al_2O_3) в ядерной и термоядерной технике не позволяет прогнозировать их надежность применительно к сложным условиям работы термоядерного реактора ИТЭР при линейных и угловых перемещениях изделий с ЭИП. Выход из строя узла трения с ЭИП приводит к необходимости ремонта и остановки реактора, что представляет большую сложность и опасность при работе термоядерной энергетической установки.

Циклический режим работы термоядерного реактора ИТЭР в сочетании с нестабильностью температурных и силовых факторов вызывает перемещения деталей с ЭИП в местах их установки. Надежная работа ЭИП в значительной степени определяется триботехническими свойствами и прочностью материала покрытия в условиях действия касательных напряжений при сдвиге. Особое внимание к триботехническим свойствам ЭИП обусловлено наличием сухого трения и малых амплитуд перемещений при повышенной температуре в вакууме, способствующих интенсивному изнашиванию и росту коэффициента трения.

Актуальным направлением исследований является изучение триботехнических прочностных характеристик ЭИП и на их базе проектирование новых тяжело нагруженных узлов трения типа опор термоядерной техники, удовлетворяющих требованиям по электрическому сопротивлению изоляции в условиях жесткого ионизирующего излучения, высоких температур и вакуума.

Объектом исследования являются плазменные электроизоляционные радиационно-стойкие покрытия изделий узлов трения и агрегатов термоядерных реакторов, работающие в условиях сухого трения при малых скоростях скольжения, высоких статических и динамических нагрузках в вакууме при высоких температурах и воздействии радиационного облучения.

Цель диссертационной работы

Повышение долговечности и обеспечение безотказности плазменных электроизоляционных покрытий изделий тяжелонагруженных узлов трения термоядерных реакторов, эксплуатирующихся в условиях высоких температур, ионизирующего облучения в вакууме при отсутствии смазывающих материалов.

Основные задачи работы

1. Разработка методики расчета геометрических параметров ЭИП изделий термоядерной техники, созданной на базе прогрессивной технологии нанесения для заданных условий эксплуатации.
2. Определение величины падения электроизоляционных свойств плазменного ЭИП– Al_2O_3 деталей модулей бланкета в рабочих условиях эксплуатации реактора ИТЭР.
3. Оценка влияния структуры и механических свойств ЭИП на износостойкость и стойкость к разрушению при заданных условиях внешнего воздействия.
4. Создание физической и математической моделей изнашивания, коэффициента трения скольжения плазменных ЭИП– Al_2O_3 для тяжелонагруженных узлов трения бланкета ИТЭР.
5. Разработка физически обоснованных математических моделей, позволяющих рассчитывать триботехнические и прочностные характеристики ЭИП в установленных режимах эксплуатации узлов трения термоядерной техники.
6. Создание методики расчета критического уровня сдвиговых напряжений в трибопарах ЭИП–металл применительно к узлам трения термоядерной техники.
7. Установление допускаемых значений коэффициента трения в парах ЭИП–металл модулей бланкета ИТЭР в условиях сухого трения при малых скоростях скольжения, обеспечивающих работоспособность при эксплуатационных контактных давлениях.
8. Оценка и выбор способа снижения сдвиговых усилий в трибопарах ЭИП–металл модулей бланкета ИТЭР до допускаемых значений в условиях эксплуатации конструкций при заданной технологии нанесения покрытия.
9. Выбор и экспериментальное обоснование конструкции и технологии нанесения ЭИП с высокими эксплуатационными свойствами для изделий узлов трения модулей бланкета ИТЭР.

Научная новизна

1. Построена и экспериментально подтверждена модель изнашивания плазменного ЭИП– Al_2O_3 , описывающая физическую картину износа в паре со сталью 316L(N)-IG и алюминиевой бронзой БрАЖНМц9-4-4-1.
2. Разработана математическая модель коэффициента трения скольжения плазменного покрытия Al_2O_3 в паре со сталью 316L(N)-IG и алюминиевой бронзой БрАЖНМц9-4-4-1, учитывающая влияние механических свойств и геометрию контактируемых поверхностей.

3. Предложено использовать прочность сцепления на сдвиг при сжатии ЭИП в качестве критерия оценки прочности газотермических покрытий изделий модулей blankets ИТЭР.

4. Установлена и экспериментально подтверждена математическая зависимость прочности сцепления на сдвиг при сжатии плазменного ЭИП–Al₂O₃ в зависимости от величины контактных нагрузок.

5. Теоретически обоснована область физико-механических параметров, при которых возникает разрушение плазменного ЭИП–Al₂O₃ изделий модулей blankets ИТЭР.

Практической значимостью обладают

1. Математические модели интенсивности изнашивания и коэффициента трения скольжения, позволяющие научно-обоснованно прогнозировать триботехнические свойства плазменного ЭИП–Al₂O₃ в паре со сталью 316L(N)-IG и алюминиевой бронзой БрАЖНМц9-4-4-1 при трении без смазочного материала деталей модулей blankets ИТЭР.

2. Разработанная автором методика расчета толщин ЭИП изделий узлов трения термоядерных реакторов по критерию электрического сопротивления позволяет учитывать факторы, снижающие электроизоляционные свойства покрытий в процессе эксплуатации реактора, и может применяться с целью определения оптимальной толщины покрытия.

3. Минимальные толщины плазменных ЭИП–Al₂O₃ изделий модулей blankets ИТЭР, полученные расчетным путем, обеспечат требуемое электрическое сопротивление в течение заданного периода эксплуатации реактора, позволяя повысить работоспособность и снизить себестоимость изделий с ЭИП.

4. Разработанная автором методика делает возможным прогнозирование критического уровня сдвиговых напряжений в трибопарах ЭИП–металл узлов трения термоядерных реакторов.

5. Предложенные автором конструкторские решения позволяют снизить касательные напряжения в трибопарах ЭИП–металл модулей blankets ИТЭР тяжело нагруженных узлов трения типа опор до допускаемых значений, работа которых обусловлена экстремальными условиями эксплуатации.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Результаты триботехнических испытаний плазменных покрытий в паре со сталью и алюминиевой бронзой при нормальных и высоких температурах.

2. Методическое обеспечение для расчета требуемых качественных характеристик ЭИП для проектирования тяжело нагруженных узлов трения термоядерных реакторов в заданных условиях эксплуатации.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению критического уровня касательных напряжений и допускаемого значения коэффициента трения в трибопарах ЭИП–металл модулей blankets ИТЭР при рабочих режимах эксплуатации реактора.

4. Теоретические основы проектирования ЭИП узлов сухого трения типа опор термоядерных реакторов, испытывающих как статические, так и динамические нагрузки в условиях радиационного облучения, вакуума и высоких температур.

Апробация работы и достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена проведением экспериментов на высокоточном лабораторном оборудовании по апробированным методикам оценки

триботехнических, физико-механических свойств нанесенных покрытий и конструкционных материалов; применением методов математической статистики для обработки результатов экспериментов и сопоставлением их с известными данными; экспериментальными исследованиями, подтверждающими правильность выдвинутых гипотез.

Результаты и основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на всероссийских и международных конференциях, семинарах, советах и совещаниях: городской семинар по механике (рук: Д.А. Индейцев), Санкт-Петербург, 17 ноября 2016 г.; семинар «Механика фрикционного взаимодействия твердых тел им. И.В. Крагельского (рук: И.Г. Горячева)», Москва, 14 октября 2016 г.; НТС АО «НИКИЭТ» им Н.А. Доллежала, Москва, 29 августа 2016 г.; XLIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 8–12 февраля, 2016 г.; VI, VIII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России», Москва, 2013, 2015 г.; 40-ая международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» посвященная 80-летию со дня рождения Юрия Гагарина, Москва, 7–11 апреля 2014 г.; XLII Summer School - Conference "Advanced Problems in Mechanics", Санкт-Петербург, 30 июня – 5 июля 2014 г.; Юбилейная XXV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС-2013, Москва, 13–15 ноября 2013 г.; конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике», Москва, 20–21 ноября 2013 г.;

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из которых 6 публикаций в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ. Общий объем публикаций 2,4 п.л.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, выводов, библиографического списка литературы, состоящего из 149 наименований. Работа изложена на 215 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков, 44 таблиц и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, описана степень ее разработанности, изложены цель и задачи исследования, определен объект исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проводится анализ условий эксплуатации деталей узлов трения с электроизоляционным радиационностойким покрытием (ЭИП– $MgAl_2O_4$, Al_2O_3 , $Al_2O_3-TiO_2$) в термоядерных реакторах типа "Токамак". Проведена систематизация основных требований к изделиям с ЭИП тяжело нагруженных узлов трения модулей blankets вакуумной камеры реактора ИТЭР; определены основные факторы, влияющие на изменение рабочих характеристик покрытий (триботехнические, электроизоляционные, прочностные).

Проведенный анализ газотермических методов напыления электроизоляционных, антифрикционных и износостойких покрытий позволил установить конкурентоспособные способы нанесения покрытий на металлических подложках – плазменное, высокоскоростное, детонационное. Применительно к термоядерной технике доминирующее положение

занимает порошковое плазменное напыление, позволяющее создавать ЭИП– $MgAl_2O_4$, Al_2O_3 с минимальным содержанием ($< 0,1$ %) примесей оксидов щелочных металлов – Na_2O , K_2O . В диссертации проведен анализ влияния γ -нейтронного облучения на электроизоляционные свойства плазменных покрытий ($MgAl_2O_4$, Al_2O_3), который показал высокую радиационную стойкость обоих материалов. Структура плазменного ЭИП– $MgAl_2O_4$ (гранецентрированная кубическая решетка) обеспечивает большую радиационную стойкость по сравнению с Al_2O_3 , но отмечается отсутствие исходных порошковых материалов ЭИП– $MgAl_2O_4$ у основных производителей-поставщиков Sulzer Metco, H.C.Starck, Praxair S.T.

Проведен анализ литературных источников, касающихся исследований триботехнических свойств ЭИП в экстремальных условиях. В нашей стране существенный вклад в развитие теории и практики электроизоляции изделий атомной энергетики внесли ученые: Иванов В.М., Кудинов В.В., Калинин Г.М., Кузовиткин В.Ф. Из зарубежных ученых следует отметить: Zinkle S. J., Goulding R.H., Rasmussen D.A., Ibarra A., Trester P.W. Данный анализ выявил ряд проблем в работоспособности покрытий в течение всего срока эксплуатации реакторов, прежде всего из-за высоких касательных напряжений, динамических и статических нагрузок, приводящих к частичному или полному разрушению (отслаивание, растрескивание, выкрашивание) ЭИП.

Отслаивание, отрыв и хрупкое выкрашивание плазменных ЭИП, отмеченное в ходе стендовых испытаний (АО "НИКИЭТ"), имитирующих циклическое нагружение изделий с ЭИП в паре с аустенитной сталью 316L(N)-IG (03X16H15M3) и алюминиевой бронзой БрАЖНМц9-4-4-1 модулей бланкета в процессе работы реактора ИТЭР (горение/пауза плазмы), указывает на необходимость повышения надежности покрытий узлов трения типа опор, что можно было бы осуществить за счет улучшения их триботехнических и прочностных свойств, установления допустимого значения коэффициента трения скольжения [f].

Применение смазывающих материалов, содержащих органические и неорганические связующие вещества, в парах трения ЭИП–металл модулей бланкета не представляется возможным из-за высоких требований к газовыделению при $T=100$ °С (примеси – $\leq 10^{-9}$ м³·Па/с; изотопы Н – $\leq 10^{-7}$ м³·Па/с) и возможного падения сопротивления изоляции (R) изделия из-за непрогнозируемой интенсификации диффузных процессов в условиях ионизирующего облучения и высоких температур. При трении скольжения в условиях отсутствия смазывающих материалов плазменных ЭИП в паре со сталью и бронзой отмечается высокий коэффициент трения $f=0,45-0,98$ как в нормальных атмосферных условиях, так и в вакууме. Результаты триботехнических испытаний плазменных оксидных покрытий в экстремальных условиях описываются в работах Trester P.W., Mckelvey T.E., Ulrickson M.A. Экстремальные условия эксплуатации изделий с ЭИП модулей бланкета (контактное давление $p_a=3-500$ МПа, температура $T=20-400$ °С, вакуум до $p_{\text{вак}}=10^{-6}$ Па, ионизирующее облучение $D_n=0,15-0,50$ сна) вызывают необходимость проведения дополнительных триботехнических испытаний покрытий при скольжении в паре со сталью 316L(N)-IG и бронзой БрАЖНМц9-4-4-1, имитирующие тип движения (возвратно-поступательный, вращательный) и амплитуды перемещения (до 3 мм) изделий узлов трения с ЭИП при эксплуатации реактора ИТЭР.

В работах Дроздова Ю.Н., Юдина Е.Г., Савиновой Т.М., Савченко Н.Л., Хуршудова А.Г. представлены основы механизма разрушения оксидной технической (спеченной)

керамики в паре с металлическими контробразцами, а также поиск математических моделей интенсивности изнашивания. Определены ключевые инварианты износа технической керамики с учетом контактного давления, температуры и скорости скольжения. Проведенный анализ разработанных математических моделей трения и изнашивания оксидной керамики в паре со сплавами выявил отсутствие закономерностей интенсивности изнашивания и коэффициента трения применительно к плазменным оксидным покрытиям.

Ввиду недостаточных исследований трения и износа плазменных ЭИП в условиях радиационного облучения были проанализированы работы Костюкова Н.С., Zinkle S. J. и др., касающиеся влияния γ -нейтронного облучения на механические свойства (микротвердость, модуль упругости) керамических материалов.

В результате проведенного анализа литературных источников по данной проблеме определены цель и задачи работы, установлена область исследования.

Во второй главе приводятся методики экспериментальных исследований физико-механических свойств материалов пар трения и используемое современное лабораторное оборудование. Представлены основы технологического процесса порошкового плазменного напыления исследуемых керамических, керметных и металлических покрытий ($MgAl_2O_4$, Al_2O_2 , $Al_2O_3-13\%TiO_2$, $Al_2O_3-40\%TiO_2$, $ZrO_2-8\%Y_2O_3$, Cr_2O_3 , $Cr_3C_2-25\%NiCr$, $Mo-Mo_2C$, $Cu-9,5\%Al-1\%Fe$).

Механические свойства исследуемых керамических, металлических и модифицированных поверхностей оценивались на приборе Nanovea Micro/Macro Scratch Tester при инструментальном индентировании по нагрузочно-разгрузочной кривой (ГОСТ Р 8.748-2011), а также по методам восстановленного и невосстановленного отпечатка (ГОСТ 9450-76). Высокотемпературные триботехнические испытания проводились на специализированных стендах-трибометрах Nanovea TRB-HL, Cetr UMT-2, имитирующих торцевое трение при возвратно-поступательном и вращательном движениях (ASTM G99, G133; DIN 50324). Температура нагрева образцов в высокотемпературной камере контролировалась с помощью тепловизионной системы FLIR T600.

Для исследования структурных особенностей и химического состава формируемых плазменных покрытий, различных поверхностей трения применялись следующие физико-химические методы: оптическая, растровая электронная микроскопия и оптико-эмиссионная спектроскопия. Использовались следующие растровые электронные микроскопы, снабженные приставкой для проведения рентгеноспектрального микроанализа: CamScan - 4DV, Tescan Mira LMU. Химический анализ проводился также на оптико-эмиссионном спектрометре тлеющего разряда GD Profiler-2 (Horiba Jobin Yvon) в режиме послойного элементного анализа материала.

Прочность сцепления плазменных покрытий оценивалась по двум методикам: на отрыв (клеевая, ГОСТ 9.304-87, ASTM F1147-88) и на сдвиг при сжатии (разработана в настоящей работе). Для практической реализации измерения прочности сцепления на сдвиг при сжатии $\tau_{сд}^{FN}$ ЭИП на плоском образце был разработан индентор, технологическая оснастка для напыления плазменных дискретных покрытий малых линейных размеров (менее 5 мм).

В третьей главе проводится анализ конструкций ЭИП деталей узлов трения термоядерных реакторов (Рисунок 1), подверженных ионизирующему облучению. На базе расчетно-аналитического метода предложен способ расчета оптимальных рабочих толщин покрытия до ($H_{п}$, $H_{п.мин}$, $H_{п.макс}$) и после ($h_{п}$, $h_{п.мин}$, $h_{п.макс}$) механической обработки,

учитывающий основные факторы, снижающие сопротивление изоляции (R) детали: ионизирующее смешанное γ -нейтронное излучение (P_γ, Φ), высокие температуры (T), максимальный линейный износ (Δh) покрытия при эксплуатации.

Для вычисления минимальных рабочих толщины ЭИП предложено использовать следующие уравнения:

$$h_{п.мин} = [n](\Delta h + h_{Al_2O_3} + h_{RZ1} + h_{RZ2} + h_{NiAl}), \quad (1)$$

$$H_{п.мин} = h_{п.мин} + Z_{о.п} + k_\phi T_{пок} - T_{нап}/2, \quad (2)$$

где $[n]$ – коэффициент запаса; $h_{Al_2O_3}$ – толщина электроизоляционного слоя; h_{RZ1}, h_{RZ2} – средние высоты микронеровностей; h_{NiAl} – толщина переходного слоя (подслоя); $Z_{о.п}$ – общий припуск на обработку покрытия; k_ϕ – коэффициент формы поверхностей покрытия (при односторонней обработке $k_\phi=1$, двухсторонней обработке $k_\phi=1/2$) $T_{пок}$ – допуск на размер толщины покрытия; $T_{нап}$ – допуск (погрешность) операции нанесения покрытия.

Учитывая специфику работы узлов трения модулей бланкета термоядерного реактора ИТЭР и значительное падение прочностных свойств плазменных покрытий с увеличением их толщины в дальнейших расчетах был принят коэффициент запаса – $[n]=1,1$.

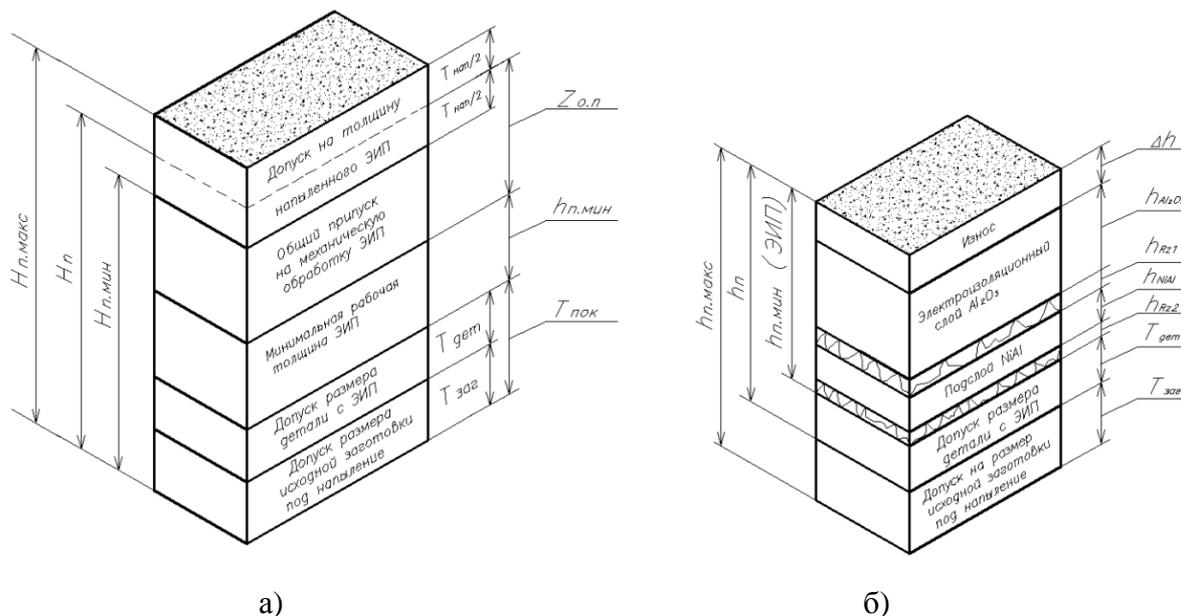


Рисунок 1 – Конструкция ЭИП– Al_2O_3 деталей узлов трения термоядерных реакторов до (а) и после (б) механической обработки

Представлен пример решения задачи по определению величины падения электроизоляционных свойств (удельная объемная проводимость ρ_v) плазменного покрытия Al_2O_3 в условиях смешанного γ -нейтронного облучения модулей бланкета ИТЭР ($P_\gamma = 2,3 \cdot 10^3$ Р/с, $D_n=0,15-0,50$ сна) при повышенных и высоких температурах ($T=250-400$ °С).

Основываясь на результатах ранее проведенных реакторных испытаний плазменного покрытия Al_2O_3 в исследовательском реакторе бассейного типа РБТ-6 была рассчитана скорость набора дозы радиационного повреждения для данного материала – $N_D=1,87 \cdot 10^{-7}$ сна/с. Что позволило определить величину дозы повреждения $D_n=0,77$ сна за время облучения $\tau=4,1 \cdot 10^6$ с при набранном флюенсе $\Phi=3,2 \cdot 10^{20}$ см⁻² ($1сна=4 \cdot 10^{20}$ см⁻²). Таким

образом, максимальная доза радиационного повреждения $D_n=0,5$ сна ЭИП– Al_2O_3 модулей blankets соответствует флюенсу $\Phi=3,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$.

Поскольку значение флюенса не превышает величину 10^{21} см^{-2} , для определения проводимости $\sigma_v(\rho_v^{-1})$ керамики могут быть использованы стандартные уравнения:

для спеченной поликристаллической керамики Al_2O_3

$$\sigma_v = 5,85 \cdot 10^{-2} \exp\left(-1,24 \cdot \frac{10^4}{T}\right) + 2,94 \cdot 10^{-20} P_\gamma T^{3/2}, \quad (3)$$

для плазменного керамического покрытия Al_2O_3

$$\sigma_v = 1,30 \cdot 10^{-8} P_\gamma^{1,2} \exp\left(-\frac{0,7}{kT}\right), \quad (4)$$

где P_γ – мощность дозы γ -излучения, Р/с; T – температура облучения, К; k – постоянная Больцмана, $8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

Проведенные расчеты по уравнениям (3)–(4) позволили установить, что в наиболее жестких условиях эксплуатации ЭИП– Al_2O_3 деталей первой стенки модулей blankets ИТЭР ($P_\gamma=2,3 \cdot 10^3$ Р/с, $T=673$ К, $D_n=0,5$ сна) проводимость керамики не превысит значение $\sigma_v=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ (спеченная – $\sigma_{v1}=5,8 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, плазменная $\sigma_{v2}=8,1 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$).

Для оценки влияния механических свойств исследуемых плазменных покрытий на их триботехнические характеристики при трении скольжения в паре со сталью 316L(N)-IG и бронзой БрАЖНМц9-4-4-1 определялись средние значения микротвердости H_μ , твердости по Виккерсу HV , модуля упругости E и вязкости разрушения K_{IC} (Таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительная таблица механических свойств материалов пар трения

Материалы пары трения	$HV_{0,3}$, ГПа	$HV_{0,5}^*$, ГПа	$HV_{0,5}$, ГПа	HV_1 , ГПа	HV_5 , ГПа	E , ГПа	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
Материал покрытия							
Al_2O_3	7,1±1,2	-	7,5±0,6	7,3±1,1	6,4±0,6	131±35	2,69±0,44
Al_2O_3 –13%TiO ₂	-	-	5,8±0,6	-	-	106±28	1,74±0,17
Al_2O_3 –40%TiO ₂	-	4,9±0,4	5,2±0,4	4,6±0,5	4,4±0,4	123±25	1,14±0,43
Cr ₂ O ₃	-	10,0±0,2	9,1±0,9	6,9±0,9	6,5±0,4	187±14	-
MgAl ₂ O ₄	4,8±0,7	-	4,3±0,4	-	-	99±12	-
ZrO ₂ –Y ₂ O ₃	-	-	2,6±0,5	-	-	63±9	-
Материал контролбразца							
316L(N)-IG	1,8±0,5	1,8±0,2	1,9±0,4	-	-	140±18	-
БрАЖНМц 9-4-4-1	2,2±0,6	2,1±0,9	2,3±0,3	-	-	79±6	-

Примечание – * (микротвердость, вычисленная по длине диагонали отпечатка).

Результаты исследования структурных особенностей ЭИП– Al_2O_3 на продольных и поперечных шлифах представлены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2 поверхность керамического покрытия характеризуется высокой пористостью, слоистостью, неоднородностью структуры, на границе «покрытие–основа» участки отслоения не обнаружены. Большое количество темных пятен (вырывы), образующиеся при подготовке шлифов, свидетельствуют о низкой когезионной прочности как отдельных частиц, так и конгломерированных участков покрытия.

С целью установления физической картины трения и изнашивания керамического покрытия Al_2O_3 в паре со сталью 316L(N)-IG и бронзой БрАЖНМц9-4-4-1, а также определения математических моделей интенсивности изнашивания I_h , коэффициента трения

скольжения f были проведены следующие триботехнические испытания по схемам торцевого трения: полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 на двух уровнях с добавлением экспериментов в нулевых точках ($p_a=3,5-7,0$ МПа, $v=0,6-6,0$ мм/мин, $T=20-250$ °С) при возвратно-поступательном движении, высокотемпературные испытания ($T=20-400$ °С, $p_a=7,0$ МПа, $v=6$ мм/мин) при вращательном движении.

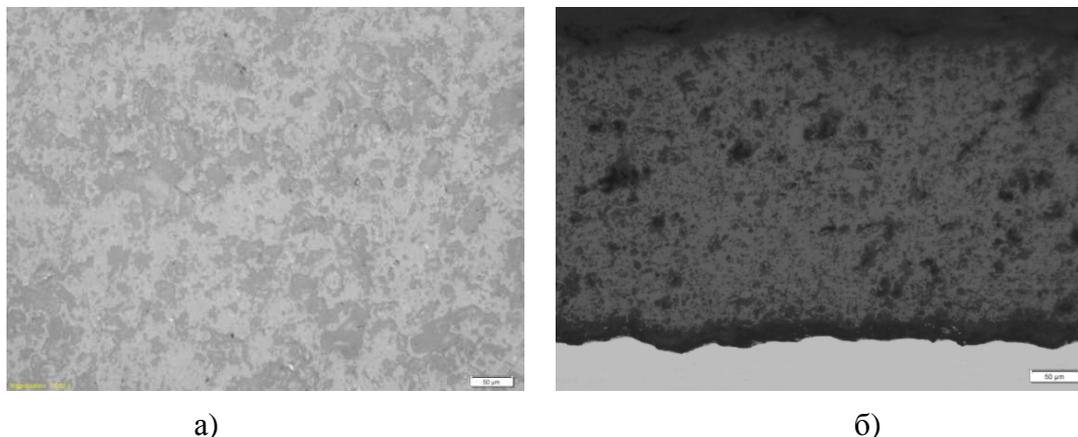


Рисунок 2 – Микрофотографии ($\times 200$) продольного (а) и поперечного (б) шлифов плазменного покрытия Al_2O_3 , нанесенного без подслоя

По результатам ПФЭ были установлены диапазоны изменения коэффициента трения, интенсивности изнашивания, линейного износа (Рисунки 3, 4); определены эмпирические коэффициенты уравнений регрессий:

ЭИП–316L(N)-IG

$$f = 0,896 - 0,057p_a - 0,95 \cdot 10^{-2}v - 0,28 \cdot 10^{-3}T + 0,16 \cdot 10^{-2}p_av + 0,83 \cdot 10^{-4}p_aT + 0,14 \cdot 10^{-3}vT - 0,13 \cdot 10^{-4}p_avT, \quad (5)$$

$$I_h = 1,2 \cdot 10^{-6}v^{-0,35}T^{-0,19}e^{0,27 \ln(p_a) \ln(T)} e^{0,11 \ln(v) \ln(T)}, \quad (6)$$

ЭИП–БрАЖНМц9-4-4-1

$$f = 0,801 - 0,058p_a - 0,042v - 0,001T + 0,39 \cdot 10^{-2}p_av + 0,17 \cdot 10^{-3}p_aT + 0,71 \cdot 10^{-4}vT, \quad (7)$$

$$\Delta h = 2,15p_a - 0,04T - 0,37p_av - 0,006p_aT - 0,005vT + 0,24 \cdot 10^{-2}p_avT. \quad (8)$$

Результаты проведенных расчетов показали адекватность полученных регрессионных зависимостей (уравнения (5)–(8)), коэффициент детерминации составил $RI=0,80-0,98$. Максимальные значения коэффициента трения составили: в паре с бронзой $f_{max}=0,57 \pm 0,01$ (Рисунок 3а), в паре со сталью – $f_{max}=0,82 \pm 0,01$ (Рисунок 3б).

В процессе приработки ЭИП–БрАЖНМц9-4-4-1 происходил постепенный переход от контакта керамика–бронза к контакту бронза–бронза за счет формирования слоя переноса из продуктов износа бронзового пальчикового контробразца на поверхности трения ЭИП. При испытаниях в паре со сталью отмечалось неравномерное распределение слоя переноса металла на поверхности керамики по сравнению с испытаниями по бронзе, что, в конечном счете, сказывается на высоком значении коэффициента трения $f=(0,51 \pm 0,01)-(0,82 \pm 0,01)$.

Максимальные значения интенсивности изнашивания ЭИП $I_{hmax}=(1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$ в паре со сталью и приращения толщины $\Delta h_{max}=(8,19 \pm 1,3)$ мкм в паре с бронзой были отмечены при температуре $T=250$ °С (Рисунки 4а, 4б). Увеличение толщины покрытия также было зафиксировано при высокотемпературных испытаниях на фоне роста коэффициента трения скольжения (Рисунки 5а, 5б). В процессе приработки ЭИП с бронзовыми и стальными

Проведенные триботехнические испытания позволили выявить механизм изнашивания ЭИП–Al₂O₃ в паре с металлами, представляющий собой многостадийный процесс: выкрашивание отдельных частиц и конгломерированных участков покрытия, попадание и движение в зоне трения продуктов износа, внедрение абразивных частиц покрытия в менее твердые поверхностные слои металла. Масштаб фрикционного разрушения покрытия определяется количеством и твердостью отделившихся частиц в зоне трения (Рисунок б).

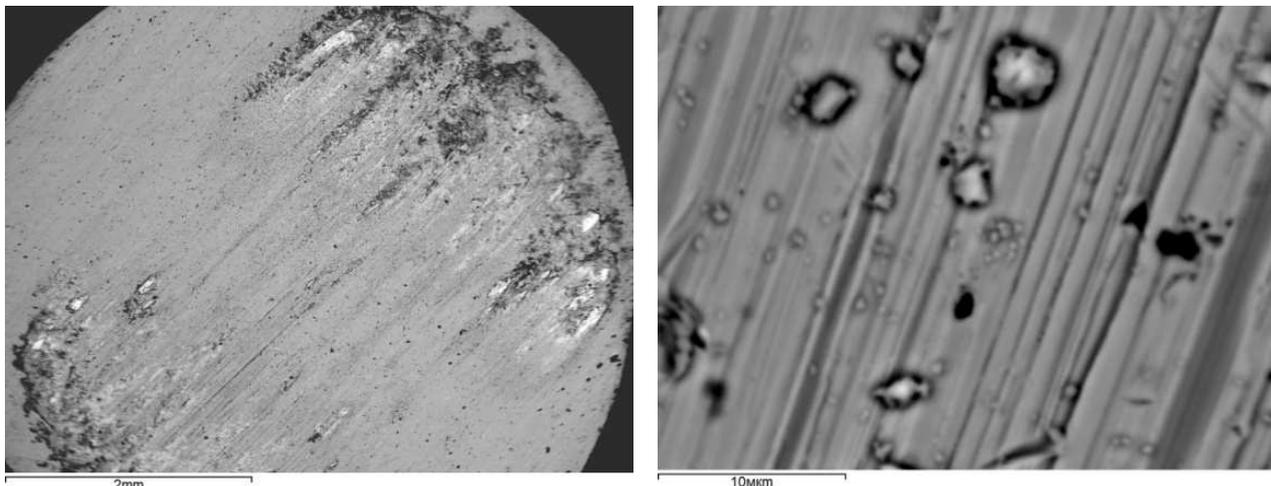


Рисунок б – Микрофотографии поверхности трения стального пальца в паре с ЭИП–Al₂O₃

Наряду с абразивным изнашиванием трущихся тел (ЭИП, сталь, бронза), триботехнические испытания выявили усталостное изнашивание ЭИП, вызванное многократным воздействием сил трения. Учитывая слоистую структуру плазменных ЭИП и механизм «сваривания» отдельных частиц при напылении, отделение (сдвиг) фрагментов покрытия в окрестностях пятен контакта наступает при достижении эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ предельных значений прочности сцепления на сдвиг при сжатии частиц $\tau_{\text{сд}}^{FN}$. Ввиду сложности измерения на практике механических свойств отдельных частиц покрытия в математической модели интенсивности изнашивания может быть использован параметр адгезионной/когезионной прочности покрытия на сдвиг при сжатии. На величину износа ЭИП значительное влияние оказывают такие параметры поверхности, как шероховатость Ra , микротвердость H_{μ} , вязкость разрушения K_{IC} .

На основе теоретико-инвариантного метода и в соответствии с разработанной физической моделью изнашивания ЭИП в паре со сплавами, уравнение для расчета линейной интенсивности изнашивания имеет следующий вид:

$$I_h = \alpha \left(f \frac{p_a H_{\mu_1}}{E' H_{\mu_2}} \right)^a \left(\frac{\tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{сд}}^{FN}} \right)^b \left(\frac{H_{\mu_2} \sqrt{Ra}}{K_{IC}} \right)^c \left(\frac{R_0 T}{E_a} \right)^d, \quad (9)$$

где α, a, b, c, d – эмпирические коэффициенты; p_a – номинальное давление, МПа; H_{μ_1} – микротвердость металла, МПа; H_{μ_2} – микротвердость керамического покрытия, МПа; E' – приведенный модуль упругости материалов, МПа; $\tau_{\text{пр}}$ – приведенные касательные напряжения, МПа; $\tau_{\text{сд}}^{FN}$ – прочность сцепления керамического покрытия на сдвиг при сжатии, МПа; Ra – шероховатость поверхности керамического покрытия, м; K_{IC} – вязкость разрушения керамического покрытия, МПа·м^{1/2}; R_0 – универсальная газовая постоянная,

Дж/(моль·К); T – температура, К; E_a – энергия активации распада межатомных связей керамического покрытия, Дж/моль.

Для практического применения уравнения (9) приведенные касательные напряжения и прочность сцепления ЭИП на сдвиг при сжатии могут быть рассчитаны:

$$\tau_{\text{пр}} = k_f f p_a, \quad (10)$$

$$\tau_{\text{сд}}^{F_N} = 70,7 + 1,5 p_a, \quad (11)$$

где $k_f \approx 3,02$ (при $f=0,32-0,82$ пары ЭИП–металл).

Принимая во внимание абразивный тип изнашивания пар ЭИП–металл, зависимость коэффициента трения скольжения может быть выражена уравнением с безразмерным обобщенным фактором (показатель экспоненты):

$$f = b_0 \frac{p_a^{b_1} T^{b_2}}{v^{b_3}} \exp\left(\frac{H_\mu Ra}{K_{IC} E' R_{\text{пр}}}\right), \quad (12)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 – эмпирические коэффициенты; p_a – номинальное давление, МПа; T – температура, °С; v – скорость скольжения, м/с; H_μ – микротвердость керамического покрытия, МПа; Ra – шероховатость более твердого материала, м; K_{IC} – вязкость разрушения более хрупкого материала, МПа·м^{1/2}; $R_{\text{пр}}$ – приведенное значение шероховатости поверхностей материалов, м.

Подстановка результатов триботехнических испытаний пар трения ЭИП–металл в уравнения (9), (12) позволила определить эмпирические коэффициенты уравнений:

ЭИП–316L(N)-IG, по результатам ПФЭ и высокотемпературных испытаний

$$f = 1,16 \frac{p_a^{-0,35} T^{0,05}}{v^{-0,03}} \exp\left(\frac{H_\mu Ra}{K_{IC} E' R_{\text{пр}}}\right) \quad (13)$$

$$I_h = 1,03 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{сд}}^{F_N}}\right)^{2,98} \left(\frac{H_{\mu 2} \sqrt{Ra}}{K_{IC}}\right)^{4,05} \left(\frac{R_0 T}{E_a}\right)^{0,89}, \quad (14)$$

ЭИП–БрАЖНМц9-4-4-1, по результатам ПФЭ

$$f = 0,26 \frac{(p_a T)^{-0,26} T^{0,27}}{v^{0,07}} \exp\left(\frac{H_\mu Ra}{K_{IC} E' R_{\text{пр}}}\right), \quad (15)$$

ЭИП–БрАЖНМц9-4-4-1, по результатам высокотемпературных испытаний

$$f = -12,9 + 11,5 \frac{(p_a T)^{0,006} T^{0,001}}{v^{0,002}} \exp\left(\frac{H_\mu Ra}{K_{IC} E' R_{\text{пр}}}\right). \quad (16)$$

Высокие значения коэффициента детерминации $RI=0,76-0,96$ уравнений (13)–(16) говорят об адекватности полученных математических зависимостей интенсивности изнашивания и коэффициента трения.

Проведенные расчеты интенсивности изнашивания I_h ЭИП в паре со сталью по уравнению (14) в рабочих диапазонах изменения контактного давления $p_a=3-500$ МПа и температуры $T=293-673$ К деталей с ЭИП модулей blankets выявили «катастрофический» износ покрытия ($I_h=5,8 \cdot 10^{-2}$ при $p_a=500$ МПа, $T=673$ К, $f=0,82$) и вероятность полной потери электроизоляции изделия во время эксплуатации реактора.

По результатам проведенных в работе экспериментальных исследований физико-механических свойств плазменного ЭИП–Al₂O₃ и разработанному методу расчета толщин газотермических ЭИП деталей узлов трения термоядерных реакторов были определены

толщины электроизоляционного слоя $h_{Al_2O_3}=0,010-0,170$ мм и рабочего слоя $h_{п.мин}=0,191-0,341$ мм для существующих в настоящее время типов деталей с ЭИП модулей бланкета ИТЭР в паре со сталью 316L(N)-IG.

В четвертой главе приведена разработанная методика оценки критического уровня сдвиговых напряжений в парах ЭИП–металл тяжело нагруженных узлов трения термоядерных реакторов.

Вследствие циклического характера работы тяжело нагруженных узлов трения с ЭИП были проведены триботехнические испытания по влиянию «стоп-эффекта» на коэффициент трения при страгивании после остановки до периода приработки (Рисунок 7). Установлено скачкообразное возрастание коэффициента трения при страгивании после остановки приработанных пар ЭИП–металл, которое превышало в 1,1–1,5 раза значения f установившегося режима трения. Рост коэффициента трения в процессе приработки пар был обусловлен хрупким выкрашиванием частиц ЭИП, которые шаржировались в поверхностные слои металлических пальцев, вызывая усиление абразивного изнашивания Al_2O_3 .

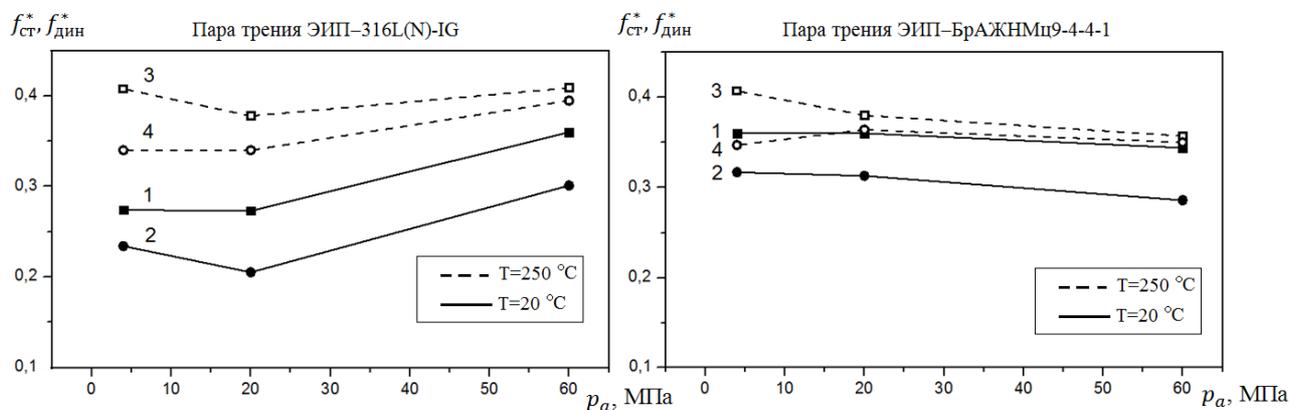


Рисунок 7 – Зависимость коэффициентов трения неприработанных пар ЭИП–316L(N)-IG (а), ЭИП–БрАЖНМц9-4-4-1 (б) от контактного давления p_a ($L_{тр}=5$ мм):

1, 3 – статический коэффициент трения $f_{ст}^*$; 2, 4 – динамический коэффициент трения $f_{дин}^*$

Для определения критического уровня сдвиговых напряжений $[\tau]$ («условного предельного состояния») и допустимых значений коэффициента трения $[f]$ в тяжело нагруженных узлах трения термоядерной техники необходимо провести сравнение возникающих тангенциальных сил трения при перемещениях деталей с несущей способностью покрытия.

Напряженно-деформированное состояние системы «покрытие–подложка» при испытаниях на сдвиг при сжатии характеризуется неравномерностью нагружения ЭИП вдоль ширины покрытия – l (Рисунок 8).

Значения прочности сцепления, рассчитанное по формуле $\tau_{сд} = F_{сд}/A_{сд}$ ($F_{сд}$ – сдвигающая сила; $A_{сд}$ – площадь сдвига) являются заниженными, поскольку материал покрытия со стороны приложения нагрузки испытывает максимальное напряжение сжатия, в то время как свободный торец испытывает незначительное нагружение ($\sigma_x \approx 0$). Неравномерность распределения касательных напряжений по ширине покрытия может быть учтена с помощью коэффициента концентраций напряжений $K_\tau - \tau'_{сд} = K_\tau (F_{сд}/A_{сд})$.

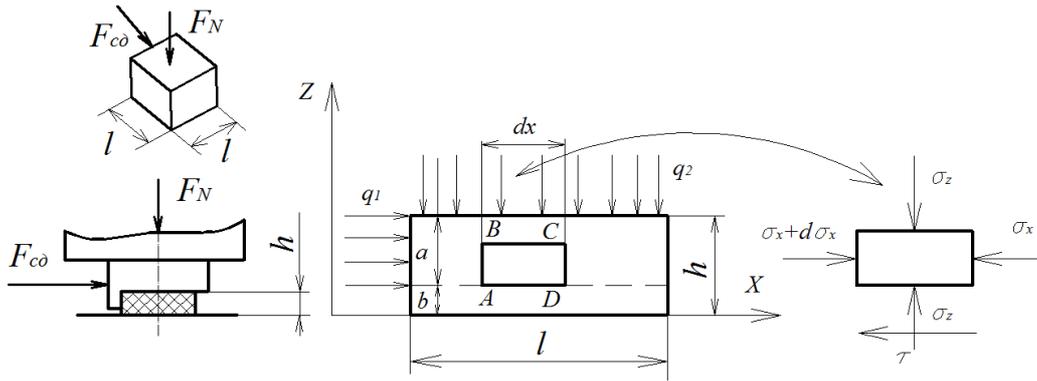


Рисунок 8 – Схема нагружения дискретного ЭИП–Al₂O₃ при экспериментальном определении прочности сцепления на сдвиг при сжатии

Дифференциальное уравнение напряженного состояния (функция распределения касательных напряжений по ширине) дискретного покрытия для плоского образца имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - k^2 u = 0, \quad (17)$$

где u – перемещение верхнего участка покрытия; $k^2 = \frac{G}{abE}$; E, G – модули упругости первого и второго рода; a, b – толщины слоя ЭИП (Рисунок 8).

Решение дифференциального уравнения (17) при граничных условиях – $\sigma_x = -q_1$ ($x=0$), $\sigma_x = 0$ ($x=l$) позволяет установить математические зависимости распределения касательных напряжений по ширине покрытия ($\tau = G \frac{u}{b}$):

$$\tau = \frac{Gq_1(e^{-kx} + e^{-2kl}e^{kx})}{bEk(1 - e^{-2kl})}. \quad (18)$$

Предполагая, что максимальные касательные напряжения τ_{max} есть действительное значение прочности сцепления на сдвиг при сжатии ($x = 0$), определим K_τ для дискретного плазменного покрытия ЭИП–Al₂O₃:

$$\tau'_{cd} = \tau_{max} = \frac{GF_{cd}(1 + e^{-2kl})}{albEk(1 - e^{-2kl})} = K_\tau \frac{F_{cd}}{l^2}, \quad (19)$$

$$K_\tau = \frac{Gl(1 + e^{-2kl})}{abEk(1 - e^{-2kl})} = 4,68, \quad (20)$$

где $E=131$ ГПа, $G=13,76$ ГПа, $a=0,2$ мм, $b=0,15$ мм, $l=2,5$ мм.

Прочность сцепления на сдвиг ЭИП–Al₂O₃ в условиях отсутствия сжимающей нагрузки составила: $\tau_{cd} = F_{cd}/l^2 = 15,1$ МПа – без учета неравномерности нагружения; $\tau'_{cd}=70,7$ МПа – с учетом неравномерности нагружения.

При испытаниях ЭИП на сдвиг в условиях осевого нагружения возникают силы трения на границе разрушения покрытия, поэтому для оценки прочности сцепления необходимо применять уравнение, в котором учитывались бы возникающие тангенциальные силы. Анализ изменения результатов экспериментальных данных ЭИП–Al₂O₃ (Рисунок 9) показывает, что прочность сцепления на сдвиг при сжатии может быть представлена линейной зависимостью:

$$\tau'' = \tau'_{cd} \frac{F_N}{F_{cd}} = \tau'_{cd} + \mu_{cd} \sigma, \quad (21)$$

$$\tau_{сд}^{FN} = 70,7 + 1,5\sigma, \quad (22)$$

где $\mu_{сд}$ – коэффициент трения при сдвиге покрытия; $\sigma = p_a$ – сжимающие напряжения.

Следует отметить, что при вычислении прочности сцепления $\tau_{сд}^{FN}$, неравномерность действия сжимающих напряжений учитывалась величиной $\xi=55,6$ МПа ($\tau = \frac{F_{сд}}{A_{сд}} + \xi$). Полученное уравнение (22) предположительно справедливо в условиях действия сжимающих напряжений, не превышающих предел прочности при сжатии покрытия – $\sigma < (\sigma_T \approx \sigma_{вс})$.

Большая часть деталей с ЭИП модулей бланкета эксплуатируется в условиях одноосного сжатия, при наличии циклически изменяющихся касательных напряжений. Рассматриваемое напряженное состояние ЭИП является упрощенно плоским ($\sigma_2=0$), тогда главные напряжения равны:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + \tau_{пр}^2}. \quad (23)$$

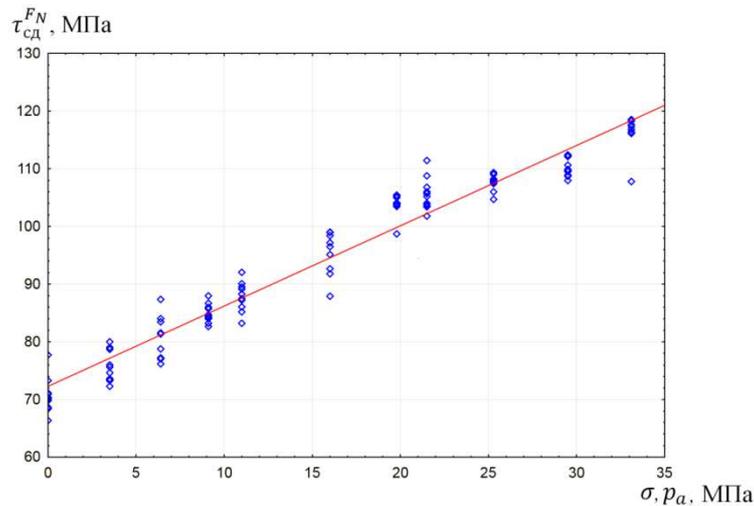


Рисунок 9 – Прочность сцепления на сдвиг при сжатии плазменного покрытия ЭИП–Al₂O₃ толщиной 0,35±0,05 мм в зависимости от сжимающих напряжений

Поскольку существует опасность хрупкого разрушения ЭИП, расчет эквивалентного напряжения $\sigma_{экр}$ производится по теории Мора. При этом прочность сцепления покрытия $\tau_{сд}^{FN}$ должна быть выше предела прочности керамики при сжатии и эквивалентного напряжения, создаваемого совместным действием сжимающих и сдвигающих усилий:

$$\tau_{сд}^{FN} > \sigma_{вс} > \sigma_{экр} = \sigma_1 - k^* \sigma_3, \quad (24)$$

где $k^* = \sigma_{вр} / \sigma_{вс} = 0,54$.

Принимая во внимание циклический характер изменения напряжений в ЭИП деталей модулей бланкета, проверку несущей способности покрытия следует производить путем сопоставления эквивалентного напряжения с допускаемым касательным напряжением $[\tau] = \tau_{сд}^{FN} / n$ при коэффициенте запаса не менее $n=1,2$:

$$\sigma_{экр} \leq [\tau]. \quad (25)$$

Обработка экспериментальных данных позволяет графическим способом определять допускаемое значение коэффициента трения $[f]$ в парах ЭИП–металл при заданных значениях варьирования контактного давления.

Выполненные расчеты по методике оценки критического уровня сдвиговых напряжений, представленной в диссертации, позволили установить допускаемое значение коэффициента трения $[f]=0,28$ тяжело нагруженных узлов трения ЭИП–металл модулей blankets (Рисунок 10). Установленный в работе диапазон изменения коэффициента трения скольжения $f=0,20–0,82$ пар ЭИП–316L(N)-IG, ЭИП–БрАЖНМц9-4-4-1 в условиях торцевого трения без смазки свидетельствует об опасности адгезионного/когезионного разрушения (отрыв/расслаивание) покрытия и потери электрической изоляции изделий модулей blankets при эксплуатации реактора ИТЭР. Поскольку напряжения в ЭИП при перемещениях деталей соизмеримы и превышают прочность сцепления на сдвиг при сжатии, возникает необходимость обеспечения антифрикционных свойств сопряжений с ЭИП узлов трения модулей blankets, что может быть достигнуто за счет снижения коэффициента трения трибопар ЭИП–металл.

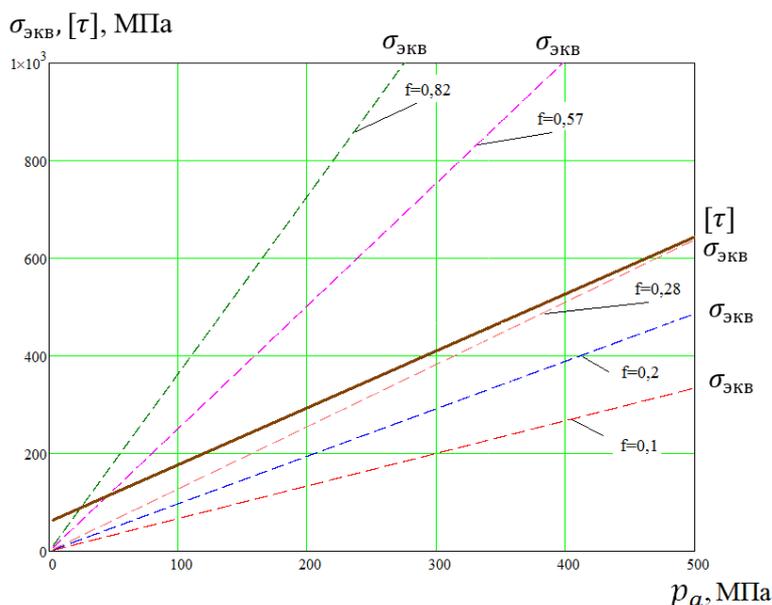


Рисунок 10 – Зависимость эквивалентных напряжений и допускаемого касательного напряжения пар ЭИП–металл модулей blankets ИТЭР от контактного давления

В пятой главе представлены результаты разработки конструкции плазменных ЭИП деталей узлов трения термоядерной техники с повышенными триботехническими свойствами.

Рассмотрены и апробированы на лабораторных стендах выбранные конструкции ЭИП (Рисунок 11), позволяющие эксплуатировать узлы трения с керамическим покрытием в условиях высоких контактных давлений (до 500 МПа), температур (до 400 °С), ионизирующего облучения ($P_\gamma = 2,3 \cdot 10^3$ Р/с, $\Phi = 3,2 \cdot 10^{20}$ см⁻²), в вакууме (до $p_{\text{вак}} = 10^{-6}$ Па) при жестких требованиях к газовыделению (примеси – $\leq 10^{-9}$ м³·Па/с).

С целью выбора оптимальных конструкций ЭИП узлов трения модулей blankets с заданными эксплуатационными характеристиками ($\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq [\tau]$, $f \leq [f]=0,28$, $R \geq 10^{10}$ Ом) были проведены триботехнические испытания при нормальной и повышенной температуре. Способ нанесения дополнительного антифрикционного/износостойкого слоя (Рисунок 11б) методом плазменного напыления ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}13\%\text{TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}40\%\text{TiO}_2$, $\text{ZrO}_2\text{--}8\%\text{Y}_2\text{O}_3$, Cr_2O_3 , $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--}25\%\text{NiCr}$, $\text{Mo--Mo}_2\text{C}$, $\text{Cu--}9,5\%\text{Al--}1\%\text{Fe}$) на ЭИП– Al_2O_3 не обеспечивает предельно допускаемого значения коэффициента трения $[f] \leq 0,28$ в паре со сталью 316L(N)-IG и бронзой БрАЖНМц9-4-4-1 при эксплуатации узлов трения модулей blankets.

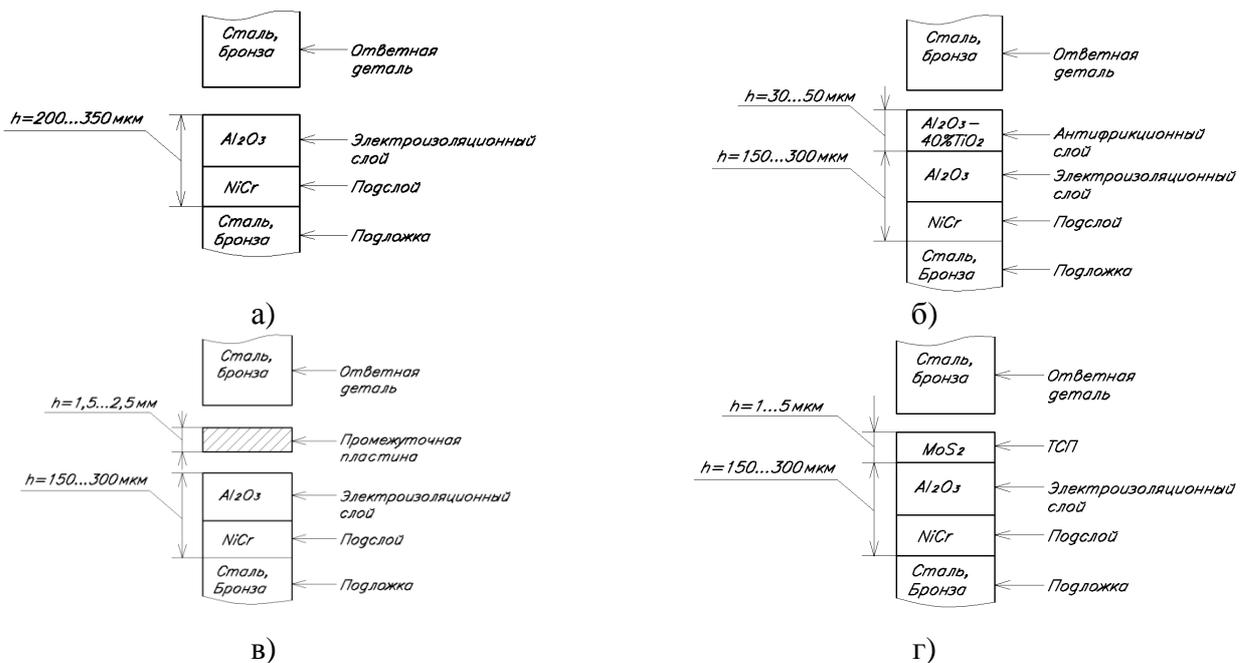


Рисунок 11 – Конструкции ЭИП–Al₂O₃ узлов трения модуля бланкета

Предложено установить между парой ЭИП–металл промежуточную модифицированную пластину из сплава ниобия ВН-2, ВН-3 (Рисунок 11в), что позволяет снизить коэффициент трения до значений $f=0,10-0,17$ ($f < [f]$) при температуре $T=20$ °С (Рисунок 12а). Пластины перед испытаниями проходили термодиффузионную модификацию – ионное карбонитрирование. Высокотемпературные испытания ($T=250$ °С) выявили превышение допустимого значения $[f]=0,28$ при нагрузках более $N \approx 270$ Н (Рисунок 12б), что объясняется деструкцией карбидных и нитридных соединений на воздухе. Поскольку узлы трения модулей бланкета эксплуатируются в вакууме, рассматриваемый метод может быть использован как один из базовых для обеспечения рабочих характеристик узлов трения с ЭИП модулей бланкета.

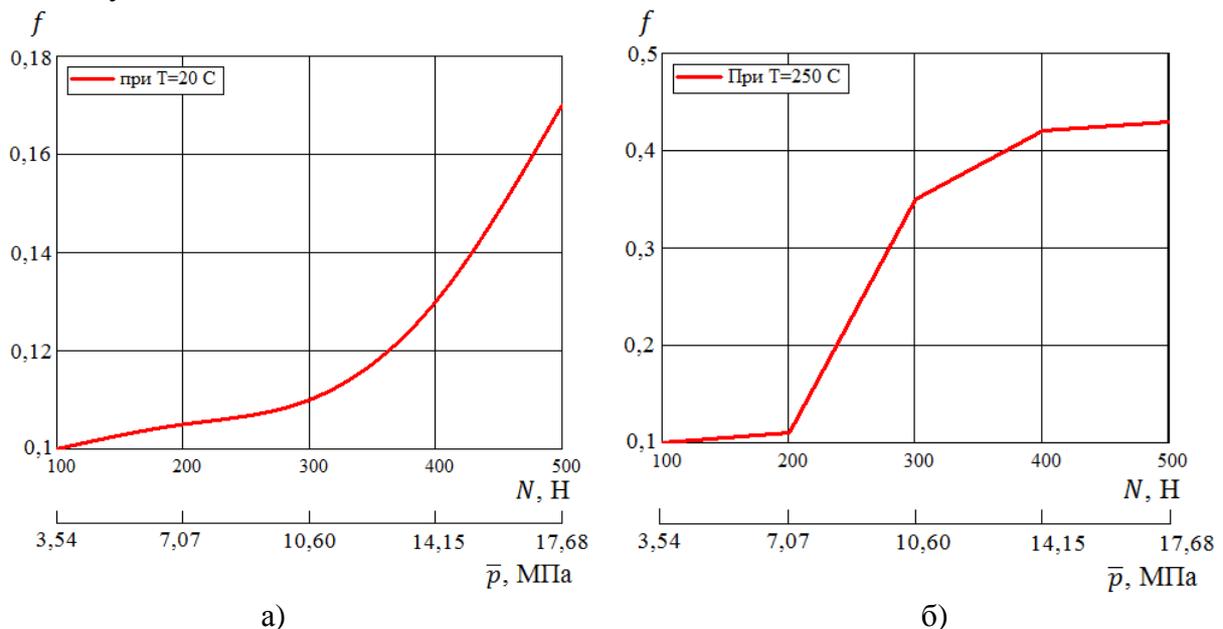


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента трения от нагрузки модифицированной пластины из сплава Nb в паре с ЭИП–Al₂O₃ (палец) при $T=20$ °С (а), $T=250$ °С (б)

Среди известных методов нанесения твердых смазочных покрытий на основе MoS_2 (не содержащие органические связующие вещества) отмечены вакуумно-дуговое напыление (магнетронное, ионно-плазменное в вакууме) и плазменное напыление в динамическом вакууме, как наиболее перспективные способы обеспечения антифрикционных свойств ЭИП в паре со сплавами деталей модулей бланкета (Рисунок 11г).

В приложении представлены промежуточные расчеты, табличные и графические результаты экспериментов и материалы, не вошедшие в основные разделы диссертации.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований:

1. Анализ литературных источников и данных предприятий атомной энергетики показал, что основными материалами для создания радиационностойких ЭИП на изделиях узлов трения термоядерной техники, в том числе и модулей бланкета ИТЭР, являются Al_2O_3 и MgAl_2O_4 .

2. Проведенный анализ существующих методов газотермического напыления тугоплавких оксидных покрытий выявил, что доминирующее положение занимает порошковое плазменное напыление, обеспечивающее минимальное содержание примесей (менее 0,5 %) в формируемом покрытии за счет их выгорания.

3. Разработана методика расчета оптимальных рабочих толщин ЭИП $h_{\text{п.мин}}, h_{\text{п}}, h_{\text{п.макс}}$ деталей узлов трения термоядерных реакторов и толщин покрытия заготовки $H_{\text{п.мин}}, H_{\text{п}}, H_{\text{п.макс}}$, учитывающая влияние радиационного облучения, износ материала покрытия и припуски на механическую обработку, обеспечивающих регламентный срок эксплуатации реактора.

4. Определена максимальная величина падения удельного объемного сопротивления ρ_v ЭИП– Al_2O_3 (не более четырех порядков, $\rho_v=10^9-10^{10}$ Ом·см) деталей модулей бланкета при работе реактора ИТЭР, являющегося исходным параметром для регламентирования оптимальной толщины ЭИП.

5. На основе результатов триботехнических испытаний установлен основной механизм изнашивания ЭИП (Al_2O_3) – абразивный износ, вызванный отделившимися конгломерированными участками покрытия, работающими в роли абразивных частиц, что позволило построить научно-обоснованные модели трения и износа ЭИП.

6. Максимальная интенсивность изнашивания $I_h=2 \cdot 10^{-5}$ ($p_a=7$ МПа, $T=400$ °С) ЭИП и коэффициент трения $f=0,82$ ($P=3,5$ МПа, $T=250$ °С) установлены в паре со сталью 316L(N)-IG при скорости скольжения $v=1 \cdot 10^{-4}$ м/с.

7. Разработаны и экспериментально обоснованы математические модели, позволяющие рассчитывать триботехнические свойства ЭИП– Al_2O_3 , допускаемые касательные напряжения $[\tau]$ в парах трения ЭИП–металл. Установлено превышение допускаемого касательного напряжения $[\tau]$ в ЭИП модулей бланкета при коэффициенте трения более $f=0,28$ в диапазоне эксплуатационных контактных давлений $p_a=3-500$ МПа.

8. Разработаны и экспериментально обоснованы способы снижения касательных напряжений до допустимых значений $[\tau]=64-644$ МПа (при $p_a=3-500$ МПа) в тяжело нагруженных узлах трения модулей бланкета, что позволило повысить надежность ЭИП деталей реактора ИТЭР.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 8 статей, из них 6 из перечня ВАК:

1. Зайцев А.Н., Максимов В.А. Исследование триботехнических характеристик плазменных электроизоляционных покрытий // Вестник МГТУ им.Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2013. №3(92). С. 102–110.
2. Утенков В.М., Зайцев А.Н. Исследование триботехнических характеристик перспективных износостойких плазменных покрытий при трении скольжения без смазки // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". 2013. №11. С. 81–89.
3. Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Зайцев А.Н. Экспериментальное исследование скоростной зависимости триботехнических характеристик некоторых плазменных оксидных покрытий при повышенных температурах // Трение и износ. 2014. №3.Том.35. С. 52–59.
4. Зайцев А.Н., Ягопольский А.Г., Александрова Ю.П. Оценка влияния структуры и химического состава плазменно-напыленных покрытий на их адгезионные и триботехнические свойства // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". 2014. №12. С. 53-62.
5. Зайцев А.Н., Лешуков А.Ю., Дубинин Г.В., Свириденко М.Н., Александрова Ю.П., Сачек Б.Я., Мезрин А.М. Расчет толщин электроизоляционных плазмо-напыленных оксидных покрытий Al_2O_3 в изделиях бланкета ИТЭР // Известия Академии Наук. Энергетика. 2016. №1. С. 79–91.
6. Зайцев А.Н., Стребков Ю.С., Лешуков А.Ю., Иванов В.М., Куксенова Л.И., Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Александрова Ю.П. Оценка критического уровня сдвиговых напряжений в трибопарах Al_2O_3 –металл деталей модулей бланкета ИТЭР // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. №6. С.44–53.

Подписано в печать 20.03.2017. Тираж 100 экз.
Формат 60×84/16. Заказ №6.
Отпечатано в типографии АО «НИКИЭТ»
107140, г. Москва, ул. М. Красносельская, 2/8.
Тел.: +7 (499)263-73-81