

На правах рукописи

ТЕР-АРУТЮНОВ Богдан Григорьевич

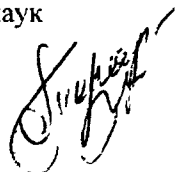
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ
ПОКРЫТИЙ НА ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальности:

01 04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

05.04 12 – «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2005

Диссертация выполнена на кафедре низких температур Московского энергетического института (технического университета)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
РЫЖЕНКОВ Вячеслав Алексеевич

Официальные оппоненты. доктор технических наук, профессор
ФЕДОРОВ Владимир Алексеевич,
доктор технических наук, профессор
ПАНФИЛОВ Юрий Васильевич

Ведущая организация: ФГУП НИИ вакуумной техники
им. С.А. Векшинского

Защита диссертации состоится «25» ноября 2005 года в 10 час 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212 157 04 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: Москва, Красноказарменная ул., дом 17, корп Т, каф инженерной теплофизики МЭИ(ТУ), комн. Т-206.

Отзывы, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., дом 14, Ученый Совет МЭИ(ТУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ(ТУ).

Автореферат разослан «24» октября 2005 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212 157.04, к ф -м н., доцент



В.И. Мика

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ресурс работы элементов энергетического оборудования (ЭЭО) в существенной степени зависит от интенсивности протекания характерных видов износа, таких как каплеударная и кавитационная эрозия, коррозия, абразивный износ, эрозия-коррозия.

В наиболее неблагоприятном положении оказались элементы проточной части паротурбинных установок. Для турбин большой мощности чрезвычайно актуальна проблема каплеударной эрозии и коррозии рабочих лопаток (РЛ) последних влажнопаровых ступеней. Каплеударное разрушение поверхностных слоев металла приводит к значительному снижению срока службы РЛ, реальный ресурс которых в среднем составляет около 50 тыс. ч., что в 2 раза меньше проектного. Абразивный износ твердыми частицами, характерный для сопловых и рабочих лопаток ЦВД и ЦСД, приводит к разрушению материала лопаток и их преждевременной замене. Коррозионным и эрозионным повреждениям также в существенной степени подвержены диски и роторы, корпуса, обоймы, диафрагмы паровых турбин.

На сегодняшний день, накоплен большой опыт борьбы с эрозией и коррозией ЭЭО, но проблема износа в полной мере не решена. Отсутствие универсальных, надежных и недорогих методов борьбы, низкая эффективность существующих методов обуславливает актуальность данной работы.

В последние годы предпринимаются достаточно активные попытки разработки и внедрения в практику способов повышения износостойкости ответственных ЭЭО за счет формирования на рабочих поверхностях защитных износостойких покрытий. Разработано много разновидностей защитных покрытий, однако, большинство из них, оказались неэффективными в энергетике из-за наличия жестких требований, в частности, обеспечения одновременно высокой эрозионной и коррозионной стойкости покрытий без изменения (ухудшения) прочностных свойств конструкционного материала (КМ), защиты всей поверхности изделия и сохранения эффективности покрытий при эксплуатационном уровне напряжений. Наиболее перспективными для решения проблемы износа ЭЭО оказались вакуумные ионно-плазменные покрытия (ИПП). Эффективность таких покрытий в существенной степени зависит от условий их формирования. Актуальность настоящей работы обусловлена в первую очередь недостаточным уровнем знаний о взаимосвязи условий формирования, физико-химических, механических свойств, структурой и эрозионной стойкостью покрытий, отсутствием технологии формирования универсальных износостойких ИПП.

Цель работы.

1. Анализ современного состояния проблемы повреждаемости ЭЭО;
2. Определение теплового режима формирования ИПП в вакууме;
3. Определение влияния условий формирования ИПП в вакууме на их физико-химические свойства,



4. Разработка методики расчета толщины ИПП на поверхностях длинномерных изделий сложной конфигурации;
5. Определение влияния концентрации атомов азота в покрытии TiN на микротвердость, структуру, морфологию поверхностного слоя и эрозионную стойкость конструкционных материалов при каплеударном воздействии;
6. Исследование влияния толщины покрытий на основе титана и нитрида титана на эрозионную стойкость конструкционных сталей;
7. Определение эрозионной стойкости композиционных ИПП, полученных чередованием слоев титана и нитрида титана;
8. Разработка технологических основ формирования износостойких композиционных покрытий на поверхностях элементов энергетического оборудования, эксплуатирующихся в условиях одновременного воздействия повреждающих факторов

Научная новизна.

- Определен тепловой режим процесса формирования ИПП в вакууме;
- Разработана методика расчета толщины ИПП на изделиях сложной конфигурации с целью оптимизации расположения их в вакуумной камере;
- Впервые установлено влияние концентрации атомов азота в покрытии TiN на его микротвердость, структуру, морфологию и эрозионную стойкость при каплеударном воздействии;
- Впервые определено влияние толщины покрытий Ti и TiN на эрозионную стойкость при каплеударном воздействии;
- Впервые показано влияние структуры многослойных ионно-плазменных покрытий с чередующимися слоями Ti и TiN на эрозионную стойкость при каплеударной эрозии.

Методы исследования. Для реализации поставленных в работе задач были применены современные методы исследований и оборудование.

Вакуумные ИПП формировались на установке «TINA900» (производство Германии) Температура образцов измерялась с помощью специально разработанной термопары, работающей в условиях сильных электромагнитных полей и высоких напряжений на изделии

Микроструктура и механические свойства покрытий исследовались с использованием оптического инвертированного микроскопа отраженного света Axiovert 25 CA фирмы «Carl Zeiss» с микротвердомерной приставкой MHT-10 для измерения микротвёрдости по Виккерсу Морфологические особенности покрытий изучались на РЭМ BS-300 TESLA и атомно-силовом SOLVER PRO микроскопах

Толщина покрытий определялась с использованием металлографических шлифов, а также с помощью толщиномера MiniTest 2100

Исследования химического состава покрытий осуществлялись с использованием атомно-эмиссионного спектрометра тлеющего разряда SA-2000 фирмы "LECO", позволяющем измерять концентрацию элементов от поверхности вглубь образца

Для определения особенностей кристаллического строения покрытий использовался универсальный просвечивающий микроскоп УЭМВ-100К.

Эрозионная стойкость защитных покрытий исследовалась на уникальном эрозионном стенде роторного типа «Эрозия» МЭИ(ТУ).

Практическая значимость и реализация результатов работы.

Разработаны технологические основы формирования защитных ИПП, позволяющих существенно повысить износостойкость КМ энергетического оборудования и способных противостоять каплеударной эрозии и коррозии.

Разработанные многослойные износостойкие покрытия были сформированы на опытных партиях эксплуатирующихся в настоящее время РЛ турбин мощностью 60, 130, 135 и 250 МВт, а также элементов запорной и регулирующей арматуры.

Достоверность и обоснованность результатов. Экспериментальные исследования осуществлены с применением аттестованных измерительных устройств и апробированных методик измерения. Достоверность результатов подтверждена повторяемостью значений толщины, химического состава, микротвердости и эрозионной стойкости покрытий при каплеударном воздействии.

Произведена оценка систематической и случайной погрешности измеряемых физических величин. Для интерпретации результатов рассчитана случайная погрешность прямых измерений потери массы с образцов при каплеударной эрозии, толщины, микротвердости покрытий. Кроме того, осуществлена оценка погрешности косвенных измерений площади эродированной поверхности, средней глубины эрозионного износа, массы воды, выпавшей на единицу поверхности образца, длительности инкубационного периода, скорости соударения, определена методическая погрешность измерения температуры поверхности конденсации.

Кривые кинетики эрозионного износа стали 20Х13 с покрытиями, определенные в результате исследований, имели явно выраженные характерные для большинства конструкционных материалов периоды эрозионного износа.

Личный вклад автора. Автором были поставлены цели и задачи исследований, для решения которых, в составе научно-исследовательской группы, было осуществлено формирование ИПП и определены их физико-химические, механические и функциональные свойства. Непосредственно автором был модернизирован экспериментальный стенд для определения эрозионной стойкости материалов и покрытий, осуществлены экспериментальные исследования эрозионной стойкости покрытий. Автором разработана методика расчета распределения толщины покрытий по поверхности длинномерных изделий сложной конфигурации и подходы к оптимизации расположения их в вакуумной камере. При участии автора были осуществлены натурные испытания разработанных в работе многослойных покрытий.

Апробация работы. Основные результаты настоящей работы докладывались на следующих научно-технических конференциях,

симпозиумах и семинарах: IX, X междунар. студ. школа-семинар «Новые информационные технологии» (г. Судак), IX, XI науч.-тех. конф. «Вакуумная наука и техника» (г. Судак), XIII, XIV Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (г. Черноголовка), IX, XI междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (г. Москва), VI междунар. науч.-практ. конф. «Энергопотребление и энергосбережение проблемы, решения» (г. Пермь), VI междунар. практ. конф.-выставка «Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций» (г. Санкт-Петербург), XX Российская конф. по электронной микроскопии (г. Черноголовка).

Публикации. Основные результаты научных исследований изложены в 12 публикациях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, изложена на 187 страницах машинописного текста, содержит 87 рисунков, 15 таблиц и библиографию из 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы износа ЭЭО, показана перспективность применения вакуумных ИПП для решения данной проблемы. Сформулированы цели, задачи, основные положения работы

Диссертационная работа посвящена изучению взаимосвязи условий формирования ИПП в вакууме, температуры конденсации ИПП, их толщины, состава, структуры, морфологии, микротвердости и эрозионной стойкости при высокоскоростном каплеударном воздействии.

В первой главе проведен анализ современного состояния проблемы повреждаемости ЭЭО, износ которого по современным представлениям понимается как сложный процесс разрушения поверхностных слоев КМ под действием ударов капель, струек, твердых частиц, транспортируемых паром и влажнопаровым потоком.

Различным видам износа подвержены элементы всего теплотехнического оборудования электрических станций. Практически все виды износа имеют место в турбинах, элементы проточной части которых подвергаются эрозионному, эрозионно-коррозионному и различным видам коррозионного воздействия. Анализ публикаций и опыта эксплуатации теплотехнического оборудования ТЭС и АЭС показывает, что с определенной степенью условности применительно к турбинам можно выделить следующие наиболее существенные виды износа конструкционных материалов: коррозия (различные формы), каплеударная эрозия, абразивная эрозия, эрозия-коррозия, коррозионное растрескивание металла под напряжением.

Наиболее нагруженными с точки зрения каплеударного разрушения оказались РЛ последних ступеней мощных паровых турбин. Традиционно применяемые лопаточные стали (20X13-Ш, 15X11МФ-Ш, ЭП291, 12X13-Ш)

не обладают достаточной стойкостью к воздействию каплеударной эрозии, поэтому проблема повреждаемости РЛ турбин весьма актуальна.

Анализ литературы показал, что разработанные методы борьбы с эрозией РЛ и прочих ЭЭО не решают проблему в целом. Так, например, наиболее распространенный способ - приварка или припайка стеллитовых пластин, для защиты входных кромок РЛ от каплеударной эрозии обладает рядом существенных недостатков: стеллитовые пластины могут отделяться от поверхности лопаток в местах припайки. В случае их отрыва, износ лопаток происходит в 2-4 раза быстрее и, тем самым, обуславливает их преждевременную замену, а также приводит к повреждениям трубок конденсатора и аварийным остановам турбин.

Наиболее перспективным методом повышения износостойкости ЭЭО является применение вакуумных ИПП на основе TiN и других нитридов, карбидов и карбонитридов тугоплавких металлов. Для разработки технологии нанесения таких покрытий необходимо исследование влияния условий их формирования на функциональные свойства. В этой связи, особого внимания заслуживают известные автору работы Барвинка В.А., Бяковой А.В., Будилова В.В., Смыслова А.М., Филиппова Л.М., Мареев А.Р., Мрочек Ж.А., Рыженкова В.А., Картмазова Г.Н., Семенова А.П. и других авторов. Исследования, проводимые ими, свидетельствуют о существенном влиянии условий формирования ИПП на их толщину, состав, структуру и служебные свойства. Так, например, температура формирования (Т) и давление реактивных газов (Р), потенциал смещения на изделии ($U_{св}$) существенно влияют на структуру вакуумных конденсаторов на основе TiN. Условия формирования и физико-химические свойства сверхтвердых ИПП влияют на остаточные внутренние напряжения в покрытии, при снижении которых может уменьшаться твердость покрытий и их износостойкость. Например, в результате исследований кавитационной стойкости покрытий системы (Ti, Cr, Nb)-С, абразивной стойкости нестехиометрических покрытий TiN было показано существенное влияние атомарной концентрации и толщины покрытий на служебные свойства.

Показана перспективность применения различных многослойных ИПП, известны, например, антиэрозионные покрытия с чередующимися слоями W и WC. Исследования, проводимые в МЭИ(ТУ) вакуумных ИПП показали перспективность многослойных покрытий системы Ti-TiN, способных одновременно противостоять каплеударной эрозии и коррозии.

Анализ предыдущих исследований показал недостаточный уровень знаний о влиянии физико-химических, механических свойств ИПП TiN и композиционных покрытий с чередующимися слоями Ti и TiN на эрозионную стойкость при каплеударном воздействии. На основании проведенного анализа были поставлены цели и задачи исследований.

Во второй главе приводится описание экспериментального оборудования и методик проведения исследований.

Приведена методика формирования ИПП. В установке реализован метод электродугового испарения в вакууме. Процесс формирования ИПП состоит

из трёх стадий: нагрев изделия электронным ударом, ионная очистка поверхности и непосредственно формирование покрытия.

Приведена методика проведения эрозионных испытаний на каплеударном стенде «Эрозия» МЭИ(ТУ), которая включает в себя методику сравнительных экспресс-испытаний и методику проведения испытаний с целью получения кинетических кривых эрозионного износа. Осуществлена модернизация генератора капель с целью получения более стабильных характеристик монодисперсного капельного потока.

В третьей главе определен диапазон температур формирования покрытий TiN, при котором достигается высокая эрозионная стойкость КМ при неизменности прочностных характеристик подложки. Для обеспечения данного условия был определен тепловой режим процесса формирования ИПП. На основе моделирования осаждения покрытий в вакууме разработана методика расчета толщины покрытий на поверхностях длинномерных изделий сложной конфигурации.

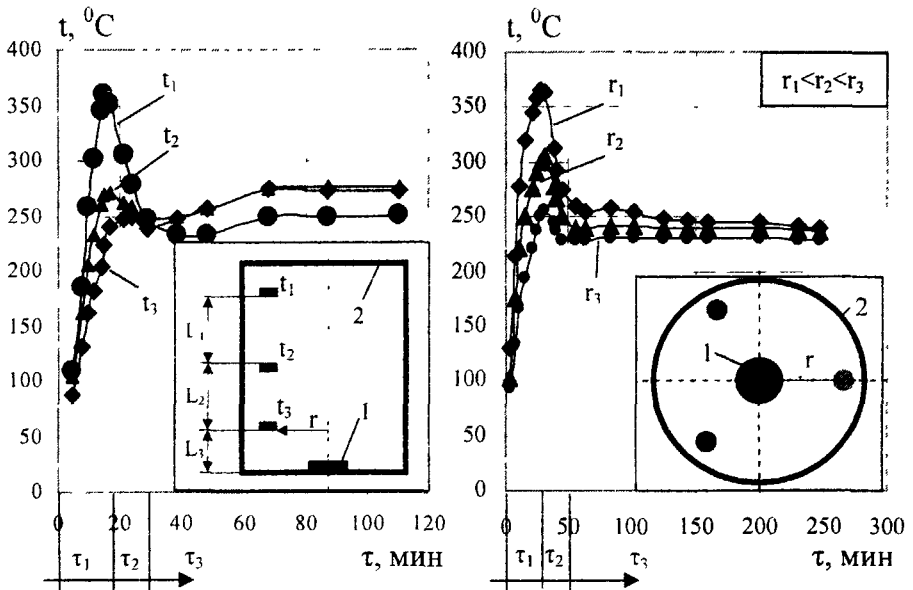


Рис 1 Изменение температуры образцов в процессе формирования покрытия при их различном расположении в вакуумной камере 1-испаритель, 2-вакуумная камера, τ_1 - электронный нагрев; τ_2 -ионная очистка, τ_3 -формирование покрытия, r - расстояние между образцом и осью вакуумной камеры

Показано, что при формировании покрытий электродуговым испарением на установке с сосредоточенным источником имеет место существенная неравномерность температуры поверхности конденсации на начальных стадиях процесса и распределения толщины ИПП на изделии. На рис 1 приведена зависимость температуры поверхности конденсации от

времени и ее пространственного расположения в вакуумной камере установки. Существенная неравномерность температур образцов наблюдается на стадиях электронного нагрева и ионной очистки. В процессе формирования ИПП температура образцов отличается незначительно и находится в диапазоне 240-280° С. В результате теплофизических исследований, было показано, что возможности варьирования температурой формирования ИПП на длинномерных изделиях в условиях установки с сосредоточенным источником крайне ограничены.

Проведены исследования эрозионной стойкости ИПП, показано, что высокая эрозионная стойкость ИПП обеспечивается при температурах осаждения не менее 330°С, а верхняя граница температурного диапазона ограничена значением 500°С, обусловленная требованием неизменности структуры и механических свойств КМ.

Одним из важнейших параметров ИПП является ее геометрическая толщина. С ее ростом наследуются и развиваются начальные дефекты структуры, появляются микротрещины, возрастает напряженное состояние, снижающее функциональные свойства защитного слоя. Тонкие покрытия обладают низкой коррозионной и эрозионной стойкостью. В этой связи, обеспечение оптимальной толщины защитных покрытий весьма важно при разработке технологии формирования ИПП.

При формировании ИПП электродуговым испарением в вакууме их толщина на различных участках длинномерных изделий ЭЭО может отличаться, что обусловлено неравномерностью плотности потока конденсирующихся частиц. На распределение толщины покрытия по поверхности изделия существенно влияет его расположение в вакуумной

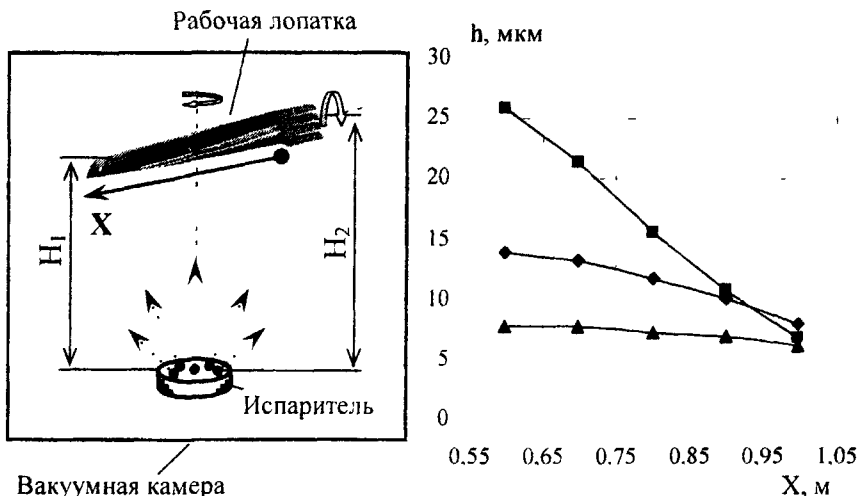


Рис 2 Расчетное распределение толщины покрытия на входной кромке рабочей лопатки при различном ее расположении в вакуумной камере

■ - $H_1=0,15$ м $H_2=0,25$ м ◆ - $H_1=0,30$ м $H_2=0,40$ м, ▲ - $H_1=0,45$ м $H_2=0,55$ м

камере. Поэтому при формировании ИИП на РЛ паровых турбин необходимо определить ее оптимальное расположение.

На основе метода имитационного моделирования (Монте-Карло пробной частицы) разработана программа расчета распределения толщины покрытия на поверхности изделий сложной конфигурации, позволяющая оптимизировать их расположение в вакуумной камере. На рис. 2 показано расчетное распределение толщины покрытия на входной кромке РЛ при различном ее расположении в вакуумной камере. С уменьшением расстояния от испарителя до РЛ увеличивается неравномерность и значение толщины покрытия. Было определено оптимальное положение РЛ, при котором средняя толщина покрытия на периферийной входной кромке составляет 12 мкм (см. рис. 2, $H_1=0.30$ $H_2=0.40$). Экспериментальное распределение толщины покрытия согласуется с расчетным (рис 3, в), что позволяет рекомендовать разработанную методику для оптимизации расположения длинномерных изделий сложной геометрии при формировании покрытий на подобных установках.

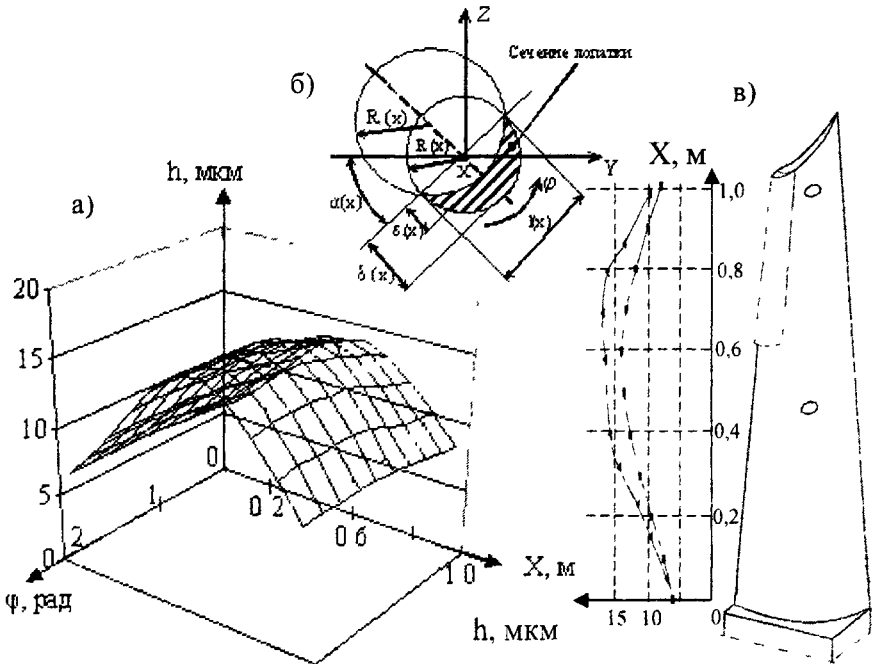


Рис 3 Расчетное распределение толщины покрытия по поверхности рабочей лопатки турбины(а) б- поперечное сечение лопатки, в- расчетное(■) и экспериментальное(▲) распределение толщины покрытия на входной кромке лопатки

Задача оптимизации длинномерного изделия в вакуумной камере усложняется необходимостью обеспечения заданной толщины покрытия на

различных участках детали, например, на периферийной входной кромке РЛ и на выходной кромке в прикорневом сечении. Разработанная методика позволяет решать подобные задачи.

Свойства ИПП в существенной степени зависят от условий их формирования в вакууме, в частности, давления реактивных газов, температуры поверхности конденсации, потенциала смещения на изделии. Эти параметры, в свою очередь, определяют степень стехиометрии и скорость роста покрытия. Показано влияние перечисленных выше параметров на содержание атомов азота в ИПП на основе TiN. Разработанная методика была применена для расчета распределения степени стехиометрии покрытия по поверхности длинномерных изделий сложной конфигурации.

Для учета влияния условий формирования ИПП TiN на концентрацию атомов азота в нём и скорость роста покрытия были осуществлены расчеты на основе физической модели плазмохимического синтеза нитридных покрытий в вакууме (рис. 4). Исходный поток ионов и атомов металла

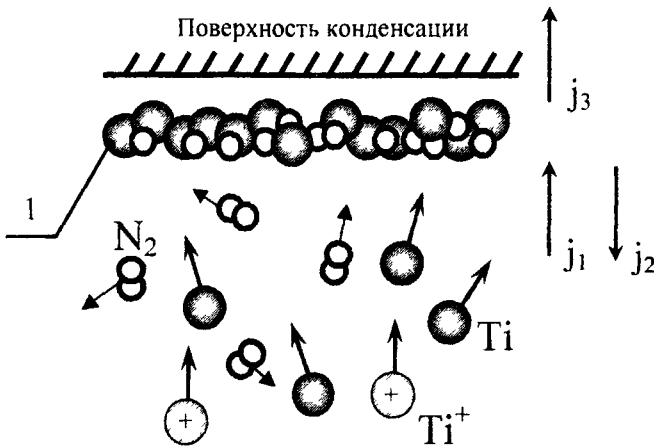


Рис.4 Плазмохимический синтез нитридных покрытий в вакууме 1- адсорбированный слой, N_2 - молекулы азота; Ti - атомы титана; Ti^+ - ионы титана, j_1 , j_2 , j_3 - плотности потоков массы адсорбированных десорбированных и хемосорбированных частиц одного сорта.

направляется на поверхность конденсации, находящейся под отрицательным потенциалом $U_{см}$ и располагающейся в вакуумной камере в атмосфере азота при некотором давлении P , обеспечивающем кнудсеновский или близкий к кнудсеновскому режим прохождения плазменного потока. Таким образом, на поверхность конденсации падает суммарная плотность потока исходных частиц, состоящих из нейтральных молекул азота, атомов титана, ионов титана и азота.

Атомы и молекулы, прошедшие кинетическую и термическую аккомодацию захватываются поверхностью и переходят в адсорбированное состояние. Попадая в адсорбированный слой 1 (рис. 4) с плотностью j_1 ,

частицы десорбируются с плотностью j_2 и в результате термической и нетермической активации процессов миграции оставшаяся их часть хемосорбируется с плотностью j_3 , достраивая кристаллическую решетку покрытия. На основе закона сохранения массы, баланс частиц одного сорта в адсорбированном слое определяется следующим соотношением:

$$\frac{dn}{dt} = j_1 - j_2 - j_3 \quad (1)$$

где n - поверхностная плотность частиц в адсорбированном слое; t - время.

В результате решения системы уравнений баланса атомов титана, молекул и атомов азота в адсорбированном слое, определено влияние давления реактивного газа и температуры поверхности конденсации на степень стехиометрии (x) в соединении TiN_x и скорость роста нитридного покрытия $TiN_x(V)$, рассчитываемые из соотношений:

$$x = \frac{\tilde{j}_3^N}{\tilde{j}_3^{II}} \quad (2)$$

$$V = a \cdot \frac{m_1 \tilde{j}_3^{II} + m_2 \tilde{j}_3^N}{m_1 + xm_2} \quad (3)$$

где \tilde{j}_3^{II} , \tilde{j}_3^N - приведенные плотности потоков атомов титана и азота, формирующих покрытие, с учетом распыления и десорбции титана и азота из кристаллической фазы, m_1 , m_2 - масса атомов титана и азота; a - постоянная кристаллической решетки

Стехиометрический нитрид титана может быть получен в широкой области параметров, а также при условии $\tilde{j}_3^N > \tilde{j}_3^{II}$ (2), однако, качество такого нитрида без должной оптимизации режима будет низким, чаще всего из-за превышения плотности потока атомов азота своего оптимального значения. Для обеспечения этого условия, в рамках модели, с учетом условий, реализованных в экспериментальной установке и требований, предъявляемых к покрытиям в энергетике, определены режимы напыления нитрида титана, которые характеризуются парциальным давлением азота $P < 2-3$ МПа и температурой формирования $T > 330$ °С.

Осуществлены расчеты для случая формирования покрытия на поверхности рабочей лопажки турбины в вакуумной камере установки с сосредоточенным источником, в результате которых определено распределение концентрации азота в покрытии TiN по поверхности рабочей лопатки. Плотность потока атомов титана, падающего на поверхность конденсации (плотность потока j_1 в соотношении (1)), определялась методом Монте-Карло пробной частицы, молекул азота - по формуле Герца-Кнудсена. Для условий экспериментальной установки показана, существенная неравномерность распределения атомарной концентрации азота в ИПП TiN на поверхности длинномерного изделия, что обуславливает

необходимость оптимизации расположения изделия и параметров процесса формирования ИПП по критерию оптимального атомарного содержания реактивного газа в нём и скорости роста ИПП.

Задача разработки адекватной методики такой оптимизации для установок с сосредоточенным источником, в которых при формировании покрытий наблюдается существенная неравномерность плотности потока конденсирующихся частиц, весьма актуальна и требует дальнейших исследований

Ограниченные возможности варьирования температуры формирования ИПП, неравномерность толщины и состава покрытий, отсутствие возможности управления соотношением плотности конденсирующихся частиц металла и реактивного газа явились причиной модернизации установки с целью упрочнения длинномерных изделий энергетического оборудования и решения поставленных в работе задач.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния атомарной концентрации азота в покрытии TiN на микротвердость, структуру, морфологию ИПП TiN и эрозионную стойкость стали 20X13 при каплеударном воздействии. Определено влияние толщины покрытий Ti и TiN на эрозионную стойкость стали 20X13. Определена эрозионная стойкость многослойных покрытий, состоящих из чередующихся слоев Ti и TiN.

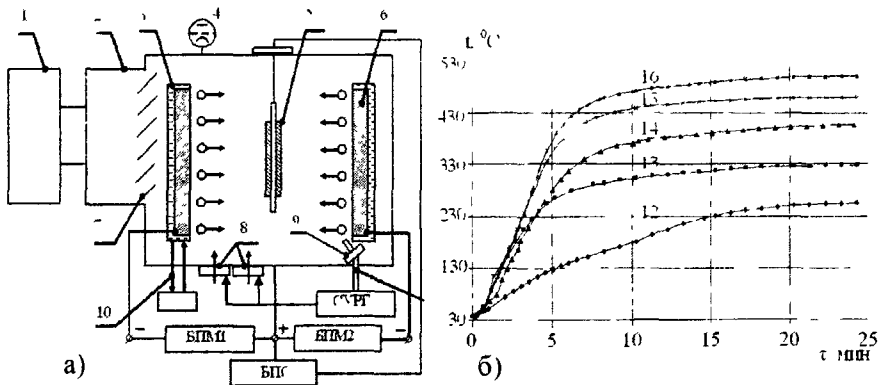


Рис.5. Схема установки для формирования ионно-плазменных покрытий в вакууме (а) и измерение температуры поверхности конденсации при различных режимах работы установки (б) 1-вакуумная система, 2-вакуумная камера, 3- охлаждающая полость магнетронов; 4-датчик давления; 5- поверхность конденсации; 6- магнетрон (мишень), 7- охлаждаемая ловушка, 8- натекатели газа, 9- крепление светоприемника, 10- система охлаждения, 11- светопроводящий кабель. БПМ- блок питания магнетронов БПС- блок питания смещения, СУРГ- система управления расходом газов; 12, 13, 14- работа в режиме одного магнетрона, 15, 16- двух магнетронов, 12- $U_{c.u.}=0$, $\varphi_{n.люк} \neq 0$; 13- $U_{c.u.}=0$, $\varphi_{n.люк} \neq 0$; 14- $U_{c.u.} \neq 0$, 15- $\varphi_{n.люк} \neq 0$, 16- $U_{c.u.} \neq 0$

В рамках работы осуществлена модернизация установки для нанесения покрытий, в результате которой изменен способ генерации плазменного потока исходных частиц.

На рис 5 (а) приведена схема модернизированной установки для формирования покрытий методом магнетронного распыления в вакууме. В качестве материала покрытия использовался титан марки ВТ1.0. Под действием отрицательного потенциала, создаваемого БМП1 и БМП2, ионизированные атомы аргона ускоряются, распыляя исходный материал покрытия. Распыленные атомы титана взаимодействуют с атомами реакционного газа у поверхности подложки 5, к которой прикладывается отрицательный потенциал смещения ($U_{см}$). Инертный газ аргон и реактивные газы подаются в вакуумную камеру через натекатели 8, расход которых контролируется СУРГ.

Определены тепловые режимы формирования ИПП (рис 5, б) Был выбран тепловой режим, характеризующийся следующими параметрами: $t=495^{\circ}\text{C}$, $U_{см}=72\text{В}$. При данных условиях достигается высокая эрозийная стойкость КМ, а процесс осаждения покрытий не вызывает изменение прочностных свойств КМ.

Покрытия формировались на специальных образцах, выполненных из термообработанной лопаточной стали 20Х13. Перед формированием ИПП проводилась отчистка поверхности ионами газоразрядной плазмы в среде аргона. Покрытия TiN с различной атомарной концентрацией азота были получены путем изменения расхода реактивного газа азота через натекатель 8 (рис 5, а), при этом толщина покрытий оставалась неизменной и составляла 6-7 мкм. Толщина покрытий Ti и TiN изменялась варьированием времени процесса, а композиционные покрытия с чередующимися слоями Ti и TiN были получены путем периодического напуска азота в вакуумную камеру.

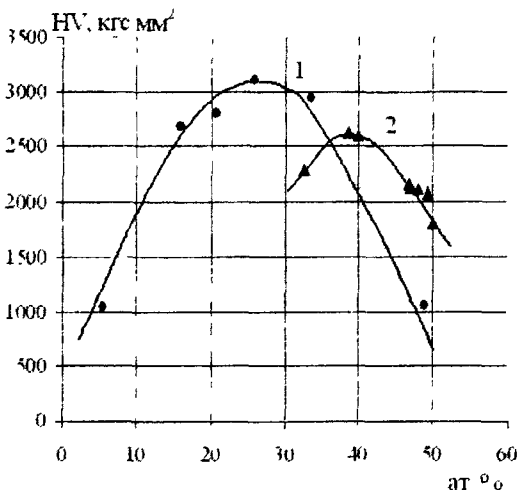


Рис 6 Зависимость микротвердости от содержания атомов азота в покрытии TiN 1- автор, 2-Albert Sue, Henry Troue

Исследования ИПП показали существенное влияние концентрации атомарного азота на микротвердость, структуру, морфологию и кинетику эрозионного износа покрытий при каплеударном воздействии. На рис. 6 приведено влияние атомарной концентрации азота в покрытиях TiN на их микротвердость. Зависимость микротвердости покрытий от атомарного содержания азота в нем имеет характерный оптимум, соответствующий, 20-30 ат. %, а значение микротвердости превышает 3000 кгс/мм².

В результате экспериментальных исследований на каплеударном стенде МЭИ(ТУ) были получены кинетические кривые эрозионного износа ИПП, которые приведены на рис. 7. В результате анализа данных кривых

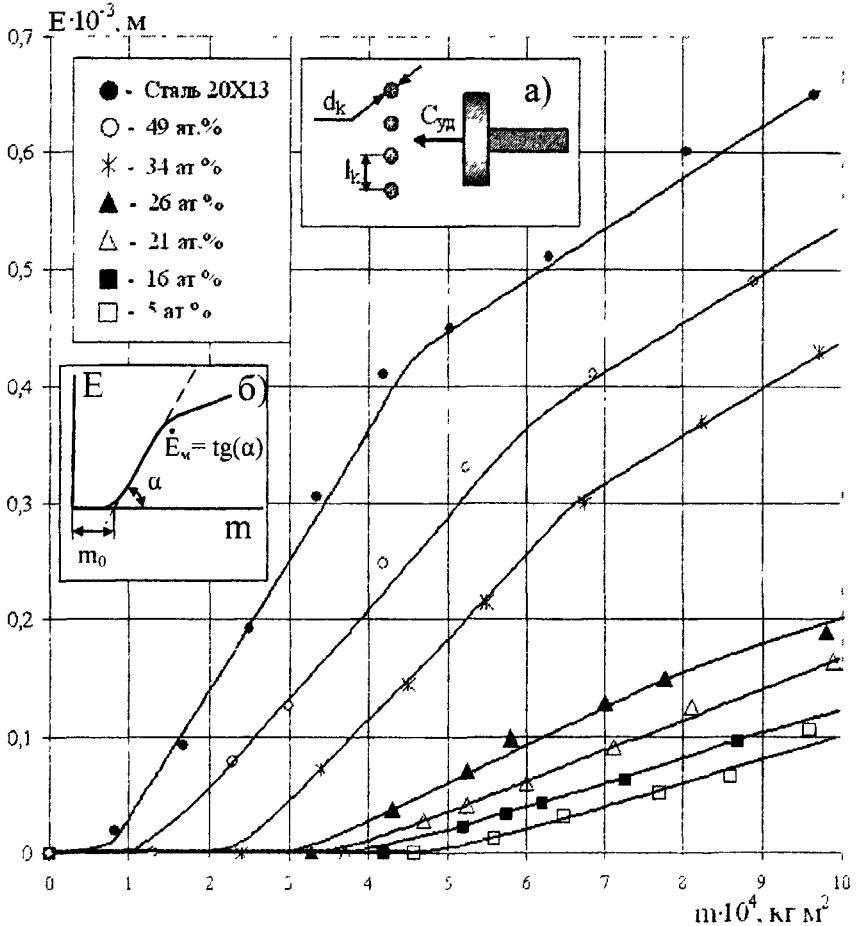


Рис. 7 Влияние атомарной концентрации азота в покрытии TiN на кинетику эрозии стали 20X13 при каплеударном воздействии а- схема взаимодействия образца с каплями воды $C_{уд} = 250 \text{ м/с}$, $d_k = 800 \text{ мкм}$, $l_k = 5d_k$, б- типичная кривая кинетики эрозионного износа

определено влияние концентрации атомов азота в покрытиях на инкубационный период стали 20Х13 и максимальную скорость эрозии при каплеударном воздействии (рис. 8). Как видно из приведенных зависимостей, с уменьшением концентрации атомов азота в покрытии TiN значение m_0 увеличивается, а максимальная скорость износа E_m уменьшается. На рисунке показаны микрофотографии исходной поверхности покрытий до каплеударного разрушения.

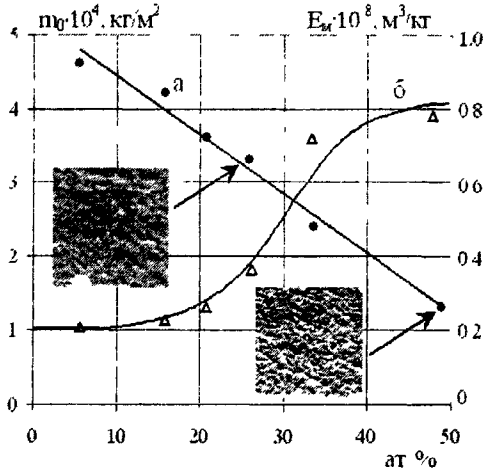


Рис 8 Влияние концентрации атомов азота в покрытии TiN на величину инкубационного периода (а) и максимальную скорость эрозии (б)

В результате исследований на оптическом, растровом, атомно-силовом микроскопе было установлено, что концентрация атомов азота в покрытии TiN существенно влияет на морфологию поверхностного слоя. Увеличение содержания азота приводит к нарушению сплошности покрытий, появлению пористости, увеличению шероховатости поверхности и размеров кристаллитов структуры, что обуславливает ухудшение функциональных свойств исследуемых ИПП.

Максимальной эрозионной стойкостью при каплеударном воздействии обладают покрытия, содержащие не более 20 ат. % азота. Высокая микротвердость таких покрытий позволяет рекомендовать их для защиты поверхностей, эксплуатирующихся в условиях абразивного износа.

Исследовано влияние толщины ИИП покрытий на эрозионную стойкость при каплеударном воздействии жидкости. На рис. 9 показана зависимость длительности инкубационного периода исследуемых покрытий от их толщины. Очевидно, что оптимальными с точки зрения высокой эрозионной стойкости являются покрытия на основе Ti толщиной 6-8 мкм, которые повышают длительность инкубационного периода стали 20Х13 в 4 раза. Увеличение толщины нитридного покрытия более 9 мкм приводит к снижению эксплуатационных свойств конструкционного материала.

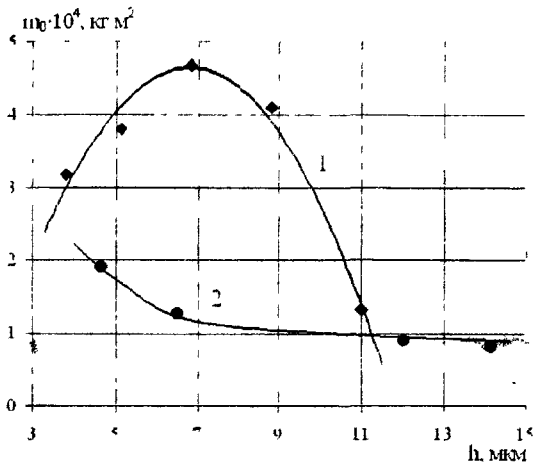


Рис 9 Влияние толщины ионно-плазменных покрытий на величину инкубационного периода процесса эрозии стали 20X13 при каплеударном воздействии: 1- покрытие Ti, 2- покрытие TiN

Дальнейшее увеличение износостойкости однослойных покрытий путём варьирования содержания азота и толщины мало перспективно. Добиться более высоких показателей возможно путем формирования многослойных покрытий с различной комбинацией слоев. Такие покрытия обладают универсальными свойствами и обеспечивают лучшую защиту по сравнению с однослойными ИПП, а возможности оптимизации таких покрытий существенно шире.

В работе представлены результаты исследований многослойных покрытий, состоящих из чередующихся слоев Ti и TiN. Определена относительная эрозионная стойкость однослойного покрытия TiN толщиной 6 мкм, двухслойного Ti-TiN 11 мкм, четырехслойного 12 мкм и десятислойного 36 мкм. На рис 10 приведена гистограмма относительной эрозионной стойкости исследованных в работе композиционных покрытий. На основе анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что увеличение количества слоев в многослойном покрытии, при прочих равных условиях, приводит к возрастанию эрозионной стойкости конструкционного материала. С увеличением толщины композиционного покрытия снижается его износостойкость. Обнаружено оптимальное четырехслойное покрытие толщиной 12 мкм, позволяющее повысить инкубационный период стали 20X13 при каплеударном воздействии в 8-9 раз. Геометрическая толщина композиционных покрытий, толщина слоёв и их свойства существенно влияют на эрозионную стойкость при каплеударном воздействии. Более детальные исследования влияния перечисленных характеристик на эрозионную стойкость КМ является задачей дальнейших исследований.

На основании проведенных экспериментальных исследований разработаны технологические основы формирования композиционных

покрытий, которые были сформированы на опытной партии рабочих лопаток паровой турбины мощностью 250 МВт для проведения натурных испытаний.

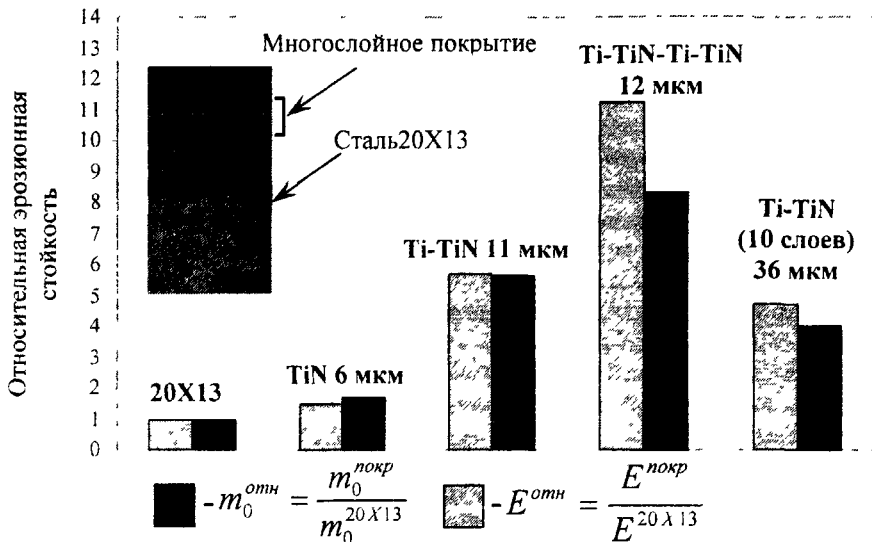


Рис. 10 Относительная эрозионная стойкость многослойных ионно-плазменных покрытий с различной комбинацией слоев Ti и TiN

После 7723 часов эксплуатации турбины был произведен визуальный контроль и измерение величины эрозии входных кромок исследуемых лопаток. Эффективность покрытий была подтверждена результатами натурных испытаний.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании результатов теплофизических исследований определен тепловой режим процесса формирования ИПП, который для стали 20X13 характеризуется температурным диапазоном 330-500 °С;
2. На основе метода Монте-Карло пробной частицы разработана методика расчета оптимального распределения толщины покрытия на длинномерных изделиях сложной конфигурации;
3. На основе математического моделирования плазмохимического синтеза покрытий TiN в вакууме, определено влияние давления реактивных газов P и температуры поверхности конденсации T на степень стехиометрии и скорость роста покрытий. Для формирования эрозионно-стойких ИПП на основе TiN, предпочтительными являются режимы напыления при P < 2-3 мПа и температуре поверхности конденсации T > 330 °С;
4. Показано влияние концентрации атомов азота в покрытии TiN на его микротвердость, структуру, морфологию. При содержании азота 20-30 ат.% микротвердость защитного слоя максимальна, а ее значение превышает 3000 кгс/мм²;

5. Впервые определена эрозионная стойкость стали 20X13 с защитным покрытием TiN при различной концентрации атомов азота в нем. Максимальной эрозионной стойкостью обладают покрытия, содержащие не более 20 ат. % азота;
6. Впервые исследовано влияние толщины покрытий Ti и TiN на эрозионную стойкость стали 20X13. Оптимальными являются покрытия Ti толщиной 6-8 мкм, которые повышают длительность инкубационного периода процесса эрозии стали 20X13 в 4 раза;
7. Определена эрозионная стойкость композиционных покрытий. Показано, что с уменьшением толщины и увеличением количества слоев в многослойном покрытии при прочих равных условиях эрозионная стойкость конструкционных материалов возрастает. Разработано четырехслойное покрытие общей толщиной 12 мкм, обеспечивающее повышение инкубационного периода процесса эрозии стали 20X13 в 8-9 раз;
8. Разработаны технологические основы формирования многослойных покрытий, состоящих из чередующихся слоев Ti и TiN;
9. В результате натурных испытаний многослойных ИПП, сформированных на рабочих лопатках турбины мощностью 250 МВт, подтверждена их эффективность в реальных условиях эксплуатации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тер-Арутюнов Б. Г. Расчёт распределения толщины износостойкого покрытия на лопатке турбины ПТ-100-130 при ионно-вакуумном напылении // IX Международная студенческая школа-семинар «Новые информационные технологии»: Тез. докл. май 2001 г.-Судак, 2001.- С 102
2. Тер-Арутюнов Б. Г. Расчёт и оптимизация толщины и стехиометрического состава нитридных покрытий на основе моделирования процессов плазменного напыления в вакууме // X Международная студенческая школа-семинар «Новые информационные технологии»: Тез. докл. май 2002 г.-Судак, 2002 - С 191-193.
3. Рыженков В. А. Качалин Г. В. Тер-Арутюнов Б. Г. Моделирование процесса формирования вакуумных ионно-плазменных покрытий заданного стехиометрического состава // IX науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника»: Тез. докл. сентябрь 2002 г.-Судак, 2002.- С. 59-60.
4. Качалин Г. В. Васильева Н. Д. Тер-Арутюнов Б. Г. Исследование структурных особенностей антиэрозионных ионно-плазменных покрытий для элементов энергетического оборудования // XIII Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твёрдых тел. Тез. докл. 2-4 июня 2003 г.-Черноголовка, 2003.- С 135.
5. Тер-Арутюнов Б. Г. Моделирование процесса формирования защитных покрытий в вакууме для повышения износостойкости элементов энергетического оборудования // IX Международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. - М., 2003.- С. 23.

6. Рыженков В. А. Качалин Г. В., Старикова О. В., Тер-Арутюнов Б. Г. Применение вакуумных ионно-плазменных покрытий для повышения надёжности и ресурса энергетического оборудования // VI Междунауч.-практ. конф. «Энергопотребление и энергосбережение: решения»: Тез. докл. 21-24 мая 2003 г. – Пермь, 2003. – С. 60-63. 2006-4
16549
7. Рыженков В.А., Качалин Г.В., Погорелов С.И., Старикова О. В., Тер-Арутюнов Б.Г. Перспективы применения ионно-плазменных покрытий для повышения износостойкости элементов энергетического оборудования // Новое в российской энергетике. - 2004.-№ 3.-С. 16-25.
8. Рыженков В.А., Качалин Г.В., Погорелов С.И., Тер-Арутюнов Б.Г. К вопросу об эффективности защитных покрытий для повышения коррозионной и эрозионной стойкости конструкционных материалов энергетического оборудования // VI Международная практ. конф.-выставка «Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций»: Сб. докл. 13-16 апреля 2004 г.-Санкт-Петербург, 2004.- С 45-51.
9. Качалин Г. В. Васильева Н. Д. Тер-Арутюнов Б. Г. Исследование влияния условий формирования на структуру антиэрозионных ионно-плазменных покрытий // XX Российская конф. по электронной микроскопии: Тез. докл. 1 июня-4 июля 2004 г.-Черноголовка, 2004.- С. 38.
10. Рыженков В.А., Качалин Г.В., Тер-Арутюнов Б.Г. Повышение ресурса и надёжности работы оборудования электрических станций посредством формирования износостойких покрытий на поверхностях ответственных элементов// IV Международная науч.-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»: Тез. докл. - М., 2004.- С 48-50.
11. Качалин Г. В., Тер-Арутюнов Б.Г., Медников А.Ф., Куц И.А. Особенности формирования вакуумных ионно-плазменных покрытий для защиты длинномерных изделий энергетического оборудования // XI науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника»: Сб. докл. сентябрь 2004 г.-Судак, 2004.– С. 76-80.
12. Тер-Арутюнов Б. Г. Исследование эрозионно-стойких ионно-плазменных покрытий // XI Международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» Тез. докл.- М., 2005.– С. 63.