

На правах рукописи



ШЕХТМАН Семен Романович

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ИОННО-
ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С СМК СТРУКТУРОЙ И ТЕХНОЛОГИЙ
ИХ НАНЕСЕНИЯ НА ЛОПАТКИ ГТД**

Специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные
материалы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2015

Работа выполнена на кафедре технологии машиностроения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Криони Николай Константинович

Официальные оппоненты: **Панфилов Юрий Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана» –
Российский национальный исследовательский
университет, заведующий кафедрой;
Верещака Анатолий Степанович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»,
профессор;
Абраимов Николай Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
Научно-исследовательский институт технологии и
организации производства двигателей («НИИД»)
ФГУП «НПЦ Газотурбостроения «Салют», нач.
отдела.

Ведущая организация: ОАО «Институт технологии и организации
производства (НИИТ)», г. Уфа.

Защита состоится 01 октября 2015 г. в 14.30 на заседании
диссертационного совета Д 212.110.04 при ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский
государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского» по
адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3.
Телефон 8 (499) 141-95-03 факс 8 (495) 788-32-61, e-mail: post@mati.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
<http://mati.ru/index.php/18-nauka/919-shekhtman-semen-romanovich> ФГБОУ ВПО
«МАТИ – Российский государственный технологический университет имени
К.Э. Циолковского»

Автореферат разослан «15» июля 2015 года

Ученый секретарь диссертационного совета
профессор, д-р техн. наук

 С.В. Скворцова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение уровня эксплуатационных свойств наиболее нагруженных, ответственных и дорогостоящих деталей ГТД, таких как лопатки компрессора, изготавливаемых из высоколегированных сталей, титановых сплавов и жаропрочных сталей, является наиболее важной задачей авиационного двигателестроения. Решение этой задачи осуществляется с использованием нескольких подходов: разработка перспективных поликристаллических и монокристаллических сплавов, модернизация способов изготовления, формообразования и обработки изделий, развитие новых методов поверхностной обработки деталей и нанесение на поверхность защитных покрытий, в том числе и функциональных покрытий с различной микроструктурой. Разработка новых материалов защитных покрытий, способов и процессов их нанесения для создания многослойных покрытий, обладающих более высокими эксплуатационными характеристиками по сравнению с монослойными, отвечающих современным требованиям по защите поверхности лопаток компрессора ГТД, работающих в условиях повышенных температур, усталостных и термоусталостных нагрузок, является важной задачей авиадвигателестроения.

Особенно остро стоит вопрос о защите поверхности лопаток компрессора ГТД при работе в условиях повышенных температур, когда рабочая температура может достигать 600 – 800 °С (для последних ступеней компрессора. Для решения этой проблемы, наряду с совершенствованием составов жаростойких сталей и титановых сплавов, разрабатываются технологии защиты поверхности лопаток ГТД от агрессивного воздействия.

Перспективным направлением для защиты лопаток компрессора ГТД являются многослойные покрытия, состоящие из периодически расположенных слоев из различных материалов нанометровой толщины, обладающие высокими механическими и эксплуатационными свойствами. Благодаря особенностям строения, большому количеству слоев и их толщине в

нанометровом диапазоне, покрытия с субмикрористаллической структурой и наноструктурированные покрытия сочетают в себе качества слоистых систем и специфические свойства нанообъектов. Кроме того, проведение процесса ионно-плазменного осаждения веществ с одновременной ионной бомбардировкой приводит к получению покрытия с субмикрористаллической структурой (СМК), обладающего повышенными эксплуатационными свойствами.

Так как в большинстве случаев разрушение деталей авиационных двигателей начинается либо с поверхности, либо разрушение наблюдается в тонком приповерхностном слое, чрезвычайно важно и экономически более целесообразно разработать технологии получения защитных и упрочняющих покрытий, свойства которых по прочности и пластичности недостижимы для традиционных моно- и поликристаллических структур.

В этой связи особый интерес представляют карбиды, силициды и карбосилициды металлов, обладающие высокими механическими и эксплуатационными свойствами, высокой твердостью, коррозионной стойкостью и термодинамической стабильностью. Однако синтез таких соединений традиционными способами возможен при длительном воздействии высокой температуры. Карбосилицид титана $Ti-C-Si$ обладает комплексом полезных физико-механических, химических свойств, которые невозможно получить в обычных сплавах. Он обладает уникальным свойством сдерживать распространение микротрещин и их рост, а материалы, содержащие карбосилицид титана, обладают высокой стойкостью к повреждениям.

Предлагаемый метод синтеза принципиально нового многослойного покрытия системы $Ti-C-Si$ с СМК структурой позволит получить соединение, содержащее в своем составе фазы сложных карбидов и карбосилицидов титана (Пат.2272088 РФ от 20.03.2006).

Актуальность исследований подтверждены Государственной научно-технической программой академии наук Республики Башкортостан. Это проекты: «Исследование физико-химических закономерностей взаимодействия

электронных, ионных и плазменных потоков с поверхностью конструкционных материалов, моделирование и разработка проектов электронно-ионно-плазменных технологий», «Многофункциональные ионно-плазменные покрытия для изделий межотраслевого назначения», «Композиционные конденсированные ионно-плазменные покрытия для изделий машиностроения», гранты: «Ведущие научные школы Российской Федерации» «Исследование и разработка ионно-плазменной технологии создания многофункциональных слоевых покрытий на основе композиции углерод-металл и алюминий – металл» (НШ-294.2003.8) и «Технология ионно-имплантационного модифицирования и ионно-плазменного осаждения покрытий применительно к изделиям новых поколений» (№ 00-15-99053), «Создание на базе вакуумной ионно-плазменной конденсации веществ нанотехнологии модифицирования поверхности деталей машин», «Нанотехнологии получения поверхностей с наноструктурированными покрытиями на деталях энергетических установок на основе высокотемпературного структурно-фазового модифицирования сильно-точными разрядами в вакууме», «Инновационные технологии и оборудование для высокотемпературного модифицирования и нанесения защитных наноструктурированных покрытий в вакууме на детали энергетических установок» и др.

Цель работы. Создание новых материалов и технологий получения вакуумных ионно-плазменных покрытий с субмикрористаллической структурой для защиты поверхности лопаток компрессора и турбины ГТД.

В соответствии с целью в работе были поставлены следующие задачи:

1. Разработать новые материалы и технологии получения многослойных ионно-плазменных покрытий с субмикрористаллической структурой (СМК) на лопатках ГТД в условиях модифицирования поверхности ионным потоком.
2. Разработать способ модификации поверхности разрядом на основе эффекта полого катода (ЭПК).

3. Экспериментально исследовать химический, фазовый состав и свойства новых материалов вакуумных ионно-плазменных покрытий с СМК структурой, используемых для защиты поверхности лопаток ГТД.

4. Теоретически и экспериментально исследовать процессы нанесения покрытий в условиях модифицирования поверхности ионным потоком.

5. Исследовать эксплуатационные свойства лопаток ГТД с вакуумными ионно-плазменными покрытиями с СМК структурой.

6. Разработать технологии нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий с СМК структурой на лопатки ГТД.

Научная новизна

1. Впервые разработан метод синтеза нового материала покрытия $Ti-C-Si$ в условиях модифицирования поверхности ионным потоком при осаждении нанометровых слоев Ti и $C-Si$ из плазмы дугового разряда, генерируемой титановым и графитокремниевым катодами.

2. Установлено, что при формировании покрытий $Ti-C-Si$ методом осаждения нанометровых слоев в условиях модифицирования поверхности ионным потоком образуются сложные карбиды ($Ti_{66}C$, Ti_8C_5 и др.) и карбосилициды титана (Ti_3SiC_2 , Ti_5Si_3C). Установлено, что повышение эксплуатационных свойств лопаток компрессора ГТД (коррозионная и эрозионная стойкость, усталостная прочность и т.д.) связано с образованием в покрытии СМК структуры и наличием в поверхностном слое синтезированного покрытия сложных карбидов и карбосилицидов титана.

3. Установлено, что в системе, состоящей из специального экрана в виде сетки и обрабатываемой поверхности детали, находящихся под отрицательным потенциалом, возникает эффект полого катода (ЭПК), проявляющийся в формировании плазмы с повышенной концентрацией заряженных частиц, генерируемых быстрыми осциллирующими электронами, эмиттируемыми с поверхности катодной полости, приводящий к интенсивной бомбардировке обрабатываемой детали заряженными частицами (Патенты РФ № 2075538, №

2096493). Система используется для модифицирования поверхности потоком ионов с целью обеспечения новых свойств поверхности и покрытия.

4. Впервые установлены зависимости фазового состава, коррозионной и эрозионной стойкости, термо и теплостойкости, усталостной прочности нового материала покрытий систем *Ti-C-Si* и *Ti-TiN* от синергетического эффекта уменьшения толщины слоев многослойного покрытия до нанометровых значений (30 ...100 нм) и проведения процесса нанесения покрытий в условиях дополнительной ионной бомбардировки.

5. Установлено, что синергетический эффект уменьшения толщины слоев многослойного покрытия до нанометровых значений (30 ...100 нм) и проведение процесса нанесения нового материала покрытий системы *Ti-C-Si* при модифицировании поверхности в условиях дополнительной ионной бомбардировки с образованием СМК структуры приводит к повышению коррозионной стойкости (на 20 – 35 %), термической стабильности (на 25 – 30 %). При осаждении многослойных покрытий системы *Ti-TiN* с СМК структурой установлено, что синергетический эффект приводит к повышению коррозионной стойкости (на 30 – 35 %), термической стабильности (на 10 – 25 %), эрозионной стойкости (в 1,9 раза) и предела выносливости (на 25 – 30%).

Практическая ценность работы

1. Разработан способ осаждения многослойных композитов, содержащих в поверхностном слое сложные карбиды (патент 2272088 РФ от 20.03.2006).

2. Разработан способ модифицирования поверхности, включающий модификацию и активацию поверхности плазмой повышенной плотности, создаваемой с помощью системы, реализующей эффект полого катода (патент 2096493 от 20.11.97).

3. Разработан способ вакуумно-плазменного нанесения покрытий, включающий осаждение покрытия в инертном газе с помощью системы, состоящей из обрабатываемой детали и экрана в виде сетки, отличающийся тем, что для получения покрытий с СМК структурой осаждение осуществляют

в сочетании с модифицированием поверхности ионным потоком при давлении инертного газа 10^{-2} - 10^{-1} Па. (патент 2145362 РФ от 10.02.2000).

4. Разработана технология осаждения нового материала многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий системы *Ti-C-Si* применительно к лопаткам компрессора второй ступени ГТД.

5. Впервые экспериментально установлено повышение микротвердости, коррозионной и теплостойкости лопаток компрессора ГТД с покрытием *Ti-C-Si* при проведении последующей термической обработки в диапазоне температур 200 – 300 °С, которое объясняется наличием в поверхностном слое сложных карбидов и карбосилицидов титана и снятием остаточных напряжений.

6. Разработана технология нанесения многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий *Ti-TiN* на лопатки компрессора второй ступени КНД, и на ее основе разработан технологический процесс осаждения покрытий, который рекомендован к внедрению на ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение».

7. Разработан метод модифицирования поверхности и нанесения покрытий на поверхность конструкционных материалов с использованием тлеющего разряда на основе эффекта полого катода (патенты РФ № 2075538, № 2096493, № 2101383).

8. Полученные в диссертации результаты используются для подготовки студентов по специальностям 150206 «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки», 151001 «Технология машиностроения», по направлениям подготовки бакалавра 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 150700 «Машиностроение».

Достоверность полученных результатов обеспечивается сопоставлением теоретических результатов с экспериментальными данными, в том числе с результатами исследований других авторов, а также оценкой погрешности эксперимента статистическими методами и успешной

реализацией технологии в производстве, применением отработанных методов и технических средств.

Основные научные положения и результаты, полученные лично автором и выносимые на защиту

1. Новый материал покрытия, полученный методом синтеза системы *Ti-C-Si*, основанный на осаждении нанометровых слоев *Ti* и *C-Si* из плазмы, генерируемой титановым и графитокремниевым катодами в условии модифицирования поверхности ионным потоком для лопаток компрессора ГТД, работающих в диапазоне температур от 500 до 700 °С.

2. Способ синтеза нового материала покрытия *Ti-C-Si* с субмикроструктурной структурой, основанный на осаждении нанометровых слоев *Ti* и *C-Si* из плазмы, генерируемой титановым и графитокремниевым катодами в условии модифицирования поверхности дополнительной ионной бомбардировкой, позволяющий получать в поверхностном слое лопаток компрессора ГТД сложные карбиды и карбосилициды титана.

3. Способ модифицирования поверхности лопаток компрессора ГТД, включающий очистку и активацию поверхности плазмой повышенной плотности, создаваемой с помощью системы, реализующей эффект полого катода (ЭПК).

4. Технология нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий с субмикроструктурной структурой на детали ГТД в условиях плазменного ассистирования.

5. Впервые установлено, что повышение коррозионной и эрозионной стойкости, термической стабильности и предела выносливости многослойных покрытий системы *Ti-TiN* с СМК структурой определяется синергетическим эффектом уменьшения толщины слоев многослойного покрытия до нанометровых значений и проведением процесса осаждения в условиях модификации поверхности дополнительной ионной бомбардировкой.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций, симпозиумов, семинаров:

Международной НТК "Вакуумная наука и техника" (Москва, 1994); III конференции "Модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц" (Томск, 1994); Международной НТК "Отделочно-упрочняющая технология в машиностроении" (Минск, 1994); Международной НТК "Напыление и покрытия-95" (Санкт-Петербург, 1995); 4-й Международной конференции (Харьков, Рыбачье, 1995); 4-й Всероссийской конференции "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц" (Томск, 1996); Международной НТК "Проблемы и перспективы развития двигателестроения в поволжском регионе" (Самара, 1997); Межнациональном совещании "Радиационная физика твердого тела" (Севастополь, 1998); V международной конференция "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц" (Томск, 2002, 2012); Международной конференции «Материаловедение и современные технологии», (Магнитогорск, 2003); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», (Самара, 2003); Международном совещании «Радиационная физика твердого тела», (Севастополь, 2004); XI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», (Судак, 2004); XII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Судак, 2005); Харьковской нанотехнологической ассамблеи-2008, (Харьков, 2008); XVI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», (Судак, 2009); Международном совещании «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов» (Белгород, 2009); XVII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Судак, 2010); XVIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов

«Вакуумная наука и техника» (Судак, 2011 – 2013); XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технология» (Санкт Петербург, 2012); Региональных научно-технических конференциях, Уфа, 1994 – 2012 г.г. В законченном виде диссертация обсуждалась в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», ФГБОУ ВПО «Камская Государственная Инженерно-Экономическая Академия», в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), в Московском авиационном институте (национальном исследовательском институте).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 69 работ в виде научных статей, трудов, материалов, докладов, в том числе 13 публикаций в центральных рецензированных журналах, рекомендованных ВАК, 1 монография, 2 учебных пособия с грифом УМО высших учебных заведений РФ по образованию в области вакуумной ионно-плазменной технологии. Получены 7 патентов РФ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 287 страницах машинописного текста, состоит из введения, 7 глав, основных выводов, приложения, содержит 29 таблицы, 120 рисунка и список литературы из 262 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика области исследования, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе «Состояние вопроса. Проблемы создания новых материалов защитных вакуумных ионно-плазменных покрытий на деталях авиационной техники» приведен анализ состояния проблемы получения покрытий, современных методов защиты поверхности деталей авиадвигателестроения и материалов покрытия. Приведен анализ современных

способов осаждения вакуумных ионно-плазменных (ВИП) многослойных покрытий.

Показано, что эти покрытия соответствуют предъявляемым требованиям по защите поверхности деталей от воздействия повышенных температур, знакопеременных нагрузок и агрессивных сред.

В настоящее время широко применяются методы вакуумного ионно-плазменного осаждения покрытий, использующие электродуговые испарители и плазмогенераторы для получения квазинейтральных потоков плазмы. Использование плазмогенераторов позволяет ускорить ионы плазмообразующего газа, а также увеличить диффузию в приповерхностных слоях обрабатываемого изделия.

Осаждение вакуумных ионно-плазменных покрытий зависит как от самого процесса нанесения, так и от свойств материала покрытия, поэтому внимание специалистов привлекают многослойные покрытия с толщиной слоев в нанометровом диапазоне. Интерес вызван перспективой синтеза покрытий, сочетающих в себе свойства слоистых систем и специфические свойства нанообъектов.

В последнее время внимание широкого круга российских и зарубежных ученых привлекают многослойные покрытия на основе композиций углерод – металл и нитрид – металл. Интерес вызван возможностью синтезировать в поверхностном слое высокопрочные фазы и получать покрытия с уникальными свойствами. На основе анализа условий эксплуатации лопаток компрессора ГТД и результатов исследований российских и зарубежных ведущих научных школ, в качестве покрытия было выбрано многослойное ВИП покрытие системы $Ti-C-Si$ и многослойное ВИП покрытие $Ti-TiN$.

В условиях, когда процесс осаждения покрытий осуществляется при одновременном воздействии дополнительной ионной бомбардировки наблюдается увеличение количества активных центров зародышеобразования, подвижности атомов, уменьшения количество вакансий и пор. Тепловая энергия вводится непосредственно в поверхностную зону, стимулируя реакции

и диффузионные процессы. Она приводит к ускорению процессов адсорбции, хемосорбции и ионного перемешивания. Это приводит к уменьшению размеров зёрен, способствует формированию субмикроструктурной структуры покрытий.

Вследствие чего, актуальной научной и практической задачей является разработка технологий нанесения многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий систем *Ti-C-Si* и *Ti-TiN* с СМК структурой на лопатки компрессора ГТД, реализованных в условиях модифицирования поверхности дополнительной ионной бомбардировкой.

Во второй главе рассмотрен хим.состав и свойства исследуемых материалов, из которых изготавливаются лопатки компрессора ГТД. Приведены основные методики экспериментальных исследований и описано используемое оборудование.

В качестве материалов для проведения исследований были выбраны наиболее распространенные в авиадвигателестроении материалы для лопаток компрессора ГТД – жаропрочная сталь ЭИ 961-Ш (13Х11Н2ВМФ), жаропрочный сплав ЭП718 (ХН45МВТЮБР) на железоникелевой основе и титановый сплав ВТ6.

В диссертационном исследовании использовались методики определения микротвердости, оценки адгезионной прочности, определения электродного потенциала поверхности, коррозионной и эрозионной стойкости, усталости, а также рентгеноструктурного анализа и вторичной ионной масс-спектрометрии.

Исследования проводились на модернизированной установке ННВ 6.6 – И1, оснащенной плазмогенератором (ПИНК).

В третьей главе представлен метод получения нового материала многослойного ионно-плазменного покрытия композиции *Ti-C-Si*, в основе которого последовательное нанесение слоев *Ti* и *C-Si* из плазмы, создаваемой соответствующими катодами (рисунок 1) в условиях модифицирования поверхности и их последующей термической обработкой.

Состав графитокремниевый катода, полученного путем погружения технически чистого графита в расплав кремния, представлен в таблице 1.

Таблица 1

Состав графитокремниевый катода

Элемент	C	Si	SiO ₂	SiC	Fe	Ca	Al	Mg
Доля, %	45,77	41,3	7,5	5,2	0,2	0,05	0,01	0,01



Рисунок 2.1 – Графитокремниевый катод

Разработана модель процесса формирования многослойного покрытия системы *Ti-C-Si* с субмикрористаллической структурой применительно к модернизированной установке ННВ 6.6 – И1 (рисунок 2).

Процесс формирования и роста покрытий системы *Ti-C-Si* состоит в следующем.

Обрабатываемая деталь находится в вакуумной камере при определенном давлении в атмосфере инертного газа (аргона). Квазинейтральный поток плазмы, состоящий из ионов, электронов и атомов металла, направляется на поверхность обрабатываемой детали, которая находится под отрицательным потенциалом. Ионы, в дебаевском слое возле поверхности подложки, ускоряются, и, вступая с ней во взаимодействие, нейтрализуются.

Атомы, взаимодействуя с подложкой, частично отражаются, распыляют атомы находящиеся в поверхностном слое. Часть из них переходят в

адсорбированное состояние после прохождения термической и кинетической аккомодации. В процессе поверхностной миграции (диффузии) они частично десобируются, частично распыляются, а оставшиеся часть ионов хемосорбируются, достраивая поверхностный слой. Одновременно осуществляется процесс ионного перемешивания.

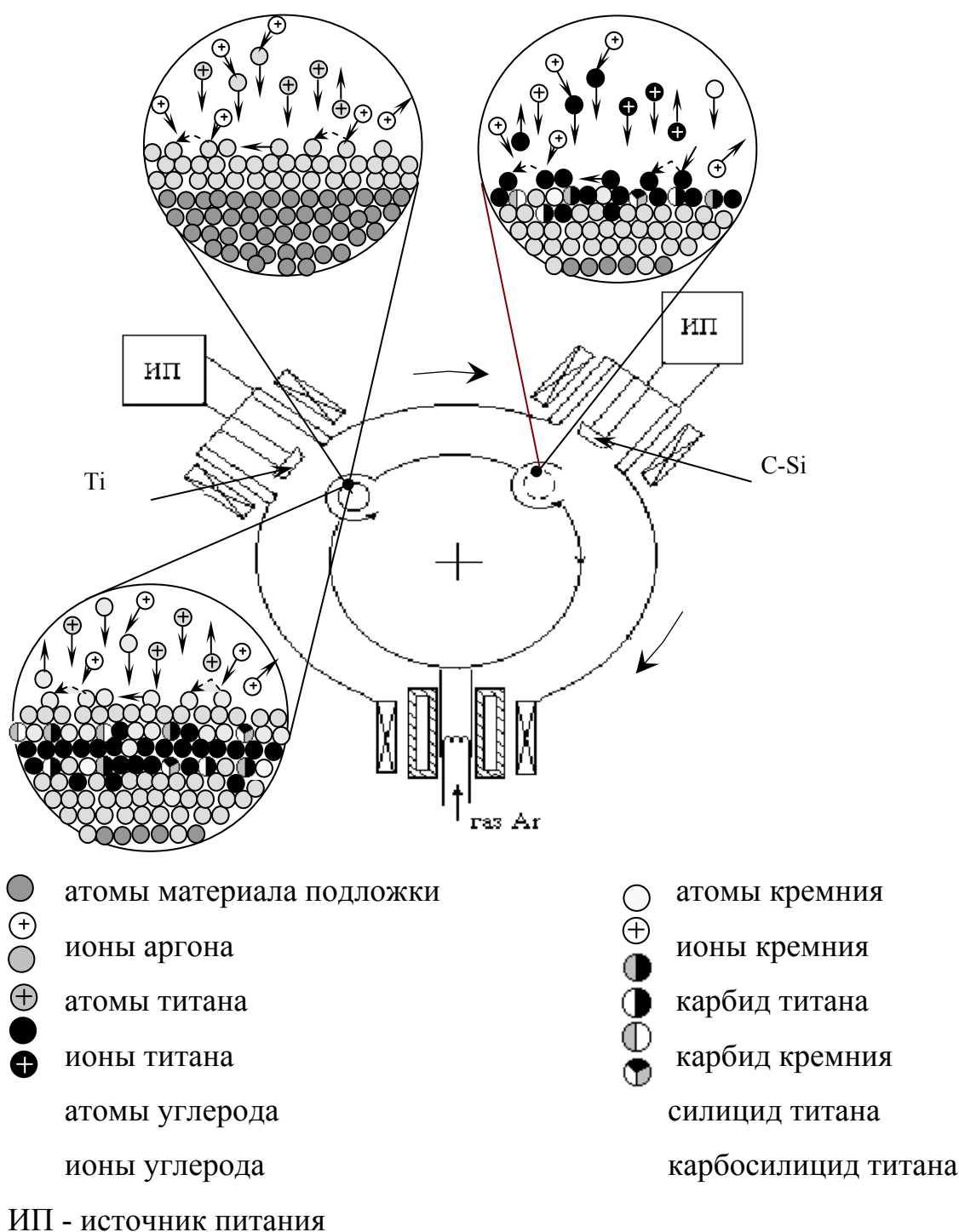


Рисунок 2 – Модель процесса осаждения многослойных ВИП покрытий с СМК структурой

Таким образом, можно выделить следующие стадии процесса.

На стадии модификации и активации поверхность бомбардируется ионами аргона с возникновением активных центров адсорбции и зародышей конденсированной фазы.

На первом этапе процесса осуществляется взаимодействие частиц из плазмы генерируемым электродуговым испарителем (ЭДИ) с Ti - катодом с подложкой, поверхностная миграция ионов и атомов титана, ионное перемешивание адсорбированных частиц.

На втором этапе реализуется одновременное осаждение частиц из плазмы, создаваемой ЭДИ с Ti - и с $C-Si$ катодами, поверхностная миграция частиц, ионное перемешивание и образование сложных карбидов.

На третьем этапе происходит переход частиц из плазмы, создаваемой ЭДИ с $C-Si$ - катодом в адсорбционный слой. Осуществляется поверхностная миграция и ионное перемешивание.

На четвертом - формирование слоя Ti , поверхностная миграция, ионное перемешивание.

Пятый этап аналогичен второму, но ионы и атомы Ti осаждаются на слой, состоящий из $C-Si$. Происходит образование сложных карбидов и карбосилицидов титана на границе раздела слоев углерод-кремний и титан. Все этапы процесса формирования многослойного покрытия реализуются в условиях модифицирования поверхности ионами инертного газа аргона. Второй – пятый этапы могут быть воспроизведены в зависимости от заданного количества слоев.

Основой разработки метода получения нового материала ВИП многослойных покрытий композиции $Ti-C-Si$ с использованием в качестве реагентов C и Si – графита, пропитанного кремнием и разработки новой технологии, служила серия проведенных экспериментов по зажиганию разряда, его стабилизации и по формированию покрытий на основе углерода. Для графитокремниевого катода приведены полученные экспериментальные

зависимости влияния технологических характеристик: напряжения смещения, давления, тока фокусировки на величину плотности тока от (рисунок 3,4).

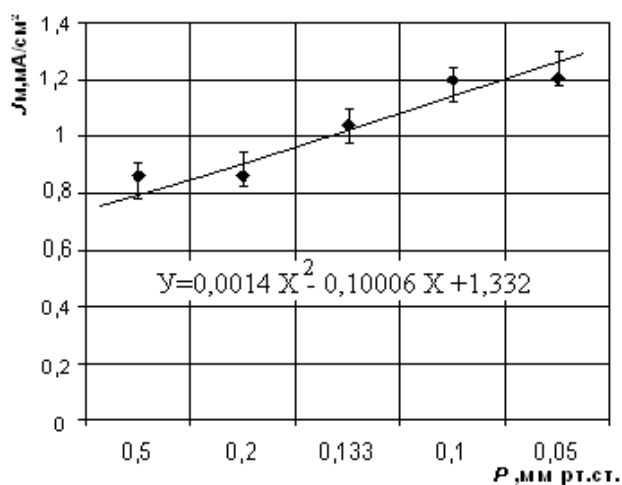


Рисунок 3 – Влияние плотности тока на подложке от давления при напряжении смещения $U=50\text{В}$ и токе дуги $J_d = 50\text{А}$

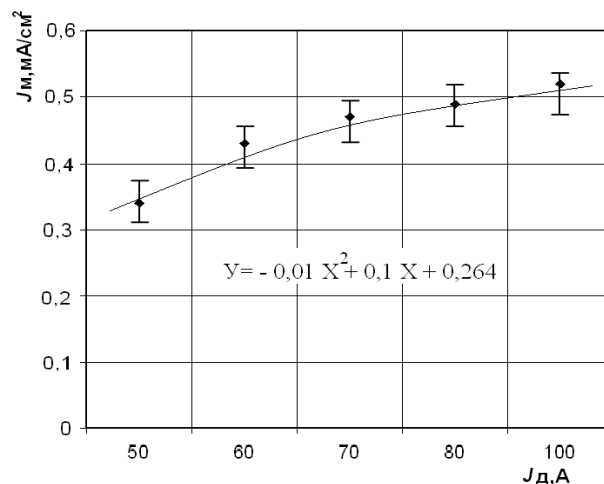


Рисунок 4 – Влияние плотности тока на подложке от тока дуги при смещении $U=50\text{В}$ и давлении $P=10^{-1}$ Па

Разработана модель процесса формирования многослойного покрытия системы $Ti-TiN$ с СМК структурой в условиях плазменного ассистирования, применительно к модернизированной установке ННВ 6.6 – И1.

Первый этап процесса – модифицирование поверхности и активация центров адсорбции на подложке несамостоятельным диф.разрядом производится с помощью плазмогенератора «ПИНК» в среде аргона, отрицательном смещении на подложке, длительности обработки до прекращения возникновения микродуг.

На втором этапе формирования многослойного покрытия с СМК структурой, осуществляется взаимодействие частиц из плазменного потока ЭДИ с титановым катодом с подложкой, миграция атомов и ионов титана. Формируется Ti слой.

На третьем этапе в вакуумную камеру подается рабочий газ азот (N_2) и происходит формирование слоя покрытия. На поверхности образуется Ti_xN_y .

На четвертом этапе количество рабочего газа увеличивают для формирования на поверхности TiN . Затем с помощью системы напуска

рабочего газа происходит снижение подачи азота в вакуумную камеру и на поверхности происходит осаждение слоя покрытия Ti_xN_y , либо чистого Ti , в зависимости от получаемого состава покрытия. Осаждения Ti из плазмы, генерируемой электродуговым испарителем, осуществляется в условии модифицирования поверхности дополнительной ионной бомбардировкой.

Третий и четвертый этапы повторяются в зависимости от заданного количества слоев.

Покрытие формировалось в процессе чередования слоев Ti и $C-Si$ из плазмы, создаваемой ЭДИ, расположенными под определенным углом к поверхности обрабатываемой детали. Испарители расположены по бокам вакуумной камеры под углом 120° .

В четвертой главе рассматривается использование дополнительной ионной бомбардировки для модифицирования и активации поверхности, предварительного нагрева и проведения процесса в условиях плазменного ассистирования.

Модифицирование обрабатываемой поверхности может быть реализовано проведением процесса в несамостоятельном сильноточном разряде с накалимым катодом, используя плазмогенератор ПИНК, который придает дополнительное ускорение ионам, а также ускоряет диффузионные процессы в приповерхностных слоях обрываемого изделия. Эффективность процесса проявляется в возможности получения покрытий, содержащих нитриды, карбиды и карбосилициды металлов, у которых температура составляет ($T = 100 - 300^\circ C$), то есть значительно более низкая, чем температура образования этих соединений ($T = 800 - 1000^\circ C$), как определяет равновесная термодинамика. Генерация частиц распыляемого материала, реализованная с использованием ЭДИ с катодным пятном и генерация ионов аргона в сильноточном диффузионном разряде без образования катодного пятна, горящие одновременно, позволяют существенно повысить концентрацию частиц, а, следовательно, ускорить процессы адсорбции, хемосорбции и ионного перемешивания. Благодаря синтезу покрытий в таких условиях,

протекают новые фазовые превращения, которые не возможны или нестабильны в обычных условиях, тем самым возможно получение соединений с уникальными свойствами.

Модифицирование поверхности может быть реализовано с помощью плазмы повышенной плотности, создаваемой между технологическим экраном, в виде сетки, и подложкой. Проведение процесса с использованием разряда на основе эффекта полого катода, позволяет не только снизить энергетические затраты, упростить реализацию обработки, (так как не требуется модернизация существующего оборудования, закупка и установка дополнительного), но и значительно сократить попадание капельной фазы на обрабатываемую поверхность при нанесении покрытий.

Способ (патент № 2075538 от 20.03.1997) обработки поверхности на основе разряда с эффектом полого катода, позволяющий модифицировать поверхность, заключается в том, что в системе, состоящей из специального экрана в виде сетки и подложки, находящейся под отрицательным потенциалом, формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц, создаваемая быстрыми осциллирующими электронами, эмиттируемыми с поверхности катодной полости. Ионная бомбардировка стимулирует обрабатываемую поверхность, способствуя активному зародышеобразованию на этапе синтеза покрытия. Уменьшается шероховатость поверхности, нарушается направленность столбчатых кристаллов. Наблюдаемые явления: образование равновесной мелкозернистой структуры, повышение плотности и улучшение свойств покрытия. Схема образования разряда на основе эффекта полого катода представлена на рисунке 5.

Необходимым условием возникновения эффекта полого катода является частичное или полное перекрытие зон отрицательного свечения, т.е. расстояние между деталью и сеткой h должно удовлетворять соотношению:

$$h \leq 2 \cdot d_k \approx 2 \cdot \ell_L; \quad (1)$$

где d_k – ширина области отрицательного свечения;

ℓ_L – ширина люнговского слоя.

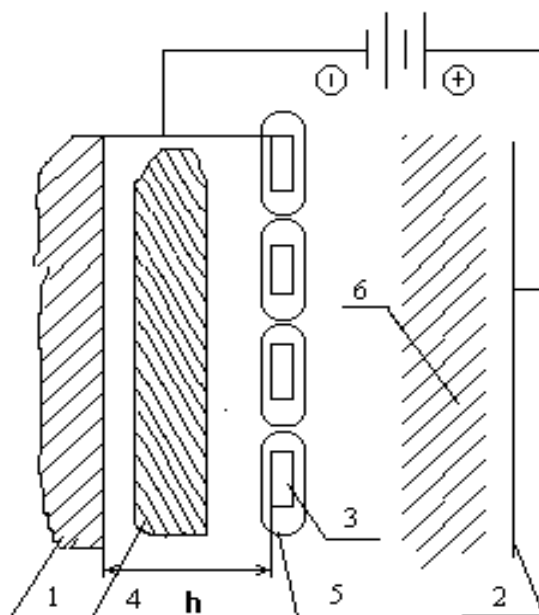


Рисунок 5 – Схема реализации процесса модифицирования поверхности на основе разряда с эффектом полого катода: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – анод, 3 – экран (сетка), 4 – плазма полого катода, 5 – прикатодные области объемного заряда, 6 – плазма тлеющего разряда

Экран подбирается таким образом, чтобы исключить уход электронов из полости, вследствие чего происходит интенсивная бомбардировка ионами инертного газа распыляемой поверхности.

Физическая модель разряда на основе эффекта полого катода описывается следующими основными положениями:

1. Эмиссия электронов с катода ограничивается пространственным зарядом, т.е. предполагается бесконечная эмиссионная способность катода. В реальной ситуации это положение можно использовать, если эмиссионная способность катода превосходит пропускную способность разрядного промежутка, что реализуется для большинства разрядов с плазменными катодами.

2. Частицы рождаются с нулевыми скоростями. Экспериментальные данные показывают, что электроны в низкотемпературной плазме рождаются с

достаточно узким распределением по энергиям, максимум приходится на 1 – 2 эВ, поэтому для начальной стадии разряда, когда напряжение на промежутке равно 100 В и более, это приближение вполне допустимо.

3. Наличие вторичной эмиссии. При анализе условий горения разряда с полым катодом предполагаем, что ионизация, в основном, определяется быстрыми вторичными электронами, эмитированными стенками полости, и пренебрегаем ионизацией плазменными электронами.

4. Принимаем, что полость имеет бесконечную длину и ширину, плазма в ней квазинейтральна и однородна с максвелловским распределением по скоростям.

5. Пристеночный слой считаем бесстолкновительным, так как размеры слоя d_k много меньше длины свободного пробега ионов λ .

Граничные условия:

– суммарный ток в катодной полости складывается из ионного и электронного токов:

$$I_i(0) + I_e(0) = I_{kn}, \quad (2)$$

– на поверхности катода при $x=0$ электроны рождаются за счет вторичной эмиссии и электронный ток связан с ионным соотношением:

$$I_e(0) = \gamma \cdot I_i(0), \quad (3)$$

где γ – коэффициент вторичной эмиссии, зависящий от материала катода и свойств газа.

Соотношение для коэффициента осцилляции ν :

$$\nu = \frac{1 - (1 - D)^{\ell_k/h}}{D}, \quad (4)$$

где D – прозрачность экрана (сетки); ℓ_k – длина области катодного падения потенциала; h – расстояние между экраном и обрабатываемой деталью.

Уточненная зависимость (4), определяющая прозрачность экрана D , выражается соотношением:

$$D = \frac{S_{отв}}{S_{\Sigma}} = \frac{(a - 2\ell_c)^2}{(a + b)^2}, \quad (5)$$

где $S_{отв}$ – площадь отверстий; S_{Σ} – суммарная площадь экрана; a – размер ячейки; b – расстояние между ячейками; ℓ_c – ширина приэлектродного слоя, определяемая зависимостью:

$$\ell_c = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{0,4 \cdot n_e} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{2}{e \cdot k \cdot T_e} \right)^{1/4} \cdot \phi_k^{3/4}, \quad (6)$$

где n_e – концентрация электронов; T_e – температура электронов в плазме; k – постоянная Больцмана; ϕ_k – катодное падение потенциала.

Зная распределение электрического поля в катодном слое, найдем падение потенциала в слое и тем самым вольт-амперную характеристику катодного слоя:

$$\varphi_k = \int_0^{\infty} E(x) dx = E_k \cdot \nu \cdot \alpha^{-1}(E_k). \quad (7)$$

Ток связан с полем на катоде соотношением:

$$j_0 = \varepsilon_0 \cdot \mu_i \cdot \alpha(E_k) \cdot (1 + \gamma) \cdot E_k^2, \quad (8)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для определения технологических параметров дополнительной ионной бомбардировки, реализуемой разрядом на основе эффекта полого катода, следует использовать параметры или зависимости, принятые для разрядов в газе. Таковыми для данного типа разряда является вольт-амперная характеристика (рисунок 6).

Разработанные методы модифицирования поверхности с использованием дополнительной ионной бомбардировки применяются для предварительной ионной очистки, активации поверхности и предварительного нагрева, а также для нанесения покрытий.

В качестве дополнительной ионной бомбардировки используется несамостоятельный сильноточный диффузионный разряд, реализуемый плазменным генератором ПИНК, или ионная бомбардировка поверхности может быть осуществлена разрядом на основе эффекта полого катода.

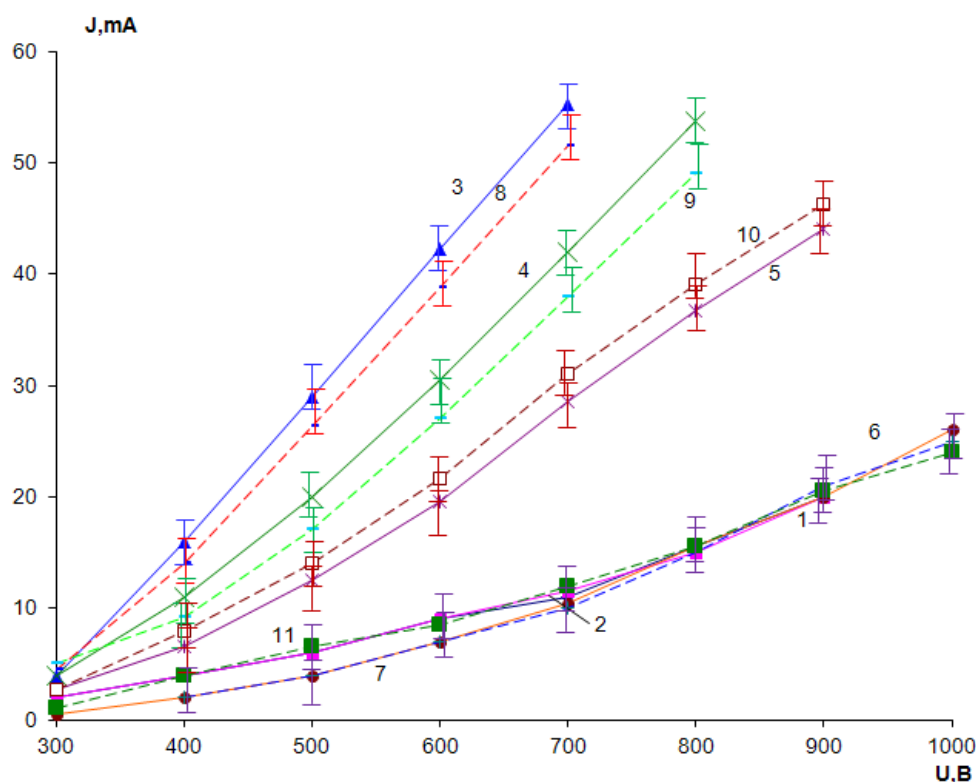


Рисунок 6 – Вольт-амперные характеристики разряда при варьировании расстояния между экраном и обрабатываемой деталью. Расстояние между катодом и анодом $L=150$ мм;

1 – $h=0$; 2 – $h=3$; 3 – $h=10$; 4 – $h=16$; 5 – $h=20$; 6 – $h=40$; 7 – $h=0$ (расч.);
8 – $h=10$ (расч.); 9 – $h=16$ (расч.); 10 – $h=20$ (расч.); 11 – $h=40$ (расч.)

В пятой главе приведены исследования химического и фазового состава нового материала для многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий с СМК структурой.

При формировании покрытия осаждение слоев Ti чередуются с осаждением C и Si при модифицировании поверхности в условиях дополнительной бомбардировки ионами Ar , что приводит к получению покрытия, содержащего Ti , C , TiC , SiC , $TiSi$ и $Ti-C-Si$. При взаимодействии

между слоями *Ti* и *C-Si* на границе их раздела происходит снижение содержания титана, кремния и повышение содержания карбида и карбосилицида титана.

Исследование методом вторичной ионной масс-спектрометрии образцов с многослойными покрытиями (рисунок 7) и результаты рентгеноструктурного анализа (рисунок 8) выявило наличие в поверхности простых и сложных соединений: *Ti*, *Si*, *C*, *TiC*, *TiC₂*, *Ti₂C*, *Ti₆₆C*, *Ti₈C₅*, *SiC*, *TiSi*, *TiSi₂*, *Ti₃SiC₂*, *Ti₅Si₃C*. Количественный состав масс спектров приведен в таблице 2.

Анализ масс-спектров многослойного покрытия и покрытия с СМК структурой показал, что фазовый состав покрытия зависит от толщины слоев.

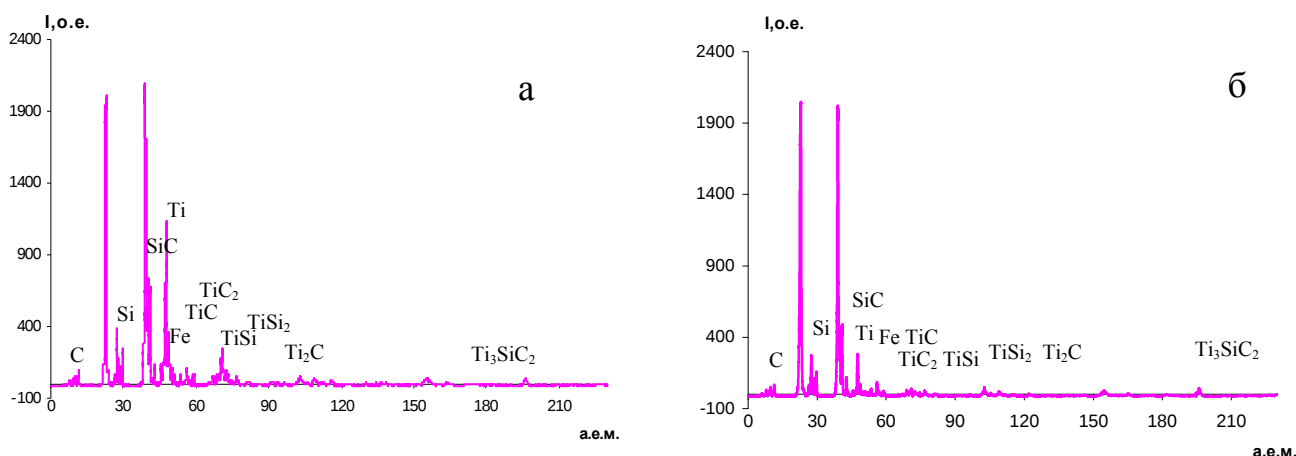


Рисунок 7 – Масс-спектры вторичных ионов многослойного покрытия (а) и покрытия с СМК структурой (б)

Анализ дифрактограмм (рисунок 8) системы *Ti – C – Si* показал:

- фазовый состав многослойного покрытия и покрытия с СМК структурой зависит от толщины отдельного слоя;
- снижение интенсивности линий, соответствующих фазам *Ti*, *C*, *SiC*, и повышение интенсивности линий, соответствующих фазам *Ti_xC_z*, *Ti_xSi_yC_z* наблюдается при переходе от многослойного покрытия к покрытию с СМК структурой;

– присутствие карбосилицида титана в покрытиях свидетельствует о взаимодействии между слоями Ti и C-Si на границе раздела слоев.

Таблица 2

Количественный анализ масс спектров

	Ti	C	Si	SiC	TiC	TiC ₂	Ti ₂ C	TiSi	TiSi ₂	Ti ₃ SiC ₂
Многослойное покрытие Ti/C-Si/Ti	23%	5%	8%	21%	2%	7%	1%	1%	1%	1%
Покрытие с СМК структурой Ti-C-Si	13%	7%	9%	24%	2%	9%	1%	1%	2%	1%

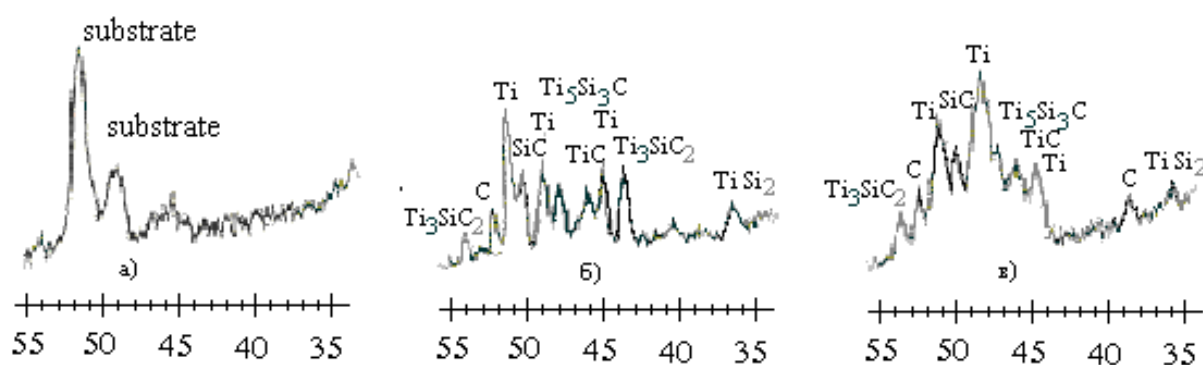


Рисунок 8 – Дифрактограммы покрытия композиции Ti-C-Si: Подложка BT6:
а – исходное состояние; б – покрытие с СМК структурой; в – многослойное покрытие

Модифицирование поверхности ионами аргона (Ar^+), в процессе синтеза многослойного покрытия стимулирует взаимодействие атомов между слоями титана и углерод-кремния с образованием фаз карбосилицидов титана и сложных карбидов, хотя интегральные температуры подложки существенно более низкие, чем при традиционных технологиях получения фаз карбида титана в системе Ti – C (рисунок 9 б).

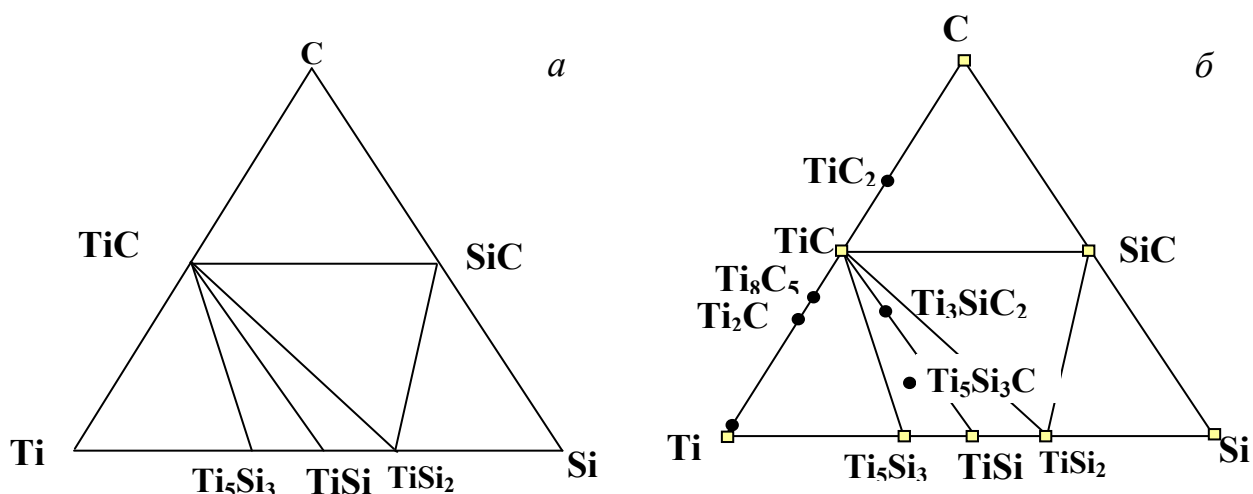


Рисунок 9 – Диаграммы состояния системы Ti-C-Si полученные:

а) высокотемпературным синтезом, б) вакуумным ионно-плазменным методом в условиях дополнительной ионной бомбардировки

Например, температура при синтезе методом плазмохимии составляет 900 – 1150 °С, при углетермическом 1200 – 1400 °С, газотермическом плазменном напылении 3000 °С. Диаграмма тройных соединений системы Ti-C-Si, полученного высокотемпературным синтезом показана на рисунке 9 а.

Вторичная ионная масс-спектропия и рентгеноструктурный анализ показали, что в покрытиях, синтезированных в условиях ионного ассистирования, присутствуют тройные соединения – карбосилициды титана, позволяющего повысить эксплуатационные свойства деталей.

Для синтеза покрытий, из микро- и нанослоёв системы Ti – TiN использовалась промышленная модернизированная установка ННВ-6.6-И1. На образцы и лопатки компрессора ГТД из материала 13X11H2BMФ осаждались покрытия, состоящие из 30 – 50 слоёв с толщиной слоёв от 30 нм до 100 нм.

С целью исследования структуры нанесенного материала и определения его фазового состава были проведены рентгеноструктурные исследования (рисунок 10).

Анализ физического уширения рентгеновских пиков образца проводили путем сравнения интегральной ширины дифракционных пиков на половине их высоты с шириной рентгеновских пиков эталона. Анализ диаграммы,

приведенной на рисунке 10, позволяет сделать вывод, что дифракционные пики рентгенограммы для образцов, полученных по предлагаемой технологии, различаются по величине интенсивности, и что внутренние напряжения в покрытии уменьшаются с увеличением числа слоев. Указанные особенности покрытий, полученных при проведении процесса в условиях дополнительной ионной бомбардировки, приводят к увеличению коррозионной стойкости.

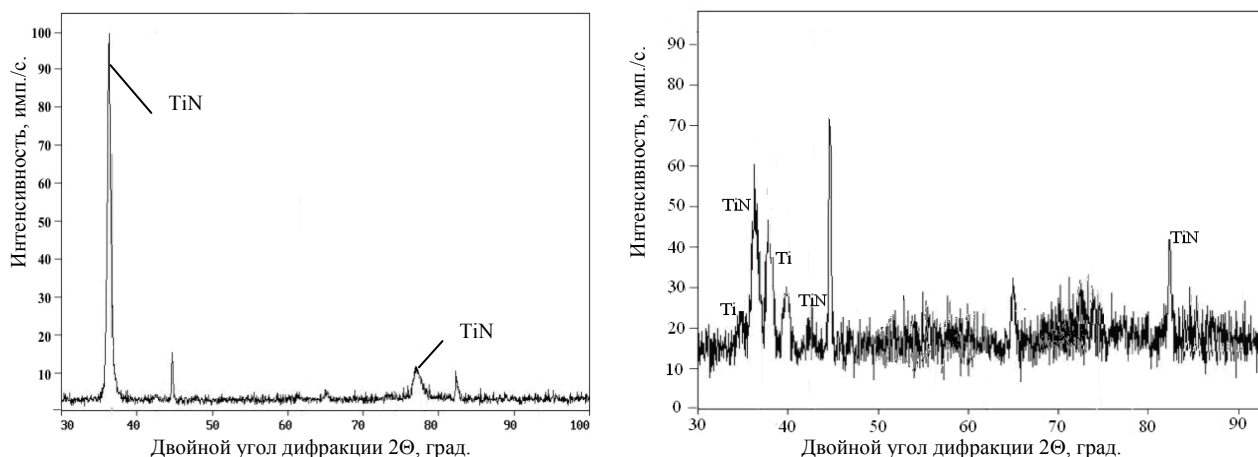


Рисунок 10 – Рентгенограмма однослойного TiN и многослойного покрытия композиции Ti-TiN с СМК структурой

На рисунке 11 приведен внешний вид сферических лунок после истирания исследуемого покрытия вращающимся шариком на приборе GSM CALOTEST. Наблюдаемые кольца соответствуют границам: «атмосфера-поверхность покрытия» внешнее кольцо и «покрытие - основной материал» (внутреннее кольцо). В случае многослойного покрытия на шлифе отчетливо просматриваются промежуточные слои.

При осаждении вакуумных ионно-плазменных покрытий с модифицированием поверхности в тлеющем разряде на основе эффекта полого катода на поверхности основы образуется покрытие с СМК структурой с величиной структурных составляющих менее 70 ± 30 нм, по сравнению с модельными покрытиями с мелкоблочной структурой.

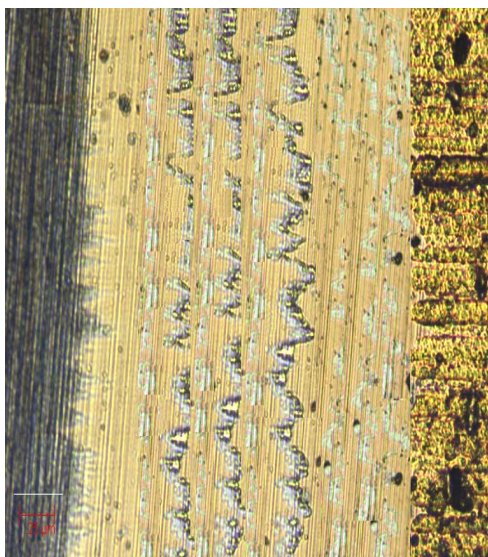


Рисунок 11 – Внешний вид кратера износа образца с покрытием для покрытия Ti-TiN с СМК структурой с размерами слоев 100 нм

В шестой главе приведены результаты исследований механических и эксплуатационных свойств покрытий и их структура.

Проведенные исследования по методике ВИАМ путем изгиба образцов показали, что покрытия для различных материалов обладают высокой адгезией к основному материалу. Кроме того, исследование адгезии путем вдавливания алмазной пирамидки показало отсутствие растрескивания материала покрытия вблизи зоны воздействия. Данное испытание косвенно свидетельствует о высокой адгезии покрытия.

Исследования показали, что микротвердость покрытия с СМК структурой выше на 20 – 50 %, электродный потенциал ниже на 20 – 25 %, теплостойкость выше на 30% по сравнению с многослойным покрытием, что связано с увеличением содержания карбида и карбосилицида титана в покрытии с СМК структурой.

Для установления химических свойств покрытия с СМК структурой проводилось исследование изменения электродного потенциала во времени. Методика заключалась в измерении разности потенциалов между индикаторным электродом и электродом сравнения при отсутствии тока в электрохимической цепи. Электродный потенциал покрытия с СМК структурой ниже на 20 – 25 % по сравнению с многослойным покрытием. Следовательно,

поверхность покрытия с СМК структурой в большей степени пассивна, что косвенно свидетельствует о ее более высокой коррозионной стойкости.

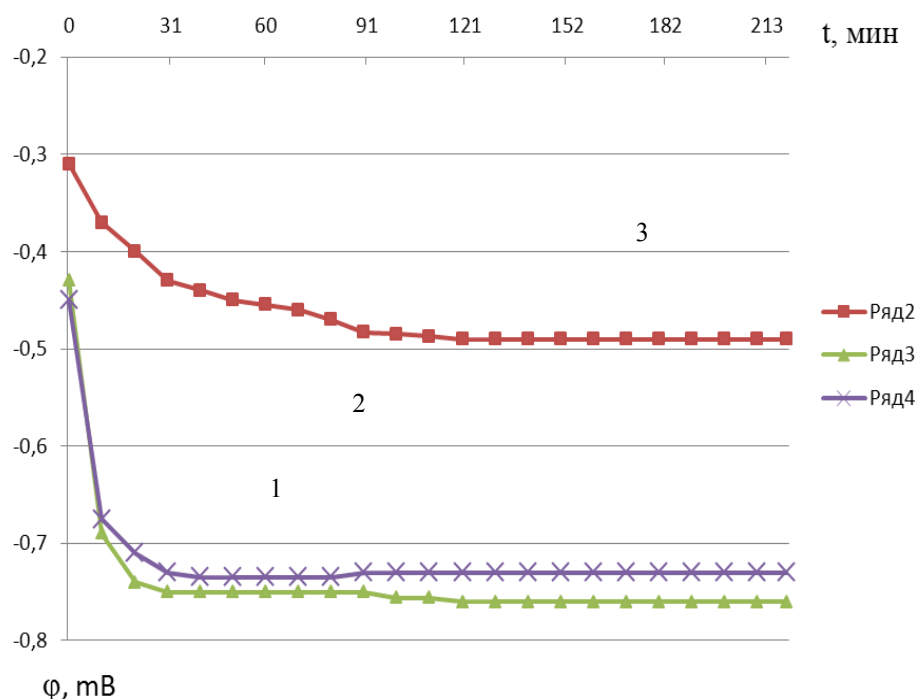


Рисунок 12 – Электродный потенциал: Подложка 13X11H2BMФ: 1 – исходное состояние; 2 – многослойное покрытие; 3 – покрытие с СМК структурой

Исследование коррозионной стойкости образцов с покрытиями определялись по изменению массы образца в результате действия коррозионной среды. Коррозионная стойкость у покрытия Ti-C-Si с СМК структурой на 22 % выше, чем у образцов с трехслойным покрытием и на 30 %, чем образец без покрытия (таблица 3).

После синтеза многослойного покрытия системы Ti-C-Si проводится последующая термическая обработка поверхности (вакуумный отжиг) при температуре 200 – 300°C и $\tau = 20$ мин. После проведения последующего отжига наблюдается повышение микротвердости поверхности на 20 – 40 % и понижение электродного потенциала на 30 – 35 %, что может быть объяснено снятием остаточных напряжений в покрытии и более активным протеканием межслоевых диффузионных процессов, которые обеспечивают увеличение содержания карбида и карбосилицида титана.

Таблица 3

Скорость коррозии образцов с покрытием системы Ti-C-Si

№	Тип покрытия	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г.	Площадь образцов, м ²	Скорость коррозии, г/м ² ·ч
1	Исходный	4,39355	4,38625	0,0015198	0,0222379
2	3-слойное покрытие	4,58860	4,58200		0,0201055
3	Многослойное покрытие	3,76240	3,75635		0,0184301
4	Покрытие с СМК структурой	4,39755	4,39245		0,0155361

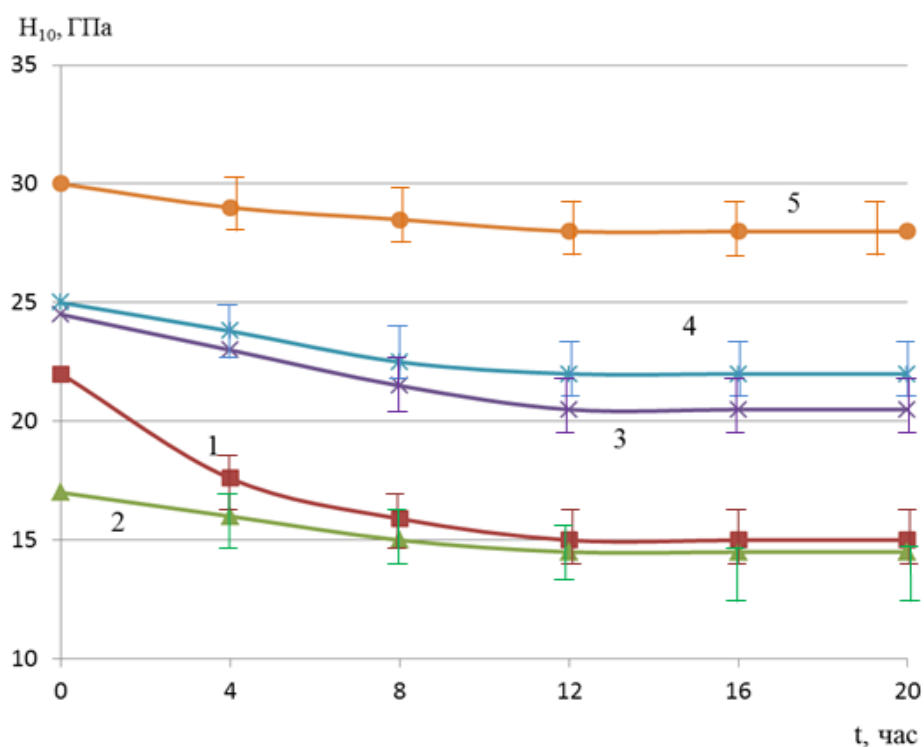


Рисунок 13 – Зависимость микротвердости от времени нагрева при температуре выдержки 600°C. Подложка ЭП718 –ИД: 1 – трехслойное покрытие, 2 – трехслойное покрытие с т/об (200 °C), 3 – покрытие с СМК структурой с т/об (600 °C), 4– покрытие с СМК структурой, 5 – покрытие с СМК структурой с т/об (200 °C)

Исследование коррозионной стойкости деталей, выполненных из материала 13X11H2BMФ с многослойными покрытиями *Ti-TiN* с СМК структурой ($h=5-7$ мкм, h слоев 50 нм), показало увеличение стойкости на 20 -

35 % по отношению к однослойным, которая достигается за счёт увеличения границ между слоями, препятствуя проникновению коррозии вглубь покрытия, тормозя и устраняя коррозионные процессы на границе среда – металл. При увеличении числа слоёв наблюдается повышению коррозионной стойкости.

Таблица 4

Скорость коррозии образцов с покрытием системы Ti-TiN

№	Тип покрытия	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г.	Площадь образцов, м ²	Скорость коррозии, г/м ² ·ч
1	Без покрытия	4,5957	4,5876	0,001752	0,021503664
2	3-слойное покрытие	4,7816	4,7749		0,017786981
3	Многослойное покрытие	3,9581	3,9519		0,016459594
4	Покрытие с СМК	4,49775	4,49277		0,013220771

Исследования многослойных покрытий композиции *Ti-TiN* с СМК структурой на теплостойкость были проведены на образцах, изготовленных из сплава ВТ-6. Температура испытаний 200 – 800 °С.

Исследования показали, что при температуре испытаний 200 °С и 400 °С микротвердость снижается на 15 - 20 %. По истечении 24-х часов значение микротвердости начинает стабилизироваться в пределах 2300 - 2100 МПа, разрушение покрытий не наблюдается. При повышении температуры испытаний до 600°С на образцах после 16 часов выдержки наблюдается резкое падение микротвердости вплоть до разрушения покрытия. При дальнейшем повышении температуры (800 °С) многослойные покрытия теряют свои эксплуатационные свойства и разрушаются в течение 4 – 8 часов.

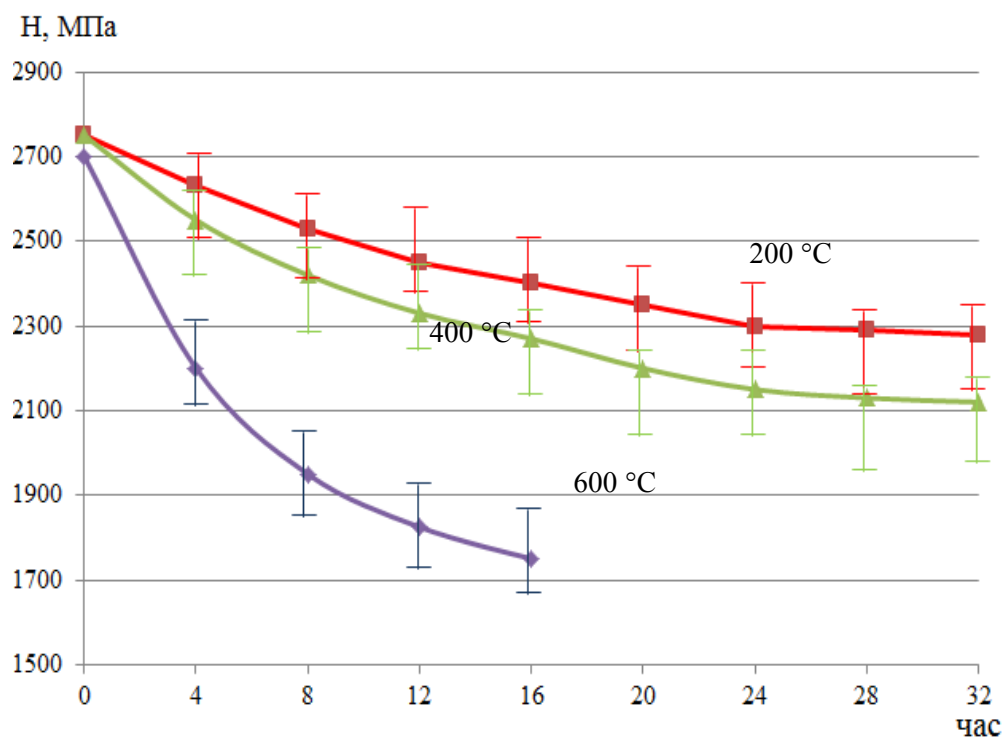


Рисунок 14 – Зависимость микротвердости многослойных покрытий $Ti-TiN$ от времени нагрева

Результаты исследования усталостной прочности показали, что при проведении испытаний лопаток на контрольном уровне напряжений σ_k и базовом числе циклов нагружения N_k ни одна из лопаток с покрытием с СМК структурой не разрушилась и покрытие сохраняло свою целостность до окончания испытания.

Эрозионная стойкость образцов с покрытиями оценивалась методом сравнительных испытаний на специализированном стенде по методике разработанной ВИАМом. Угол атаки пылевоздушного потока 20° .

Исследования показали, что у образцов ВТ-6 с покрытием $Ti-TiN$ с СМК структурой эрозионная стойкость в 1,9 раза выше, чем у исходных образцов ВТ-6 без покрытия и в 1,3 раза выше, чем у образцов из материала ВТ-6 с однослойным покрытием TiN .

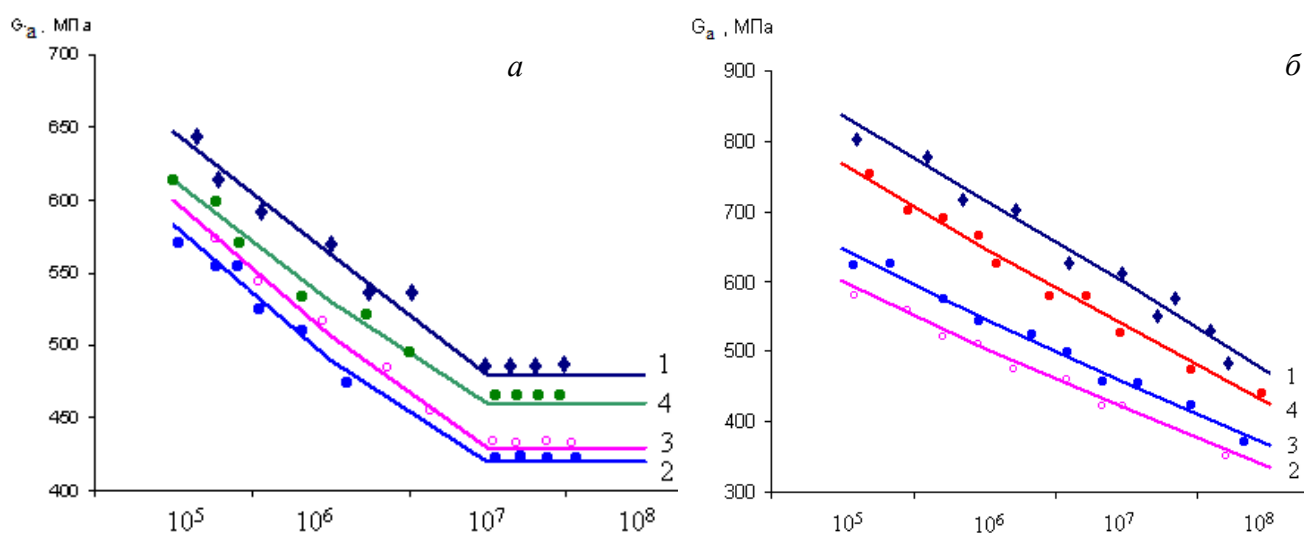


Рисунок 15 – Влияние вида покрытия на предел выносливости.

1 – исходное состояние без покрытия; 2 – покрытие $Ti-N$; 3 – многослойное покрытие (3 слоя); 4 – покрытие с СМК структурой.

Подложка: а) сталь 13X11H2B2МФ-Ш, б) сплав ВТ-6

В седьмой главе рассматриваются вопросы практического применения результатов исследования. Разработана технология осаждения и термической обработки многослойных покрытий системы $Ti-C-Si$, реализованная на модернизированной установке ННВ 6.6–И1, оснащенной плазмогенератором «ПИНК». Она позволяет получать многослойные композиты с нанометровыми слоями и многослойные покрытия с микрометровыми слоями, покрытия с СМК структурой, содержащие в поверхности карбиды, силициды и карбосилициды титана (рисунок 16).

Разработана технология осаждения нового материала многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий системы $Ti-C-Si$ применительно к лопаткам компрессора второй ступени ГТД.

Разработанная технология, позволяющая создавать многослойные ионно-плазменные покрытия системы $Ti-C-Si$ в условиях плазменного ассистирования, основана на следующих процессах:

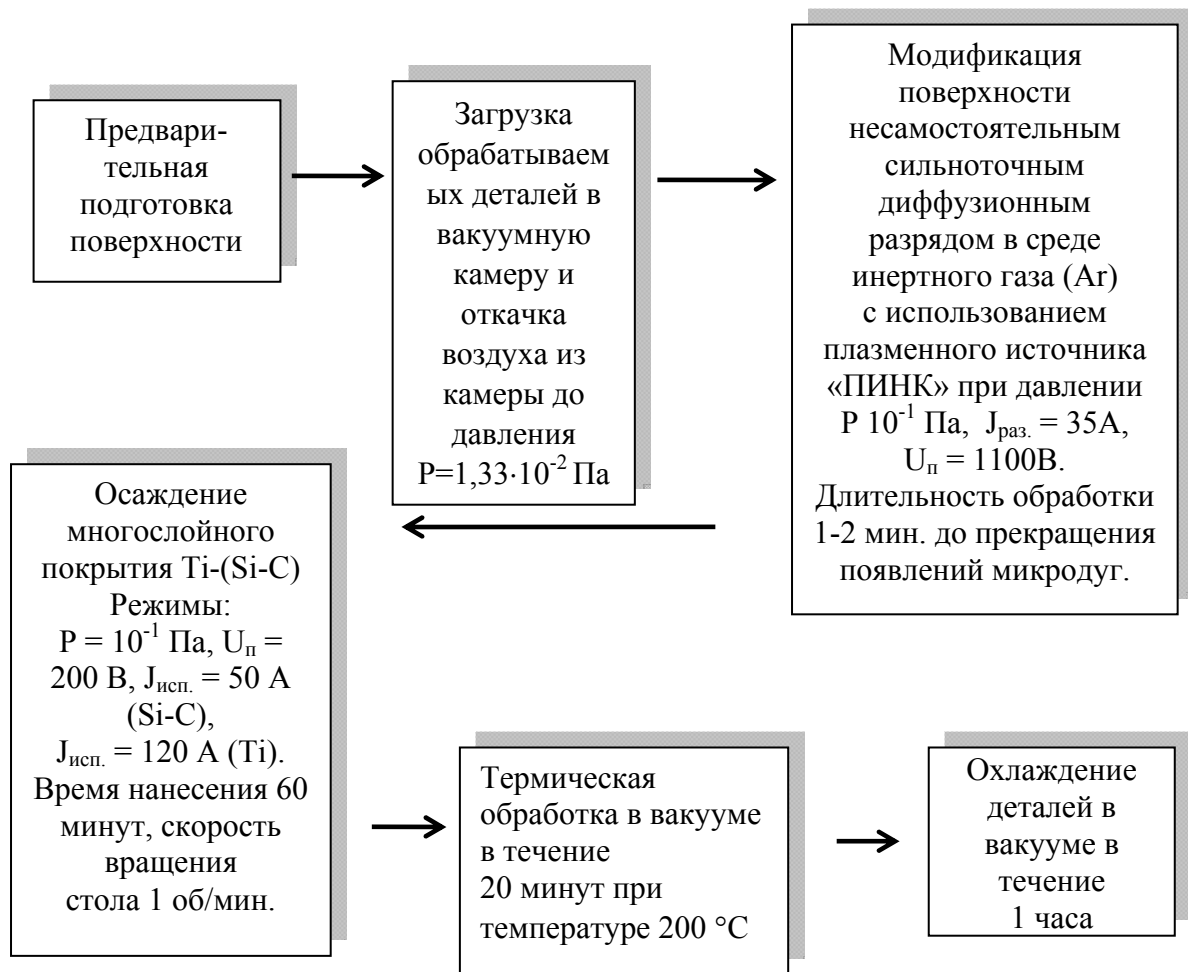


Рисунок 16 – Схема технологического процесса получения многослойного покрытия системы *Ti-C-Si*

- бомбардировка поверхности несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом производилась с помощью плазменного источника «ПИНК» в среде инертного газа (аргона), для модифицирования поверхности, ее активации и предварительной очистки;
- предварительный нагрев поверхности обрабатываемого изделия ионами металла;
- нанесение многослойных покрытий с плазменным ассистированием;
- последующая термическая обработка.

Совмещение основных технологических операций, сравнительная простота их реализации в одном вакуумном цикле определяют высокую эффективность ионно-плазменной технологии.

Разработана технология ионно-плазменного осаждения многослойных покрытий $Ti-TiN$ с СМК структурой в условиях модифицирования поверхности дополнительной ионной бомбардировки, обеспечивающая повышение качества поверхностного слоя деталей ГТД и высокую адгезионную прочность покрытий.

Разработана технология нанесения защитных покрытий, включающая модификацию в тлеющем разряде, ионную очистку и осаждение покрытий на лопасти компрессора ГТД, в которой с целью получения покрытия с СМК структурой с высокими эксплуатационными свойствами, осаждение осуществляют при одновременной дополнительной ионной бомбардировке поверхности, реализуемой с использованием разряда на основе ЭПК.

Проведена модернизация промышленной установки ННВ-6.6-И1, обеспечивающая осаждение многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий. Обработаны опытные партии деталей на модернизированной установке ННВ 6.6–И1 по типовому технологическому процессу. Создан промышленный участок для нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на ОАО «УМПО».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан принципиально новый способ получения нового материала покрытия системы $Ti-C-Si$ с субмикроструктурной структурой, основанный на осаждении нанометровых слоев Ti и $C-Si$ из плазмы, генерируемой титановым и графитокремниевым катодами.

2. Установлено, что при нанесении нового материала покрытия системы $Ti-C-Si$ методом осаждения нанометровых слоев в условиях плазменного ассистирования образуются сложные карбиды ($Ti_{66}C$, Ti_8C_5 и др.) и

карбосилициды титана (Ti_3SiC_2 , Ti_5Si_3C). Впервые установлено, что повышение эксплуатационных свойств лопаток компрессора ГТД связано с образованием в покрытии СМК структуры и наличием в поверхностном слое сложных карбидов и карбосилицидов титана.

3. Впервые установлено, что повышение коррозионной стойкости (на 20 – 35 %), термической стабильности (на 25 – 30 %) многослойных покрытий системы $Ti-C-Si$ определяется синергетическим эффектом уменьшения толщины слоев нового материала многослойного покрытия на лопатках компрессора ГТД до нанометровых значений и проведением процесса осаждения в условиях плазменного ассистирования.

4. Впервые установлено, что повышение коррозионной стойкости (на 30 – 35 %), эрозионной стойкости (в 1,5 – 1,9 раза), термической стабильности (на 10 – 25 %) и предела выносливости (на 25 – 30%) многослойных покрытий системы $Ti-TiN$ определяется синергетическим эффектом уменьшения толщины слоев многослойного покрытия до нанометровых значений и проведением процесса осаждения в условиях плазменного ассистирования.

5. Впервые экспериментально установлен диапазон температур термической обработки деталей с многослойными покрытиями системы $Ti-C-Si$, в котором наблюдается повышение микротвердости, коррозионной стойкости и термостойкости, что объясняется увеличением содержания карбидов и карбосилицидов титана в покрытии на лопатках компрессора ГТД и сохранением многослойной композиции.

6. Разработан способ модификации поверхности с помощью плазмы повышенной плотности, создаваемой между экраном, в виде сетки, и обрабатываемой поверхностью, позволяющий осуществлять процесс модификации при нанесении многослойных покрытий с СМК структурой на лопатки компрессора ГТД.

7. Разработаны и рекомендованы к внедрению в производство на ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» технологический процесс нанесения многослойных вакуумных ионно-

плазменных покрытий систем $Ti-C-Si$ и $Ti-TiN$ на детали ГТД. Создан производственный участок на ОАО «УМПО» для нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Монография

Шехтман, С.Р. Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов: физические основы и технические решения / В.В. Будилов, В.С. Мухин, С.Р. Шехтман // - М.: Наука, 2008. - 194 с.

Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК

1. **Шехтман, С.Р.** Новые ионно-плазменные технологии в производстве деталей ГТД [Текст] / В.С. Мухин, В.В. Будилов, С.Р. Шехтман, Н.Ф. Измайлова // Вестник Самарск. Гос. аэрокосм. ун-та. – Самара: Изд. Самарск. гос. аэрокосм. ун-та, , -1999. – С.52-55 (личный вклад: 1 ж.л.).

2. **Шехтман, С.Р.** Обработка поверхности деталей ГТД тлеющим разрядом на основе эффекта полого катода [Текст] / В.С. Мухин, В.В. Будилов, С.Р. Шехтман, Р.М. Киреев // Изв. Высших учебных заведений. Авиационная техника. - Казань. 2000, -№ 4. - С. 38 - 40. (личный вклад: 1 ж.л.).

3. **Шехтман, С.Р.** Использование разряда с полым катодом для обработки поверхности конструкционных материалов [Текст] /В.В. Будилов, С.Р. Шехтман, Р.М. Киреев // Физика и химия обработки материалов М.: - 2001. №2. - С. 31 - 35. (личный вклад: 1,6 ж.л.).

4. **Шехтман, С.Р.** Осаждение вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатки турбины ГТД с использованием разряда на основе эффекта полого катода [Текст] / В.В. Будилов, С.Р. Шехтман, Н.Ф. Измайлова // Изв. Высших учебных заведений. Авиационная техника. - Казань. 2001, -№ 1. - С. 76 - 77. (личный вклад: 1 ж.л.).

5. **Шехтман, С.Р.** Технология создания защитных поверхностных слоев на основе разряда с использованием эффекта полого катода [Текст] / С.Р. Шехтман, О.В. Голубев, Н.А. Сухова / Вестник УГАТУ. – Уфа: -2003. - Т. 4., №1. С. 221 – 223 (личный вклад: 2 ж.л.).

6. **Шехтман, С.Р.** Технология получения наноструктурированных защитных покрытий [Текст] / С.Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – Уфа: -2006. - Т. 7., №1 (14). - С. 188 – 191.

7. **Шехтман, С.Р.** Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования [Текст] / В.С. Мухин, С.Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – Уфа: -2007. - Т. 9., №1 (19). - С. 84 – 91 (личный вклад: 4 ж.л.).

8. **Шехтман, С.Р.** Исследование свойств наноструктурированных вакуумных ионно-плазменных покрытий [Текст] / С.Р. Шехтман, Р.М. Киреев // Известия МГТУ «МАМИ». – М.: - 2010. – Т 2 (10). - С. 82 – 90 (личный вклад: 6 ж.л.).

9. **Шехтман, С.Р.** Исследование эксплуатационных свойства материалов лопаток компрессора с вакуумными наноструктурированными ионно-плазменными покрытиями на основе Ti-C-Si [Текст] / С.Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – Уфа: - 2010. - Т. 14, №5 (40). - С. 75 – 79.

10. **Шехтман, С.Р.** Технология нанесения вакуумных ионно-плазменных наноструктурированных покрытий Ti-TiN [Текст] / В.С. Мухин, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – Уфа: - 2011. - Т. 15., №4(44). - С. 212 – 215 (личный вклад: 2 ж.л.).

11. **Шехтман, С.Р.** Технология получения вакуумных ионно-плазменных покрытий Ti-C-Si с субмикрорекристаллической структурой в условиях плазменного ассистирования. Вакуумная техника и технология - С.Петербург, 2012. С. 104-105.

12. **Шехтман, С.Р.** Методология создания покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами и технология их нанесения на лопатки

компрессора ГТД [Текст] / В.С. Мухин, В.В. Будилов, С.Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – Уфа: - 2012. - Т. 16., №5 (50). - С. 149 – 153. (личный вклад: 3 ж.л.).

13. **Шехтман, С.Р.** Синтез вакуумных ионно-плазменных покрытий с СМК структурой на основе композиции углерод-металл" [Текст] / В.С. Мухин // Наноинженерия, №1, 2013. – С. 32 – 36.

Патенты на изобретения

14. **Шехтман, С.Р.** Устройство для нанесения вакуумно-плазменных покрытий [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Пат.2075538 РФ, МКП ⁶ С 23 С 14/34, Заявлено 22.11.93; Оpubл. 20.03.97, Бюл.№8.

15. **Шехтман, С.Р.** Способ обработки поверхности [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Пат.2096493 РФ, МКП ⁶ С 23 С 14/02, Заявлено 17.10.94; Оpubл. 20.11.97, Бюл.№32.

16. **Шехтман, С.Р.** Способ катодного распыления [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Пат.2101383 РФ, МКП ⁶ С 23 С 14/34, Заявлено 19.02.95; Оpubл. 10.01.98, Бюл.№1.

17. **Шехтман, С.Р.** Способ ионной имплантации [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Пат.2087586 РФ, МКП ⁶ С 23 С 14/48, Заявлено 08.04.94; Оpubл. 20.08.97, Бюл.№23.

18. **Шехтман, С.Р.** Способ азотирования в тлеющем разряде [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Пат.2095462 РФ, МКП ⁶ С 23 С 8/36, Заявлено 17.10.94; Оpubл. 10.11.97, Бюл.№31.

19. **Шехтман, С.Р.** Способ вакуумно-плазменного нанесения покрытий [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Пат.2145362 РФ, МКП ⁶ С 23 С 8/36, Заявлено 16.10.97; Оpubл. 10.02.2000, Бюл.№.

20. **Шехтман, С.Р.** Способ вакуумного ионно-плазменного нанесения многослойных композитов, содержащих сложные карбиды [Текст] / В.В. Будилов, С.Р. Шехтман, Н.А. Сухова // Пат.2272088 РФ, МПК С 23 С 14/24, Заявлено 12.07.2004; Оpubл. 20.03.2006, Бюл.№.

Статьи в других изданиях

21. **Шехтман, С.Р.** Моделирование интегрированной технологии с использованием ионных пучков и плазменных потоков. [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Материалы III конф. «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц» Т. 2. – Томск: ИСЭ СО РАИ 1994. С. 115 – 118. (личный вклад: 1,5 ж.л.).

22. **Шехтман, С.Р.** Технология ионного модифицирования поверхности конструкционных материалов на основе эффекта полого катода [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Материалы международной конф. “Напыление и покрытия - 95”. - С.-Петербург: изд. СПб ГТУ, 1995. – С.127-130 (личный вклад: 1 ж.л.).

23. **Шехтман, С.Р.** Модификация поверхности лопаток турбин ГТД с использованием эффекта полого катода [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Материалы IV международной конференции “Новые технологии в машиностроении”. - Харьков: изд. ХАИ, 1995. – С. 56. (личный вклад: 0,5 ж.л.).

24. **Шехтман, С.Р.** Ионное модифицирование поверхности с использованием эффекта полого катода [Текст] / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман // Материалы IV Всероссийской конференции по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. –Томск: Изд. Сибирского отделения РАН, 1996.-С.121-125. (личный вклад: 3 ж.л.).

25. **Шехтман, С.Р.** Технология нанесения защитных вакуумных ионно-плазменных покрытий на детали ГТД: проблемы и перспективы [Текст] / В.В. Будилов, В.В. Мухин, С.Р. Шехтман // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе. – Самара: Изд. Самарск. гос. аэрокосм. ун-та, -1997. - С. 32 - 34. (личный вклад: 1 ж.л.).

26. **Шехтман, С.Р.** Технология нанесения высокотвердых покрытий с использованием графитовых катодов и тлеющего разряда [Текст] / В.С. Мухин, С.Р. Шехтман, Н.А. Сухова // Материалы 6 международной конференции

«Модификация материалов потоками частиц и плазменными потоками. - Томск, - 2002, - С. 555-558 (личный вклад: 2 ж.л.).

27. **Шехтман, С.Р.** Исследование фазового состава многослойных покрытий системы Ti-C-Si, синтезированных из плазмы вакуумно-дугового разряда [Текст] / В.С. Мухин, В.В. Будилов, С.Р. Шехтман, Н.А. Сухова // Труды XVI Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – Севастополь: -М.: 2004. – С. 615-619. (личный вклад: 2 ж.л.).

28. **Шехтман, С.Р.** Рентгеноструктурный анализ многослойных покрытий системы Ti-C-Si, синтезированных из плазмы вакуумно-дугового разряда [Текст] / В.С. Мухин, В.В. Будилов, С.Р. Шехтман, Н.А. Сухова // Материалы XI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». – М.: МИЭМ, 2004. – С.384-388. (личный вклад: 2 ж.л.).

29. **Шехтман, С.Р.** Эксплуатационные свойства вакуумных ионно-плазменных наноструктурированных покрытий на деталях энергетических установок [Текст] / В.С. Мухин, С.Р. Шехтман// Сборник докладов Харьковской нанотехнологической ассамблеи-2008. –Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008. –С.30 – 33. (личный вклад: 1 ж.л.).

30. **Шехтман, С.Р.** Исследование свойств вакуумных наноструктурированных ионно-плазменных покрытий [Текст] / С.Р. Шехтман, Р.И. Ишбулдин // XVI научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» Материалы конференции 2009. С. 212-216 (личный вклад: 4 ж.л.).

31. **Шехтман, С.Р.** Свойства вакуумных наноструктурированных ионно-плазменных покрытий на основе Ti-C-Si [Текст] / С.Р. Шехтман, К.Н. Рамазанов // Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов, г. Белгород, 2009. С. 294 – 297 (личный вклад: 3 ж.л.).

32. **Шехтман, С.Р.** Технология создания наноструктурированных многослойных покрытий композиции Ti-TiN вакуумными ионно-плазменными

методами [Текст] / В.С. Мухин, С.Р. Шехтман // XVII - научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» Материалы конференции, - Санкт Петербург, 2010. - С. 111 – 116 (личный вклад: 4 ж.л.).

ШЕХТМАН Семен Романович

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ИОННО-
ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С СМК СТРУКТУРОЙ И ТЕХНОЛОГИЙ
ИХ НАНЕСЕНИЯ НА ЛОПАТКИ ГТД**

Специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные
материалы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать . . . 2015. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman
Усл.печ. 2,0 Усл. Кр.-отт. 2,0 Уч.-изд.л. 1,9.

Тираж 150 экз. Заказ
ФГБОУ ВПО
Центр оперативной полиграфии