

На правах рукописи



Громов Алексей Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДОВ УСКОРЕННЫХ
ИСПЫТАНИЙ ЛОПАТОК ГТД С ПОКРЫТИЯМИ НА
ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ И АДГЕЗИЮ В УСЛОВИЯХ
ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИЛЬНОТОЧНЫХ
ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ**

Специальность 05. 07. 05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Шулов Вячеслав Александрович

Официальные оппоненты: **Смыслов Анатолий Михайлович**,
доктор технических наук, профессор, федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уфимский государственный
авиационный технический университет», профессор;

Равилов Ринат Галимчанович,
кандидат технических наук, Лыткаринский
машиностроительный завода - филиал
ПАО «ОДК-УМПО», главный металлург.

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»**

Защита состоится 23 декабря 2019 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», https://mai.ru/upload/iblock/510/Dis_Gromov-.pdf.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.125.08, д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последнее двадцать лет в авиационном двигателестроении бурное развитие получили новые прогрессивные методы модифицирования поверхностных слоев наиболее ответственных деталей ГТД. К таким методам относится вакуумно-плазменная технология высоких энергий, плазменная технология, обработка поверхности концентрированными импульсными потоками энергии. Особое развитие получило применение сильноточных импульсных электронных пучков для повышения уровня служебных свойств (усталостная прочность, жаростойкость, эрозионная и коррозионная стойкость и др.) и для ремонта лопаток компрессора и турбины ГТД. В работах сотрудников НИИЭФА имени Д.В. Ефремова (Энгелько В.И. и Ткаченко К.И.) ММП имени В.В. Чернышева (Пайкина А.Г., Белова А.Б., Крайникова А.В. и Новикова А.С.), МАИ (Шулова В.А. и Теряева Д.А.) были развиты основы технологических процессов модифицирования поверхности и ремонта лопаток ГТД из титановых сплавов, стали ЭП866-Ш и жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У, ЖС26НК и ЖС32ВИ с защитными покрытиями. Кроме того, было разработано и изготовлено оборудование для реализации технологических процессов. Испытания лопаток на технологическом изделии, проведенные на ММП имени В.В. Чернышева, показали, что этот метод обработки и ремонта может быть внедрен в производство. Все полученные результаты были приведены и обобщены в монографии «Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения» под редакцией А.С. Новикова, В.А. Шулова и В.И. Энгелько, (Изд-во Дипак, 2012, 292 с.). Таким образом, была доказана актуальность работ по развитию технологии обработки поверхности сильноточными импульсными электронными пучками, что обеспечивает повышение уровня следующих служебных свойств лопаток ГТД: усталостной прочности до 40%, жаростойкости в 4 раза, сопротивление пылевой эрозии в 2 раза и солевой коррозии до 6 раз. Все это может быть получено при облучении поверхности лопаток при плотностях энергии в импульсе от 18 до 55 Дж/см², когда в поверхностном слое реализуются процессы перекристаллизации и абляции. Если же использовать облучение при низких значениях плотности энергии, то можно проводить процесс термообработки (быстрый нагрев и охлаждение), что несомненно является актуальным. Кроме того, при таких плотностях энергии становится возможным реализовать испытания деталей на термостабильность в условиях термоциклирования, а также испытания на адгезионную прочность применяемых в производстве защитных покрытий. Такое использование сильноточных импульсных электронных пучков представляется особо актуальным, поскольку расширяются области применения ускорителей и удастся проводить ускоренные испытания, так как длительность импульса составляет всего 40 мкс, а их скважность до 30 с. Главным здесь является определение температурных полей в поверхностном слое и полей напряжений.

Степень разработанности темы исследования

Разработка и совершенствование методов испытаний на термоциклирование и адгезию защитных покрытий деталей и заготовок с использованием концентрированных импульсных потоков энергии имеет ряд преимуществ перед классическими методами испытаний, такими как термический нагрев и охлаждение на воздухе, в воде, в масле, в струе аргона и др. (термостабильность в условиях термоциклирования), а также «клеевой» метод и метод «штифта» (адгезионная

прочность покрытий): определение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя, получение температурного профиля, ускорение испытаний, обусловленное небольшим промежутком времени, затрачиваемым на нагрев и охлаждение матрицы. Применение концентрированных импульсных потоков энергии имеет, по сути, только один недостаток: высокая наукоемкость разрабатываемых методов, обусловленная необходимостью проведения длительных и дорогостоящих исследований влияния режимов облучения на физико-химическое состояние материала, определяемое после облучения для фиксации изменений в поверхностных слоях деталей.

Данная работа сконцентрирована на использовании высокоточных импульсных электронных пучков (СИЭП) для реализации ускоренных испытаний на термоциклирование и адгезию покрытий. СИЭП являются одними из наиболее доступных и развитых видов концентрированных импульсных потоков энергии для модификации свойств деталей авиационной техники и, в частности, для повышения уровня коррозионных и усталостных свойств лопаток компрессора ГТД из жаропрочных сплавов и сталей.

Методология и методы исследования

В настоящей работе, применено облучение лопаток СИЭП для построения температурного профиля и профиля напряжений с фиксацией изменений в поверхностном слое как на нано – так и на микроуровне, т.е. фиксируется собственно начало разрушения изделия.

В этой связи **цель настоящей работы** в фундаментально-прикладном отношении определяется необходимостью получения базовых знаний о влиянии режимов облучения СИЭП на физико-химическое состояние поверхностных слоев и эксплуатационные свойства деталей из жаропрочных сплавов, а с практической точки зрения - возможностью внедрения техпроцессов ускоренных испытаний на термостабильность при термоциклировании и методики определения адгезионной прочности защитных покрытий, используемых в авиадвигателестроении на предприятиях отрасли уже в ближайшее время.

Для достижения сформулированной цели было необходимо реализовать постановку и последующее решение следующих задач методического, теоретического и практического плана: (1) выбор комплексной методики исследования физико-химического состояния нано - и микро - метровых поверхностных слоев деталей из многокомпонентных гетерогенных материалов, основанной на применении таких методов, как: электронная Оже-спектроскопия (ЭОС), рентгеноструктурный анализ (РСА), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), оптическая металлография в поляризованном свете, измерение шероховатости поверхности (R_a) и др.; (2) выбор и использование комплексной методики определения развиваемых на стадии облучения СИЭП в поверхностных слоях напряжений расчетным методом в соответствии с работой С.А. Будиновского, а также экспериментально методом рентгенографического анализа и методом измерения деформации при стравливании поверхностных слоев (метод академика Н.Н. Давиденкова); (3) выбор режимов электронно-пучковой обработки лопаток из жаропрочных материалов при их испытаниях на термоциклирование и адгезию покрытий; (4) определение микро- нано-структуры в поверхностных слоях облученных лопаток, изучение механизмов изменения свойств лопаток в результате облучения

СИЭП; (5) рекомендации для совершенствование оборудования для электронно-пучковой обработки с целью испытаний лопаток компрессора и турбины из жаропрочных сплавов.

Научная новизна работы

Достижение сформулированной цели, в соответствии с общим планом исследований, практически полностью отражает научную новизну полученных в диссертации данных. Впервые доказана эффективность использования обработки облучением СИЭП с энергией 100-120 кэВ для проведения испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования и испытаний на адгезию защитных покрытий на лопатках компрессора и турбины ГТД из жаропрочных материалов.

Кроме того, впервые были получены экспериментальные результаты о влиянии режимов обработки облучения СИЭП на физико-химическое состояние материала поверхностных слоев при термоциклировании и определены значения адгезионной прочности защитных покрытий лопатках двигателя, изготовленных из титановых и никелевых сплавов, а также жаростойких сталей.

Впервые получены данные о характере распределения напряжений, сформированных в поверхностных слоях материала в результате обработки СИЭП. Эта часть работы является одной из важнейших составляющих задачи определения значений адгезионной прочности покрытий.

На защиту выносятся:

1. Методика определения напряжений в поверхностных слоях деталей из жаропрочных сплавов, при испытаниях на термоциклирование и адгезионную прочность включающая:
 - оценку напряжений с помощью системы уравнений, составленной С.А. Будиновским;
 - определение профиля напряжений рентгеновским методом по толщине поверхностного слоя при его химическом травлении;
 - определение напряжений механическим методом измерения деформации при травлении поверхностных слоев (метод академика Н.Н. Давиденкова).
2. Результаты исследования влияния режимов электронно-пучковой обработки на ускорителе "Геза-ММП" (энергия электронов $E = 115-150$ кэВ; длительность импульса $\tau = 15-40$ мс; плотность энергии в импульсе $W = 10-50$ Дж/см²; число импульсов $n = 1-10$ имп.) на физико-химическое состояние материала в поверхностных слоях лопаток из жаропрочных сплавов (химический состав, фазовый состав, структурные характеристики, остаточные напряжения и шероховатость поверхности) после испытаний на термоциклирование.
3. Данные об адгезионной прочности используемых защитных покрытий на лопатках турбины и компрессора, полученных методом вакуумно-плазменной технологии высоких энергий.

Теоретическая и практическая значимость работы

Предложена методология проведения испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования и определения адгезии покрытий на поверхности лопаток ГТД, в основе которых лежат теоретические методики построения профилей температуры и напряжений в поверхностных слоях деталей из жаропрочных сплавов с использованием программы «Betain».

Методики испытаний лопаток ГТД на термостабильность при термоциклировании и определения адгезионной прочности защитных покрытий используемых при производстве применялись при реализации программы работ по внедрению электронно-пучковой обработки деталей ГТД на АО «ММП имени В.В. Чернышева».

Личный вклад автора

Автор научно обосновал, что с помощью облучения сильноточным импульсным электронным пучком микросекундной длительности удается реализовать ускоренные испытания различных деталей машин на термостабильность в условиях термоциклирования. Установлено, что при испытаниях в поверхностных слоях мишеней, в зависимости от величины плотности энергии в импульсе $10-90 \text{ Дж/см}^2$, протекают процессы: плавления, перераспределения элементов, кратерообразования, абляции, высокоскоростной кристаллизации из расплава, изменения фазового состава и микроструктуры (включая субструктуру), формируемых при облучении сильноточным импульсным электронным пучком. Все исследования и испытания серийных и облученных лопаток, а также методики их исследований в МАИ и в АО «ММП им. В.В. Чернышева» были спланированы и выполнены непосредственно автором диссертации.

Степень достоверности

Результаты диссертационных исследований не противоречат теоретическим положениям, согласуются с результатами работ, опубликованных ранее другими исследователями. Достоверность экспериментальных данных обеспечена проведением экспериментов на повторяемость и воспроизводимость результатов исследований с помощью сертифицированной и аттестованной контрольно-измерительной аппаратуры.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: 11-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» в 2017 г. (г. Минск, Беларусь) 25-29 сентября 2017 г., 11-я Международная конференция по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками (г. Томск, Россия) 1-5 октября 2012 г., 12-я Международная конференция по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками (г. Томск, Россия) 22-26 сентября 2014 г., 14-я Международная конференция по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками (г. Томск, Россия) 1-5 октября 2018 г.

Публикации

По результатам исследований по теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 13 работ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация изложена на 121 стр. и состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы из 118 наименований. В работе представлено 82 рисунка и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыта новизна работы, теоретическая и практическая значимость результатов исследований.

Первая глава посвящена описанию объектов исследования, которые представляли собой натурные детали (лопатки компрессора и турбины ГТД, изделие 88) из стали ЭП866Ш, титановых ВТ6 и ВТ9, а также никелевых сплавов ЖС26НК и ЖС32ВИ, химический состав и режимы термообработки которых приведены ниже:

- ВТ6 - (Ti; 0,1-C; 6,0-Al; 4,5-V; 0,05-N; 0,15-O; 0,015-H), отжиг при 960 °С в течение 2 часов, охлаждение на воздухе, старение на воздухе при 550 °С в течение 4 часов;
- ВТ9 - (Ti; 0,1-C; 6,9-Al; 3,8-Mo; 0,25-Fe; 0,35-Si; 2,5-Zr; 0,05-N; 0,15-O; 0,015-H), отжиг при 960 °С в течение 2 часов, охлаждение на воздухе, старение на воздухе при 550 °С в течение 4 часов;
- ЭП866Ш - (Fe; 1,7-Ni; 0,13-C; 15-Cr; 1,35-Mo; 4,5-Co; 0,6-Mn; 0,18-V; 0,2-Nb; 0,6-Si; 0,03-N; 0,02-S; 0,03-P; 0,65-W); закалка в струе аргона от 1100 °С; отпуск при 700 °С в течение 2 час 30 мин; отпуск при 650 °С в течение 2 час 30 мин;
- ЖС26НК (Ni; 1,0-Ti; 5,6 – Cr; 6,2-Al; 1,4-Mo; 10,0-Co; 1,2-V; 1,4-N; 12,5-W; 0,18-C; <0,1-O, N;<0,02-H; <0,015-B), отжиг при 1250 °С в вакууме в течение 3 час, охлаждение со скоростью 50-60 град/мин, стабилизирующий отжиг при 1000 °С в вакууме в течение 2 часов;
- ЖС32ВИ (основа-Ni; 0,15-C; 4-Cr; 6-A; 10,5-W; 10,0-Co; Ti-1,0; Mo-3,2; 2,2-Nb; 2,0-Re), отжиг при 1250 °С в вакууме в течение 3 час, охлаждение со скоростью 50-60 град/мин, стабилизирующий отжиг при 1000 °С в вакууме в течение 2 часов).

Также исследования проводили на плоских образцах размером 60x15x5 мм и 120x15x5 мм. На поверхность образцов и лопаток методами вакуумно-плазменной технологии высоких энергий и вакуумно-дугового осаждения при ассистировании процессом вакуумно-дуговой ионной имплантации элементов покрытия (ВТ6 и ВТ9) и в тлеющем разряде (ЖС26НК и ЖС32ВИ), разработанным НИИЯФ при ТПУ (г. Томск) и ГТУ „Станкин“ (Москва) наносилось покрытие системы TiSiB, СДП-1, СДП-2 и NiAl. После осаждения покрытий TiSiB лопатки и образцы отжигались в вакуумной печи ULVAK при 550 С и 1000-1050 °С в соответствии с технологией АО «ММП имени В.В. Чернышева» и ФГУП «ВИАМ». Внешний вид лопаток и образцов для исследования и испытаний представлен на рисунках 1 и 2.

Также, **в первой главе** рассмотрены особенности методик исследования физико-химического состояния материалов в поверхностных слоях лопаток и образцов.

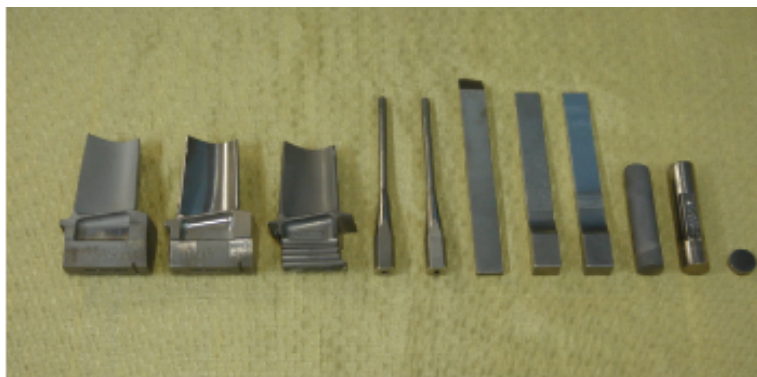


Рисунок 1 - Внешний вид объектов исследования (лопатки турбины ГТД РД33, а также модельные образцы для исследования физико-химического состояния материала поверхностных слоев после термоциклирования и испытаний на адгезию, а также для проведения коррозионных и усталостных испытаний.

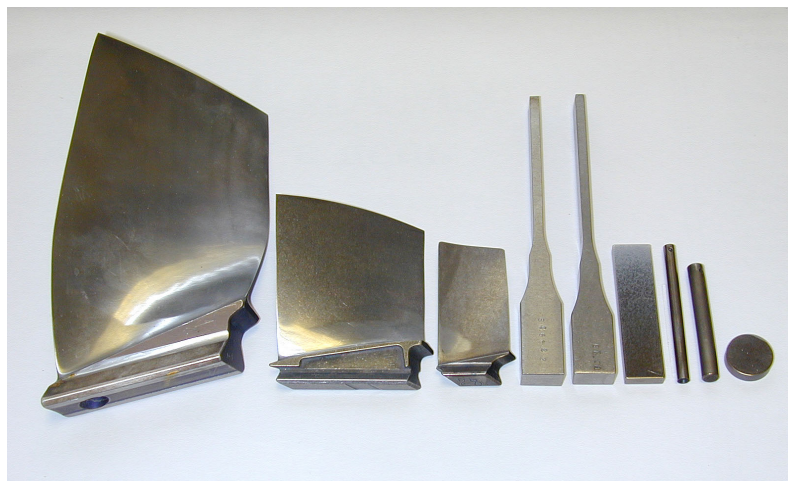


Рисунок 2 - Внешний вид лопаток компрессора ГТД РД33 из титановых сплавов для исследования физико-химического состояния материала поверхностных слоев после термоциклирования и испытаний на адгезию.

Облучение образцов и лопаток реализовывалось на усовершенствованном ускорителе «Гега-ММП» при следующих значениях основных параметров: $w = 15-50$ Дж/см²; $E = 110-120$ кэВ; $\tau = 15-40$ мкс. Установка Гега-ММП оснащена камерой обработки, которая позволяет загружать 40 мишеней, предназначенных для облучения (рисунок 3). Устройство фиксации лопаток в камере обработки ускорителя «Гега-ММП» способно в процессе обработки осуществлять как вращение лопаток вокруг своей оси, так и их дискретный поворот на заданный угол.



Рисунок 3 - Внешний вид устройства для закрепления лопаток в установке «ГЕЗА-ММП».

Во второй главе представлен критический анализ экспериментальных литературных данных посвященных применению сильноточных импульсных электронных пучков для модификации поверхности лопаток ГТД из титановых сплавов. В первой части обзора показано, что облучение приводит к изменению

химического и фазового составов, а также структуры в поверхностных слоях титановых сплавов. Все это обеспечивает существенное изменение свойств лопаток и образцов, после облучения при оптимальных режимах и прошедших термическую обработку, и наблюдается значительный прирост числа циклов до разрушения. Эти образцы, отстоявшие до разрушения максимальное количество циклов, имели на различных глубинах от 6 до 50 мкм многоочаговый характер разрушения. В местах излома выявлены усталостные бороздки, расположенные на расстоянии 400-500 мкм от очага разрушения. Разницы в величине шага у облученных и исходных образцов не было выявлено, это говорит о том, что повысить усталостную прочность образцов после облучения СИЭП с плотность энергии 18-20 Дж/см² удается за счет изменения механизмов появления усталостной трещины, а не снижением скорости ее развития. Но когда плотность энергии значительно превышала оптимальные значения, тогда предел усталости у облученных образцов из VT8 и VT9 сильно падал относительно исходных. Это связано со следующими факторами: происходит разложение упрочняющей β -фазы; возникают остаточные растягивающие напряжения; формирование микродефектов на поверхности (кратеры). Ввиду того, что на титановые детали при усталостном нагружении сильно влияют концентраторы напряжений, находящиеся на поверхности, то, как следствие, после такого облучения нужно ожидать уменьшения предела усталостной прочности.

Очередным важным результатом данной работы, полученным в результате проведенного здесь эксперимента, является зависимость предела усталости лопаток из титанового сплава VT9 модифицированных СИЭП от значения остаточного вакуума в камерах для финишной термообработки. Как видно из таблицы 3, усталостная прочность образцов, которые были отожжены в вакууме ниже 10^{-3} мм. рт. ст., снижается. Это вызвано тем, что в поверхностных слоях толщиной до 25 мкм в процессе облучения возникает высокодефектное состояние, имеющее плотность дислокаций 10^{12} - 10^{13} м⁻². Во время термообработки кислород активно распространяется за счет диффузии по дефектам поверхности и проникает в матричный материал образцов на глубину до 25 мкм при средней концентрации 8-20 ат.%. Это влияет на снижение пластичности и увеличения микротвердости до 500-600 ед. HV. Если для сравнения взять серийные лопатки, после виброглянцевания, то тут мы видим также присутствие кислорода, но на глубине всего 400 нм, вследствие чего и не происходит такого значительного падения усталостной прочности. Облучение деталей электронным пучком дает возможность почти полностью убрать кислород из поверхностного слоя, однако во время протекания процесса высокоскоростной кристаллизации увеличивается содержание линейных и точечных дефектов. Поэтому чтобы уменьшить окислительные процессы, необходимо проводить вакуумный отжиг, не ниже 10^{-5} мм. рт. ст. Приведенные в этой главе результаты свидетельствуют о возможности с помощью электронно-лучевой обработки повысить сопротивляемость окислению деталей из титановых сплавов более чем в 3 раза. Испытания облученных и серийных титановых лопаток на коррозионную стойкость показали, что оптимальные условия для повышения жаростойкости создаются тогда, когда на поверхности отсутствуют кратеры или их число незначительно. Как уже было сказано ранее, этому условию соответствует плотность энергии 18-20 Дж/см². Исследования физико-химического состояния поверхностного слоя деталей до и после облучения, дали возможность определить причины повышения жаростойкости. К основным причинам

можно отнести: уменьшение шероховатости поверхности, образование защитной пленки на поверхности на основе оксидов алюминия и титана (Al_2O_3 , TiO), снижение концентрации дислокаций и точечных дефектов в поверхностном слое, реализованное во время термообработки в условиях высокого вакуума, и формирование в поверхностном слое тонкодисперсной би-модальной структуры. Однако, если обработка происходит при жестких режимах и на поверхности образуются кратеры и трещины, а также в перекристаллизованном слое протекает разложение β фазы, то все это будет приводит к снижению жаростойкости. Это дает основание говорить, что ускорителям необходимо предъявлять жесточайшие требования, касающиеся неоднородности распределения энергии по сечению пучка. Этот параметр не должен превышать 10%. Стабильных результатов испытаний, и как следствие надежности всего изделия, можно добиться только при достижении такого уровня функционирования оборудования.

Эрозионные испытания, проводились на эрозионном стенде в «Московском авиационном институте». На стойкость к эрозионному износу исследовались лопатки из сплавов ВТ8 и ВТ9. Результаты этих испытаний показали, что при использовании электронно-лучевой обработки, удастся повысить эрозионную стойкость титановых лопаток более чем в два раза. Это обусловлено тем, что на первоначальной стадии эрозионного воздействия происходит образование кратеров вдавливания на поверхности облученных СИЭП деталей, а не рубчатых, как у серийных лопаток. Это происходит из-за того, что при плавлении, высокоскоростной кристаллизации и финишной термообработке поверхностный слой материала глубиной до 25 мкм становится более пластичным. При этом пластическая деформация и выдавливание материала происходят в начальный период эрозионного изнашивания, а уже при достижении критической величины деформации происходит возникновение трещин, и последующее удаление дефектного слоя. Невзирая на то, что обработка СИЭП дает несущественный прирост эрозионной стойкости деталей из $\alpha+\beta$ -титановых сплавов, если сравнивать со всевозможными покрытиями, данный метод обработки имеет хорошие перспективы, так как после него наблюдается более однородное физико-химическое состояние материала по всей поверхности лопатки. Более того применение электронно-лучевой обработки не имеет ограничений по адгезии и не снижает циклическую долговечность.

Из результатов коррозионных испытаний деталей в условиях термоциклирования видно, что воздействие СИЭП на поверхность образцов из $\alpha+\beta$ -титановых сплавов при режимах плавления дает возможность повысить сопротивление солевой коррозии более чем в четыре раза. Это связано с образованием на поверхности деталей, облученных при оптимальных режимах, защитных пленок TiO и Al_2O_3 , в то время как на поверхности исходных образцов или образцов облученных при высоких плотностях энергии, активно образуется рутил, который практически не обладает коррозионными свойствами, в связи с чем происходит коррозионного растрескивания. Снижение адсорбционной активности поверхности и ее шероховатости, а также выход на поверхность алюминия после действия электронно-лучевой обработки в режиме плавления являются основными причинами улучшения коррозионных свойств деталей.

В этой же главе проанализированы результаты исследования кинетики удаления поврежденного при эксплуатации эрозионностойкого покрытия из ZrN на лопатках из

сплава ВТ9, представлены элементы технологических карт процессов модификации поверхности при изготовлении и ремонте лопаток 3 ступени ротора КВД.

В третьей главе представлен критический анализ данных о возможности применения СИЭП для модифицирования свойств и ремонта лопаток турбины из никелевых сплавов.

Здесь важно сказать, что в большом количестве публикаций разработчиков вакуумно-плазменной технологии высоких энергий представляются результаты циклические испытания образцов из никелевых сплавов с новыми видами жаростойких покрытий систем NiCrAlTaY, NiCrAlSiY, NiCrAlTaSiBY и т.д., причем эти покрытия обязательно увеличивают предел выносливости.

Такие данные получают большое число серьезных замечаний, особенно важным из которых является различие коэффициентов термического расширения и модулей Юнга материалов этих рекомендуемых покрытий и жаропрочных сплавов, что при усталостном нагружении непременно приведет к преждевременному разрушению или при комнатной, или при рабочих температурах.

Проведенные при комнатной и рабочих температурах испытания на усталость лопаток турбины из сплава ЖС26НК и ЖС32ВИ с защитными покрытиями свидетельствуют, что после обработки СИЭП усталостная прочность лопаток не изменяется. Последнее представляется логичным, поскольку за усталостные свойства отвечает не покрытие, а матрица (основной материал).

Результаты испытаний на жаростойкость позволяют заключить, что обработка СИЭП при плотностях энергии $w=42-45$ Дж/см² и последующая финишная термическая обработка позволяют повысить в три раза жаростойкость при рабочих температурах $t=950$ °С. Однако если произвести облучение с низкими плотностями энергии и не проводить последующий отжиг, то это может отразиться в снижении жаростойкости. Это происходит из-за того, что при нагреве до высоких температур в покрытиях детали возникает коррозионное растрескивание. Воздействие на поверхность детали с плотностью энергии 42-45 Дж/см² и дальнейший отжиг приводят к формированию в поверхностном слое стабильной структуры с оптимальным содержанием β -NiAl-фазы, которая и объясняет повышение жаростойкости в облученных образцах. Кроме того, вакуумно-плазменные технологии нанесения покрытия, которые используются на данный момент в авиационном двигателестроении, имеют один существенный минус — это присутствие капельной фракции в плазме. Обработка поверхности детали СИЭП дает возможность частично, а иногда и полностью, избавиться от этого. За счет капельной фракции происходит снижение адгезионных свойств покрытия, а также формирование относительно высокой пористости, из-за чего неизбежно будет происходить деградация покрытия, и как следствие его разрушение. Однако, при проведении многократной перекристаллизации удастся создать поверхность без пор, что в свою очередь приведет к уменьшению распространения кислорода в матричные слои. Из полученных к настоящему времени данных (А.В. Крайников) следует, что: возможное формирование зерен размерами в 100-200 мкм у исходных монокристаллических лопаток происходит из-за высокотемпературной термообработки или из-за ликвационных и сегрегационных процессов, происходящих вовремя литья; формирование поликристаллической «рубашки» в месте соприкосновения покрытия и подложки происходит вследствие проведения пескоструйной обработки и последующего отжига

при высоких температурах после нанесения покрытия. Полученное по вакуумной плазменной технологии высоких энергий покрытие, имеет своей отличительной чертой высокую степень неоднородности фазового и элементного составов, имеет большие области с малой концентрацией алюминия и ощутимым присутствием элементов жаропрочного сплава; это объясняет почему у вакуумно-дугового покрытия плохая жаростойкость. Обработка СИЭП позволяет нам получить толщиной 20-25 мкм однородный беспористый слой с содержанием алюминия на поверхности до 9-10 мас. %, что приводит к повышению уровня эксплуатационных свойств.

К тому же, при условии, что покрытие перед обработкой СИЭП имело низкую адгезию, то напряжения, возникающие во время действия импульса и высокоскоростной кристаллизации, могут спровоцировать отслаивание покрытия от подложки. Для контроля качества нанесенного покрытия применяется люминесцентный метод контроля, который дает возможность выявить разрушения на поверхности образцов. Рентгеноструктурный анализ позволяет нам определять остаточные напряжения в различных макроточках. В связи с тем, что оба этих метода являются косвенными, то для получения количественных данных обычно используют разрушающий метод.

В процессе облучения лопаток с покрытием нет необходимости проверять его адгезию, так как такого рода контроль реализуется автоматически. После облучения отбраковка лопаток с низкой адгезией может быть проведена визуально, что представлено на рисунке 4.



Рисунок 4 - Внешний вид серийной лопатки из сплава ЖС26НК с вакуумно-дуговым покрытием СДП-2, облученной электронным пучком (отслоение покрытия на корыте и в зоне входной кромки).

Эти данные свидетельствуют о возможности контроля адгезии покрытий.

В четвертой главе приводятся методики проведения испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования.

Известные методы испытаний материалов на термостабильность в условиях термоциклирования основаны на нагреве до температуры эксплуатации и охлаждения до комнатной температуры деталей и модельных образцов. Реализация этих испытаний

заключается в использовании различных способов нагрева и охлаждения, а также различных видов воздействия окружающей среды. Например, такие испытания очень часто проводят на воздухе при нагреве модельного образца в муфельной печи или токами высокой частоты с последующим охлаждением на воздухе или в воде. Здесь после нагрева до требуемой температуры скорость охлаждения достигает 10-100 °С в секунду, а на цикл испытаний затрачивается 3 и более минут.

В отличие от известных способов в предлагаемом нагрев материала в поверхностном слое обеспечивается термализацией ускоренных электронов за время действия импульса 20-40 мкс, а охлаждение теплопроводностью материала, когда тепло отводится в матричный объем за 10^{-5} - 10^{-6} секунды. Таким образом, продолжительность одного цикла складывается из времени термализации 20-40 мкс, времени теплоотвода (охлаждения) 10^{-5} - 10^{-6} секунды и времени зарядки генератора импульсных напряжений от 10 до 30 секунд.

Термостабильность материала обычно проверяют визуально или металлографически. С помощью такого контроля фиксируются трещинообразование, изменения фазового состава и модификация структурных характеристик. Более информативен рентгеноструктурный анализ, методика которого подробно описана в четвертой главе.

Способ испытаний деталей машин на термостабильность в условиях термоциклирования включает: облучение поверхности детали сильноточным импульсным электронным пучком микросекундной длительности с плотностью энергии в импульсе $w=10-90$ Дж/см² при энергии электронов $E=100-120$ кэВ и числе импульсов, необходимом для первого появления изменений физико-химического состояния материала поверхностного слоя (химический состав, фазовый состав, структурные характеристики); определение физико-химического состояния материала поверхностного слоя методами оптической металлографии, рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии; определение температурного поля в поверхностном слое при облучении с использованием программы «Betain», разработанной А.А. Яловцом.

Предлагаемый метод относится к способам испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования с помощью многократного поверхностного нагрева испытываемого образца (образцов, деталей) за счет термализации ускоренных электронной в поверхностном слое за время действия импульса и высокоскоростного охлаждения за счет теплоотвода внутрь мишени.

Этот метод может быть использован при разработке технологии производства различных изделий, эксплуатируемых при повышенных температурах в условиях термоциклирования, а именно: в металлургической, авиационной, машиностроительной, судостроительной, космической и др. отраслях промышленности.

При разработке современных технологий металлообработки, особенно на стадии выбора материалов, применяют различные способы испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования, которые можно разделить на две большие группы: испытания при объемном нагреве и охлаждении в какой-либо среде; испытания при поверхностном нагреве и охлаждении за счет теплоотвода в объем детали. На практике чаще всего используют нагрев в муфельной печи и охлаждение в воде. Кроме того, нашли применение «нагрев токами высокой частоты с последующим охлаждением в

струе аргона» и «высокоскоростной нагрев за счет лазерного излучения в макроточке и высокоскоростное охлаждение при теплоотводе в объем детали». Первые два способа характеризуются низкой производительностью, поскольку время на реализацию одного цикла «нагрев – охлаждение» достигает нескольких минут (5-10 минут). На результаты таких испытаний накладывается влияние окружающей среды (например, окисление). Использование лазерного нагрева в макроточке создает большие трудности в исследовании физико-химического состояния, вызывает очень большие напряжения в окрестности зоны испытаний и не позволяет с требуемой точностью фиксировать температуру в макроточке.

За прототип был выбран наиболее типичный способ испытаний «нагрев в муфельной печи с последующим охлаждением в воде (режим «закалки»). Он позволяет проводить испытания практически в любой среде (кроме вакуума) с затратой времени на цикл 5-6 минут при скоростях охлаждения 10-100 °С в секунду.

Цель предлагаемого метода испытаний на термоциклирование – существенное увеличение производительности процесса испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования, когда полностью исключены химические процессы и механические нагрузки. Это достигается тем, что испытываемые детали помещаются в область действия пучка диаметром 10 см, облучаются при выбранных плотностях энергии (температурах в поверхностном слое), а состояние материала в поверхностных слоях исследуется методами Оже-электронной спектроскопии, рентгеноструктурного анализа, просвечивающей электронной микроскопии и оптической металлографии. По этим данным выбирается число циклов, которое может выстоять мишень без видимых нарушений физико-химического состояния материала поверхностных слоев.

Метод реализуется следующим образом.

Испытываемые образцы помещают в вакуумную камеру установки «Геза-ММП». Облучение осуществляется импульсами длительностью в десятки микросекунд. Требуемая плотность энергии в диапазоне 10-90 Дж/см² выбирается, исходя из температурных полей построенных для материала детали и из требований к ее эксплуатации. Указанные границы диапазона существования плотности энергии, позволяют проводить испытания при нагреве до температур 400-600 °С, при которых эксплуатируются лопатки компрессора ГТД, и до 2500-3000 °С, когда протекают процессы абляции и плазмообразования, что очень важно для аттестации материалов космической техники.

Отличия предлагаемого метода обусловлены физикой процессов, протекающих при облучении: высокоскоростной нагрев, плавление, испарение, абляция и высокоскоростные перекристаллизация и охлаждение. Протекание этих процессов может приводить к фазообразованию, релаксации и наведению новых остаточных напряжений, трещинообразованию, кратерообразованию, изменению химического состава, дислокационной структуры и плотности точечных дефектов.

В диссертации проведены испытания титановых сплавов с анализом топографии поверхности, с анализом текстуры и анализом субструктуры с помощью рентгеноструктурного анализа, оптической металлографии и просвечивающей электронной микроскопии. Кроме того приведены результаты испытаний лопаток ГТД из сплава ЖС32ВИ с покрытием СДП-2 с анализом топографии поверхности.

В пятой главе приводятся методики испытаний жаростойких покрытий на адгезионную прочность с применением высокоточных импульсных электронных пучков.

Вопросы адгезии покрытий всегда занимали особое место в машиностроении и особенно в авиационном двигателестроении. Это обусловлено высокой ответственностью деталей, эксплуатируемых в условиях различных температур (от комнатных до близких к температурам плавления) и высоких постоянных и циклических нагрузках. Поэтому при низкой адгезии происходит растрескивание и отслаивание покрытий и, как следствие, разрушение детали. Существует большое количество методов определения адгезии и способов подготовки поверхности под их нанесение. Для определения количественных характеристик адгезии чаще всего используются метод «штифта» или «клеевой» метод. Для деталей авиадвигателестроения эти методы малоприменимы, что связано с методиками нанесения покрытий на основе вакуумно-плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ). Толщины покрытий составляют 5-100 мкм, при их формировании в плазме присутствует капельная фракция, что заведомо ведет к низкой адгезии с атомно-гладкой поверхностью. Поэтому на практике на начальной стадии проводят создание развитого микрорельефа поверхности для обеспечения механического сцепления покрытия с подложкой, а затем реализуют термическую обработку (диффузионный вакуумный отжиг) для достижения диффузионного сцепления на атомном уровне. Проверить силу сцепления не удастся методом штифта из-за малой толщины покрытий, а клеевым методом из-за отсутствия клея с требуемой силой сцепления... Кроме того, проверять адгезию покрытий на многих авиационных деталях необходимо как при комнатной, так и при высоких температурах (до 1200 °С), что не позволяет использовать эти классические методы определения адгезии. Качественно адгезионные свойства покрытий в авиадвигателестроении (лопатки компрессора и турбины) определяют из результатов металлографического анализа специально подготовленных поперечных шлифов по наличию или отсутствию несплошностей, пор и микротрещин. Этот метод применялся в данной работе.

Из приведенных в 1-4 главах данной диссертации видно, что обработка поверхностей мишеней СИЭП приводит к высокоскоростному нагреву, формированию ударных волн и высокоскоростному охлаждению материала поверхностного слоя. Если поверхностный слой состоит или содержит инородный с матрицей материал (покрытие), то в этой области при нагреве и охлаждении развивается механическое воздействие (нормальные и тангенциальные напряжения). При низкой адгезии происходит отслоение или скол покрытия. Необходимо только оценить уровень этих напряжений.

Нормальные напряжения могут быть определены с помощью программы *Batain*, как это показано в п. 1.4. Тангенциальные же напряжения можно оценить с помощью методик, описанных в работах Будиновского А.С.

Для выбора типа и конструкции жаростойкого алюминидного покрытия на рабочие температуры до 1200°С используется следующая математическая модель. Исходная система содержала три металлических слоя. При наличии силового воздействия на систему только вдоль оси X и нагреве композиции, пользуясь методом наложения (суперпозиций), относительную деформацию каждого из слоёв, полагая её

упругой, можно представить, как сумму силовой деформации и чисто температурной деформации и представить её выражением:

$$\varepsilon_i = \alpha_i \cdot \Delta T + \frac{\sigma_i}{E_i} (1 - \mu_i)$$

где ε_i – относительная деформация i -ого слоя,
 α_i – термический коэффициент линейного расширения материала,
 ΔT – разность температур до и после нагрева композиции,
 σ_i – напряжение в i -ом слое по оси x ,
 E_i – модуль Юнга материала i -ого слоя,
 μ_i – коэффициент Пуассона материала i -ого слоя.

Расчёт величины упругих напряжений в поверхности подложки толщиной 1 мм из сплавов ЖС6У, ЖС32, ЖС36 и ВКНА1В с многокомпонентными покрытиями из сплавов СДП-1 и СДП-2, а также с покрытием из моноалюминида никеля был реализован при толщине покрытий 100 мкм. На рисунке 5 представлены полученные результаты расчетов, которыми можно пользоваться для оценки нагрузок при различных режимах облучения.

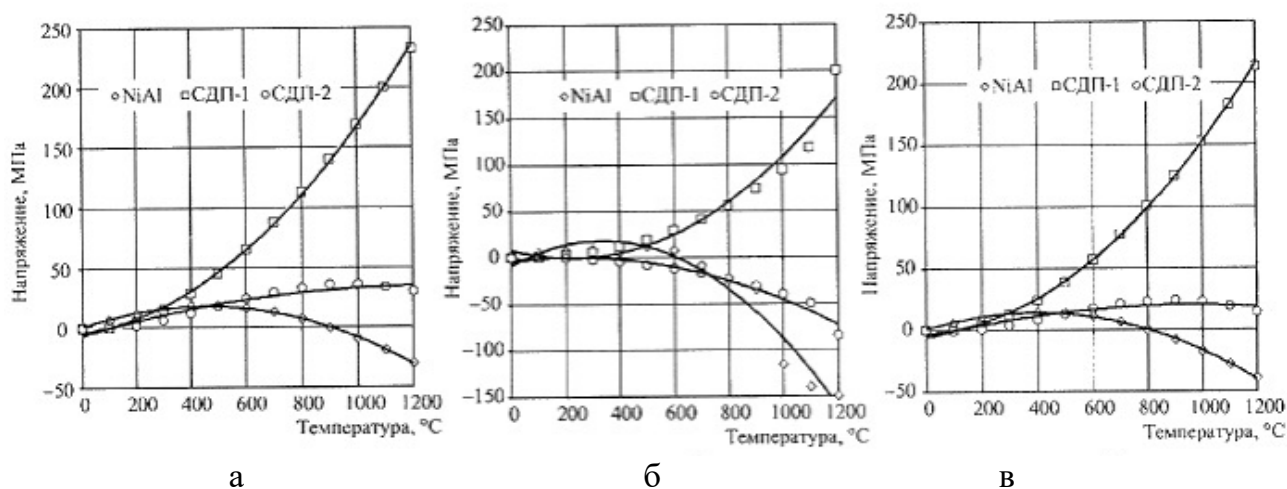


Рисунок 5 - Температурные зависимости нормальных упругих напряжений в поверхности подложки из жаропрочных сплавов ЖС6У (а), ЖС32 (б), ЖС36 (в) с покрытиями NiAl, СДП-1 и СДП-2.

Экспериментально, развиваемые в поверхностном слое напряжения при облучении могут быть определены с помощью рентгеноструктурного анализа (рисунок б) или по методике Давиденкова при послойном удалении поверхностных слоев (рисунок 7).

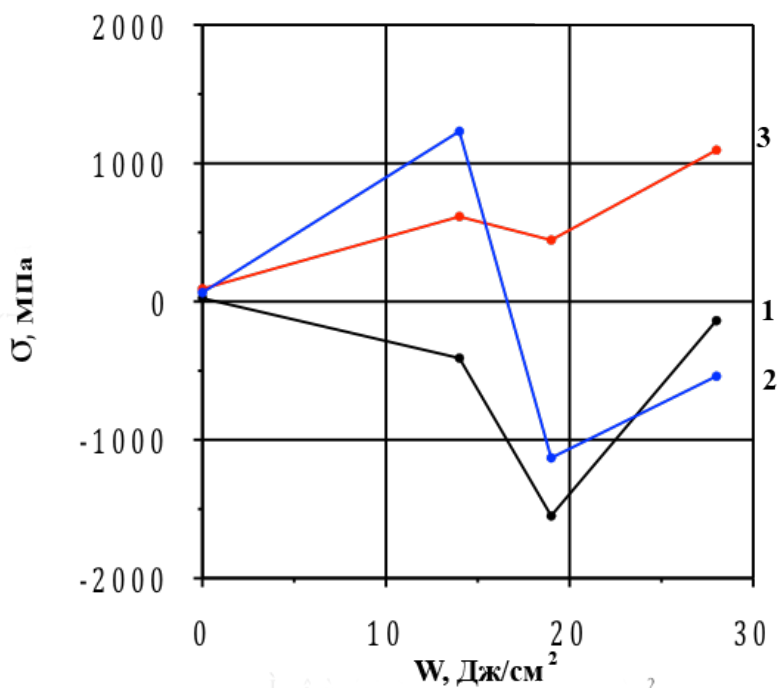


Рисунок 6 - Остаточные напряжения, сформированные на поверхности мишеней из сплавов ВТ6 (1), ВТ8 (2) и ВТ9 (3) после облучения с разными плотностями энергии (результаты рентгеноструктурного анализа).

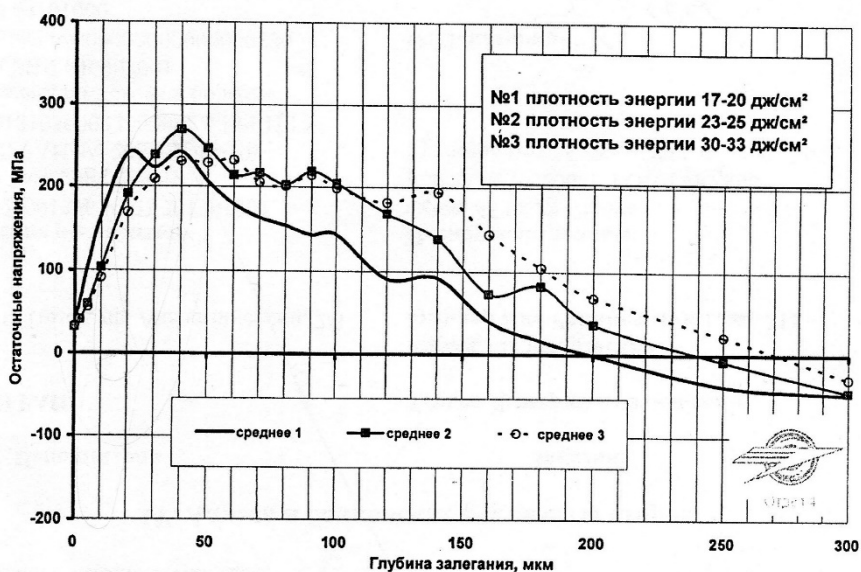


Рисунок 7 - Усредненные эпюры остаточных напряжений по Давиденкову в поверхностном слое образцов из сталиЭП866-Ш с покрытием СДП-1+NiAl после обработки СИЭП при различных плотностях энергии.

Следует помнить, что в отличие от расчетных значений нормальных напряжений экспериментальные значения получены в рамках модели плосконапряженного состояния.

Определение нарушений в адгезии после облучения может фиксироваться визуально или с помощью ЛЮМ-контроля. Кроме того, этот контроль может быть реализован при изготовлении и просмотре поперечных металлографических шлифов на оптическом микроскопе (возможно образование несплошностей при формировании

растягивающих напряжений или растрескивание на границе матрица-покрытие при образовании высоких сжимающих напряжений).

Результаты определения адгезии покрытий, используемых в авиационном двигателестроении, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения адгезионной прочности покрытий на лопатках ГТД, определенные с помощью облучения СИЭП.

Лопатка	Покрытие	Толщина, мкм	Плотность энергии, Дж/см ²	Нагрузка, МПа	Контроль адгезии	Метод определения
ТВД, ЖС32-моно	ВСДП9+ ВСДП18 с отжигом	90 ^{±10}	20-24	460 ^{±30} , растягивающие напряжения	Несплошности (Визуально, ЛЮМ-контроль)	Давиденков
ТВД, ЖС32-моно	ВСДП9+ ВСДП18. без отжига	90 ^{±10}	40-45	140 ^{±20} , растягивающие напряжения	Несплошности, растрескивание (Визуально, ЛЮМ-контроль)	Давиденков
КВД, ЭП866-Ш	СДП1+NiAl с отжигом	10 ^{±2}	18-20	>260 ^{±30} , растягивающие напряжения	Отсутствие дефектов (Визуально, ЛЮМ-контроль)	Давиденков
КВД, ЭП866-Ш	СДП1+NiAl с отжигом	10 ^{±2}	20-24	>290 ^{±30} , растягивающие напряжения	Отсутствие дефектов (Визуально, ЛЮМ-контроль)	Давиденков
КВД, ЭП866-Ш	СДП1+NiAl с отжигом	10 ^{±2}	30-36	>360 ^{±30} , растягивающие напряжения	Отсутствие дефектов (Визуально, ЛЮМ-контроль)	Давиденков
КВД, ВТ8	ZrN	20 ^{±5}	18-20	210±30, растягивающие напряжения	Отслаивание покрытия (Визуально, ЛЮМ-контроль)	РСА
КВД, ВТ8	ZrN	20 ^{±5}	22-26	260±30, растягивающие напряжения	Отслаивание покрытия (Визуально, ЛЮМ- контроль)	РСА
КВД, ВТ8	ZrN	20 ^{±5}	30-36	290±30, растягивающие напряжения	Отслаивание покрытия (Визуально, ЛЮМ-контроль)	РСА
КВД, ВТ9	TiSiB	10 ^{±2}	18-20	250±30, сжимающие напряжения	Растрескивание, скол покрытия (Визуально, ЛЮМ-контроль)	РСА
КВД, ВТ9	TiSiB	10 ^{±2}	26-30	320±30, сжимающие напряжения	Растрескивание, скол покрытия (Визуально, ЛЮМ-контроль)	РСА

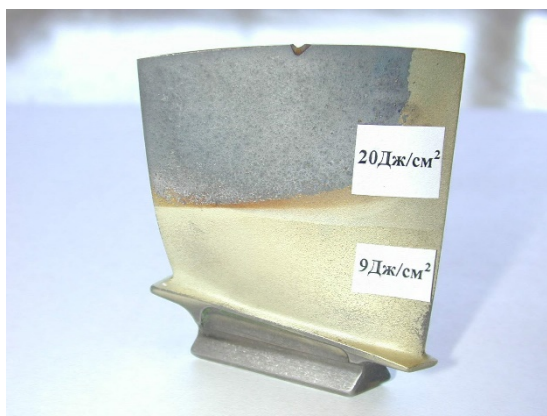


Рисунок 8 - Визуальное наблюдение отслаивание покрытия ZrN с поверхности лопатки из сплава ВТ8 после обработки СИЭП.

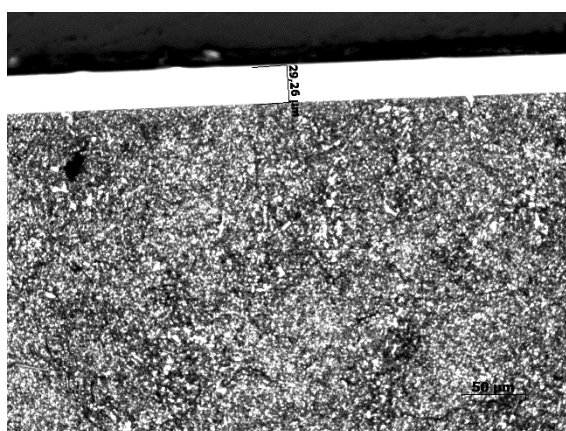


Рисунок 9 - Покрытие TiSiB на поверхности лопатки из сплава ВТ9, полученное методом вакуумно-плазменной технологии высоких энергий.

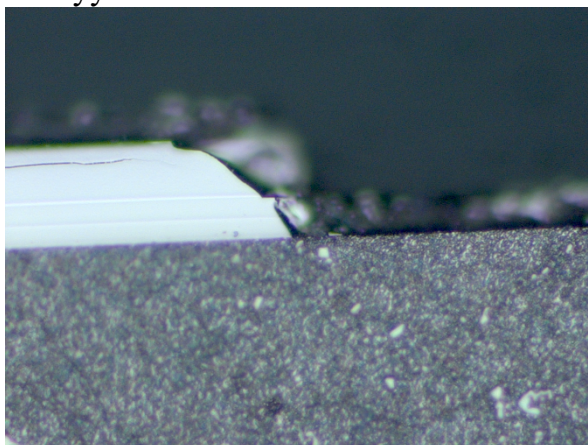


Рисунок 10 - Скол покрытия TiSiB с поверхности лопатки из сплава ВТ9, полученное методом вакуумно-плазменной технологии высоких энергий, при облучении СИЭП за счет формирования высоких остаточных сжимающих напряжений (600-700 МПа) по данным рентгеноструктурного анализа.

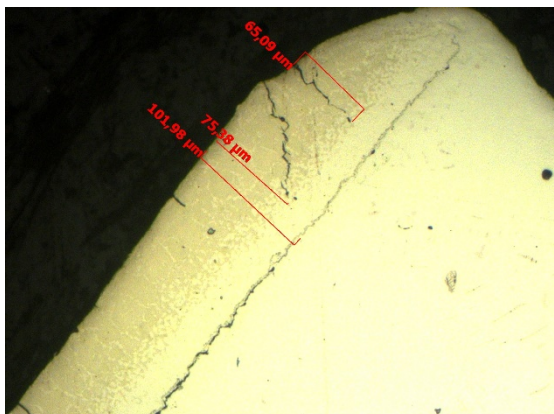


Рисунок 11 - Образование несплошностей в зоне адгезии. Покрытие ВСДП9+ВСДП18 на поверхности лопатки из сплава ЖС32-моно (адгезия согласно технологии ММП имени В.В. Чернышева) после облучения при плотности энергии 22 Дж/см².

Приведенные здесь данные позволили впервые определить критическую силу адгезии, при которой начинает протекать процесс отслаивания покрытия, в этой связи строится зависимость «плотность энергии при облучении – температура развиваемая в зоне адгезии – напряжения, формируемые в этой зоне – формирование несплошностей на границе покрытие-матрица или скол покрытия». Видно, что зафиксированные здесь данные свидетельствуют о хороших адгезионных свойствах покрытий, используемых в авиационном двигателестроении.

В шестой главе приведено описание установки «Геза-ММП». После проведения апробации установки проявилось снижение эффективности работы катода за счет абляционных процессов и конденсации продуктов распыления на поверхности острей диода. Был изготовлен новый катод с защитными колпачками на каждом острие, что позволило повысить продолжительность эксплуатации катода. Для полного устранения загрязнений поверхности катода продуктами разлета компонентов, рекомендовано выносить мишени в другой объем установки для чего необходимо повернуть электронный пучок.

Заключение

Экспериментально показано, что с помощью облучения сильноточным импульсным электронным пучком микросекундной длительности удастся не только целенаправленно изменять эксплуатационные свойства деталей, но и реализовать ускоренные испытания различных изделий на термостабильность в условиях термоциклирования. Изучено влияние режимов испытаний на термостабильность с применением электронно-лучевой обработки на физико-химическое состояние материала в поверхностных слоях мишеней. Показано, что, используя такие методы анализа, как просвечивающую электронную микроскопию, рентгеноструктурный анализ и оптическую металлографию, удастся зафиксировать любые изменения микро- и нано-структуры и фазового состава на стадии испытаний.

Показано, что для определения температуры в поверхностных слоях мишеней на стадии испытаний необходимо использовать программу «Betain», которая обеспечивает построение температурных полей и полей напряжений в зависимости от времени. Экспериментально на примере титановых и никелевых сплавов ВТ6, ВТ9, ВТ8 и ЖС32ВИ доказано, что предлагаемый способ ускоренных испытаний на термостабильность в условиях термоциклирования обеспечивает получение надежных

данных об этой эксплуатационной характеристике с применением установки Геза-ММП, которая изготовлена для реализации модифицирования поверхности и ремонта лопаток ГТД.

Установлено, что способ испытаний на термостабильность реализуется при облучении сильноточным электронным пучком в ускорителе «Геза-ММП». Требуемая плотность энергии в диапазоне 10-90 Дж/см² выбирается, исходя из температурных полей, построенных для материала детали и из требований к ее эксплуатации. Указанные границы диапазона существования плотности энергии, позволяют проводить испытания при нагреве до температур 400-600 °С, при которых эксплуатируются лопатки компрессора ГТД, и до 2500-3000 °С, когда протекают процессы абляции и плазмообразования, что очень важно для аттестации материалов космической техники.

Предложен метод определения адгезии покрытий на различных деталях при их облучении сильноточным импульсным электронным пучком, сущность которого состоит в определении напряжений, развиваемых в зоне адгезии покрытия на стадии облучения и фиксации процесса отслаивания покрытия с помощью оптической металлографии или сканирующей электронной микроскопии. Впервые определена адгезионная стойкость защитных покрытий на лопатках ГТД из жаропрочных никелевых и титановых сплавов, а также жаропрочных сталей.

Предложенные методы испытаний на термоциклирование и адгезионную прочность использованы на ОАО ММП имени В.В. Чернышева. Показано, что полученные при таких испытаниях результаты хорошо согласуются с расчетными данными, полученными по методике ВИАМ и с данными, зафиксированными с помощью программы «Betain».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Shulov V.A., Bytzenko O.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engelko V.I., Tkachenko K.I. The influence of relaxation processes on effectiveness of surface treatment of titanium compressor blades with intense pulsed electron beams // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 12-3. С. 242-244.
2. Громов А.Н., Энгелько В.И., Шулов В.А., Теряев Д.А., Быценко О.А. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинного двигателя с перфорационными отверстиями // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. №10. С. 23-25.
3. Громов А.Н., Энгелько В.И., Шулов В.А., Теряев Д.А., Быценко О.А. Влияние режимов облучения сильноточными импульсными электронными пучками на процесс кратерообразования на поверхности мишеней из никелевых сплавов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. №11. С. 15-19.
4. Шулов В.А., Громов А.Н., Быценко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Ширваньянц Г.Г. Структурно-фазовые изменения в поверхностных слоях деталей из титанового сплава ВТ9 при облучении сильноточными импульсными электронными пучками // Физика и химия обработки материалов. 2014. №1. С. 12-16.
5. Shulov V.A., Teryaev D.A., Shirvanyants G.G., Engelko V.I., Gromov A.N., Bytzenko O.A. Application of high-current pulsed electron beams for the restoration of operational

properties of the blades of gas-turbine engines // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2015. Т. 56. № 3. С. 333-338.

6. Gromov A.N., Shulov V.A., Bytsenko O.A., Teryaev D.A., Teryaev A.D., Engelko V.I. Application of intense pulsed electron beams for repair and property recovery of turbine blades with perforate holes // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 10-3. С. 27-30.

7. Gromov A.N., Shulov V.A., Bytsenko O.A., Teryaev D.A., Shirvanyants G.G., Engelko V.I. Structural changes into surface layers of parts from titanium alloys during irradiation by intense pulsed electron beams // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. №12/3. С. 237-240.

8. Gromov A.N., Shulov V.A., Bytsenko O.A., Teryaev D.A., Engelko V.I. The effect of irradiating regimes with intense pulsed electron beams on crater creation taking place on the surface of targets from nickel alloys // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 12-3. С. 232-236.

9. Shulov V.A., Teryaev D.A., Gromov A.N., Engelko V.I. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016. Т. 57. № 3. С. 256-265.

10. Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н., Теряев Д.А., Быценко О.А., Ширваньянц Г.Г. Кратерообразование на поверхности деталей из титановых сплавов при облучении сильноточными импульсными электронными пучками // Физика и химия обработки материалов. 2015. №5. С. 22-28.

11. Шулов В.А., Громов А.Н., Теряев Д.А., Ширваньянц Г.Г., Перлович Ю.А., Исаенкова М.Г., Фесенко В.А. Текстурирование поверхностных слоев мишеней из сплава Ti-6Al-4V при их облучении сильноточными импульсными электронными пучками // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. № 9-2. С. 283-286.

12. Шулов В.А., Громов А.Н., Теряев Д.А., Теряев А.Д. Влияние режимов облучения сильноточными импульсными электронными пучками на процесс кратерообразования на поверхности мишеней из титановых сплавов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. №9/2. С. 279-282

13. Шулов В.А., Громов А.Н., Теряев Д.А., Перлович Ю.А., Исаенкова М.Г., Фесенко В.А. Текстурирование в поверхностных слоях мишеней из сплава ВТ6 при облучении сильноточными импульсными электронными пучками // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 6. С. 19-24.

Другие публикации:

14. Быценко О.А., Шулов В.А., Пайкин А.Г., Громов А.Н., Теряев А.Д., Панов В.А. Основные аспекты технологического процесса электронно-лучевого ремонта и восстановления эксплуатационных свойств рабочих лопаток ГТД // Взаимодействие излучений с твердым телом: сб. труд. 12-й Международной конференции (Минск, Беларусь, 19—22 сентября 2017). — Минск: Изд. центр БГУ, 2017. — С. 214-216 (483 с.)