

На правах рукописи



ДАУТОВ Станислав Сагитович

**ДЕГРАДАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГТД ИЗ
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА TNM-V1 И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ
ИХ ЗАЩИТЫ**

**Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергетические установки летательных аппаратов**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре технологии машиностроения

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Смыслов Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Петухов Анатолий Николаевич,
главный научный сотрудник
ФГУП «ЦИАМ имени П.И. Баранова»

кандидат технических наук, доцент
Федорченко Дмитрий Геннадьевич,
генеральный конструктор АО «Металлист-
Самара»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет гражданской
авиации» (г. Москва)

Защита состоится «07» декабря 2017 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.288.10 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su

Автореферат разослан «__» октября 2017 г.

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



Ф.Г.Бакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Создание современных конкурентоспособных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) невозможно без применения новых перспективных материалов, позволяющих повысить ресурс и его эксплуатационную надежность. Рост удельной тяги двигателя может быть обеспечен за счет повышения температуры газа на выходе из камеры сгорания, что приводит к необходимости использования в конструкциях лопаток турбины новых сверхлегких материалов и технологий защиты их поверхности от высокотемпературной газовой коррозии.

К новым перспективным материалам, используемым в конструкциях лопаток турбин, относятся интерметаллидные сплавы на основе фаз γ -TiAl и α_2 -Ti₃Al, удельный вес которых в среднем в 1,5...2 раза ниже, чем у современных жаропрочных никелевых сплавов. Применение аналогичного материала для лопаток последних ступеней двигателя GENx-54B фирмой General Electric позволило снизить массу всего изделия на величину порядка 81 кг.

В настоящее время перед предприятиями ОДК (ОАО «УМПО», г. Уфа и ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь) стоит задача производства рабочих лопаток 5 и 6 ступеней турбины низкого давления (ТНД) двигателя ПД-14 (рисунок 1) из сверхлегкого интерметаллидного титан-алюминиевого сплава¹.

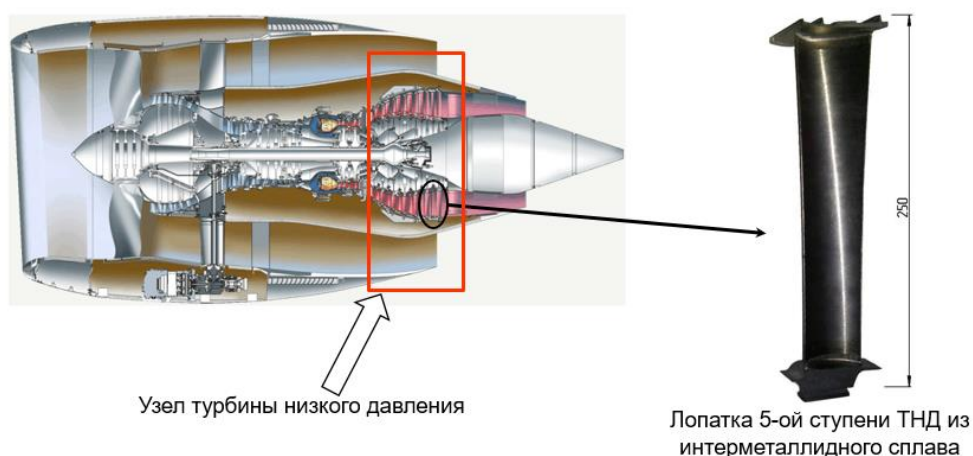


Рисунок 1 – Схема двигателя ПД-14 и фотография лопатки из сплава TNM-B1

Надежность любого технического изделия (в том числе и авиационного двигателя), определяется надежностью его составных частей. Обычно ресурс

¹ Проект «Разработка и внедрение новой технологии изготовления лопаток турбины и компрессора для перспективных газотурбинных двигателей с применением интерметаллидов титана», ПАО «УМПО»

«горячей» части двигателя существенно ниже, чем «холодной», и ремонт, связанный с заменой лопаток турбины, до 10 раз дороже, чем при замене лопаток компрессора. Поэтому увеличение ресурса лопаток турбины имеет первостепенное значение.

При эксплуатации ГТД рабочие лопатки турбины подвержены повышенным тепловым, механическим и вибрационным нагрузкам. Многочисленные исследования, проведенные в различных научно-исследовательских институтах (ВИАМ, ЦИАМ, ЦКТИ, и др.), показали, что дефекты деталей горячей части двигателя являются одной из наиболее распространенных причин отказов, ведущих к съему и ремонту всего изделия. При этом существенным фактором, приводящим к деградации эксплуатационных характеристик авиационных турбин, является высокотемпературная газовая коррозия рабочих и сопловых лопаток.

Опыт эксплуатации серийных авиационных ГТД выпускаемых ПАО «УМПО» (изд. «55», «95» и «99») показал, что для лопаток турбин наиболее распространенными являются дефекты, обусловленные высокотемпературной газовой коррозией (до 51%) и термоусталостным разрушением (до 49%)².

В этой связи актуальным является проблема исследования высокотемпературной газовой коррозии лопаток турбины низкого давления из сплава TNM-B1, кинетики данного процесса и его влияния на структуру поверхностного слоя, а также разработка способов повышения долговечности изделия за счет нанесения жаростойких покрытий.

Степень изученности

Вопросам коррозионной стойкости и надежности лопаток турбины посвящены работы Каблова Е.Н., Иноземцева А.А., Мубояджана С.А., Никитна В.И., Абраимова Н.В., Гишварова А.С. Изучению эксплуатационных характеристик, их взаимосвязь со структурой и технологией обработки интерметаллидных сплавов на основе алюминидов титана посвятили свои работы такие авторы как F.Appel, M.Oehring, C.Leyens, M.Peters, Имаев В.М., Имаев Р.М., Y.-W. Kim. Вопросы технологии защиты поверхности от высокотемпературного окисления были частично изучены G.H.Meier, H.R.Jafarian, A. Rahmel, M-R.Yang, и другими.

Цель работы - снижение интенсивности деградации поверхностного слоя в условиях высокотемпературной газовой коррозии лопаток турбины низкого давления двигателя ПД-14 из интерметаллидного сплава TNM-B1 путем защиты поверхности.

² По данным конструкторского отдела исследования надежности ПАО «УМПО»

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие **задачи**:

1. Изучить особенности деградации поверхностного слоя лопатки ТНД авиационного ГТД из сплава TNM-B1 в условиях длительного высокотемпературного окисления и коррозии при температурах эксплуатации 800 – 850 °С.

2. Проанализировать современные методы защиты лопаток турбин из интерметаллидных сплавов от высокотемпературной газовой коррозии.

3. Исследовать особенности процесса деградации поверхностного слоя лопаток ТНД из сплава TNM-B1 после применения технологий защиты поверхности.

4. Установить влияние модификации поверхности материала лопатки ТНД из сплава TNM-B1 на термическую усталость, циклическую (при усталостном нагружении) и длительную (при статическом нагружении) долговечность.

Научная новизна:

1. Установлено, что для лопаток ТНД авиационного ГТД из сплава TNM-B1 отмечается низкая стойкость к высокотемпературной (800-850°С) газовой коррозии, которая выражается в линейном росте оксидного слоя (при выдержках свыше 500 часов, среда – воздух), а также невысокая его когезионная прочность, обусловившая периодическое скалывание образующихся окислов. Это предопределяет необходимость защиты поверхности лопаток в условиях воздействия высоких температур и окислительной среды.

2. Выявлено, что снижение интенсивности высокотемпературного повреждения лопаток ТНД может быть достигнуто посредством: легирования поверхности атомами Al, Cr, Si и их оксидами; нанесения жаростойких покрытий на никелевой основе; применения комбинированной технологии, сочетающей формирование на поверхности жаростойкого подслоя на никелевой основе и коррозионно-стойкого слоя на алюминиевой основе; насыщение фосфором из раствора ортофосфорной кислоты.

3. Показано, что из рассмотренных технологий защиты лопаток авиационного ГТД от высокотемпературной газовой коррозии:

- диффузионное насыщение поверхности атомами Al, Cr и Si позволяет повысить стойкость лопатки ТНД авиационного ГТД к высокотемпературному окислению, но не препятствует формированию TiO₂. При этом, в условиях присутствия синтетической золы, имитирующей продукты сгорания газотурбинного топлива, данный способ защиты не оказывает значительного влияния на коррозионную сопротивляемость.

- газотермические жаростойкие покрытия на никелевой основе препятствуют как окислению поверхностного слоя лопатки ТНД, так и его разрушению в условиях сульфидно-оксидной коррозии, но при этом слабо противодействуют диффузии серы в основной материал детали через покрытие;

- комбинированное вакуумно-плазменное покрытие задерживает диффузию титана к границе с окружающей средой и тем самым препятствует формированию оксида титана и значительно повышает стойкость детали к высокотемпературному окислению. Установлено, что данное покрытие оказывает влияние на характер протекания сульфидно-оксидной коррозии только на первых 50-100 часах выдержки;

Впервые изучено влияние обработки поверхностного слоя лопаток ТНД из интерметаллидного сплава в растворе фосфорной кислоты. Установлено, что в процессе высокотемпературного окисления формируется пирофосфат титана замедляющий диффузию кислорода к основному материалу и повышающий сопротивляемость поверхности окислению.

4. Установлено, что вакуумно-плазменное покрытие системы Ni-Co-Cr-Al-Y+Al-Co-Si-Y обеспечивает повышение термической усталости (950°C-20°C, воздух) и усталостной долговечности ($\sigma_a = 300$ МПа) по сравнению с исходным состоянием материала лопатки ТНД TNM-B1 (без защиты поверхности).

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа современного состояния проблемы обеспечения стойкости лопаток турбины авиационных ГТД из интерметаллидных сплавов к высокотемпературной газовой коррозии.

2. Результаты исследования деградации поверхности лопаток ТНД из интерметаллидного сплава и особенности данного процесса в условиях высокотемпературного окисления и сульфидно-оксидной коррозии при температуре 800-850°C и длительности испытаний 1050 часов.

3. Результаты исследования по влиянию диффузионного насыщения, химической обработки поверхности лопаток ТНД, а так же жаростойких покрытий на интенсивность деградации в условиях высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии при температуре 800 °C и длительности испытаний 500 часов.

4. Результаты исследования по повышению характеристик материала лопаток ТНД авиационного ГТД путем нанесения вакуумно-плазменного жаростойкого покрытия.

Объектом исследования является лопатка 5 ступени турбины низкого давления двигателя ПД-14 из интерметаллидного сплава марки TNM-B1;

предметом исследования – закономерности деградации поверхностного слоя лопатки из интерметаллидного сплава в условиях высокотемпературной коррозии, как в исходном состоянии, так и после защиты поверхности.

Практическая значимость – разработаны и внедрены на ПАО «УМПО» технологические рекомендации по защите лопаток из интерметаллидного сплава TNM-B1 от высокотемпературной газовой коррозии в условиях оксидной и сульфидно-оксидной коррозии. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «УГАТУ» и используются по направлениям подготовки 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» по специализации №1 «Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», 15.03.05. «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в лекционных курсах, курсовом и дипломном проектировании.

Методы исследования базируются на классических положениях о деградации поверхности металлов в процессе длительной эксплуатации, требованиях ГОСТ и рекомендациях, полученных в результате проведенных ранее исследований в области повреждаемости лопаток турбин авиационных двигателей в условиях высоких температур и агрессивной среды.

Личный вклад автора заключается в формулировании цели и задач работы, проведении экспериментальных исследований и анализе полученных данных, выявлении и построении математических зависимостей протекания процесса оксидной и сульфидно-оксидной коррозии в различных условиях, а также в обобщении полученных результатов работы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается за счет применения признанных и широко распространенных научных положений, и теорий, апробированных методов испытаний и анализа, проведенных на современном оборудовании. Результаты работы не противоречат основным зависимостям, полученным и опубликованным ранее другими исследователями в данной области.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 научных конференциях и форумах, проводимых в УГАТУ, ВИАМ, ЦИАМ, РГАТУ им. П.А.Соловьева, МАТИ в 2012 – 2017 гг.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ суммарным объемом 44 страницы в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 3 из которых были также переведены на английский язык и опубликованы в изданиях, индексируемых Scopus, 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 135 страницах, содержит 95 рисунков, 18 таблиц, состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 113 наименований.

В первой главе проведен анализ причин повреждаемости лопаток авиационных ГТД и установлено, что проблема деградации поверхности в условиях высокотемпературной коррозии лопаток турбин является актуальной, в том числе для деталей из интерметаллидных титан-алюминиевых сплавов.

Из работ, проведенных в ЦИАМ и Киевском институте гражданской авиации, известно, что рабочие лопатки турбин во многих случаях лимитируют ресурс авиационных ГТД. Нарботка по двигателям CFM56-3 (General Electric) и Т-56-7 (Rolls-Royce) показала, что в 30% случаев снятия двигателя с эксплуатации основной причиной являлись проблемы, связанные с долговечностью лопаток турбин, вызванные деградацией их поверхности.

Кроме того, коррозионные повреждения поверхности лопаток турбины ухудшают как микро-, так и макрогеометрию профиля лопаток турбин, что, по данным работ Тихонова А.С. (ОАО «Авиадвигатель», г.Пермь), Кривошеева И.А. (УГАТУ, г.Уфа), Гоголева И.Г. (БГТУ, г.Брянск) и др. вызывает ухудшение таких характеристик изделия как расход газа и КПД, а так же изменяют осевое усилие на рабочие лопатки.

Исследования, проведенные НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова и ГосНИИ гражданской авиации, показали, что для большинства авиационных двигателей актуальна проблема сульфидно-оксидной коррозии, вызванная попаданием в газовый тракт агрессивных соединений серы, ванадия, и др. Актуальность данной проблемы подтверждается работами Никитина В.И. и Абраимова Н.В., выполненными применительно к лопаткам из никелевых сплавов, в которых показано, что наиболее подвержены данному виду повреждения лопатки, работающие в температурном интервале 600–850°C, что соответствует температуре эксплуатации последних ступеней ТНД двигателя ПД-14.

Также в данной главе был проведен анализ существующих методов защиты лопаток авиационных турбин, в том числе из интерметаллидных сплавов, от

высокотемпературной газовой коррозии. Среди рассмотренных методов защиты были выделены 2 основные группы: 1) модификация поверхности диффузионным легированием, ионной имплантацией и химической обработкой поверхности; 2) формирование на поверхности лопаток защитных вакуумно-плазменных конденсационных или газотермических покрытий.

Основная задача, решаемая при разработке данных методов, – это создание в поверхностном слое повышенной концентрации элементов (Al, Cr, Si и др.) оксиды которых обладают высокой химической и термической стабильностью и препятствуют окислению титана в основном материале.

Вторая глава посвящена особенностям интерметаллидного материала лопаток 5 и 6 ступеней ТНД двигателя ПД-14, а так же методикам, применяемым в работе.

Сплав TNM-B1 относится к группе γ -сплавов, его фазовый состав представлен следующими основными компонентами: алюминиды титана γ -TiAl с тетрагональной $L1_0$ структурой и α_2 -Ti₃Al с гексагональной DO_{19} структурой, а также в небольшом количестве Θ -фазой Ti₂AlNb.

Для оценки стойкости поверхности лопаток ТНД из указанного сплава к высокотемпературному окислению применялась гравиметрическая методика в соответствии ГОСТ 6130-71 и ГОСТ 9.312-89. Использовались образцы размерами 8x8x4,5 мм. По результатам испытаний строились кривые зависимости удельного привеса q от времени выдержки t . Суммарная длительность испытаний составляла до 1050 часов, при длительности каждого цикла 50...100 часов и температуре 800 и 850 °С.

Для оценки стойкости к высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии использовалась методика НПО ЦКТИ (г. Санкт-Петербург), разработанная профессором Никитиным В.И. Основное отличие от вышеописанной методики оценки стойкости к высокотемпературному окислению в диссертационной работе состоит в нанесении на поверхность образцов слоя синтетической золы (с целью имитации процессов сульфидно-оксидной коррозии в приближенных к реальной эксплуатации лопатки), который возобновлялся после каждого цикла. Аналогичным образом оценивалось изменение массы образца с построением соответствующей зависимости.

С целью установления структурных и кинетических взаимосвязей процесса деградации поверхности лопаток ТНД из интерметаллидного материала в условиях сульфидно-оксидной и оксидной коррозии проводились металлографические исследования образцов до и после испытаний с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM6490LV (Япония). При этом были

исследованы изменения химического состава поверхности и структуры оксидных слоев методом энергодисперсионного микроанализа с помощью аналитического кремний дрейфового детектора Inca X-Act (Великобритания) в точечном режиме и путем построения карт распределения элементов.

Третья глава посвящена исследованию деградации поверхностного слоя материала лопатки в условиях оксидной и сульфидно-оксидной коррозии.

Исследования на высокотемпературную окисляемость при 800 и 850 °С (рисунок 2) позволили установить, что поверхность лопатки из интерметаллидного сплава характеризуется низкой жаростойкостью в условиях близких к эксплуатационным – кинетика высокотемпературного окисления в начальный период подчиняется степенной зависимости удельного привеса от времени выдержки $q(t)$ вида:

$$q_t = k_1 \cdot t^\beta. \quad (1)$$

При более длительных выдержках (свыше 350 - 450 часов), наблюдается этап установившейся коррозии, подчиняющийся линейной зависимости:

$$q_t = b + k_2 \cdot t, \quad (2)$$

где q_t – удельный привес, г/м²;

t – время, ч;

k_1, k_2, b и β – коэффициенты, зависящие от условий испытаний.

Установлено, что повышение температуры испытаний с 800 до 850 °С приводит к увеличению скорости коррозии на начальном этапе в 1,5 раза (на базе 400 часов), как это видно из данных удельного привеса образцов (рисунок 2). В свою очередь, незначительное изменение в 1,1 раза константы скорости k_2 на этапе установившейся коррозии указывает на то, что при длительных выдержках скорость окисления зависит от температуры в меньшей степени.

Анализ структуры оксидных слоев при вышеназванных температурах показал, что в процессе окисления формируются прослойки некогерентных оксидов алюминия и титана, что приводит к возникновению внутренних напряжений в поверхностном слое лопатки турбины при воздействии высоких температур. Это обусловило периодическое разрушение оксидного слоя при температуре 850°С.

На основе экспериментальных данных о структуре и химическом составе оксидного слоя, а также существующих моделях формирования оксидных слоев, описанных в работах Дж. Х. Мейлера, А.Рамеля и П. Лейенса, были сформулированы модельные представления о процессе окисления поверхностного слоя лопатки из интерметаллидного сплава TNM-B1.

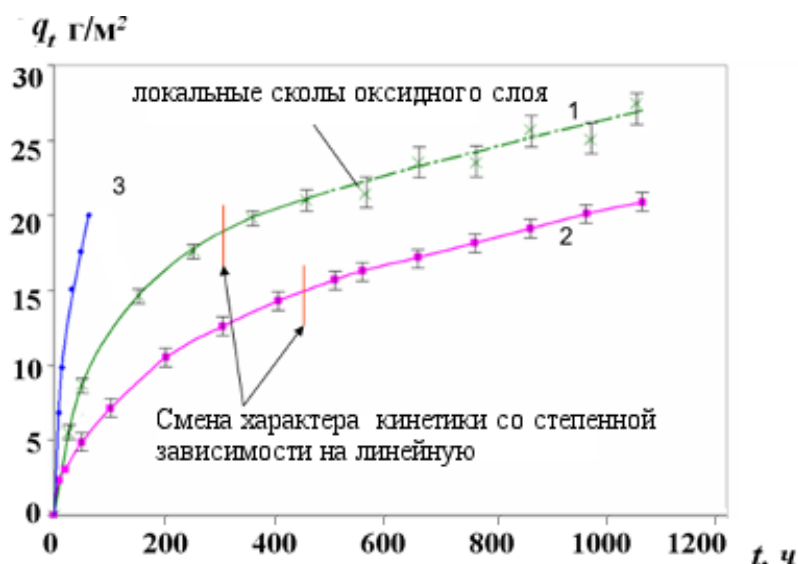


Рисунок 2 – Результаты гравиметрических испытаний образцов на стойкость к высокотемпературному окислению при различных температурах:
1 – 850 °C; 2 – 800 °C; 3 – 900 °C (по данным работы Аванесяна Т.Г)

Исследование стойкости к высокотемпературной газовой коррозии при температуре 800 °C в присутствии синтетической золы показало, что, по данным привеса образцов после 500-часовой выдержки, в условиях сульфидно-оксидной коррозии интенсивность деградации до 60 раз по сравнению с воздушной атмосферой (рисунок 3). При этом выявлены 2 основных стадии процесса – начальный этап (до 100 часов выдержки) и стадию катастрофической коррозии, которая сопровождается интенсивным уносом массы в каждом цикле испытания. Установлено, что обе стадии подчиняются зависимостям вида (1) и (2) соответственно.

Химический и структурный анализ позволили установить, что в условиях сульфидно-оксидной коррозии на поверхности образцов формируется слой оксидов, аналогичный случаю окисления на воздухе без золы. Отличительной особенностью структуры является формирование в зоне диффузионного воздействия сульфидов основных компонентов материала лопатки.

Значительное ускорение коррозионного процесса в условиях синтетической золы позволило заключить, что при высоких температурах (800 °C) эксплуатации лопатка ТНД 5 ступени не обладает требуемой стойкостью к сульфидно-оксидной коррозии в следствие интенсивной деградации поверхности, выраженной в формировании оксидов и сульфидов компонентов материала лопатки и, как следствие, периодическом разрушении слоя продуктов коррозии. В этой связи возникает необходимость исследования влияния методов защиты поверхности от

высокотемпературной коррозии на деградацию поверхности лопаток ТНД авиационного ГТД из интерметаллидного сплава.

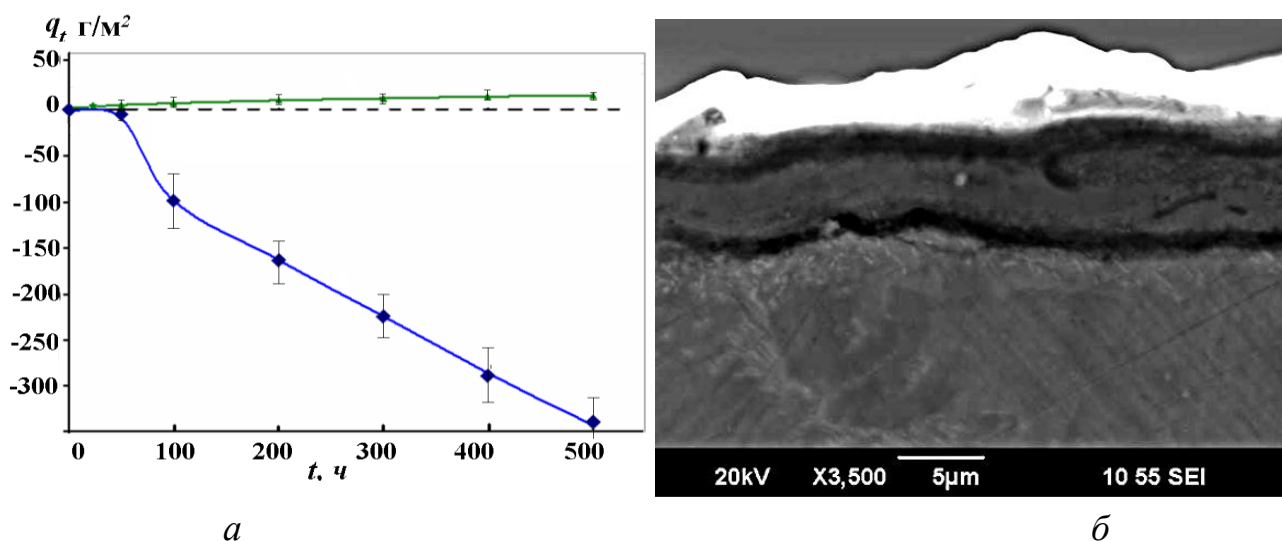


Рисунок 3 – Изменение удельного привеса образцов с нанесенным слоем золы (2) и без него (1) при температуре 800 °С (а) и структура коррозионного слоя образца после выдержки с золой в течение 450 часов (б)

Четвертая глава посвящена исследованию влияния технологий защиты поверхности лопаток ТНД к высокотемпературной газовой коррозии при температуре 800 °С как в присутствии синтетической золы, так и без нее.

На основании проведенного в первой главе литературного обзора были выделены основные направления методов защиты поверхности лопаток авиационных ГТД:

1. Модификация поверхностного слоя диффузионным легированием, ионной имплантацией и химической обработкой поверхности. В рамках данной группы были выбраны для исследования следующие технологии:

а) Диффузионное легирование поверхности в порошковой смеси $Al_2O_3 + Cr_2O_3 + Al + Cr$ (Система Al-Cr) при температуре 900-950 °С, времени выдержки 6-7 часов в вакуумной печи СНВ-1.

б) Диффузионное легирование поверхности посредством вакуумно-плазменного нанесения слоя покрытия системы Al-Si-Y на установке ВУ-500М, с последующим диффузионным отжигом при температуре 1000-1050 °С в течение 3-4 часов.

в) Химическая обработка поверхности, заключающаяся в выдержке в 4М растворе фосфорной кислоты в течение 22...24 часов с последующей сушкой при 100...120 °С в течение 1...1,5 часа.

2. Нанесение жаростойких плазменных покрытий:

а) Газотермическое плазменное напыление покрытия системы Ni-Al на установке УПУ-8М, оснащенной плазмотроном ПП-25 при грануляции порошка – 60-120 мкм.

б) Газотермическое плазменное напыление покрытия системы Ni-Al-Cr-Y на установке Artes (Италия) при грануляции порошка - 80-100 мкм.

в) Вакуумно-плазменное напыление комбинированного покрытия в едином вакуумном объеме, состоящего из жаростойкого подслоя системы Ni-Co-Cr-Al-Y и коррозионно-стойкого слоя Al-Co-Si-Y на установке ВУ-2М с последующим стабилизирующим отжигом при температуре 550-650 °С в течение 5-7 часов.

Были проведены испытания на стойкость к высокотемпературной сульфидно-оксидной и оксидной коррозии, а также исследованы структура и химический состав поверхностного слоя до и после термоэкспозиции при температуре 800°С (рисунок 4, таблица 1, 2).

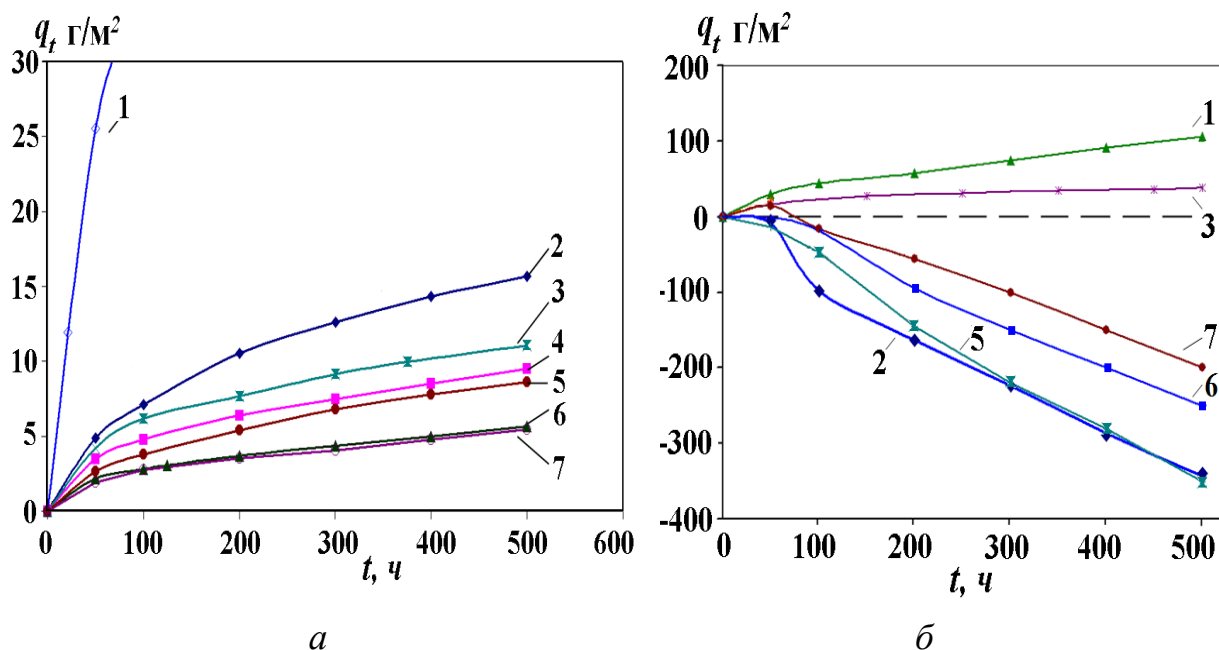


Рисунок 4 – Кинетика процесса высокотемпературной коррозии образцов после обработки без золы (а) и с золой (б):

1 – покрытие системы Ni-Al; 2 – исходное состояние; 3- Ni-Al-Cr-Y; 4 – легирование поверхности системой Al-Si-Y; 5 – химическая обработка; 6 – легирование поверхности системой Al-Cr; 7 – покрытие системы Ni-Co-Cr-Al-Y+ Al-Co-Si-Y

Установлено, что в условиях высокотемпературного окисления (без синтетической золы), среди всех рассмотренных технологий защиты, наилучшим образом снижают скорость коррозии диффузионное легирование в смеси порошков системы Al-Cr и комбинированное покрытие системы Ni-Co-Cr-Al-Y+

Al-Co-Si-Y, формируемое вакуумным ионно-плазменным осаждением. В обоих случаях наблюдается снижение удельного привеса на базе 500 часов в 3 раза по сравнению с исходным состоянием поверхности (по параметру q_{500} , таблица 2).

Таблица 1 – Показатели кинетики процесса высокотемпературного окисления

Параметры кинетики	Исх.	Хим. обработка	Al-Cr	Ni-Al	Ni-Al-Cr-Y	Al-Si-Y	Ni-Co-Cr-Al-Y + Al-Co-Si-Y
Константа скорости коррозии, k_2 , г/м ² ч	0,010	0,012	0,007	0,17	0,013	0,011	0,007
Привес на базе 500 часов, q_{500} , г/м ²	15,7	8,6	5,7	103,5	11,3	9,4	5,4

Исследования влияния технологий защиты лопатки турбины из интерметаллидного сплава TNM-B1 позволили установить, что наилучший эффект на стойкость к высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии оказывает газотермическое покрытие системы Ni-Cr-Al-Y, которое не только сохраняет структурную целостность поверхности на протяжении всех 500 часов испытания, но и снижает скорость коррозии примерно в 6 раз по сравнению с исходным (без защиты) состоянием поверхности лопатки (по параметру k_2 , таблица 2).

Таблица 2 – Показатели кинетики процесса высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии

Параметры кинетики	Исх.	Хим. обработка	Al-Cr	Ni-Al	Ni-Al-Cr-Y	Ni-Co-Cr-Al-Y + Al-Co-Si-Y
Константа скорости коррозии, k_2 , г/м ² ч	-0,6	-0,6	-0,46	0,17	0,09	-0,48
Привес на базе 500 часов, q_{500} , г/м ²	-339,7	-352,3	-248	105,9	56,9	-211,2

Установлено, что в случае диффузионного легирования, химической обработки поверхности и нанесения комбинированного покрытия системы Ni-Co-Cr-Al-Y + Al-Co-Si-Y происходит интенсивное разрушение оксидной пленки, формируемой на поверхности в ходе испытаний, – в первом и втором случаях это разрушение наблюдалось уже после 50 часов испытаний, а в третьем – после 100 часов. Обозначенная ранее некогерентность окислов алюминия и титана,

формирующихся в процессе коррозии, также является причиной разрушения оксидной пленки.

Небольшая толщина (порядка 5...7 мкм) покрытия, полученного методом вакуумной ионно-плазменной обработки, вероятно стала причиной проникновения вглубь материала агрессивных компонентов золы (серы, ванадия) и образования, аналогично случаю с химико-термической обработкой, слоистой оксидной пленки, состоящей преимущественно из оксидов алюминия и титана. Это обусловило разрушение поверхностного слоя при выдержке более 100 часов.

Также были проведены сравнительные испытания образцов из сплава ТНМ-В1 на длительную прочность и усталость, а так же на стойкость к резкой смене температур (термическую усталость), с целью установления влияния технологий защиты на указанные характеристики. Для данных испытаний были выбрана технология формирования вакуумно-плазменного комбинированного покрытия системы Ni-Co-Cr-Al-Y+Al-Co-Si-Y, характеризующаяся наименьшей скоростью коррозии в условиях атмосферы воздуха, а так же обеспечивающая кратковременную стойкость к интенсивной сульфидно-оксидной коррозии до 50 часов.

Испытания на длительную прочность проводились на установке рычажного типа ВП-8 на образцах плоского типа в соответствии с ГОСТ 9651-84 в воздушной атмосфере при температуре 700 °С и нагрузке 450 МПа. Образцы выдерживались до разрыва, с определением времени их разрушения.

Испытания на усталость выполнялось по схеме изгиба в одной плоскости при комнатной температуре в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502-79 и рекомендациями ОАО «УМПО» на установке ВЭДС-400 при нагрузке $\sigma_a = 300$ МПа ($f = 700-710$ Гц). Образцы без покрытия проходили предварительную механическую полировку до Ra 0.6 мкм (базовая технология), а образцы с покрытием дополнительно подвергались электролитно-плазменному полированию с обеспечением Ra 0.1 мкм.

С целью учета влияния степени деградации поверхностного слоя, протекающей в процессе высокотемпературного окисления, на усталостную долговечность образцы так же выдерживались в воздушной атмосфере при температуре 800°С в течение 500 часов.

Ускоренные испытания на термическую усталость проводились при температуре 950 °С с периодическим (длительность цикла – 1 час) охлаждением образцов на воздухе до 20 °С.

Выявлено, что долговечность образцов с вакуумно-плазменным покрытием возрастает на 15% по критерию длительной прочности и в 2.7 раза по критерию усталостной прочности, а так же не менее чем в 5 раз по критерию термической

усталости, что объясняется снижением интенсивности процессов окисления поверхности и препятствием образованию оксида титана за счет блокирования его в диффузионной зоне между покрытием и основным материалом.

На основании полученных результатов были разработаны и внедрены на предприятии ПАО «УМПО» технологические рекомендации по защите лопаток 5 и 6 ступеней ТНД двигателя ПД-14 из интерметаллидного сплава TNM-B1 от высокотемпературной газовой коррозии. Для защиты лопаток, работающих в условиях высокотемпературного окисления, было предложено вакуумно-плазменное комбинированное покрытие системы Ni-Co-Cr-Al-Y+Al-Co-Si-Y, а для лопаток, работающих в условиях сульфидно-оксидной коррозии, – жаростойкое покрытие системы Ni-Cr-Al-Y.

Основные выводы по работе:

1. Установлено, что эксплуатация лопаток турбин авиационных ГТД, в том числе из интерметаллидных сплавов, в условиях высоких температур и агрессивных сред приводит к деградации их поверхности вследствие протекания процессов высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии, что создает необходимость исследования и разработки способов их защиты.

По результатам анализа современных методов защиты поверхности лопаток ГТД от высокотемпературной газовой коррозии, с учетом особенностей состава их материала, выбраны: диффузионное легирование поверхности Al, Cr, Si и их соединениями; газотермическое нанесение жаростойких покрытий на никелевой основе; комбинированное вакуумно-плазменное покрытие, состоящее из жаростойкого подслоя на никелевой основе и коррозионно-стойкого алюминидного слоя; химическая обработка поверхности в растворе ортофосфорной кислоты.

2. Изучены особенности деградации поверхности лопаток турбины 5 ступени из интерметаллидного сплава TNM-B1 в условиях длительного (до 1050 часов) высокотемпературного (800 – 850 °С) окисления и коррозии. Установлено, что исследуемые лопатки имеют низкую стойкость к высокотемпературному окислению и не обеспечивают сопротивляемость к высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии по причине недостаточной когезионной прочности формирующегося на их поверхности оксидного слоя. Показано, что в присутствии синтетической золы уже после 100 часов наступает стадия катастрофической коррозии, приводящая к интенсивному повреждению поверхности.

3. Исследована кинетика процессов высокотемпературного окисления и коррозии поверхностного слоя лопатки турбины после ее модификации

различными способами. Выявлено, что в условиях высокотемпературного окисления лопатки из сплава TNM-B1 наиболее оптимальным методом защиты поверхности лопаток ТНД является вакуумно-плазменное комбинированное покрытие системы Ni-Co-Cr-Al-Y + Al-Co-Si-Y, обеспечивающее трехкратный рост стойкости (на базе 500 часов). Показано, что наилучшим методом защиты поверхности лопатки в условиях высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии является газотермическое плазменное напыление покрытия системы Ni-Al-Cr-Y, обеспечивающего повышение ее стойкости к коррозии до 6 раз (на базе 500 часов).

4. Установлено, что вакуумно-плазменное комбинированное покрытие системы Ni-Co-Cr-Al-Y + Al-Co-Si-Y повышает долговечность материала лопатки ТНД из интерметаллидного сплава при циклическом нагружении в 2,7 раза, термическую усталость не менее чем в 5 раз в сравнении с состоянием без защиты поверхности и не оказывает негативного влияния на длительную прочность.

Публикации, в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Смыслов, А.М., Быбин, А.А., Даутов, С.С. Исследование высокотемпературной газовой коррозии интерметаллидного сплава TNM-B1 / А.М. Смыслов, А.А. Быбин, С.С. Даутов // Вестник машиностроения, 2015. № 7. С. 68–71.

2. Смыслов, А.М., Быбин, А.А., Даутов, С.С. Влияние алитирования поверхности интерметаллидного сплава TNM-B1 на стойкость к высокотемпературному окислению и газовой коррозии / А.М. Смыслов, А.А. Быбин, С.С. Даутов // Вестник машиностроения, 2016. № 5. С.68-71.

3. Смыслов, А.М., Быбин, А.А., Даутов, С.С. Влияние методов защиты поверхности интерметаллидного сплава системы Ti-Al на его коррозионную стойкость при высоких температурах / А.М. Смыслов, А.А. Быбин, С.С. Даутов // Упрочняющие технологии и покрытия, 2016. № 4. С.29-33.

4. Смыслов, А.М., Быбин, А.А., Даутов, С.С. Особенности высокотемпературного окисления интерметаллидного сплава TNM-B1 / А.М. Смыслов, А.А. Быбин, С.С. Даутов // Металловедение и термическая обработка металлов, 2016. № 5. С.24-28.

5. Даутов, С.С., Смыслов, А.М. К вопросу обеспечения сопротивления высокотемпературной газовой коррозии лопаток ГТД из интерметаллидных сплавов системы Ti-Al / С.С. Даутов А.М. Смыслов // Вестник РГАТУ им. П.А.Соловьева, 2017. № 1. С.138-141.

Прочие издания:

6. Мингажева, А.А., Даутов, С.С. Жаростойкое покрытие с псевдопластичными свойствами для защиты деталей из интерметаллидных

сплавов / А.А. Мингажева, С.С. Даутов // XXXVIII Гагаринские чтения. Научные труды международной молодежной научной конференции. М.:МАТИ, 2012. С. 47.

7. Даутов, С.С. Мингажева, А.А. Жаростойкое покрытие с повышенными барьерными характеристиками для деталей из интерметаллидных сплавов / С.С. Даутов, А.А. Мингажева // Будущее авиации за молодой Россией: Материалы Международного молодежного форума, - Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2012. С. 95.

8. Даутов, С.С. Некоторые особенности защиты сплава на основе интерметаллида γ -TiAl от высокотемпературной газовой коррозии / С.С. Даутов // Сборник докладов конференции VII Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», Уфа: УГАТУ, 2013. Т.5. С. 178.

9. Даутов, С.С., Смыслов, А.М. Изучение динамики высокотемпературной коррозии интерметаллидного сплава на основе алюминидов титана [Электронный ресурс] / С.С. Даутов, А.М. Смыслов //Сборник трудов II всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик: ВИАМ, 2015. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

10. Даутов, С.С., Смыслов, А.М., К вопросу о повышении жаростойкости интерметаллидного сплава на основе алюминидов титана / С.С. Даутов, А.М. Смыслов // Сборник тезисов докладов «Авиадвигатели XXI века «Всероссийская научно-техническая конференция». М.:ЦИАМ, 2015. С. 628.

11. Даутов, С.С., Повышение стойкости интерметаллидного сплава на основе алюминидов титана к сульфидно-оксидной и оксидной коррозии / С.С. Даутов // Сборник докладов конференции VII Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения». Уфа: УГАТУ. 2016. Т. 6. С. 45.

12. Даутов, С.С., Смыслов, А.М., Разработка способа защиты поверхности интерметаллидного сплава от высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии [Электронный ресурс] / С.С. Даутов, А.М. Смыслов // Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции «Новые разработки в области защитных, теплозащитных и упрочняющих покрытий для деталей ГТД». Москва: ВИАМ, 2016, URL: <http://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/903.rar> (дата обращения: 15.01.2017).

13. Пат. 2615963 Российская Федерация МПК С23С 22/07. Способ защиты интерметаллидного сплава от высокотемпературного окисления / Смыслов А.М., Быбин А.А., Даутов С.С. заявка №2015153891; заявл. 15.12.2015; опубл. 11.04.2017. Бюл. №11. 3 с.

Диссертант

С. С. Даутов

ДАУТОВ Станислав Сагитович

ДЕГРАДАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГТД ИЗ
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ТММ-В1 И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ИХ
ЗАЩИТЫ

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические
установки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук