

На правах рукописи



САМОЙЛЕНКО ЕЛИЗАВЕТА ВАСИЛЬЕВНА

**МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ
ЛОПАТОК ТУРБИНЫ СОВРЕМЕННЫХ ГТД ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ
УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ**

Специальность 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) на кафедре «Технической механики и инженерной графики».

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой «Технической механики и инженерной графики» ФГБОУ ВО МГТУ ГА
Петров Юрий Владимирович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор заведующий
кафедрой «Материаловедение» ФГОУ ВО
«Московский политехнический университет»
Овчинников Виктор Васильевич

Кандидат технических наук, ведущий специалист АО
«ММП им. В. В. Чернышева»
Быценко Оксана Анатольевна

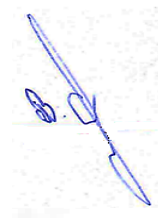
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени
П.А. Соловьева», г. Рыбинск**

Защита состоится «01» октября 2025 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) и на сайте www.mstuca.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 42.2.001.01
доктор технических наук, профессор



В. М. Самойленко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Надежность современных газотурбинных двигателей (ГТД) во многом определяется работоспособностью таких деталей, как рабочие лопатки турбин. В условиях эксплуатации лопатки подвергаются значительным термомеханическим нагрузкам, окисляющему и эрозионному воздействию агрессивной среды. Это приводит к возникновению дефектов в поверхностном слое лопатки и снижению ее работоспособности. В серийном производстве ГТД для защиты рабочих лопаток турбины широкое применение нашли теплозащитные покрытия (ТЗП). В процессе эксплуатации ТЗП постепенно теряют свои защитные свойства. Поэтому для обеспечения заданного ресурса ГТД при его ремонте производится замена лопаток турбины, либо восстановление ТЗП. В то же время необходимость повышения эффективности ГТД различного назначения влечет за собой увеличение рабочей температуры газов перед турбиной, которая ограничена температурой плавления жаропрочных сплавов на основе никеля. Это усложняет решение задачи по обеспечению заданного ресурса.

Государственной программой Российской Федерации (РФ) «Развитие авиационной промышленности», утвержденной постановлением Правительства РФ от 29 марта 2019 г. № 376, в подпрограмме 3 "Авиационное двигателестроение" предусматривается обеспечение потребностей РФ в гражданской авиационной технике в значительной степени за счет создания конкурентоспособной отечественной продукции отрасли авиационного двигателестроения. Целью программы предусмотрена разработка и запуск в серийное производство двигателей нового поколения, предназначенных для использования на отечественных и иностранных воздушных судах (ВС), в наземных и судовых установках.

Создание ГТД нового поколения с высокой экономической эффективностью в значительной степени определяется возможностью увеличения температурно-силовых параметров работы деталей газового тракта при неизменном условии обеспечения их надежности. Решение этого вопроса ведет к усложнению конструкции двигателя, и как следствие, к увеличению термомеханической нагруженности лопаток турбины ГТД. Воздействие высоких нагрузок и внешней коррозионной среды на лопатки турбины приводит к снижению их ресурса, а значит и ресурса двигателя в целом. Перспективными направлениями исследований в области авиадвигателестроения являются: разработка новых многокомпонентных поликристаллических и монокристаллических сплавов; совершенствование способов изготовления, формования и обработки изделий и заготовок; развитие новых методов поверхностной обработки деталей и нанесения на их поверхность различных защитных покрытий.

Долговечность деталей, работающих в газовых средах при высоких температурах, во многом зависит от состава, структуры и свойств поверхностного слоя. Материалы, применяемые для изготовления высокотемпературных деталей, прежде всего лопаток газовых турбин различного назначения, должны обладать не только высокой жаропрочностью, но и высокой жаростойкостью. Решение задачи обеспечения надежной работы турбин ГТД идет по пути повышения эффективности систем их охлаждения, а также создания новых материалов и прогрессивных технологий защиты поверхности деталей. В этой связи, разработка и внедрение высокоэффективных методов увеличения прочностных свойств, коррозионной стойкости сплавов и их защитных покрытий являются важнейшими в решении проблемы долговечности газовых турбин. Особенно остро стоит проблема обеспечения заданной долговечности при разработке, производстве и ремонте высокотемпературных авиационных ГТД.

Рост температуры газов перед турбиной ограничивается жаропрочностью и жаростойкостью материалов, используемых при изготовлении сопловых и рабочих лопаток турбины. В конструкции современных и перспективных газовых турбин в основном применяют сплавы на никелевой основе. Использование сплавов на основе тугоплавких элементов (вольфрам, молибден, ниобий) ограничено их высокой склонностью к окислению при воздействии повышенных температур.

Повышение эффективности ГТД путем увеличения температуры газов перед турбиной может быть достигнуто за счет использования и совершенствования систем охлаждения лопаток турбины и применения новых керамических материалов, формирующих теплозащитные покрытия (ТЗП).

Применение ТЗП и их своевременное восстановление позволяют уменьшить экономические затраты при ремонте ГТД и обеспечивает увеличение надежности ГТД.

Условия эксплуатации лопаток турбины ГТД во многом определяют выбор защитных покрытий, исходя из их служебных характеристик – тепловых, механических и физических свойств, химического состава и метода его формирования, полученной структуры, а также стоимости покрытия. Следовательно, для каждого конкретного ГТД необходимо разрабатывать специальную технологию формирования покрытия. На отечественных и зарубежных ГТД для защитных покрытий широкое применение нашла система $\text{Ni-Cr-Al} + \text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$, однако, в настоящее время данное покрытие исчерпало свои возможности с точки зрения повышения температуры газов перед турбиной. Для лопаток турбины современных ГТД требуются покрытия, которые способны длительное время работать под нагрузкой при температуре металла лопатки вплоть до 1200...1300 °С. Так, например, для нового двигателя ПД-14 расчетная температура покрытия на режиме "Red Line" составляет от 1250 до 1350 °С, что существенно выше допустимой температуры для применяемых в настоящее время ТЗП на основе оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия.

Таким образом, налицо *противоречие научного характера*, состоящее в том, что существует объективная необходимость создания эффективных авиационных ГТД путем повышения температуры газов перед турбиной, однако, применяемые в настоящее время конструкционные материалы лопаток ГТД из жаропрочных никелевых сплавов с серийными ТЗП исчерпали возможности решения данной проблемы.

Противоречие практического характера заключается в том, что межремонтный ресурс авиационных ГТД в основном определяется ресурсом лопаток турбины, который, в свою очередь, ограничен возникающими в эксплуатации повреждениями ТЗП, при этом отсутствуют эффективные методы восстановления работоспособности лопаток турбины ГТД с целью повышения их ресурса.

В диссертации для устранения указанных противоречий решается **актуальная научная задача** разработки усовершенствованного ТЗП для лопаток турбины ГТД и метода восстановления работоспособности покрытий при ремонте.

Степень разработанности темы диссертации. Развитие техники привело к необходимости разработки и применению сложных комбинированных защитных систем. И только они в настоящее время позволяют и обеспечивают дальнейший прогресс двигателестроения.

На лопатки турбины современных отечественных и зарубежных ГТД различными технологическими методами наносят ТЗП с целью увеличения их долговечности. Опыт фирмы General Electric показал, что за счет применения ТЗП можно достичь эффекта снижения температуры на материале лопаток турбины до 90°С. Такой эффект во многом определяется толщиной наносимого керамического слоя ТЗП, его свойствами, и в первую очередь теплопроводностью, в сочетании с применяемой системой охлаждения лопаток турбины. Применение ТЗП на лопатках турбины позволило существенно повысить их долговечность в условиях эксплуатации.

В настоящее время на лопатках турбины ГТД применяют ТЗП отечественные производители: ПАО «НПО «Сатурн», АО «Уральский завод гражданской авиации», СНТК им. Н.Д. Кузнецова, УМПО, АО «ОДК-Пермские моторы» и др. Анализ литературных данных показывает, что фирмы Pratt & Whitney, Siemens, General Electric, Rolls-Royce также успешно применяют ТЗП.

Научные и экспериментальные исследования отечественных ученых Коломыцева П. Т., Арзамасцева Б. Н., Иванова Е. Г., Тамарина Ю. А., Абраимова Н. В., Мубояджана С. А., Векслера В. Г. Симонова В. Н., а также работы зарубежных ученых Каваками, Б. А., Миллер Р. А., Дж. Говард, Стефан Стекура, М. Мовчан, К. Ю. Яковчук, Брайан Глисон, и др. внесли существенный вклад в развитие и применение защитных покрытий на лопатках турбины ГТД.

Однако проблема увеличения жаростойкости применяемых ТЗП и особенно их термостойкости при увеличении температуры газа перед турбиной актуальна. Одним из таких факторов, приводящих к разрушению ТЗП в эксплуатации, является спекание его керамического слоя в результате воздействия высоких температур. В указанных работах было показано, что

процесс спекания керамики не зависит от способа нанесения покрытия и в значительной степени зависит от высоких установившихся температурных градиентов.

При нанесении защитного покрытия на жаропрочный сплав между ними происходит диффузионное взаимодействие, приводящее к образованию сложной защитной системы, где входящие в систему химические элементы обеспечивают работоспособность рабочей лопатки с покрытием. Таким образом, наносимое защитное покрытие должно выбираться с учетом температурного и механического воздействия в условиях эксплуатации, а также их физико-химических свойств и способов нанесения, которые оказывают влияние на стоимость и структуру покрытия, а значит их защитные свойства. Поэтому для лопаток турбины каждого конкретного ГТД требуется разработка своей специальной защитной системы и технологии ее нанесения с учетом условий применения двигателя.

Своевременная замена защитных покрытий с эксплуатационными дефектами на лопатках ГТД позволяет увеличить их ресурс при выполнении очевидного условия восстановления защитных функций. Технология ремонта должна обеспечить полное удаление поврежденных слоев покрытий и исключить отрицательное влияние на стабильность фазового состава, структуру и свойства поверхностного слоя материала лопатки.

Поэтому разработка и внедрение новых высокоэффективных методов восстановления работоспособности лопаток турбин ГТД, обусловленная недостаточным ресурсом существующих ТЗП, является весьма актуальной задачей в решении проблемы повышения долговечности лопаток турбины и двигателя в целом. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной для современного авиадвигателестроения.

Объектом исследования является лопатка турбины ГТД, выполненная из жаропрочного никелевого сплава с нанесенным теплозащитным покрытием.

Предметом исследования являются процессы изменения свойств системы «жаропрочный никелевый сплав - теплозащитное покрытие» в условиях, приближенных к эксплуатационным, а также исследование изменения теплофизических свойств и структурных параметров в самом покрытии при тепловой и механической нагрузке и влияние этих изменений на защитные свойства ТЗП.

Методология и методы диссертационного исследования. Для решения поставленных задач в работе применялись аналитические и экспериментальные методы исследований служебных характеристик ТЗП, нанесенных на лопатки турбины ГТД. Физические эксперименты, приближенные к условиям эксплуатации, проводились в лабораторных условиях. В работе использованы методы оптической и сканирующей электронной микроскопии для определения химического состава исследуемых материалов и их микроструктуры. Обработка полученных экспериментальных данных и разработка математической модели определения теплового состояния материала лопатки была осуществлена с применением программного пакета Microsoft Office Excel. В качестве теоретической базы для исследования использованы научные труды в области теплозащитных покрытий рабочих лопаток турбины и методов их нанесения.

Целью работы разработка метода восстановления работоспособности лопаток турбины за счет нанесения усовершенствованного ТЗП с барьерным слоем, позволяющего обеспечить повышение ресурса ГТД по сравнению с известными методами.

Для решения поставленной научной задачи были рассмотрены следующие вопросы:

- анализ дефектов ТЗП на лопатках турбины современных ГТД, возникающих в процессе их эксплуатации, и исследование механизма разрушения применяемых ТЗП;
- анализ методов нанесения ТЗП;
- теоретическое обоснование применения нового состава керамического слоя ТЗП, имеющего более высокие защитные свойства, а также целесообразности нанесения на него «жертвенного» барьерного металлического слоя;
- закономерности формирования нового состава ТЗП на жаропрочных никелевых сплавах и сравнительная оценка его служебных характеристик;

- разработка математической модели оценки теплового состояния материала лопатки турбины с нанесенным многослойным ТЗП в зависимости от физических свойств покрытия и его толщины;

- разработка метода восстановления работоспособности лопаток ГТД путем применения усовершенствованного теплозащитного покрытия.

Научная новизна работы.

1. Разработан метод восстановления работоспособности рабочих лопаток турбины ГТД путем применения усовершенствованного ТЗП при их ремонте.

2. Теоретически обоснован и разработан новый состав керамического слоя для ТЗП, имеющий более высокие физические свойства в сравнении с серийным, а также технология его нанесения на рабочие лопатки современных ГТД.

3. Установлены закономерности изменения служебных характеристик в разработанном новом ТЗП, нанесенном на жаропрочный никелевый сплав, в процессе его формирования, а также при испытаниях на жаростойкость и термостойкость.

4. Результаты оценки теплового состояния материала рабочей лопатки ГТД с усовершенствованным ТЗП в зависимости от его толщины и физических свойств, полученные с использованием разработанной математической модели.

Практическая ценность работы.

1. Разработано усовершенствованное ТЗП с новым составом керамического слоя и нанесением на него металлического барьерного слоя, предназначенное для восстановления работоспособности рабочих лопаток турбины при ремонте.

2. Получены данные о влиянии состава керамического слоя и его толщины на тепловое состояние материала рабочих лопаток ГТД.

3. Разработана технология нанесения ТЗП с новым керамическим слоем и металлическим барьерным слоем на рабочие лопатки турбины ГТД.

4. Определены теплофизические свойства нового ТЗП, а также проведены сравнительные исследования его характеристик с применяемыми в настоящее время ТЗП в процессе испытаний на изотермическую жаростойкость и термостойкость.

5. Разработан метод восстановления работоспособности лопаток турбины ГТД с усовершенствованным ТЗП, который может быть использован на существующих и перспективных ГТД и позволяет увеличить ресурс покрытия по сравнению с серийными ТЗП.

6. Проведена апробация нанесения усовершенствованного ТЗП по разработанной технологии на рабочие лопатки турбины высокотемпературного двигателя, которая показала возможность получения качественного защитного покрытия. Проведены стендовые испытания опытной партии лопаток с усовершенствованным ТЗП в составе ГТД.

Достоверность научных результатов. Результаты экспериментальных исследований подтверждаются их проведением на стандартизованных никелевых сплавах по апробированным методикам на сертифицированном оборудовании и паспортизированных материалах. Теоретические положения, примененные в диссертации, базируются на известных достижениях в области материаловедения, химии и физики твердого тела.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты оценки повреждаемости ТЗП лопаток турбины ГТД в процессе эксплуатации.

2. Теоретическое обоснование создания нового состава керамического слоя ТЗП и нанесения на него барьерного слоя.

3. Результаты математического моделирования оценки теплового состояния материала лопатки в зависимости от характеристик ТЗП.

4. Технология нанесения нового состава керамического слоя ТЗП на никелевый сплав ЖС32.

5. Результаты сравнения служебных характеристик разработанного и серийных ТЗП, нанесенных на лопатки турбины ГТД, в процессе испытаний при высоких температурах на изотермическую жаростойкость и термостойкость.

6. Метод восстановления работоспособности лопаток турбины ГТД с усовершенствованным ТЗП.

7. Результаты апробации усовершенствованного ТЗП с новым керамическим и барьерным слоем.

Личный вклад автора. Автор подготовила и лично проводила экспериментальные исследования с последующей их статической обработкой. Разработала метод восстановления работоспособности рабочих лопаток ГТД и технологию нанесения керамического слоя нового состава ТЗП, а также разработала математическую модель оценки теплового состояния материала лопатки в зависимости от свойств применяемого ТЗП. Совместно с научным руководителем обсуждала научные задачи, формулировки положений, выносимых на защиту, выводов по работе, а также участвовала в подготовке статей.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «XXI Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского», на 57-х Научных чтениях, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, на научно-технических семинарах на кафедре «Технической механики и инженерной графики (ТМ и ИГ)» МГТУ ГА. Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в 14 научных статьях (102 с.), 7 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (61 с.), в том числе 4 работы в журналах, входящих в систему Scopus (23 с.), 3 публикации в трудах международных и всероссийских конференций (18 с.).

Реализация результатов. Основные результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ЛМЗ ОАО УМПО и в МГТУ ГА в учебном процессе, что подтверждено соответствующими актами.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка используемых источников. Основное содержание работы изложено на 132 страницах машинописного текста, содержащего 20 таблиц и иллюстрированного 60 рисунками. Список использованных источников содержит 168 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, выявлены противоречия научного и практического характера в области разработки усовершенствованного ТЗП для лопаток турбины ГТД и метода восстановления работоспособности покрытий при ремонте, сформулированы цель и задача исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту и изложено краткое содержание диссертации.

В первой главе проведен анализ условий работы лопаток турбин авиационных ГТД и влияние эксплуатационных факторов на их долговечность, исследованы вопросы применения ТЗП на рабочих лопатках турбины современных авиационных ГТД. Представлен обзор отечественной и зарубежной литературы по ТЗП и технологиям их нанесения, а также существующим методам восстановления поверхностных слоев лопаток газовых турбин авиационных ГТД с применением ТЗП. Определены направления исследования.

Из анализа статистики дефектов и условий работы деталей двигателей сделан вывод о том, что ресурс современных двигателей, на которых применены теплозащитные покрытия, в значительной степени ограничивается ресурсом рабочих лопаток турбины высокого давления. Температура материала на входной кромке лопатки достигает значений 1100...1200 °С, и она подвергается интенсивному окислению, прогару покрытия, эрозионно-коррозионному износу, образованию термоусталостных трещин и сколу керамического слоя ТЗП. В настоящее время покрытия не всегда обеспечивают заданный межремонтный ресурс лопаток турбины. Установлено, что основной причиной разрушения керамического слоя ТЗП на основе оксида циркония $ZrO_2-8\%Y_2O_3$, которое широко применяется в практике двигателестроения, при высоких температурах эксплуатации являются процессы, присущие самому материалу (фазовые изменения при

температурах выше 1200 °С и возникающие при этом напряжения, спекание). При этом наблюдается рост оксидной пленки на границе «металлический подслоя – керамический слой» в результате кислородной проводимости керамического слоя, что приводит к его частичному разрушению – сколу.

Таким образом, разработка усовершенствованного ТЗП, использующего новые материалы в керамическом слое и снижающего вероятность возникновения поверхностных дефектов лопаток турбины при выработке межремонтного ресурса, является актуальной научной задачей, решение которой может значительно увеличить межремонтный ресурс двигателя в целом, а также повысить эффективность ГТД путем повышения температуры газов перед турбиной.

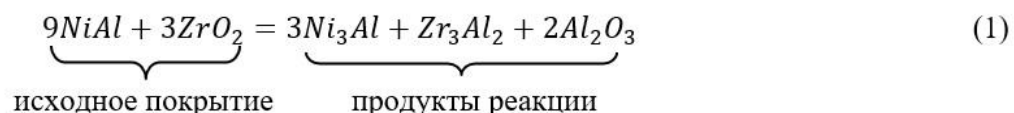
В главе также рассмотрены достоинства и недостатки применяемых в настоящее время способов нанесения ТЗП. Сделано заключение о том, что для повышения ресурса покрытия целесообразно применять электронно-лучевую технологию нанесения.

Во второй главе дана характеристика применяемых для исследования материалов, описаны используемые в работе методы исследования состава, структуры и свойств покрытий, методики проведения испытаний на изотермическую жаростойкость и термостойкость, которые были применены в работе при выполнении экспериментальных исследований.

Третья глава посвящена теоретическому обоснованию возможности разработки более долговечного усовершенствованного ТЗП путем выбора нового состава керамического слоя.

Создание конкурентоспособного ГТД без применения ТЗП на лопатках турбины в настоящий момент не представляется возможным. Температура газа перед турбиной современного ГТД достигает 1900...2200 °С. Если не применять ТЗП, а использовать только систему охлаждения, то температура материала лопатки достигает значений 1150...1200 °С, что приводит к существенному уменьшению её ресурса. Цель применения ТЗП состоит в уменьшении теплового потока, поступающего на детали горячей части ГТД, сглаживание термических циклов нагрузок и повышении сопротивления высокотемпературному окислению.

Для обоснованного выбора конструкции усовершенствованного ТЗП необходимо знать причины, приводящие к их разрушению. Температуры на поверхности ТЗП лопаток турбин в современных ГТД колеблются в интервале 1000...1200 °С. Из физической химии также известно, что при повышении температуры на 100 °С – скорость химической реакции возрастает более чем в 10 раз. Возникает вопрос, какие химические реакции протекают на границе «керамический слой – металлический подслой» при изотермической выдержке лопатки с ТЗП. Анализ показывает, что протекают реакции, которые можно описать уравнением:



Условия эксплуатации современных ГТД и температура газа перед турбиной определяют требования к новым керамическим материалам: коэффициент температурного линейного расширения α – более 10 К⁻¹, удельная теплопроводность λ не менее 2 Вт/м·К, рабочая температура не ниже 1700 °С. Эти характеристики учитываются при выборе новых керамических материалов для ТЗП.

В результате многочисленных исследований было предложено использовать для ТЗП материалы систем: ZrO₂ - Y₂O₃, Nd₂O₃(Cd₂O₃), Yb₂O₃(Sc₂O₃), La₂Ce₂O₇, CeZrO₄. Данные материалы имеют низкую теплопроводность, свойства которой авторы связывают с образованием в структуре малоразмерных кластеров оксидов типа Nd₂O₃, Yb₂O₃ или других. Свойства некоторых перспективных керамик для лопаток турбины ГТД представлены в таблице 1.

Можно сделать вывод, что в настоящее время основными направлениями совершенствования ТЗП являются:

- а) поиск новых материалов для керамического слоя (КС), способных заменить систему ZrO₂–8%Y₂O₃(YSZ);
- б) поиск новых составов для жаростойкого соединительного слоя;
- в) разработка новых способов нанесения ТЗП и совершенствование существующих.

В рамках данной работы была решена задача по рациональному подбору химического состава керамического слоя ТЗП с целью улучшения его эксплуатационных свойств, а, следовательно, повышения работоспособности лопаток турбины ГТД.

На применяемых в настоящее время ТЗП на лопатках турбины ГТД в большинстве своем керамический слой состоит из диоксида циркония (ZrO_2), стабилизированного 7-8 масс.% оксида иттрия (Y_2O_3). Переход из моноклинной в тетрагональную фазу ($t \rightarrow m$) при охлаждении носит мартенситный характер и может привести к нежелательному растрескиванию керамики в результате изменения объема на 3...7%. Были проведены многочисленные исследования с целью выявления альтернативных стабилизаторов (например, MgO , CeO_2 , Sc_2O_3 , In_2O_3 и CaO) и разработки экономичных (т.е. с Y_2O_3) покрытий, но, как оказалось, ZrO_2 , стабилизированный на 7-8 масс.% Y_2O_3 , является наиболее подходящим для применения.

Таблица 1. Свойства оксидных керамических материалов для работы при температурах > 1200 °C

Керамика	$T_{пл}, K$	$\lambda,$ Вт/(м·К) (1273 K)	$\alpha \times 10^{-6}$ K ⁻¹	Преимущества	Недостатки
$ZrO_2+Y_2O_3$	2973	2,17	10,7	низкий λ , высокий α , термостоек	фазовый переход 1443 K, спекание выше 1473 K, кислородопроницаем
$La_2Zr_2O_7$	2573	1,56	9,1	низкая спекаемость, низкий λ , высокая термостабильность, не проводит кислород	низкий α
$YSZ+HfO_2$	3170	2,0	5,0	термостоек, низкий λ , высокий α , меньшая склонность к фазовым переходам	кислородопроницаем
CeO_2	2873	2,77	13	термически стоек, имеет низкий λ и меньшую склонность к фазовым переходам, высокий α	высокая скорость спекания, осаждение выше 1373 K и испарение при нанесении
Al_2O_3	2323	5,8	9,6	высокая твердость, не проводит кислород	высокий λ , низкий α , фазовый переход 1273 K
$Cd_2Zr_2O_7$	2300	1,6	10,4	низкая спекаемость, низкий λ , высокая термостабильность не проводит кислород	низкий α

Однако общая тенденция к увеличению температуры газа перед турбиной приводит к значительному повреждению керамического слоя ТЗП. Это предопределяет необходимость разработки новых составов ТЗП и усовершенствования способов их нанесения. Анализ литературных данных, а также сравнение параметров, достоинств и недостатков различных ТЗП позволяет сделать вывод, что одним из перспективных материалов для керамического слоя покрытия является введение в систему $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ оксида гафния. Свойства оксидов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение свойств диоксида циркония и диоксида гафния

Характеристика	Оксид циркония	Оксид гафния
Температура плавления, °C	2710	2800
Температуры фазовых переходов, °C		
моноклинная — тетрагональная	1170	1650
тетрагональная — кубическая	2370	2550
Изменение объема материала при фазовом переходе моноклинная — тетрагональная фаза, %	5...7	3...4
Усредненный температурный коэффициент линейного расширения, $10^{-6} K^{-1}$ (25 – 1000 °C)	9	5

Диоксид гафния имеет температуру плавления и фазовых переходов выше, чем диоксид циркония, а теплопроводность ниже. Коэффициент термического линейного расширения чистого и стабилизированного HfO_2 ниже, чем у ZrO_2 , и, таким образом, в системе могут быть созданы структуры, устойчивые к термическому удару. Это позволяет сделать выбор оксида гафния, как перспективного материала для верхнего слоя ТЗП.

Преимуществом оксида гафния является то, что переход из моноклинной в тетрагональную фазу происходит при температуре более 1650 °С (на ~ 480° С выше, чем для оксида циркония), а при ~ 2550 °С, соответственно, в кубическую модификацию (на ~ 180 °С выше, чем для диоксида циркония). Как видно, при переходе из тетрагональной фазы в моноклинную изменение объема материала для оксида гафния составляет ~ 3 %, что ниже, чем для диоксида циркония. Это позволяет уменьшить термические напряжения, возникающие в керамическом слое при рабочих температурах лопаток турбины ГТД. Кроме того, применение его в качестве термобарьерного слоя ТЗП может позволить повысить температуру газа перед турбиной, увеличить его термическое сопротивление и трещиностойкость. Оксид гафния менее подвержен спеканию, чем диоксид циркония, а также обладает более длительной стойкостью при термоциклических испытаниях.

Ввиду сходства кристаллической решётки, близких химических свойств оксид гафния был выбран для использования в качестве добавки при разработке усовершенствованного ТЗП. Сходство кристаллических решеток ZrO_2 и HfO_2 позволяет образовывать непрерывные растворы замещения в системе ZrO_2 – HfO_2 .

Исследования показали, что добавление оксида гафния позволяет совершенствовать существующие ТЗП на основе системы диоксида циркония, при этом снижается коэффициент теплопроводности λ и увеличивается рабочая температура до ~ 1400 °С. Применение ТЗП позволяет уменьшить температуру материала лопатки и увеличить их долговечность в условиях теплосмен (термоциклической долговечности).

Количество тепла, передаваемое через ТЗП, зависит от коэффициента теплопроводности материала керамического слоя ТЗП $\lambda_{\text{П}}$ и времени запаздывания $\tau_{\text{П}}$. Коэффициент теплопроводности керамического покрытия (табл. 1) примерно в 10 раз меньше, чем у применяемых материалов для изготовления лопаток турбины (табл. 3). Это значит, что за то же время через ТЗП пройдет в 10 раз меньше тепла, чем через стенку без покрытия, или то же количество тепла пройдет через ТЗП в 10 раз медленнее, чем через стенку без покрытия. Учитывая, что толщина ТЗП $\delta_{\text{П}}$ значительно меньше в сравнении с толщиной рабочей лопатки $\delta_{\text{СТ}}$ и эффект запаздывания $\Delta\tau$ невелик ($\Delta\tau = 0.4\text{с}$), то

Таблица 3. Теплофизические свойства никелевых сплавов

Сплав	Температура	λ , Вт/(м·К ¹)
ЖС6У	900	23
ЖС32	900	21,35
ВЖМ4	900	19,4
ВКНА25	900	19,1

снижение температуры стенки составит $\Delta T = 35\ldots 50\text{ К}$. Однако даже такое снижение температуры позволяет прогнозировать повышения ресурса лопатки в 10 раз (известно, что снижение температуры лопатки на 10К позволяет повысить ресурс в 2 раза) или повысить температуру газов перед турбиной на 70...100 К.

ТЗП позволяет уменьшить температуру защищаемой поверхности рабочей лопатки лишь при

наличии теплового потока через стенку, т.е. при наличии отвода теплоты от неё, например, за счёт пленочного охлаждения. Рассмотрим принципиальную схему тепловой защиты за счет применения ТЗП (рис. 1), на которой даны характерные температуры и обозначения параметров для расчета при теплопередаче охлаждаемой рабочей лопатки с ТЗП: $\delta_{\text{М}}$, $\delta_{\text{МС}}$ и $\delta_{\text{КС}}$ – толщины стенки металла лопатки, металлического и керамического слоев покрытия соответственно; $\lambda_{\text{М}}$, $\lambda_{\text{МС}}$ и $\lambda_{\text{КС}}$ – коэффициенты теплопроводности металла лопатки, металлического и керамического слоев покрытия соответственно; $T_{\text{КС}}$, $T_{\text{МС}}$, $T_{\text{М.нар}}$ и $T_{\text{М.вн}}$ – температуры на керамическом слое, металлическом слое, материале лопатки и на материале лопатки со стороны внутренней полости соответственно.

Рассмотрим влияние ТЗП на значение температуры под ним, т.е. на материале лопатки $T_{\text{М.вн}}$, при заданной температуре

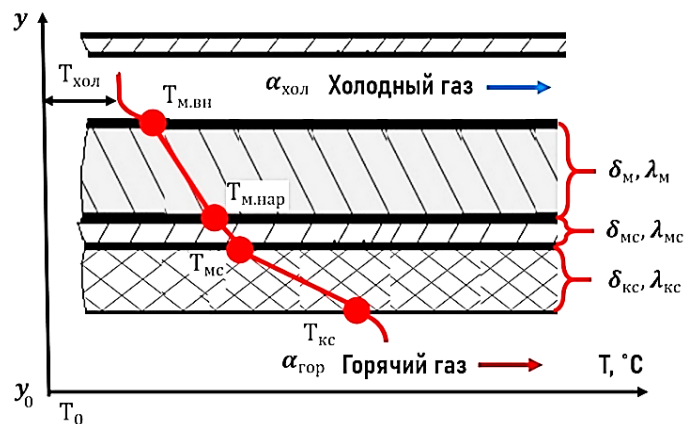


Рисунок 1 – Схема тепловой защиты лопатки турбины за счет применения ТЗП

горячего газа после камеры сгорания. Для упрощения расчётов будем считать, что применяемое ТЗП не влияет на температуру горячего газа и температуру охлаждающего газа $T_{\text{хол}}$, а также на значения их коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{\text{гор}}$ и $\alpha_{\text{хол}}$, соответственно. Нанесенный керамический слой ТЗП будет снижать плотность теплового потока за счет увеличения сопротивления его прохождению, которое зависит от свойств применяемого состава керамического слоя:

$$q = \Delta T / R, \quad R = \lambda / \delta, \quad (2)$$

где q – значение теплового потока,

ΔT – разность температур между температурами слоев,

R – сопротивление тепловому потоку, создаваемое ТЗП.

Примем допущение, что каждый из прилегающих слоёв рассматриваемой схемы (рис. 1) имеет одинаковую температуру. Температуры на наружных поверхностях керамического слоя $T_{\text{КС}}$ и $T_{\text{М.ВН}}$ известны. Температуру материала лопатки со стороны внутренней полости, т.е. со стороны охлаждающего воздуха:

$$T_{\text{М.ВН}} = T_{\text{хол}} + \frac{q}{\alpha_{\text{хол}}}. \quad (3)$$

Из закона Фурье эту температуру можно определить, как:

$$T_{\text{М.ВН}} = T_{\text{КС}} - q \frac{\delta}{\lambda}. \quad (4)$$

Если приравнять правые части уравнения, то можно получить формулу для определения температуры под керамическим слоем ТЗП с учетом близких значений по теплопроводности между металлом лопатки и металлическим подслоем ТЗП:

$$T_{\text{МС}} = T_{\text{М.ВН}} + q \left(\frac{1}{\alpha_{\text{хол}}} + \frac{\delta}{\lambda} \right). \quad (5)$$

Используя формулу (5), можно вычислить тепловые потоки на каждом слое ТЗП:

$$q_{\text{КС}} \frac{\delta_{\text{КС}}}{\lambda_{\text{КС}}} = T_{\text{КС}} - T_{\text{МС}}, \quad q_{\text{МС}} \frac{\delta_{\text{МС}}}{\lambda_{\text{МС}}} = T_{\text{МС}} - T_{\text{М}}, \quad q_{\text{М}} \frac{\delta_{\text{М}}}{\lambda_{\text{М}}} = T_{\text{МС}} - T_{\text{ВН.П}}. \quad (6)$$

При определении общего теплового потока имеем:

$$q \left(\frac{\delta_{\text{КС}}}{\lambda_{\text{КС}}} + \frac{\delta_{\text{МС}}}{\lambda_{\text{МС}}} + \frac{\delta_{\text{М}}}{\lambda_{\text{М}}} \right) = T_{\text{КС}} - T_{\text{М.ВН}}, \quad q = T_{\text{КС}} - T_{\text{М.ВН}} / \left(\frac{\delta_{\text{КС}}}{\lambda_{\text{КС}}} + \frac{\delta_{\text{МС}}}{\lambda_{\text{МС}}} + \frac{\delta_{\text{М}}}{\lambda_{\text{М}}} \right) \quad (7)$$

Видно, что нанесение слоя ТЗП определенной толщины с низким значением коэффициента теплопроводности, согласно формуле (7), позволяет снизить плотность теплового потока q через него, что в свою очередь ведет к уменьшению температуры материала лопатки, как на стороне горячего газа, так и со стороны охлаждаемой внутренней полости $T_{\text{М.ВН}}$. При этом снижение температуры оказывается тем выше, чем выше тепловое сопротивление покрытия.

Определив значение теплового потока q , можно последовательно найти значения температур на границах соседних слоёв: $T_{\text{КС}}$, $T_{\text{МС}}$ и $T_{\text{М.нар}}$.

В диссертации на основании вышеизложенных процессов теплообмена в охлаждаемой лопатке разработана математическая модель для определения температурного состояния материала лопатки турбины в зависимости от толщины и свойств наносимого керамического слоя. Исходные данные для моделирования представлены в таблице 4. Расчеты, проведенные с помощью предложенной модели представлены на рисунке 2.

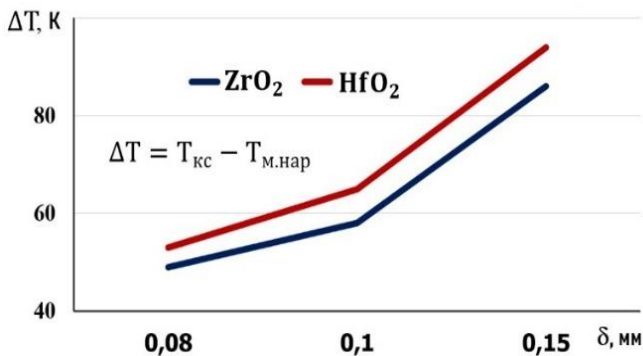


Таблица 4. Исходные данные для расчета перепада температур

№ п/п	Характеристика	Значения							
1	$\delta_{\text{КС}}$, мм	0,08		0,1		0,15		0,2	
2	$\lambda_{\text{КС}}$, Вт/(м·К)	ZrO ₂	HfO ₂	ZrO ₂	HfO ₂	ZrO ₂	HfO ₂	ZrO ₂	HfO ₂
		2,2	2,0	2,2	2,0	2,2	2,0	2,2	2,0
3	$\delta_{\text{МС}}$, мм	0,05		0,05		0,05		0,05	
4	$\lambda_{\text{МС}}$, Вт/(м·К)	14,5		14,5		14,5		14,5	
5	$\delta_{\text{М}}$, мм	8,0		8,0		8,0		8,0	
6	$\lambda_{\text{М}}$, Вт/(м·К)	23		23		23		23	
7	$T_{\text{Г}}$, К	1900		1900		1900		1900	
8	$T_{\text{ВН}}$, К	600		600		600		600	
9	$\alpha_{\text{Г}}$, Вт/(м ² ·К)	3000		3000		3000		3000	
10	$\alpha_{\text{ВН}}$, Вт/(м ² ·К)	3000		3000		3000		3000	

Видно, что применение усовершенствованного керамического слоя позволяет снизить температуру на материале лопатки примерно на 10...13% в сравнении с применением в качестве керамического слоя системы $ZrO_2-Y_2O_3$. Кроме того, увеличение толщины керамического слоя приводит к увеличению перепада температур между керамическим слоем и металлом лопатки.

Четвертая глава посвящена исследованию стабильности состава и структуры ТЗП, оценке их долговечности и разработке технологии нанесения усовершенствованного ТЗП на никелевый сплав ЖС32ВИ.

Долговечность рабочих лопаток турбины с ТЗП, работающих при высоких температурах, во многом зависит от состава, структуры и свойств металлического подслоя. ТЗП при характерных тепловых потоках $\sim 10^6$ Вт/м² на лопатке турбины позволяет снизить температуру основного материала на 50 – 100 °С и более. Это обеспечивает повышение ресурса защищаемой детали или возможное увеличение температуры газа перед турбиной ГТД, а значит его эффективности.

Анализ опыта эксплуатации рабочих лопаток турбин с применением керамических покрытий на них отечественных и зарубежных ГТД выявил ряд проблем: снижение в процессе эксплуатации значения защитного эффекта из-за спекания, деградация ТЗП, возросшая стоимость оборудования и технологии его нанесения. Это еще раз подтверждает необходимость разработки и применения усовершенствованного ТЗП с целью увеличения его работоспособности.

Если воздействие внешнего теплового потока и охлаждающего лопатки воздуха постоянны, то значение положительного теплового эффекта ТЗП достигается за счет его толщины и удельной теплопроводности керамического слоя. Теплопроводность электронно-лучевого покрытия РВА 266 в исходном состоянии в диапазоне температур 100...900 °С составляет 1,5...1,7 Вт/(м·К), но уже после 500 часов циклического нагрева до 1135 °С возрастает до 2,2 Вт/(м·К), что снижает значение теплового эффекта покрытия до 40...50 °С. Причиной роста теплопроводности керамического слоя является его спекание, приводящее к уменьшению в керамике пор, трещин, вертикальных каналов роста столбчатой структуры керамики.

С целью выбора металлического подслоя ТЗП и для оценки его работоспособности на лопатках турбины при высоких температурах в работе выполнен сравнительный анализ изотермической жаростойкости ТЗП с различными вариантами металлических подслоев. Испытания технологических лопаток ГТД с нанесенными на них по серийной технологии ТЗП с различными металлическими подслоями были проведены при температурах 1100 и 1170 °С. Изотермическое окисление проводили с целью избежать влияния термической деформации на разрушение ТЗП.

В качестве критерия повреждения был принят скол керамического слоя на входной кромке и корыте на площади $\sim 30\%$. Особое внимание обращалось на состояние жаростойкого подслоя в месте сколовшейся керамики. Лопатки были изготовлены из сплава ЖС32ВИ, на которые были нанесены различные варианты металлических подслоев, а затем на все варианты методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме нанесли керамический слой $ZrO_2 \times 7\% Y_2O_3$. Варианты покрытий и их толщина представлены в таблице 5. Результаты испытаний представлены на рисунках 3 и 4.

Таблица 5. Варианты исследуемых покрытий.

№ п/п	Тип покрытия	Толщина, мкм
1	ВСП-11+ $ZrO_2 + 7Y_2O_3$	100-150
2	СП-2+ $ZrO_2 + 7Y_2O_3$	110-150
3	СП-6+ $ZrO_2 + 7Y_2O_3$	110-140
4	CrAlY + $ZrO_2 + 7Y_2O_3$	90-110
5	ГЦХА+ $ZrO_2 + 7Y_2O_3$	110-120
6	NiCrTaY+ $ZrO_2 + 7Y_2O_3$	100-120
7	АЖ-8+CrAl+ $ZrO_2 + 7Y_2O_3$	110-140

Из результатов испытаний видно, что наилучшие результаты достигнуты на лопатках с вариантами металлических подслоев №6 и №7. С увеличением температуры испытаний долговечность всех исследуемых покрытий резко уменьшается. При температуре испытаний 1170 °С долговечность уменьшилась в 2-3 раза по сравнению с долговечностью при температуре испытаний 1100 °С. Это

можно объяснить увеличением интенсивности диффузионных процессов, происходящих между ТЗП и основным сплавом. С увеличением температуры быстрее развиваются окислительные процессы и тем раньше происходит скол керамического слоя. При температуре 1170 °С в определенных условиях в керамическом слое происходят процессы распада кубической и тетрагональной фаз, и может появляться моноклинная фаза. Это приводит к увеличению напряжений сжатия в керамическом слое и, соответственно, происходит его отрыв от подслоя.

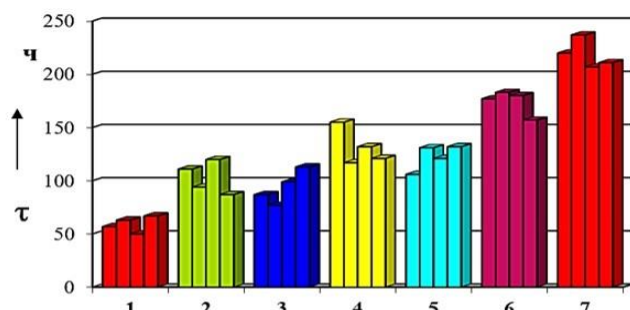


Рисунок 3 – Диаграмма испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1100 °С с вариантами металлических подслоев: 1) ВСДП-11; 2) СДП-2; 3) СДП-6; 4) CrAlY; 5) ГЦХА; 6) NiCrTaY; 7) АЖ-8+CrAl

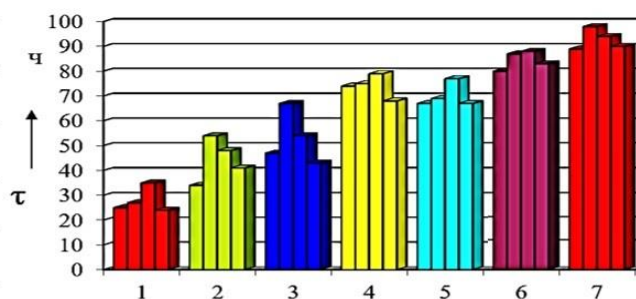


Рисунок 4 – Диаграмма испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1170 °С с вариантами металлических подслоев: 1) ВСДП-11; 2) СДП-2; 3) СДП-6; 4) CrAlY; 5) ГЦХА; 6) NiCrTaY; 7) АЖ-8+CrAl

На основании проведенного исследования для повышения долговечности ТЗП предложено использовать металлический подслоя АЖ-8+CrAl, который имеет химический состав близкий к химическому составу применяемых никелевых сплавов для изготовления лопаток современных ГТД. Это позволяет уменьшить диффузионные процессы между подслоем и сплавом, а наличие в металлическом подслое тугоплавких элементов (особенно тантала и иттрия) позволяет несколько замедлить рост оксидной пленки, что также положительно влияет на долговечность всего ТЗП.

Рассмотрим процессы, происходящие в ТЗП (рис. 5) при изотермической выдержке, как при стационарном режиме. Между керамическим и металлическим слоями проходят реакции, описанные выражением 1.

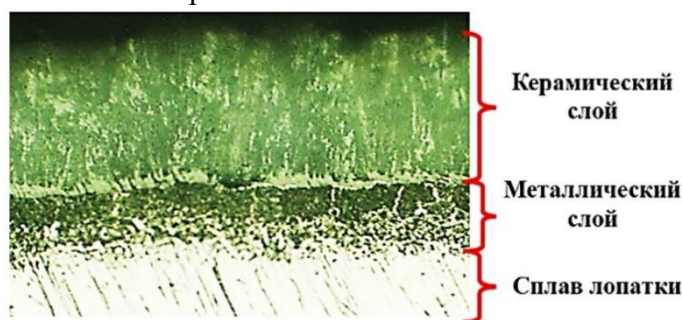


Рисунок 5 – Микроструктура ТЗП с металлическим подслоем АЖ-8+CrAl после термовакуумной обработки

В соответствии с законами термодинамики композиция исходного покрытия стабильна. Свободная энергия образования ZrO_2 близка к свободной энергии образования Al_2O_3 (при концентрациях Zr и Al около 100 %).

Концентрация алюминия (масс %) в алюминиде никеля более чем в 5 раз меньше, чем в чистом алюминии. На первый взгляд кажется, что восстановление оксида циркония алюминием, находящимся в алюминиде никеля невозможно. Однако

взаимная диффузия алюминия (из NiAl) в керамику (ZrO_2) и циркония (из ZrO_2) в алюминидный подслоя не может протекать без восстановления алюминием (в NiAl) оксида циркония. Таким образом, происходит отвод восстановленного циркония с места реакции в сторону алюминид никеля, что сдвигает всю реакцию взаимодействия вправо. В итоге около границы «металлический подслоя – керамика» возникают фазы: алюминиды никеля, алюминиды циркония, оксид алюминия.

Возникает вопрос: какое влияние оказывают эти фазы на жаростойкость и адгезионную прочность циркониевой керамики с алюминидным подслоем?

Ясно, что алюминиды никеля и циркония в разной степени повышают жаростойкость. Взаимная диффузия алюминия и циркония повышает адгезионную прочность.

Как взаимодействует растущая прослойка оксида алюминия с керамикой?

Диаграмма состояния $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ эвтектического типа. Это значит, что, если получить сплав оксидов с температурой выше 2000°C , то можно достичь высокой прочности по типу припоев. Но в температурном интервале до 1300°C нет взаимодействия между растущей прослойкой Al_2O_3 с керамикой ($\text{ZrO}_2 + 7\%\text{Y}_2\text{O}_3$). Значит, растущая прослойка Al_2O_3 будет существенно ухудшать адгезионную связь керамики с подслоем.

В диаграмме $\text{Zr} - \text{Al}$ имеются 8 алюминидов циркония. Независимо от состава образующегося алюминида циркония на границе алюминидного подслоя керамики с увеличением выдержки композиции при повышенной температуре $900...1200^\circ\text{C}$ (даже в условиях глубокого вакуума) будет расти толщина оксидной пленки алюминия, ухудшая адгезию керамики. В условиях вакуума этот процесс протекает медленнее. В окислительной среде процесс ускоряется вследствие высокой диффузии кислорода через циркониевую керамику. Скорость диффузии кислорода в ZrO_2 на пять порядков выше, чем у оксида алюминия Al_2O_3 при температурах $1100 - 1200^\circ\text{C}$.

Следовательно, керамика ZrO_2 является слабой защитой от проникновения кислорода к поверхности алюминидного подслоя. Значит механизм разрушения керамики при изотермической выдержке в основном определяется ростом разделительного слоя типа Al_2O_3 , как за счет восстановления оксида циркония алюминием, так и за счет высокой скорости диффузии кислорода через керамику (рис. 6.а и б).

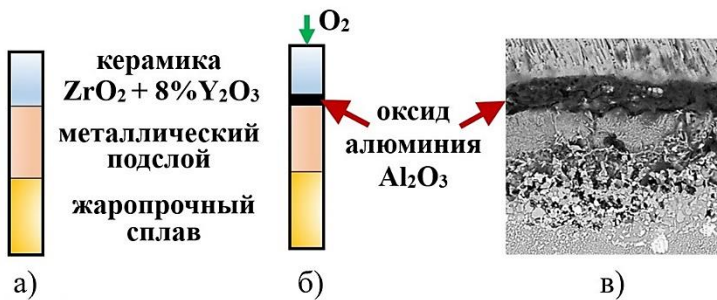


Рисунок 6 – Схема строения ТЗП после его нанесения (а), эксплуатации (б) и его микроструктура (в) после эксплуатации в течении 5987 часов в составе ПС-90

В результате образования и роста оксидной пленки на границе «металл – керамика» (рис. 6.в) в процессе эксплуатации снижается адгезионная связь, что приводит к скалыванию керамики с алюминидного слоя. Если ясен механизм разрушения керамики, то можно предложить способ повышения ее работоспособности.

Так, для торможения реакции образования оксида алюминия можно предложить следующие мероприятия: в

алюминидный слой при формировании покрытия ввести цирконий; в керамику ввести оксид (например, оксид гафния), который образовывал бы твердый раствор или химическое соединение с выделяющейся пленкой Al_2O_3 ; заменить алюминидный подслоя на силицидный, тогда при взаимодействии подслоя с керамикой формировалось бы химическое соединение типа циркона ZrSiO_4 без больших объемных превращений: на алюминидный подслоя наносить керамику из оксида хрома, тогда образующийся в процессе окисления оксид алюминия неограниченно бы в нем растворялся, сохраняя адгезионную прочность и жаростойкость всей композиции ТЗП.

В процессе эксплуатации ТЗП подвергаются воздействию окисляющих продуктов сгорания, а температура на их внешней поверхности может достигать 1200°C . В этих условиях происходят явления, такие как спекание пористого керамического слоя, окисление связующего слоя и взаимная диффузия с подложкой. Эти изменения в сочетании с действующими термическими и механическими нагрузками могут в конечном итоге привести к образованию трещин и отслаиванию керамического слоя (рис. 7).

В результате сгорания продуктов износа прирабатываемых покрытий компрессора, мелких частиц из окружающей среды и топливовоздушной смеси на поверхности лопаток турбины образуются отложения, содержащие оксиды Ca , Mg , Al и Si , которые при нагреве образуют *расплав смеси оксидов указанных элементов* (CMAS) с включениями частиц металлических элементов Ti , Fe , Ni . Такие отложения на лопатках становятся опасными, как только температура поверхности ТЗП становится достаточно высокой, чтобы вызвать их

расплавление. В результате в наиболее горячих зонах на входной кромке лопатки наблюдается значительные повреждения ТЗП (рис. 7).

Высокие температуры на поверхности ТЗП лопатки приводят к расплавлению CMAS и его проникновению в межстолбовые промежутки керамического слоя, вплоть до оксидного слоя на металлическом подслое с образованием трещин и отслоений керамического слоя (рис. 8).

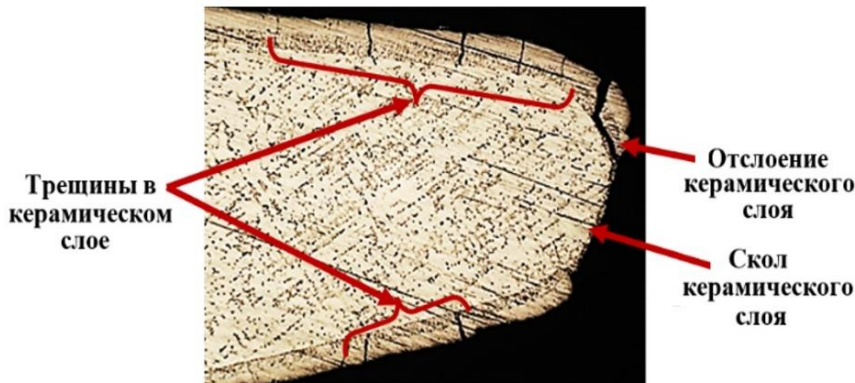


Рисунок 7 – Микроструктура ТЗП с дефектами после эксплуатации

керамического слоя – $9...11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. При тепловом воздействии происходит существенное расширение металлической составляющей ТЗП по сравнению с керамическим слоем.

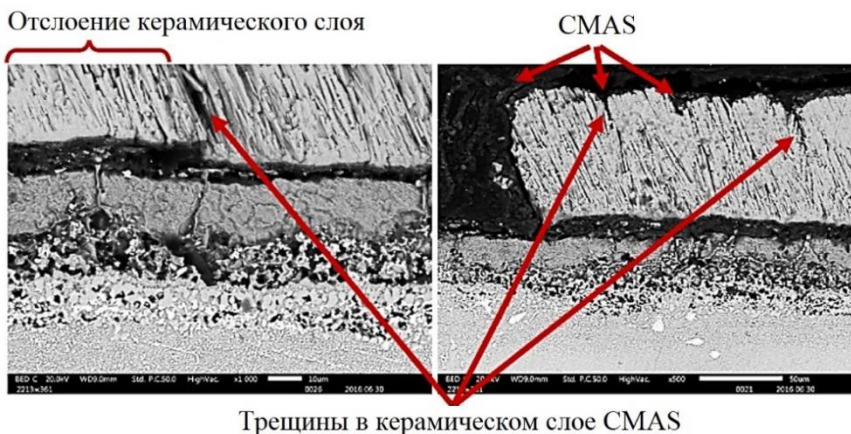


Рисунок 8 – Микроструктура ТЗП с дефектами от попадания CMAS

химическое взаимодействие расплавленного CMAS и керамического слоя, что приводит к деградации верхней части столбов керамического слоя (рис. 9).

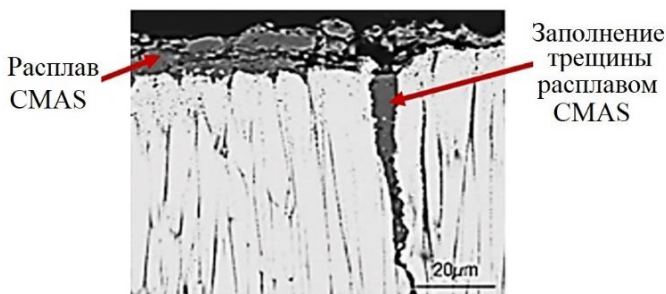


Рисунок 9 – Разрушение столбов керамического слоя расплавом CMAS

долговечности ТЗП необходимо, кроме мероприятий по увеличению жаростойкости металлического подслоя, введения в систему $\text{ZrO}_2 + 8\%\text{Y}_2\text{O}_3$ оксида гафния, позволяющего

Кроме указанных выше процессов существенный вклад в разрушение ТЗП вносят напряжения из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения (ТКРЛ) между керамическим слоем и материалом лопатки, а также состав газовой среды. В зависимости от химического состава ТКРЛ никелевых сплавов составляет – $16...18 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, а

При охлаждении расплав CMAS переходит в твердое состояние, и пропитанный им керамический слой ТЗП становится жестким, теряя устойчивость к деформации. В покрытии могут образовываться трещины, что приводит к постепенному отслаиванию ТЗП при термоциклировании в процессе эксплуатации (рис.8).

Также происходит химическое взаимодействие расплавленного CMAS и керамического слоя, что приводит к деградации верхней части столбов керамического слоя (рис. 9). Выделяются два типа взаимодействия между CMAS и ТЗП: проникновение CMAS в межстолбовое пространство ТЗП (поры, трещины) и химическое взаимодействие с ТЗП в соответствии с механизмом растворения-повторного осаждения. Оба взаимодействия приводят к постепенному разрушению верхнего слоя ТЗП в виде развивающихся трещин из-за спекания ТЗП и деградации верхнего слоя керамики.

В результате исследования установлено, что для увеличения

снизить коэффициент теплопроводности λ и увеличить рабочую температуру, необходимо также провести мероприятия по исключению доступа кислорода к металлическому слою и обеспечить защиту керамического слоя от попадания в меж столбовое пространство CMAS. Такую защиту можно осуществить путем нанесения плотного, достаточно тонкого поверхностного слоя на столбчатую керамику, предотвращающего доступ окислительных продуктов к металлу или использовать материалы, обеспечивающие эффективное самозалечивание покрытий.

В диссертации разработано усовершенствованное ТЗП, при котором на рабочую лопатку турбины наносится керамический слой с более низкой теплопроводностью и имеющий полиморфное превращение при более высоких температурах. В этом случае снижается вероятность скола керамического слоя в процессе эксплуатации ГТД. На первом этапе были изготовлены керамические штабики с новым составом системы $ZrO_2-HfO_2-Y_2O_3$. Была выбрана следующая технология нанесения усовершенствованного ТЗП: сначала на лопатку из сплава ЖС32ВИ наносится вакуумно-плазменным методом подслоя с повышенным содержанием тугоплавких элементов – АЖ-8 (толщина 40...60 мкм); затем наносится керамический слой на установке электронно-лучевого осаждения и конденсации покрытий в вакууме при температуре лопатки турбины 880 – 920 °С. По окончании процесса осаждения керамического покрытия в камере установки производят осаждение на поверхность керамики барьерного металлического слоя ПХ25Ю5 (толщина 3...10 мкм). Термовакuumная обработка (ТВО) после нанесения комбинированного ТЗП проводится по серийной технологии. Схема технологического процесса представлена на рисунке 10.



Рисунок 10 – Схема технологического процесса нанесения усовершенствованного ТЗП

Разработанная технология предусматривает применение стандартного оборудования авиадвигательных предприятий, что позволяет данное усовершенствованное покрытие для лопаток турбины ГТД в кратчайшие сроки и с минимальными затратами внедрить в серийное производство.

Микроструктура ТЗП, полученная по разработанной технологии, представлена на рисунке 11.

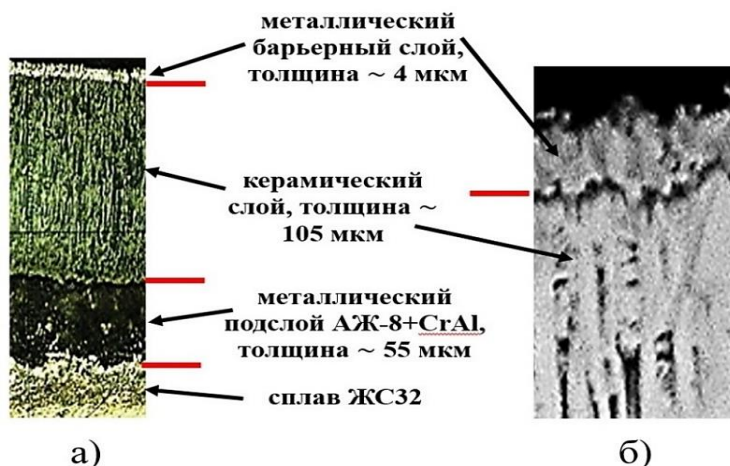


Рисунок 11 – Микроструктура ТЗП с барьерным слоем (а) после его осаждения и микроструктура барьерного слоя на керамическом слое (б)

В результате проведенного в работе исследования установлено, что защита поверхности керамики барьерным металлическим слоем препятствует доступу кислорода к металлическому подслою, тем самым замедляет его окисление в процессе эксплуатации и подпаданию продуктов CMAS в межстолбовое пространство керамики, что способствует увеличению долговечности всей конструкции ТЗП.

Пятая глава посвящена сравнительному исследованию свойств усовершенствованного ТЗП с

серийно применяемыми, а также апробации его нанесения на рабочие лопатки турбины ГТД по разработанной в работе технологии.

В процессе эксплуатации деталей ГТД с покрытиями происходит изменение состава, структуры, толщины и защитных свойств покрытий. Одним из способов оценки долговечности покрытий при сохранении их целостности является испытание на изотермическую жаростойкость. В работе были проведены сравнительные испытания на изотермическую жаростойкость серийного ТЗП и разработанного усовершенствованного. Кроме того, такое исследование имеет целью проверку работоспособности разработанной математической модели, а также технологии нанесения предложенной конструкции ТЗП.

Для исключения влияния на долговечность ТЗП металлического подслоя все варианты покрытия имели одинаковый подслоя АЖ-8+CrAl. Сравнительные лабораторные испытания лопаток с различными вариантами ТЗП на стойкость к изотермическому окислению проводились в атмосферной печи при температуре 1100 ± 10 °С, среда – воздух. Изменения структуры и толщины ТЗП контролировали металлографическим анализом. Оценку жаростойкости проводили по внешнему виду до появления первого скола керамики и площади скола, степени окисления подслоя, а также по изменению толщины покрытия.

Варианты керамических слоев (табл. 6) для исследования наносили методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме. На всех вариантах керамические слои сформированы равномерно, трещин, сколов, отслоений, вспучиваний не выявлено. Микроструктура покрытий до испытаний представлена на рисунке 12.

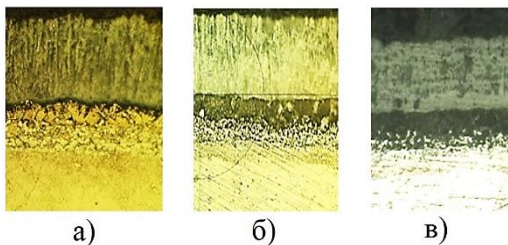


Рисунок 12 – Микроструктура ТЗП до испытаний (варианты): а) – №1; б) – №2; в) – №3

Таблица 6. Варианты исследуемых покрытий.

№ варианта	Сплав	Система керамического слоя ТЗП	Толщина керамического слоя, мкм
1	ЖС-32ВИ	$ZrO_2 + 7\%Y_2O_3$	$\sim 90 \pm 5$
2	ЖС-32ВИ	$ZrO_2 + 7\%Y_2O_3 + HfO_2$	$\sim 90 \pm 5$
3	ЖС-32ВИ	$ZrO_2 + 7\%Y_2O_3 + Cr$	$\sim 80 \pm 5$

Таблица 7. Появление первого скола керамики

№ варианта	Время появления скола, ч	Характер скола и место появления
№ 1	196ч	мелкий скол на корыте
№ 2	481ч	мелкий скол на выходной кромке
№ 3	232ч	расслоение керамического слоя на входной кромке

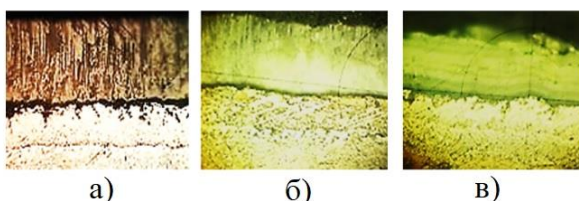


Рисунок 13 – Микроструктуры исследуемых покрытий после выдержки 232 часа; а) - вариант №1; б) - вариант №2; в) – вариант №3

В процессе испытаний установлено, что первые сколы керамического слоя появились на всех вариантах в разное время (табл. 7). Структура покрытий после выдержки 232 часа представлена на рисунке 13. Лопатки с вариантом ТЗП №3, где размеры сколов керамического слоя превысили нормы ТУ, были сняты с испытаний через 481 час. Керамический слой с металлическим хромом имеет специфичный

механизм разрушения (рис. 13). Вероятно, это связано с возникновением термических напряжений между керамической ($ZrO_2 + 7\%Y_2O_3$) и металлической (Cr) составляющими слоев. Из рисунка 13 видно, что происходит расслоение керамического слоя по металлической составляющей – хрому.

Вариант ТЗП №2 показал наилучшую жаростойкость. На штатном варианте ТЗП сколы появились после 196 часов, а на варианте №2 после 481 часов без превышения допустимых величин по ТУ. Характерной особенностью ТЗП варианта №2 является то, что в процессе дальнейших испытаний сколы не увеличивались, в отличие от штатного варианта ТЗП.

Как видно из рисунка 14 вариант ТЗП №2 после выдержки 1413 часов не имеет сколов, диффузионный слой вырос с 55 до 75 мкм, а толщина оксидной пленки составляет порядка 5...8 мкм, что говорит о его работоспособности в условиях длительного воздействия высоких температур.

На штатном варианте покрытия АЖ-8+CrAl+ZrO₂+7%Y₂O₃ при наработке 795ч выявлено шелушение керамического слоя на всей поверхности спинки и сколы в зоне перфорации.

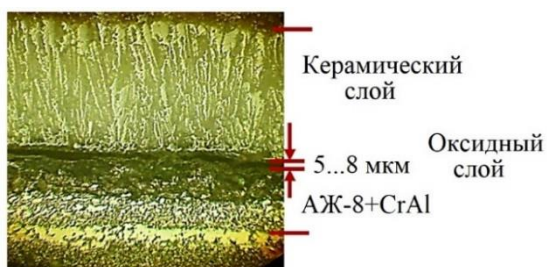


Рисунок 14 – Микроструктура ТЗП варианта №2 после выдержки 1413 часов

керамического слоя на варианте ТЗП появилось через 41 час, а на варианте через 43 часа. При дальнейшей выдержке сколы увеличивались и стали допустимых норм согласно ТУ. На варианте ТЗП №2 первый единичный выходной кромке появился через 51 час. На варианте ТЗП №2 сколы покрытия норм ТУ появились после 65 часов выдержки.

В дальнейшем после выдержки 75 лопатки были сняты с испытаний. что с увеличением температуры испытаний долговечность всех исследуемых покрытий снижается. Повышение температуры испытаний ускоряет фазовые и структурные изменения в защитных покрытиях и основе сплава, приближая их предельное состояние.

Проведенные исследования показали, что разработанный усовершенствованный вариант ТЗП с оксидом гафния повышает жаростойкость в 1,7 раз при температуре испытания 1100±10 °С и в 1,3 раза при температуре испытания 1170±10 °С по сравнению с серийным покрытием.

При исследовании возможности работы лопаток с покрытием в условиях теплосмен проводились испытания на термическую стойкость образцов и технологических лопаток (рис. 16) с различными вариантами покрытий на сплаве ЖС32ВИ, представленными в таблице 6. После каждых 5 циклов поверхность образца осматривали с помощью микроскопа МБС - 9 при увеличении ×12,5 на предмет появления трещин и видимых сколов покрытия. По числу циклов до появления трещин в поверхностном слое проводили оценку сравнительной термостойкости исследуемых покрытий на образцах.

Термостойкость оценивали по количеству циклов до начала разрушения покрытия (N₁) и по количеству циклов до появления в покрытии трещин (N₂).

В процессе испытаний на термостойкость кроме визуального осмотра и определения появления трещин в покрытии проводили измерения размеров площади скола керамического слоя. На рисунке 17 представлен внешний вид технологических лопаток и образцов после 100 циклов испытаний.

Проведённые испытания указанных вариантов ТЗП на термостойкость по циклу 1100↔400 °С показали, что вариант №2 имеет более высокую стабильность. Достоверность

На рисунке 15 представлена диаграмма с результатами испытаний на жаростойкость. Видно, что вариант ТЗП №2 отличается стабильностью поведения нового керамического слоя. При выдержке более 1600 часов имеющиеся незначительные сколы керамического слоя не превышают допустимых по ТУ, что свидетельствует о его высоких служебных свойствах.

Были проведены сравнительные испытания при температуре 1170 °С. Первое шелушение

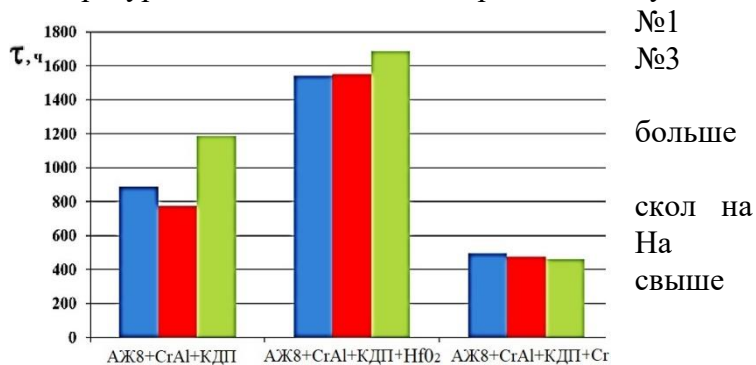


Рисунок 15 – Диаграмма результатов испытаний на жаростойкость вариантов ТЗП при температуре 1100±0 °С

Видно, что вариант ТЗП №2 отличается стабильностью поведения нового керамического слоя. При выдержке более 1600 часов имеющиеся незначительные сколы керамического слоя не превышают допустимых по ТУ, что свидетельствует о его высоких служебных свойствах.



Рисунок 16 – Внешний вид технологических лопаток и образцов до испытаний на термостойкость

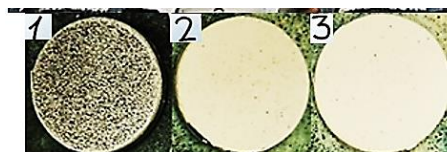


Рисунок 17 – Внешний вид технологических лопаток и образцов после 100 циклов испытаний на термостойкость

полученных в результате испытаний подтверждается сведениями из литературных источников. Оксид гафния имеет более высокую температуру плавления, а значит более высокую стойкость при воздействии высоких температур, а также претерпевает полиморфные превращения при температурах выше 1400 °С в отличие от стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония, имеющего полиморфное превращение при 1200 °С и имеющего меньшую температуру плавления.

Целью применения ТЗП является повышение работоспособности лопаток турбины за счет снижения температуры материала, сглаживания циклов нагрева-охлаждения на переменных режимах работы ГТД, а также защита от газовой коррозии. Таким образом, от применяемого ТЗП – его состава, толщины и свойств применяемых материалов в ТЗП, будет зависеть ресурс лопатки турбины. Эти требования вызывают потребность изучения теплофизических свойств при разработке и выборе новых ТЗП.

Теплофизические характеристики ТЗП, такие как коэффициенты теплопередачи и теплопроводности, определяют по методикам с применением специального оборудования. В тоже время практически невозможно применить для этого экстраполирование данных для плотных оксидов применительно к конкретному покрытию (неплотному и содержащему стабилизирующие примеси). В условиях эксплуатации на лопатках турбины ГТД образуется нагар и происходит его коксование, а также происходит отложение продуктов коррозии, что приводит к изменению степени черноты (излучательной способности) поверхности покрытия, которое не учитывается при определении теплофизических свойств по известным методикам. В тоже время доля теплового излучения в нагреве поверхности покрытия может достигать 10% от общего теплового потока, что оказывает существенное влияние на тепловое состояние лопатки турбины.

В работе теплопроводность ТЗП определяли по разработанной в Рыбинской государственной авиационно-технологической академии имени П.А. Соловьева (РГАТА им. П.А. Соловьева) методике. На одну сторону образца, представляющего собой пластину 50x50 мм, наносили исследуемый вариант покрытия, другая сторона была без покрытия. Экспериментальному исследованию подверглись два варианта ТЗП – разработанное усовершенствованное с керамическим слоем системы - $ZrO_2+8\%Y_2O_3+HfO_2$ и серийно применяемый с керамическим слоем системы $ZrO_2+8\%Y_2O_3$. Результаты исследования представлены на рисунках 18 и 19 и в таблицах 8 и 9 соответственно.

Таблица 8. Результаты измерения температуры на образце с разработанным ТЗП

№	Температура °С	
	На стороне с покрытием	На стороне без покрытия
M1	124,2	65,2
M2	120,1	67,1
M3	122,8	61,8
M4	123,0	62,5

Таблица 9. Результаты измерения температуры на образце с серийным ТЗП

№	Температура °С	
	На стороне с покрытием	На стороне без покрытия
M1	150,9	80,2
M2	149,8	78,8
M3	141,1	75,9
M4	140,7	75,2

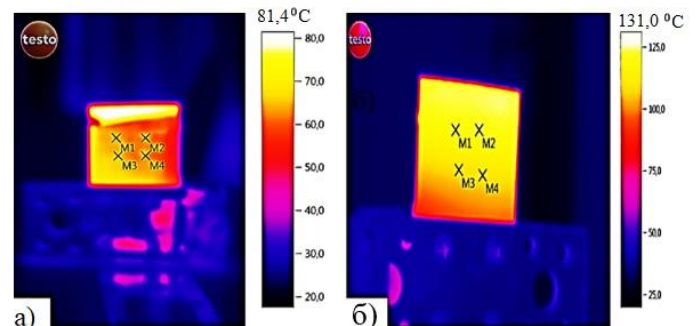


Рисунок 18 – Распределение температурного поля на образце с разработанным покрытием: а) на стороне покрытия; б) на стороне без покрытия

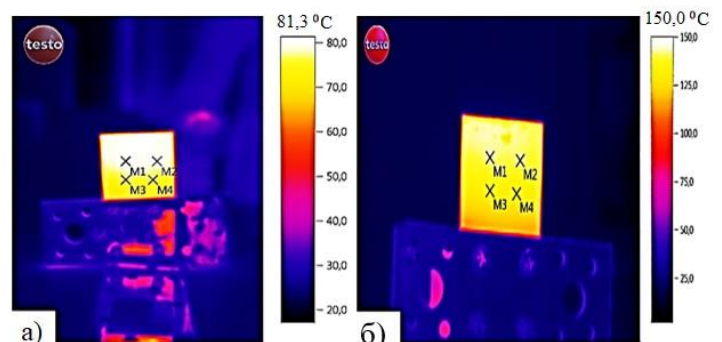


Рисунок 19 – Распределение температурного поля на образце с серийным покрытием: а) на стороне покрытия; б) на стороне без покрытия

Эффективность охлаждения определялось по общепринятой безразмерной температуре:

$$\Theta = (T_{\Gamma}^* - T_{\text{ст}}) / (T_{\Gamma}^* - T_{\text{вх}}^*), \quad (8)$$

где $T_{\text{ст}}$ – температура на наружной поверхности с покрытием,

$T_{\text{вх}}^*$ – температура охлаждающего, омывающего воздуха на стороне без покрытия,

T_{Γ}^* – температура газа в электрическом калорифере (в эксперименте 220 °С)

Из результатов исследования видно, что разработанная в работе система керамического слоя $\text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{HfO}_2$ имеет более высокую эффективность, чем применяемое ТЗП с керамическим слоем $\text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$. Это можно объяснить более высокими физическими свойствами оксида гафния (см. табл. 1), а именно более низким коэффициентом теплопроводности и более высокой температурой плавления.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что применение разработанного ТЗП позволяет в 1,2 раза повысить долговечность рабочих лопаток турбины в сравнении с применяемым ТЗП или повысить температуру газа перед турбиной приблизительно на 20%.

В процессе эксплуатации ГТД покрытия лопаток турбины постепенно теряют свои защитные свойства. Продление срока эксплуатации возможно путем восстановления ТЗП и устранения дефектов поверхности. Восстановление защитных свойств ТЗП, ресурс которого сопоставим с ресурсом рабочей лопатки турбины, являются актуальным и эффективным решением продления ресурса лопаток. Поэтому при ремонте ГТД широко используют метод восстановления жаростойких покрытий, состоящий из удаления старого и нанесения нового покрытия.

Из результатов исследования (глава 4) видно, что металлический подслой после наработки имеет достаточный запас алюминия и удовлетворительную структуру. Это позволяет его не удалять, а провести восстановление рабочих лопаток только путем ремонта дефектного керамического слоя.

В работе обоснован и предложен новый состав керамического слоя (см. главу 3) для ТЗП. Это требует разработки метода его нанесения при восстановлении работоспособности лопаток турбины ГТД. Ранее в работе (см. главы 1 и 3) отмечалось, что по совокупности получаемых свойств ТЗП, наиболее подходящим методом нанесения керамического слоя покрытия, является метод электронно-лучевого напыления, который и был выбран в качестве метода его нанесения.

Метод восстановления ТЗП на рабочих лопатках турбины состоит из нескольких этапов. Одним из этапов является подготовка самих керамических штабиков с разработанным составом. Учитывая, что оксиды, входящие в состав штабика производятся из руды и после их производства и изготовления составе присутствуют и другие оксиды – SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , HfO_2 , MgO , CaO , P_2O_5 , Na_2O , а также хлориды и фториды. Их количество регламентируется техническими условиями. Каждое вещество имеет свое парциальное давление паров, что приводит к различной скорости их испарения в вакууме при различных температурах. В первую очередь, происходит испарение легко испаряемых веществ, которые конденсируются на лопатке, что приводит к снижению адгезионной прочности связи керамического слоя с металлическим. С целью частичного удаления примесей из штабиков предлагается их после просушки дополнительно прокалить перед загрузкой в камеру при температуре 1100 °С в течении 2 часов с последующим охлаждением вместе с печью.

Нанесение керамического слоя производится на установке электронно-лучевого распыления и конденсации в вакууме из спрессованных штабиков с разработанным химическим составом – $\text{ZrO}_2 + 7\% \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{HfO}_2$. После загрузки приспособлений с технологическими лопатками проводится напыление керамики по рабочему режиму, затем проводится контроль качества нанесения и взвешивание лопаток-образцов. По окончании процесса осаждения керамического покрытия в камере установки электронно-лучевого распыления и конденсации в вакууме производят осаждение на поверхность керамики барьерного металлического слоя системы ПХ25Ю5 толщиной 3...10 мкм.

В процессе испарения керамического штабика в вакууме происходит частичная диссоциация оксидов. В образующихся продуктах диссоциации присутствует кислород, который в вакууме

частично удаляется из зоны испарения. Для окончательного формирования ТЗП с разработанным керамическим слоем выполняется ТВО при температуре $1080^{\pm 10} \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов в вакууме. Для стабилизации керамического покрытия проводится отжиг на воздухе при температуре $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа. Структурная схема метода восстановления рабочих лопаток турбины современных двигателей с помощью применения разработанного ТЗП представлена на рисунке 20. Разработанный метод восстановления ТЗП была опробован на экспериментальной партии лопаток в заводских условиях.

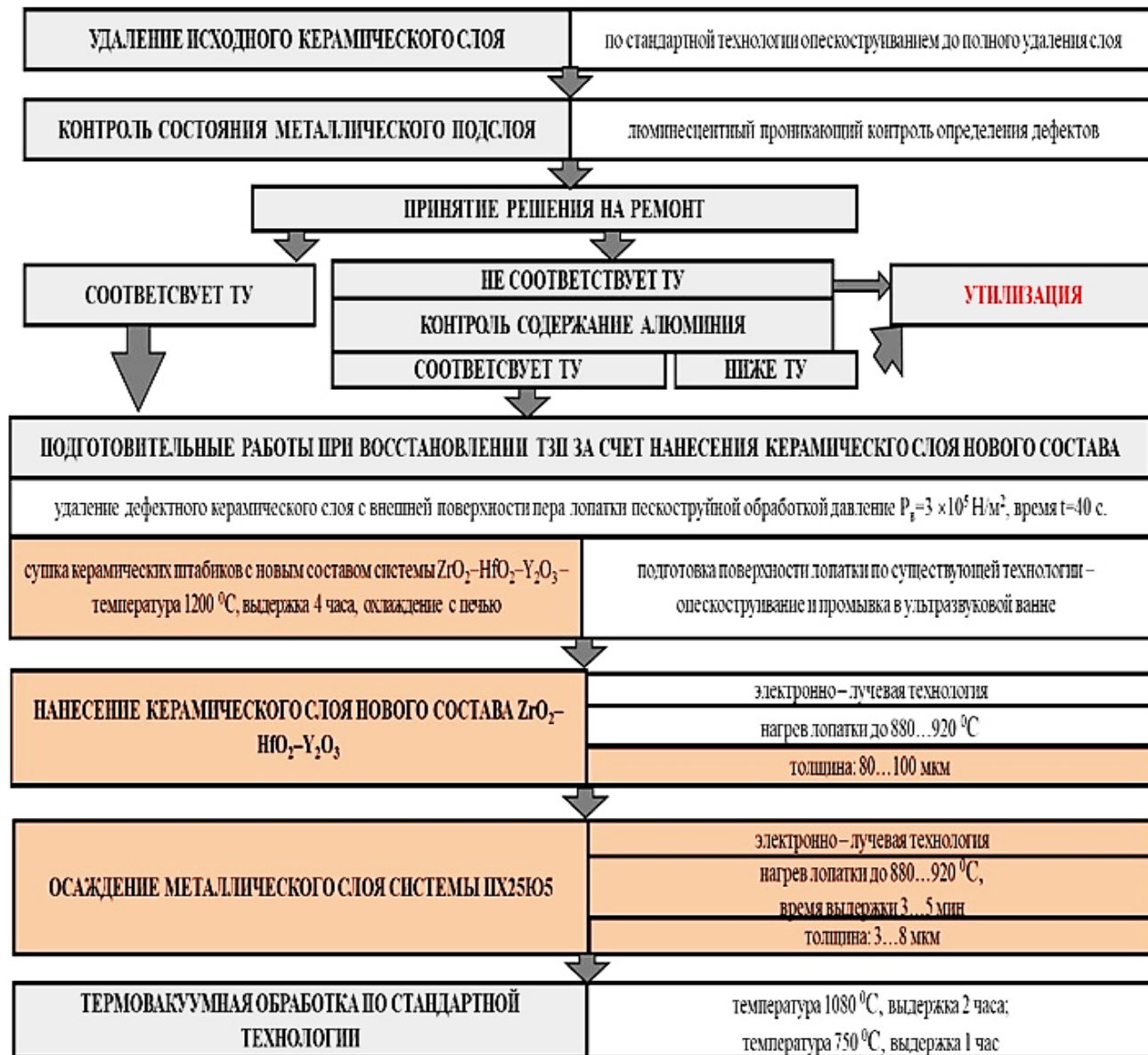


Рисунок 20 - Схема метода восстановления ТЗП на лопатке турбины ГТД

Покрытие наносили на рабочие лопатки турбины на заводском оборудовании. Установлено, что для нанесения усовершенствованного ТЗП не требуется дополнительных установок, кроме имеющихся на авиаремонтном предприятии. Микроструктура ТЗП на технологических рабочих лопатках турбины ГТД представлены на рисунке 21. Микроструктура соответствует микроструктуре исследованного покрытия на образцах и технологических лопатках в лабораторных условиях. Это свидетельствует о воспроизводимости технологии разработанного ТЗП. Следует ожидать, что покрытия на лопатках двигателей ГТД при эксплуатации будет обладать такими же свойствами, как и исследованные в работе покрытия на образцах и технологических лопатках.

На основании данных, полученных в диссертационной работе после испытаний технологических лопаток с разработанным усовершенствованным ТЗП на жаростойкость и

термостойкость, была изготовлена опытная партия лопаток из сплава ЖС32ВИ. Рабочие лопатки с разработанным ТЗП были собраны в рабочее колесо совместно с рабочими лопатками с серийным ТЗП и прошли стендовые испытания в составе ГТД. Лопатки с разработанным подслоем допущены к дальнейшим испытаниям.

В работе проводилась оценка стоимости восстановления работоспособности ТЗП на лопатках ГТД при ремонте, при этом стоимость катода и его изготовления не учитывались. Так как нанесение металлического подслоя и керамики для всех вариантов осуществляется на одних и тех же установках с одинаковыми трудозатратами и расходом электроэнергии, то стоимость нанесения и удаления ТЗП во всех вариантах считается одинаковой. Проведенные в работе исследования (глава 4 и 5) показали, что все варианты покрытий при испытании на жаростойкость при температуре 1100 °С показали различную долговечность. Количественная оценка эффективности разработанной ремонтной технологии проводилась по критерию «долговечность / стоимость». Относительный коэффициент эффективности ремонта теплозащитного покрытия:

$$K_W = \frac{W_{\text{нов}}}{W_{\text{станд}}}, W_{\text{нов(станд)}} = \tau/C, \quad (15)$$

где τ – долговечность данного ТЗП, ч; C – стоимость ремонта покрытия, руб.

Расчеты представлены в таблице 10.

Таблица 10. Расчет коэффициента эффективности ремонта ТЗП

№	Покрытие	Стоимость ремонта, руб.	Долговечность τ , ч	K_W
1	ЖС32+АЖ-8+ CrAl+Zr ₂ O+8%Y ₂ O ₃ + HfO ₂ +PX25Ю5	8430	1687	1,1
2	ЖС32+АЖ-8+ CrAl+Zr ₂ O+8%Y ₂ O ₃	6520	1187	1,0

усовершенствованного ТЗП является экономически выгодной технологией, позволяющей увеличить межремонтный ресурс в 1,4 раза и повысить коэффициент эффективности его восстановления по сравнению с серийно применяемым покрытием приблизительно на 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа работоспособности применяемых в эксплуатации ТЗП на лопатках турбины современных ГТД обоснована необходимость разработки более эффективного усовершенствованного теплозащитного покрытия.

2. Проведено теоретическое обоснование возможности получения усовершенствованного ТЗП и разработана технология его нанесения с целью улучшения эксплуатационных свойств.

3. Разработана математическая модель расчета теплового состояния материала рабочей лопатки в зависимости от физических свойств применяемого ТЗП и температуры газа перед турбиной.

4. Представлены результаты расчета температуры на материале лопатки турбины в зависимости от физических свойств применяемого ТЗП, его толщины и температуры газа перед турбиной.



Рисунок 21 – Микроструктура усовершенствованного ТЗП с керамическим и барьерным слоем на рабочей лопатке ГТД

Как видно из расчета наиболее эффективной технологией ремонта является технология, не требующая удаления металлического подслоя. Таким образом, технология нанесения разработанного

5. Исследованы закономерности процессов истощения работоспособности усовершенствованного ТЗП, а также его термостойкость и теплофизические свойства. Установлено, что применение разработанного теплозащитного покрытия увеличивает ресурс рабочих лопаток из сплава ЖС32 примерно в 1,7 раза.

6. Разработан метод восстановления работоспособности ТЗП рабочих лопаток турбины современных двигателей путем применения разработанного теплозащитного покрытия с новым металлическим подслоем при ремонте, которое по данным экспериментальных исследований на 10% эффективнее серийно применяемых ТЗП.

7. Проведена апробация нанесения нового ТЗП по разработанной технологии на рабочие лопатки турбины высокотемпературного ГТД, которая показала возможность получения качественного защитного покрытия. На основании проведенных исследований на опытную партию лопаток ГТД нанесено предложенное в диссертации усовершенствованное ТЗП, которое успешно прошло стендовые испытания в составе ГТД.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Научные публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. **Самойленко Е. В.,** Зубов О.Е., Самойленко В.М. Исследование теплофизических свойств металлических подслоев для теплозащитного покрытия. – М.: Электromеталлургия. 2021. № 11. С. 20-24.

2. **Самойленко Е. В.,** Самойленко В.М., Пашенко Г.Т., Шестаков В.В. Влияние параметров суспензии на свойства покрытия, получаемого шликерным методом. – М.: Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25. № 6. С. 53-61.

3. **Самойленко Е. В.,** Самойленко В.М., Пашенко Г.Т., Гнездилова А.А. Влияние примесей, содержащихся в топливе и воздухе, на сульфидную коррозию лопаток турбины газотурбинных двигателей. – М.: Научный Вестник МГТУ ГА Том 26, № 01, 2023. С.72...80.

4. **Самойленко Е. В.,** Головнева Т.И., Самойленко В.М., Зубов О.Е. Оптимизация состава раствора для химического удаления диффузионного покрытия при ремонте лопаток ГТД. – М.: Электromеталлургия. 2023. № 2. С. 17-22.

5. **Samoylenko E. V.,** Samoylenko V.M., Paschenko G.T., Gnezdilova A.A. Influence of impurities contained in fuel and air on sulfide corrosion of turbine blades of the gas turbine engine. - Civil Aviation High Technologies. 2023. Т. 26. № 1. С. 72-80.

6. **Самойленко Е. В.,** Петров Ю.В., Самойленко В. М., Ратенко О.А. Применение защитного покрытия для восстановления работоспособности лопаток турбины газотурбинного двигателя с учетом их эксплуатационных повреждений. – М.: Электromеталлургия № 9, 2024 г. С. 12-23.

7. **Самойленко Е. В.,** Ратенко О.А., Петров Ю.В. Исследование влияния действующих нагрузок на микроструктурные изменения в сплаве INCONEL 738LC. – Иркутск.: Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2024. № 2. С. 51-61.

В изданиях, индексируемых в Scopus, WOS:

1. **Samoylenko E. V.,** O. E. Zubov, V. M. Samoilenko. Thermophysical Properties of Metallic Sublayers for a Thermal Barrier Coating. - Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2021, № 12, pp. 1594–1597.

2. **Samoylenko E. V.,** Golovneva T. I., Samoilenko V. M., Zubov O. E. Optimization of the Solution Composition for the Chemical Removal of a Diffusion Coating during the Repair of Gas Turbine Blades. - Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2023, №. 6, PP. 831–835.

3. **Samoylenko E. V.,** Samoylenko V.M., Paschenko G.T., Gnezdilova A.A. Effect of the impurities contained in fuel and air on the sulfide corrosion of gas turbine engines blades. Russian Metallurgy (Metally). 2024. Т. 2024. № 3. С. 657-661.

4. **Samoylenko E. V.**, Petrov Yu.V., Samoilenko V.M., Ratenko O.A. Protective coating for restoring the operability of gas turbine engine blades with allowance for their service-induced damage. Russian Metallurgy (Metally). 2024. T. 2024. № 6. С. 1377-1385.

Публикации в других изданиях

1. **Самойленко Е. В.** Оценка теплофизических свойств теплозащитных покрытий с различными металлическими подслоями. В книге: К.Э. Циолковский. История и современность. Материалы 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга, 2022. С. 400-402.

2. **Самойленко Е. В.**, Петров Ю. В. Увеличение работоспособности теплозащитных покрытий на лопатках турбины газотурбинных двигателей. Труды академии наук воздухоплавания №3, 2024 г., 11...17 С.

3. **Самойленко Е. В.**, Опокин В. Г., Равилов Р. Г., Самойленко В. М. Разработка нового теплозащитного покрытия для рабочих лопаток турбины газотрубных двигателей. Труды академии наук воздухоплавания №3, 2024 г., 3...10 С.

Соискатель

Е. В. Самойленко