

На правах рукописи



Портных Александр Иванович

**ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ
ЭРОЗИОННОСТОЙКИХ ТЕРМОЗАЩИТНЫХ
ПОКРЫТИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
МНОГОРАЗОВУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ ИЗДЕЛИЙ**

Специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки
05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Воронеж - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)

Научный руководитель **Смоленцев Владислав Павлович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кадырметов Анвар Минирович,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», профессор кафедры «Производство, ремонт и эксплуатация машин»;

Козлов Андрей Александрович,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», доцент кафедры «Технология машиностроения»

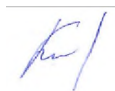
Ведущая организация Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Техномаш»», г. Москва

Защита состоится 20 ноября 2019г. в 17⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ), ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (БГТУ), по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <http://www.cchgeu.ru/> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Автореферат разослан «19» сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Кириллов О.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Долговечность теплонапряженных деталей зависит от работоспособности поверхностного слоя, который можно формировать путем нанесения покрытий, обладающих высокой адгезионной и эрозионной стойкостью при больших градиентах температур. В двигателях для авиакосмической техники температурные режимы работы покрытий постоянно изменяются в период запуска двигателей, что сдерживает рост температур, повышающих эксплуатационные характеристики изделий. В изделиях новых поколений применяют все более высокие температуры горячей зоны, а в космической технике с переходом на системы многоразового использования возникла проблема усиления защиты от разрушения горячей зоны двигателей от неоднократных тепловых ударов, эрозионного износа и разрушения покрытия. Для этого были созданы многослойные минералокерамические покрытия, показавшие хорошие результаты по износостойкости и защите от внешних воздействий. Однако, попытки перенесения установившейся технологии на материалы деталей и условия эксплуатации тепловых машин при многократных тепловых ударах выявили значительные ограничения по их применению, к которым относится нестабильность эксплуатационных показателей, в первую очередь, трещинообразование, эрозионный износ и слабая адгезия к материалам, применяемым для изготовления деталей проточного тракта двигателей, вызывающая перегрев конструкции, сколы и недопустимое прогорание стенок. Для применения в таких изделиях термопокровтий требуется создание новых способов, обоснованных режимов и технологических процессов, обеспечивающих получение деталей с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Учитывая значимость исследований в области создания тепловых двигателей, где наша страна владеет приоритетом на мировом рынке промышленной продукции, тема выполняемой работы актуальна для многих отраслей машиностроения и соответствует задачам, решения которых требуют постановления Правительства РФ №2164-П «О проведении государственной программы «Мобильный комплекс» (раздел «Техническое перевооружение»), федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (раздел 1.2.1 «Проведение поисковых научно-исследовательских работ по направлению «Ракетостроение») и научное направление исследований ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по плану ГБ НИР №2010.15

«Наукоемкие технологии в машиностроении, авиастроении и ракетно-космической технике».

Цель работы. Разработка технологии и средств технологического обеспечения для формирования покрытий, обеспечивающих адгезионную стойкость и эрозионную износостойчивость при эксплуатации в условиях многоцикловых термических ударов.

Задачи исследований:

1. Анализ воздействий тепловых нагрузок на термостойкость поверхностного слоя теплонапряженных деталей с покрытиями при многократных циклах воздействий.

2. Разработка путей повышения эрозионной стойкости и средств технологического оснащения для создания термозащитных покрытий с локальной обработкой переходных участков.

3. Исследование механизма и разработка способов изготовления термонапряженных деталей с требуемыми параметрами поверхностного слоя термозащитных покрытий.

4. Проектирование технологического процесса плазменного нанесения многослойных покрытий с эффективной защитой от термических ударов в процессе запусков тепловых двигателей многократного использования.

5. Анализ состояния поверхностного слоя деталей с многослойными покрытиями по результатам огневых испытаний и разработка рекомендаций по расширению области использования деталей, работающих в условиях термоударных воздействий.

Научная проблема. Ограниченная информационная база о технологии плазменного нанесения и чистовой обработке многослойных термозащитных эрозионностойких покрытий с керамическими включениями и практически полное отсутствие научно обоснованных сведений о механизме поддержания эксплуатационных характеристик таких изделий в процессе многократных термических ударов, возникающих в период повторных запусков тепловых двигателей.

Методы и достоверность исследований. При построении работы использовались теоретические положения классических закономерностей в области технологии машиностроения, электрических методов обработки, закономерности проектирования комбинированных технологических процессов, теоретические положения подобия в технике капиллярных процессов, критериальный анализ для выбора воздействий, наиболее полно отвечающие запросам потребителей и разработчиков перспективной продукции машиностроения.

Достоверность результатов подтверждается получением воспроизводимых результатов при моделировании процессов, применением

современных технических средств, хорошим совпадением данных различных исследователей, положительными результатами использования комбинированных технологий в процессе их освоения и внедрения в производство на предприятиях машиностроения.

Объект исследования. Многослойные термозащитные эрозионно-стойкие минералокерамические покрытия, работающие в огневой зоне тепловых двигателей.

Предмет исследования. Технологические способы и техническое обеспечение для получения требуемых эксплуатационных характеристик изделий с нанесенными покрытиями.

Научная новизна работы:

1. Механизм плазменного формирования многослойного комбинированного покрытия из металлического подслоя и минералокерамических гранул, построенный на новом принципе - процессе капиллярного заполнения пространства между гранулами жидкой фазой подслоя.

2. Методология расчета состава каждого слоя покрытия для обеспечения требуемой адгезионной прочности и толщины термозащитных эрозионно-стойких покрытий при многократных термических ударах и изменении их толщины эрозионным воздействием факела пламени.

3. Установление связей между условиями эксплуатации изделий в горячей зоне тепловых двигателей и технологическими параметрами для нанесения минералокерамических покрытий с требуемыми свойствами.

4. Алгоритм расчета технологических режимов нанесения плазменного многослойного покрытия с использованием заданных эксплуатационных требований в качестве граничных условий.

Практическая значимость:

1. Разработка технологии подготовки поверхности детали под плазменное минералокерамическое покрытие, создающее условия получения качественного термозащитного эрозионно-стойкого покрытия, устойчиво работающего в условиях многократных циклов тепловых воздействий.

2. Создание и внедрение в производство нового (защищенного патентом) сопла для нанесения плазменного покрытия, обеспечивающего его чистоту и устраняющего прогар при многократных концентрированных тепловых воздействиях агрессивных рабочих сред.

3. Разработка технологических режимов с учетом многоцикловых тепловых ударов для проектирования технологических процессов

плазменного нанесения многослойных покрытий, отвечающих требуемым эксплуатационным требованиям.

4. Создание новых способов и устройств по совершенствованию процесса плазменного нанесения многослойных минералокерамических покрытий с заданными эксплуатационными свойствами.

5. Подтверждение, в том числе огневыми испытаниями, возможности использования разработанной технологии получения минералокерамических покрытий для деталей горячей зоны тепловых двигателей при многократных тепловых ударах в процессе эксплуатации изделий новых поколений.

Вклад соискателя в теорию технологической науки. Теоретическое обоснование эффекта изменения наружной границы жидкого металлического подслоя как неньютоновской жидкости для закрепления гранул в покрытии в период нанесения наружного слоя, рассматриваемого в виде губчатой капиллярной среды, формируемой узким пространством между соседними гранулами.

Вклад соискателя в выполнение работы. Личное участие при решении всех поставленных задач и получении результатов, имеющих научную и практическую значимость для обеспечения существенного вклада в развитие технологической науки в машиностроении.

Автор защищает:

1. Новый подход к формированию процесса плазменного нанесения многослойных минералокерамических покрытий при использовании их в качестве поверхностного слоя горячей зоны тепловых двигателей многократного использования.

2. Создание новой технологической оснастки, обеспечивающей получение минералокерамических покрытий с требуемой эксплуатационной стойкостью.

3. Доказательную базу для назначения припуска на полировку минералокерамического покрытия, обеспечивающего требуемые эксплуатационные свойства поверхностного слоя при многократных тепловых воздействиях на изделие.

4. Методы расчета технологических параметров для проектирования технологических процессов плазменного нанесения и локальной полировки переходных участков покрытия для достижения надежной защиты от тепловых ударов при многократных запусках изделий.

5. Правомерность применения разработанной технологии нанесения и обработки покрытий по результатам испытаний изделий.

Апробация работы. Результаты работы и ее составные части представлялись и обсуждались на: IX Всероссийской конференции «Новые технологии» (Москва, РАН, 2012); 12-й международной научно-технической конференции (Москва, МАИ, 2013); XXXIII Всероссийской конференции по проблемам науки и техники (Миасс; МСНТ, 2013); 13-й международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2014); международной конференции «Электроннолучевая сварка и смежные технологии – 2015» (Москва, МЭИ, 2015); Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии на современном этапе развития машиностроения» (Москва, 2016); VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (Иркутск, ИрННТУ, 2016); Международном симпозиуме «Перспективные направления развития финишных методов обработки; микроволновые технологии» (Ростов-на-Дону; ДГТУ, 2016); международной научно-технической конференции «Лучшие технологические школы России» в рамках IV международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, РГАТУ им. П. А. Соловьева, 2017); IX Международной научно-технической конференции ТМ-2017 (ВолгГТУ, 2017); X Международной научно-технической конференции ТМ-2018 (Воронеж, ВГТУ), 8th EEIGM International Conference on Advanced Material Research (June 11th & 12th 2015, Universitat Politecnica de Valencia Valencia-SPAIN).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы прошли проверку в цехах ВМЗ – филиала ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и внедрены в серийное производство для ракетных двигателей, а также на НПП «Гидротехника», АО КБХА с реальным экономическим эффектом. Материалы проведенных исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научные работы общим объемом 10,15 п.л., где соискателю принадлежит 3,29 п.л. В их число входит монография, 5 патентов, 4 публикации в изданиях по списку ВАК РФ и 1 в системе «Scopus».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, приложений, списка литературы из 115 наименования. Работа изложена на 176 страницах, содержит 46 рисунков и 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, вынесенные на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе приведен анализ технологических воздействий на эксплуатационные характеристики высоконагруженных изделий.

В процессе анализа рассмотрены основополагающие работы для исследуемой области знаний, выполненные учеными и специалистами России и ведущими учеными мира. К ним относятся исследования научных школ Москвы, Рыбинска, Тулы, Воронежа, Ростова-на-Дону, Казани, Волгограда, Брянска, Перми, Уфы и других городов, а также работы ученых Германии, США, Англии и других стран.

В результате установлено:

1. Термостойкость и другие эксплуатационные характеристики покрытий зависят от сочетания материалов, адгезионных показателей, износостойкости защитного слоя, начальной толщины покрытия, совместимости физических и химико-механических свойств материалов заготовки и наносимых слоев, что требуется учитывать при создании технологии изготовления деталей горячей зоны тепловых двигателей при многократных пусках.

Требуемые эксплуатационные свойства наиболее полно могут обеспечить многослойные покрытия, где каждый слой выполняет заданное функциональное назначение и сохраняет работоспособность покрытия при многократных тепловых ударах.

2. Способы повышения эрозионной стойкости термозащитных покрытий, используемые при эксплуатации ракетных двигателей, достаточно полно отвечают заданным требованиям при единичных пусках, но ограничивают количество повторных тепловых ударов. Это требует создания новых способов и технологических процессов нанесения поверхностных слоев.

3. Известные из доступных источников связи, научно обоснованные, между эксплуатационными требованиями к создаваемым изделиям новых поколений тепловых двигателей и технологическими процессами нанесения многослойных покрытий не учитывают в полной мере совместного агрессивного воздействия внешней среды и интенсивных многократных тепловых нагрузок. Это требует разработки взаимосвязанных процессов подготовки поверхности заготовки под покрытие и создания новых способов плазменного нанесения многослойных покрытий из плавких металлических и керамических

слоев, обеспечивающих требуемые защитные свойства поверхности при многократном использовании тепловых двигателей.

4. Применяемые в промышленности методы локальной зачистки переходных участков с минералокерамическими покрытиями имеют высокую трудоемкость и могут нарушать качество поверхностного слоя, поэтому требуется поиск и обоснование новых технологических способов и режимов выполнения таких операций.

5. Часть требуемых эксплуатационных показателей многослойных покрытий может быть надежно установлена только при натурных испытаниях изделий. Это требует создания материальной базы и программы огневых испытаний, что позволяет разработать рекомендации по расширению области использования деталей, работающих в условиях термодинамических воздействий.

Результаты анализа позволяют сформировать цель и задачи работы, приведенные во введении.

Во второй главе раскрыты методы и средства для решения поставленных задач.

Разработаны и обоснованы научные гипотезы:

1. Процессы, протекающие при нанесении покрытий, включающих минеральные гранулы с закреплением их металлической связкой, могут подчиняться закономерностям, установленным для изготовления абразивного инструмента, что дает возможность рассматривать механизм получения качественных покрытий с использованием положений теории подобия технических систем, за счет чего усилить доказательную базу применением проверенных практикой результатов эксплуатации абразивного инструмента.

2. Для проектирования технологии чистовой обработки минералокерамических покрытий применимы положения, принятые при профилировании рабочего профиля абразивного инструмента с металлической связкой, в том числе высокопроизводительная комбинированная обработка с наложением электрического поля.

3. При построении механизма нанесения покрытия для обеспечения в нем требуемого соотношения между твердыми гранулами и жидкой связкой процесс подчиняется закономерностям течения вязких жидкостей через пористые тела с образованием менисков, обеспечивающих требуемую для закрепления в связке смачиваемость поверхности гранул.

4. Многократные тепловые удары на поверхность могут вызывать местное отслаивание и скалывание покрытия, устранение которых возможно, если обеспечить однородный состав компонентов покрытия при отсутствии инородных металлических включений, создаю-

щих локальные внутренние напряжения при многократных циклах интенсивного нагрева и охлаждения в процессе запуска изделий.

5. Для построения механизма формирования минералокерамического покрытия допустимо принять форму углублений на поверхности деталей после опескоструивания сферической с расстоянием между углублениями, равным размеру частиц, а гранулы минералокерамики считать шарами, плотно расположенными в связке в один слой с касанием поверхности детали.

Обоснован выбор объектов и предмета исследований, что позволило конкретизировать объем исследований по теме диссертации. Предложен принцип критериальной оценки уровня полезности возможных технологических воздействий на поверхностный слой изделий, что позволило установить наиболее перспективные (как правило, выполненные на уровне изобретений) способы, определяющие направления исследований по совершенствованию поверхностного слоя. На рисунке 1 показаны образцы деталей, использованных для испытаний, и макет камеры сгорания, в которую устанавливаются образцы для огневых испытаний покрытий, в том числе при многократных пусках изделий.

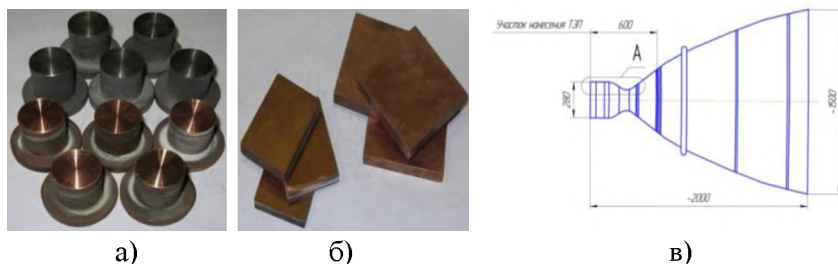


Рисунок 1 - Образцы для испытаний и имитатор камеры сгорания ракетного двигателя: а) круглые для испытания адгезионной прочности покрытия; б) плоские – для контроля толщины покрытия; в) макет камеры сгорания для испытания образцов на термостойкость эрозионную износоустойчивость покрытий; А – зона нанесения теплозащитного покрытия

Обоснован выбор новых способов воздействий на поверхностный слой, что дает возможность наметить пути проектирования эффективных технологических процессов. Это позволило создать базу для построения методологии проектирования технологических процессов воздействия на поверхностный слой с учетом достигнутых и перспективных эксплуатационных показателей.

Разработан алгоритм выполнения работы, обеспечивающий достижение поставленной цели. В алгоритме учтены основные этапы исследований, последовательность выполнения работы, ограничения при анализе полезности выбранных решений, роль заказчика изделий при выборе или разработке новых технологических процессов.

В третьей главе рассмотрены факторы, определяющие механизм формирования многослойных эрозионностойких термоустойчивых многокомпонентных покрытий, включающих минералокерамические гранулы, что позволяет проектировать технологические режимы получения качественных деталей, работающих в горячей зоне тепловых двигателей при многократных термических ударах, возникающих в период их пуска.

При построении механизма нанесения покрытий был принят ряд допущений: перемещение жидкого металла (нихром) в период нанесения защитного слоя подчиняется закономерностям течения его через узкие пространства между гранулами. Для изучения качественной картины этого механизма принято, что гранулы имеют сферическую форму с диаметром, равным толщине наружного слоя, и плотно упакованы в один ряд на поверхности с покрытием (рисунок 2).

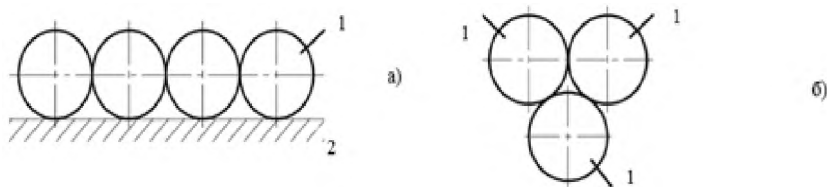


Рисунок 2 - Размещение гранул (1) на подложке (2) при нанесении наружного слоя: а) вид сбоку; б) вид сверху

Применяемые для покрытий гранулы имеют различную форму и размеры, но для экспериментов можно подобрать некоторое количество гранул, имеющих форму, близкую к сферической, и одинаковые размеры.

На рисунке 2, б видно, что между гранулами 1 образуются каналы малого сечения (для порошков их сечение измеряется микронами), что подтверждает возможность образования капиллярных течений, картину которых раскрывает рисунок 3.

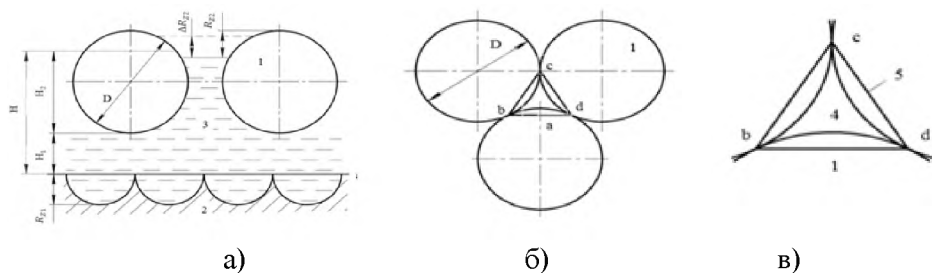


Рисунок 3 - Расчетная схема для построения механизма капиллярного снижения уровня подслоя при нанесении защитного слоя покрытия: а) образование мениска между соседними гранулами; б) геометрия каналов; в) расчетное сечение канала; H - общая толщина покрытия; H_1 - толщина подслоя; H_3 - высота столба подслоя в канале; R_{z1} - величина микроуглублений в подложке; R_{z2} - высота микронеровностей покрытия; ΔR_{z2} - изменение высоты неровностей из-за капиллярного снижения уровня жидкого металла; D - диаметр гранулы; 1 - гранула; 2 - подложка; 3 - материал подслоя; 4 - расчетное сечение канала

Из рисунка 4 следует, что разрез канала имеет геометрию сопла Лавали.

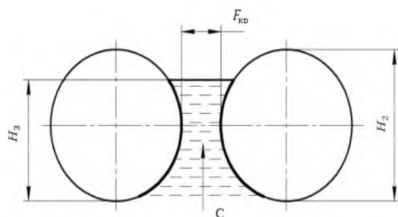


Рисунок 4 - Разрез канала между соседними гранулами: где $F_{кр}$ - площадь критического сечения, аналогичного соплу Лавали; c - вектор действия сил жидкого металла от перемещения гранул при нанесении защитного слоя

С учетом принятых допущений раскрыт механизм протекания материала подслоя через капиллярные сечения.

Для неньютоновских жидкостей при протекании через капилляры (аналог движения жидкости в пористой среде) в канале формируется ядро с радиусом r_0 , перемещение которого в канале при фильтрации возможно только при выполнении критерия

$$r_0 < r_{экр} \quad (1)$$

где $r_{экр}$ - радиус, описывающий канал, эквивалентный по сечению площади критического сечения $F_{кр}$ (рисунок 4);

r_0 - находят по закону Дарси для фильтрации жидкостей через грунт по схеме течения жидкости на рисунке 3.

В губчатых средах при течении неньютоновских жидкостей ядро канала поддерживает цилиндрическую форму с радиусом r_0 .

Если условие (1) не выполняется, то перемещение расплавленного металла нарушается и образуются пустоты типа приведенной на рисунке 5, что может быть объяснено разрывом струи металла в канале вследствие его торможения в критическом сечении канала и невозможностью образовать мениск требуемой высоты.

Появление дефекта снижает адгезионные связи между подслоем и подложкой.

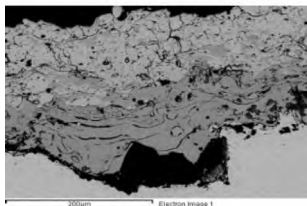


Рисунок 5 - Место сопряжения подслоя с подложкой

По закону Дарси снижение границы мениска на величину h на столько же увеличивает высоту неровностей ΔR_{z2} покрытия.

Если принять $h = \Delta R_{z2}$, то

$$\Delta R_{z2} = \frac{(H - H_1 - R_{z2})F_c K_n H_2}{K_1 F_{KP}}, \quad (2)$$

где F_c - диаметр сопла плазменной установки;

K_n - коэффициент плотности заполнения канала жидким металлом.

$$K_n = (V_1 - V_2) / V_1 \quad (3)$$

где K_1 - коэффициент фильтрации (мкм/сек), определяется экспериментально по скорости перемещения границы мениска в зависимости от свойств губчатой поверхности и жидкой среды.

Величину K_n устанавливают измерением сплошности материала покрытия на шлифах.

С учетом допущения, что $H_2 = D$, формула (2) примет вид:

$$\Delta R_{z2} = \frac{4 \cos \alpha (H - H_1 - R_{z2}) F_c K_n}{K_1 D}, \quad (4)$$

где $\cos \alpha$ - угол подачи порошка в плазменную дугу.

Расчеты, выполненные по (4) и приведенные в работе позволяют оценить надежность закрепления гранул в поверхностном слое покрытия. Для этого необходимо выполнить требования критерия (1):

$$\Delta R_{z2} < (1 - K_3)D, \quad (5)$$

где K_3 - коэффициент закрепления.

Для принятой сферической формы гранулы K_3 должен быть не менее $2/3$ диаметра гранул.

За счет эрозионного износа в первую очередь снижается толщина подслоя H_1 , а термостойкие подслои гранул (слой H_2) преимущественно выпадают из покрытия по мере износа подслоя. Это позволяет установить начальную границу заполнения металлом подслоя канала между гранулами в начале эксплуатации изделия H_3 :

$$H_3 = H - R_{z2} - \Delta H \geq K_3 D, \quad (6)$$

где ΔH - износ покрытия после заданного количества пусков.

Из условия подобия процессов износа при всех пусках можно найти среднюю величину износа U_{1cp} за один пуск при нормированном в задании количестве пусков N_n :

$$U_{1cp} = \Delta H / N_n. \quad (7)$$

Величина ΔH находится прямыми измерениями толщины покрытия перед огневыми испытаниями и после нормированного количества пусков. Отсюда находится минимальная начальная толщина H_{3min} подслоя после нанесения наружного слоя:

$$H_{min} \leq H_1 + KD + \Delta H. \quad (8)$$

Выполнение условия (8) гарантирует, при выполнении прочих условий, от осыпания гранул и устраняет утрату термостойкости покрытий из-за их разрушения.

Рассмотрена динамика изменения толщины слоев в многослойных покрытиях и их взаимодействие, что позволило обосновать диапазоны толщин металлического подслоя и термозащитного наружного слоя, способного поддерживать работоспособность двигателя многократного использования при числе заданных пусков и раскрыть пути увеличения этого показателя для перспективных изделий.

Приведены результаты комплексных исследований адгезионной прочности всех слоев, позволившие уточнить требования к подготовке под покрытие.

Установлены формальные связи между этапами выполнения технологических операций при нанесении многослойных покрытий, что легло в основу созданной системы управления процессом получения многослойных покрытий с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

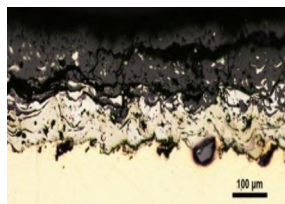
Установлен ранее неисследованный факт изменения границы капилляра при нанесении термостойких гранул, что позволило теоретически обосновать получаемую шероховатость поверхностного слоя и допустимые границы изменения припуска на полировку переходных участков с минимальным снижением адгезионной прочности покрытий за счет утонения наружного слоя.

Разработана методика оценки износа защитного покрытия с использованием огневых испытаний, что позволило прогнозировать назначение минимальной толщины слоев покрытий на эксплуатируемые и создаваемые тепловые двигатели.

В четвертой главе приведены методы расчета и выбора технологических режимов, назначаемых с учетом эксплуатационных требований, где принимаются во внимание условия работы деталей с термозащитным покрытием в горячей зоне двигателей летательных аппаратов. Рассмотрены покрытия, состоящие из нескольких слоев, сочетание которых обеспечивает высокую адгезионную прочность и эрозионную стойкость изделия (см. рисунок 6).



а) подслой
PX20H80



б) подслой
ПТЮ-10Н

Рисунок 6 - Микрошлифы образцов подслоями из различных материалов (x100)

Обоснован выбор режимных показателей перемещения сопла плазмотрона, рационального расхода материалов покрытия, размеров гранул, величины припуска на полировку переходных участков покрытия. При разработке режимов впервые учтены особенности течения расплавленного металла подслоя покрытия на формирование тех-

нологических показателей процесса нанесения двухслойного покрытия, наружный слой которых содержит минералокерамические гранулы.

Доказано, что применение в качестве промежуточного слоя материала из терморегулирующего сплава типа ПТЮ-10Н обеспечивает повышение уровня отрывной прочности керметного покрытия.

Установлены взаимосвязи между подготовкой поверхности и применяемыми промежуточными слоями на адгезионную прочность (рисунок 7), износостойкость и термическую стойкость получаемых покрытий на основе тугоплавких оксидов ZrO_2 .

Показано, что использование карбида кремния более мелкой фракции F46 обеспечивает увеличение адгезионной прочности покрытия за счет получения наиболее оптимальной шероховатости поверхности и уменьшение количества включений в основном материале (рисунок 8).

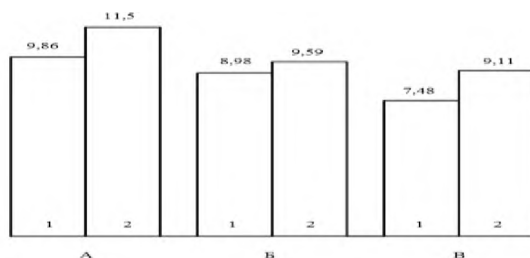


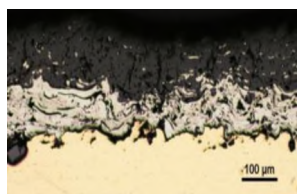
Рисунок 7- Адгезионная прочность (МПа) между слоями покрытия:

А - между подложкой и подслоем из ПТ-Ю10Н; подслоем и покрытием состава; Б - 75- 80 % порошка диоксида циркония, стабилизированного 10- 12% оксида иттрия, и 20% порошка ПТ-Ю10Н; В - 78- 80 % порошка диоксида циркония, стабилизированного 7-8 % оксида иттрия, и 20% порошка ПТ-Ю10Н

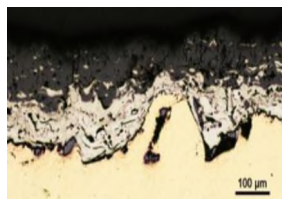
Режимы плазменного покрытия:

- А-1 – I = 360 А, U = 40 В; А-2 - I = 380 А, U = 45 В;

- Б-1, В-1 - I = 380 А, U = 70 В; Б-2, В-2 - I = 400 А, U = 75 В.



а)



б)

Рисунок 8 - Фотография микрошлифов образцов (x100):

а) пескоструйная обработка порошком SiC фракция F46;

б) пескоструйная обработка порошком SiC фракция F20

Разработанные технологические режимы и рекомендации по их использованию подтверждены при экспериментальной проверке результатов на образцах деталей и в процессе огневых испытаний на макетах камер сгорания ракетных двигателей, что дает основания рекомендовать их к использованию при проектировании технологических процессов плазменного нанесения многослойных термозащитных покрытий.

Таблица 1 - Показатели термостойкости при различных режимах напыления нихрома

Группа образцов	Порошок NiCr	Режимы напыления	$\sigma^{\text{ср}}$, МПа	Термостойкость, циклов
1	ПХ20Н80 56-26	340 А; 50 В	8,49	8; 9; 11
2	ГОСТ 13084-88	380 – 400 А, 30 – 35 В	10,32	12; 12; 12

Определено, что имеется возможность обеспечить стойкость теплозащитного покрытия при многократных пусках двигателя. Для этого необходимо увеличить толщину защитного покрытия, которое при этом должно обеспечивать минимальную адгезию 6,0 МПа (см. рисунок 9).

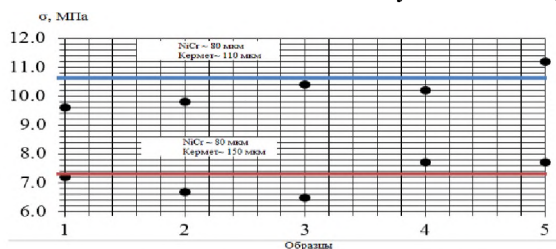


Рисунок 9 – Зависимость прочности покрытия от толщины

Так как время работы двигателя при каждом пуске одинаково, то необходимый запас толщины наружного покрытия будет пропорционален числу пусков (рисунок 10).

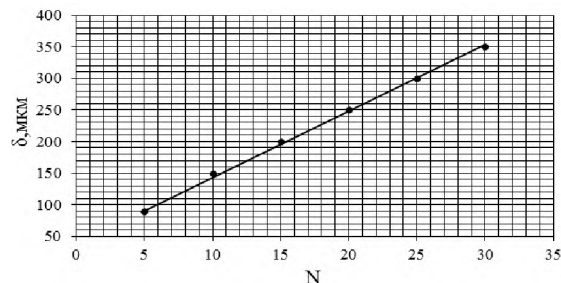


Рисунок 10 – Зависимость толщины теплозащитного покрытия от количества пусков

Заключение

Разработана и освоена в промышленности технология плазменного нанесения и чистовая обработка многослойных теплозащитных эрозионностойких качественных покрытий с минералокерамическими гранулами, построенная на научно обоснованных положительных результатах технологических исследований, создании новых способов и устройств для нанесения плазменного покрытия и на результатах огневых испытаний изделий при многократных термических ударах, возникающих в период повторных запусков тепловых двигателей.

В соответствии с заключением могут быть сделаны следующие выводы:

1. Установлены требования к исходной поверхности деталей под покрытие, где шероховатость R_z не должна превышать толщины подслоя и назначаться в пределах от 50 до 60 мкм, что обеспечивает требуемую адгезионную прочность многослойного покрытия в условиях многократных тепловых ударов.

2. Для снижения уровня концентрации напряжений в поверхности заготовки целесообразно использование струйного метода обработки гранулами из карбида кремния черного марки 54 С при давлении 0,5 МПа в 2 прохода, что обеспечивает усталостную прочность деталей при многократных нагрузках в процессе эксплуатации и повышает сохранение работоспособности покрытия при многократных пусках изделия.

3. Разработан механизм формирования шероховатости поверхности покрытия, когда впервые обосновано наблюдаемое повышение высоты неровностей при наличии в поверхностном слое гранул, которое можно рассматривать как результат воздействия капиллярных явлений при течении неньютоновских жидкостей, для которых имеет место снижение границы мениска в узком канале между гранулами.

4. Обосновано и экспериментально подтверждено назначение припуска на локальную полировку проблемных участков огневого тракта с учетом коррекции уровня подслоя в покрытии, что позволило ограничить эту величину (в зависимости от состава слоев) от 10 до 15 мкм и сохранить эрозионную и адгезионную прочность покрытия.

5. Доказано, что шероховатость многослойного покрытия практически не зависит от микрорельефа исходной поверхности заготовки, что позволяет получать качественные покрытия с толщиной, обеспечивающей повышенную эрозионную и термическую стойкость изделий.

6. Показано, что под действием многократных термических ударов износ покрытия под действием факела пламени происходит за счет снижения толщины наружного слоя. Это снижает термозащитные свойства плазменных покрытий из-за удаления гранул и требует корректировки толщины наружного слоя в пределах рекомендованного диапазона изменения толщины.

7. Доказано, что предложенные технологические режимы, защищенные патентами новые способы и устройства для плазменного нанесения многослойных покрытий обеспечивают стабильность их эксплуатационных показателей на весь ресурсный срок эксплуатации изделий (в настоящее время 8-12 запусков) и позволяют создавать двигатели многоразового запуска для использования в новых поколениях летательных аппаратов, где требуется достичь 20 штатных запусков, а в перспективных двигателях космических аппаратов обеспечить возможность повышения этого показателя до 50.

8. Установлено, что рациональными режимами плазменного нанесения подслоя защитного покрытия являются: напряжение 35^{+2} В, ток плазменной дуги 380^{+20} А, что обеспечивает заданное качество покрытия в диапазоне толщин:

- подслоя от 60 мкм до 70 мкм,

- слоя с минералокерамическими гранулами от 100 мкм до 180 мкм.

9. Обоснованы технологические режимы локальной обработки переходных участков покрытий полированием алмазной пастой смесью 1:1 зерен с размерами 3 и 1 мкм, что стабильно обеспечивает получение шероховатости R_a не выше 2,5 мкм и сохранение эрозионной стойкости изделий при многократных тепловых ударах.

10. Полученные в работе результаты прошли экспериментальную и промышленную проверку и внедрены в производство с реальным экономическим эффектом, что позволяет рекомендовать материалы для расширенного использования.

11. Проведенный технико-экономический анализ эффективности использования толстых многослойных покрытий, содержащих минералокерамические гранулы, на примерах типовых изделий транспортно-машиностроения доказал перспективность применения предложенных способов и разработанных технологических процессов в наукоемких изделиях новых поколений техники.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях в системе «Scopus»

1. Smolentsev V.P. Technology of combined chemical-mechanical fabrication of durable coatings/ В.П.Смоленцев, В.В.Иванов, А.И.Портных //JOP Conf.series:Materials Science and Engineering 327 (2018) 042121 doi:10.1088/1757-899X/327/04/042121.

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

2. Исследование способа исключения эрозии материала медного сопла плазмотрона при плазменной металлургии [Текст] / А. И. Портных, К. Н. Маркин, В. Г. Бещеков, Ю. А. Бочаров // Технология машиностроения. - 2016. - № 10. - С. 40-42.

3. Портных, А. И. Отработка технологичности изделий под электрические методы обработки [Текст] / А. И. Портных, В. П. Смоленцев, О. В. Скрыгин // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2018. - № 11. - С. 31-33.

4. Портных, А. И. Технологические режимы плазменного нанесения многослойных термозащитных покрытий [Текст] / А. И. Портных, В. П. Смоленцев, Е. В. Паничев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - №1. - 2019. т. 15. - С. 112-115.

5. Портных, А. И. Механизм формирования высокоресурсного термостойкого покрытия [Текст] / А. И. Портных, В. П. Смоленцев, Е. В. Паничев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - №1. - 2019. т. 15. - С. 96-99.

Монография

6. Портных, А. И. Повышение эксплуатационных характеристик деталей путем модификации поверхностного слоя [Текст]: монография / А. И. Портных, С. В. Сафонов, В. П. Смоленцев // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: коллект. монография. – М.: Изд. дом «Спектр», 2014. –Т. 3. – С. 365-405.

Патенты на способы и устройства

7. Пат. на полезную модель № 139366 Российская федерация, МПК В23К, С23С. Сопло плазмотрона [Текст] / Портных А. И. и др.; заявитель и патентообладатель ФГУП «Научно-производственное объединение «Техномаш». - № 2013154518/02; заявл. 10.12.2013; опубл. 20.04. 2014, Бюл. № 11. – 9 с.

8. Пат. № 2644491 Российская федерация, МПК В23К 31/02, В23К 15/02, В23К 33/00. В23К 101/06. Способ электроннолучевой сварки кольцевых соединений титановых сплавов [Текст] / Гребенщиков А. В., Портных А. И., Шуваева Л. П., Еремин М. В.; заявитель и патен-

тообладатель ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». - № 2016118569/02; заявл. 12.05.16; опубл. 12.02.18, Бюл. № 5. – 8 с.

9. Пат. на полезную модель №157428 Российская федерация, МПК В23К 37/06, В23К 9/035. Подкладка для формирования кольцевого сварного шва [Текст] / Портных А. И. и др.; заявитель и патентообладатель ФГУП «Научно-производственное объединение «Техномаш». - № 2015127447/02; опубл. 10.12.15, Бюл. № 34. –11 с.

10. Пат. № 2693283 Российская Федерация, С23С 4/04, С23С 30/00, С23С 4/134. Способ получения эрозионно-стойких теплозащитных покрытий [Текст] / Портных А. И., Паничев Е. В.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». - №2018121793; заявл. 13.06.2018; опубл. 02.07.2019, Бюл. № 19.

11. Пат. №2646652 Российская федерация, В23Н1, В23Н5, В23К26. Способ эрозионно-лучевого упрочнения поверхностей металлических деталей и устройство для его использования [Текст] / Смоленцев В. П., Кондратьев М. В., Смоленцев Е.В., Портных А. И. и др.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». - № 1016152372; заявл. 28.12.16; опубл. 06.03.18. Бюл. № 7.

Публикации в других изданиях

12. Портных, А. И. Разработка технологии нанесения износостойкого покрытия нитрида титана [Текст] / А. И. Портных, С. С. Юхневич А. С. Грибанов // Конструктивные особенности и технология изготовления деталей ракетных двигателей нового поколения: сб. науч. тр. - Воронеж: ВМЗ, 2014. – С. 59-68.

13. Портных, А. И. Влияние инородных включений на эксплуатационные характеристики теплозащитного покрытия [Текст] / А. И. Портных, М. А. Люлина, Е. В. Паничев // Конструктивные особенности и технология изготовления деталей ракетных двигателей нового поколения: сб. науч. тр. - Воронеж: ВМЗ, 2014. – С. 119-131.

14. Портных, А. И. Сварка и жаростойкие покрытия [Текст] / А. И. Портных, В. И. Кольцов, В. П. Чудинов // Очерки производства жидкостных ракетных двигателей: науч. сб. ВМЗ – филиала ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. – Воронеж: ОАО «Воронежская областная типография», – 2013. – С. 147-187.

15. Специальные технологии [Текст] / А. И. Портных, А. М. Гордон, А. С. Грибанов, С. С. Юхневич // Очерки производства жидкостных ракетных двигателей: науч. сб. ВМЗ – филиала ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева – Воронеж: ОАО «Воронежская областная типография», – 2013. – С. 65-80.

16. Плазменные эрозионностойкие теплозащитные покрытия на основе тугоплавких оксидов ZrO_2 . [Текст] / Е. А. Кляцкина, В. Н. Бутрим,

М. Д Сальвадор, А. И Портных // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: науч. тр. IV-й междунар. науч. конф. – М.: Издательский дом «Спектр», - 2015. – С. 274.

17. Технология плазменного нанесения теплозащитных покрытий. Влияние технологических режимов и материалов на служебные характеристики покрытий [Текст] / А. И. Портных и др. // Новые технологии материалы IX Всерос. конф.– М.: РАН, 2012. - С. 41-49.

18. Портных, А. И. Технология плазменного нанесения теплозащитных покрытий. Влияние технологических режимов и материалов на служебные характеристики покрытий [Текст] / А. И. Портных, Е. В. Паничев // Авиация и космонавтика – 2012: докл. 11-й Междунар. конф. – М: Изд-во МАИ, 2012. – С. 213.

19. Неоднородные материалы и конструкции: плазменное напыление – универсальная технология в ракетно-космической технике [Текст] / А. И. Портных, Б. И. Омигов, Е. В. Паничев, Е. П. Орлов // Сообщения 33-й Всерос. конф. по проблемам науки и технологии. – Миасс: МСНТ, 2013. - Т. 1.– С. 79-82.

20. Портных, А. И. Неоднородные материалы и конструкции: определение оптимального способа сварки и присадочной проволоки при изготовлении рамной конструкции из 12Х2НВФА после упрочняющей термической обработки [Текст] / А. И. Портных, А. Л. Тюков, М. А. Люлина // Сообщения 33-й Всерос. конф. по проблемам науки и технологии. – Миасс: МСНТ, 2013. - Т. 1. – С. 82-85.

21. Смоленцев, В. П. Электрохимическая обработка лопаток машин [Текст] / В. П. Смоленцев, Д. В. Силаев, А. И. Портных // Современные технологии производства в машиностроении: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2013. - Вып. 7. – С. 116-123.

22. Смоленцев, В. П. Электрохимическая обработка лопаток машин [Текст] / В. П. Смоленцев, Д. В. Силаев, А. И. Портных // Современные технологии производства в машиностроении: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2013. - Вып. 7. – С. 116-123.

23. Портных, А. И. Влияние подготовки поверхности и материала промежуточного слоя на свойства эрозияннотойких теплозащитных покрытий [Текст] / А. И. Портных, В. Г. Кобзев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. – Самара: Самарский университет, 2016. - С. 111-112.

24. Портных, А. И. Исследование способа исключения эрозии материала медного сопла плазмотрона в процессе плазменной металлургии [Текст] /А. И. Портных, К. Н Маркин., В. Г. Бещеков, Ю. А. Бочаров // Вестник НПО «Техномаш», 2017. - № 2. - С. 30-32.

Подписано в печать 12.09.2019 года
Формат 60х84/16. Формат для множительных препаратов.
Усл. печ. л. 1,3. Тираж 80 экз. Заказ № 92
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14