

Ананьева Екатерина Александровна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МАЛОРАЗМЕРНЫЕ
ВНУТРЕННИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ
ДЕТАЛЕЙ
ГОРЯЧЕГО ТРАКТА ГТД**

Специальность 05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летальных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Самара - 2007

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королева»

Научный руководитель

Барвинок Виталий Алексеевич - чл.-корр. РАН, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Амосов Александр Петрович – заведующий кафедрой металловедения и порошковой металлургии Сам ГТУ, доктор физико-математических наук, профессор.

Проничев Николай Дмитриевич – заместитель заведующего кафедрой производства двигателей летательных аппаратов СГАУ, доктор технических наук, профессор.

Ведущая организация ОАО «Металлист-Самара»

Защита состоится 28 сентября 2007 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212. 215.02 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

Автореферат разослан «24» августа 2007 года

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук,

профессор

В. Н. Матвеев

Общая характеристика работы

Актуальность работы Увеличение мощности, экономичности и эффективности работы современных газотурбинных двигателей связано с повышением температур рабочих газов. Детали горячего тракта ГТД такие, как лопатки турбин, секции сопловых аппаратов, жаровые трубы камер сгорания работают в сложных эксплуатационных условиях при температурах выше 1373 К. При этом потеря работоспособности современных жаропрочных и жаростойких материалов на основе никеля происходит в основном из-за высокотемпературной газовой коррозии поверхности. Проблема повышения ресурса этих деталей решается технологическими или конструкционными методами. Однако возможности металлургии в создании новых материалов в настоящее время в основном исчерпаны, ограничены также возможности конструктивных решений в снижении нагрева этих материалов за счет специальных систем охлаждения. В связи с этим наиболее эффективным и экономичным решением данной проблемы является использование на рабочих поверхностях деталей горячего тракта специальных теплозащитных покрытий (ТЗП).

Теплозащитные покрытия используются уже более 25 лет и в настоящее время широко применяются на всех двигателях гражданской и военной авиации. Однако среди деталей горячего тракта имеется группа деталей, рабочие поверхности которых конструктивно представляют внутренние малоразмерные полости переменного диаметра от 70 до 100 мм. Такие детали в настоящее время защищают от воздействия высоких температур конструкционными методами и не используют применение защитных покрытий, что обусловлено сложностью формы рабочей поверхности и трудным доступом к ней. Таким образом, задача по разработке технологии нанесения теплозащитных покрытий (ТЗП) на малоразмерные внутренние сложнопрофильные поверхности является актуальной и позволит решить важную народно - хозяйственную проблему повышения эксплуатационных характеристик деталей горячего тракта ГТД.

Цель работы – повышение эксплуатационных характеристик деталей горячего тракта ГТД за счет нанесения теплозащитных покрытий на их внутренние поверхности методом газотермического плазменного напыления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести математическое моделирование процессов ускорения, нагрева и плавления в плазменной струе напыляемого порошкового материала.

2. Разработать специальные технологические приемы нанесения ТЗП на внутренние поверхности малоразмерных сложнопрофильных деталей.
3. Провести исследования влияния режимов напыления на эксплуатационные свойства покрытий при их нанесении в полостях малого диаметра.
4. Провести выбор оптимальных режимов плазменного напыления ТЗП на внутренние поверхности малоразмерных деталей типа жаровая труба.
5. Разработать технологию нанесения теплозащитного покрытия на внутреннюю поверхность жаровой трубы.

Автор выносит на защиту.

1. Математическую модель процессов ускорения, нагрева и плавления напыляемого порошкового материала в плазменной струе.
2. Результаты расчетно-экспериментальных исследований траекторий движения, ускорения, нагрева и плавления частиц различного диаметра в плазменной струе.
3. Уравнения регрессии, адекватно описывающие зависимость физико-механических и эксплуатационных характеристик теплозащитного покрытия от параметров режима напыления и дисперсности напыляемого материала.
4. Способ нанесения теплозащитных покрытий на малых дистанциях в малоразмерных полостях переменного диаметра, защищенный патентом на изобретение № 2246557 от 20.02.2005
5. Технологию плазменного газотермического нанесения теплозащитного покрытия на внутреннюю поверхность детали жаровая труба

Научная новизна

1. Научная новизна решенной важной народно- хозяйственной задачи по повышению эксплуатационных характеристик деталей горячего тракта ГТД определяется разработкой новых научно обоснованных технологических и технических решений, обеспечивших создание и внедрение плазменной газотермической технологии нанесения ТЗП на малоразмерные внутренние сложнопрофильные поверхности деталей типа цилиндрических жаровых труб.
2. Научная новизна разработанной математической модели ускорения, нагрева и плавления порошковых частиц в плазменной газотермической струе определяется корректным учетом закона лобового сопротивления частиц в зависимости от числа Рейнольдса, учетом влияния расхода порошка на величину потери импульса плазменным потоком, учетом

влияния изменения параметров струи на дистанции напыления, а так же определяется новизной полученных результатов и вытекающих из них выводов о сепарации траекторий частиц различного диаметра, сепарации частиц различного размера в локальных областях покрытий, влиянии такой сепарации на свойства покрытий и способах снижения и регулирования указанной сепарации.

3. Научная новизна новых технологических и технических решений, обеспечивших получение эффективных ТЗП на малоразмерных сложнопрофильных поверхностях деталей подтверждена патентами на изобретение и определяется установленными зависимостями качества покрытий от угла напыления, установленными величинами минимального угла и минимальной дистанции напыления, новым способом формирования плазменных покрытий на минимальных дистанциях с учетом принудительного охлаждения поверхности и использованием эффекта регулируемой сепарации частиц для повышения эксплуатационных свойств покрытия.

Практическая ценность

1. По результатам математического моделирования сформулированы требования к допустимой дисперсии диаметров напыляемых частиц.
2. Разработана эффективная методика компьютерного входного контроля определения гранулометрического состава порошкового материала.
3. Разработаны рекомендации на способ подачи порошка в анодный канал плазмотрона и кинематические схемы движения плазмотрона относительно детали с целью уменьшения и регулирования сепарации частиц в пятне напыления и повышения качества напыляемого слоя.
4. Сформулированы требования к минимальной дистанции напыления и минимальному углу наклона плазменной струи к напыляемой поверхности, при которых формируется качественное покрытие.
5. Разработанные рекомендации и технологии изложены в нормативно-технической документации на технологический процесс получения ТЗП на внутренние сложнопрофильные поверхности малоразмерных деталей.

Реализация результатов работы

Разработана технология напыления теплозащитных покрытий на внутренние рабочие поверхности жаровых труб камер сгорания, ГТД. Изготовленная партия деталей прошла весь комплекс заводских испытаний по методике предприятия ОАО «СНТК им. Н.Д.

Кузнецова» в составе изделий НК – 38 СТ КГ – 101, НК 38 – СТ КГ 103. Экономический эффект составил 124 тыс. руб.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на конференциях: Санкт-Петербург, 2003, Санкт-Петербург, 2006, Москва, 2006, Москва, 2005, Самара 2006.

Публикации

По результатам выполненных исследований и разработок опубликованы: Статей- 2, тезисы доклада – 5, получено 5 авторских свидетельств на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений, в совокупности изложенных на 177 страницах машинописного текста, 56 рисунков, 32 таблицы и 8 приложений.

Работа выполнялась в рамках персонального гранта молодых ученых 2005.

Краткое содержание работы

Во введении изложена актуальность проблемы повышения эксплуатационных характеристик деталей горячего тракта ГТД за счет нанесения теплозащитных покрытий на их внутренние поверхности методом газотермического плазменного напыления.

В первой главе рассмотрены условия эксплуатации некоторых деталей горячего тракта ГТД (рабочие и сопловые лопатки турбин, жаровые трубы камер сгорания и др.), подвергаемых наиболее интенсивным тепловым нагрузкам, виды их износа и применяемые в настоящее время основные методы защиты от воздействия высоких температур. Показано, что эффективным и экономичным решением задачи повышения ресурса является использование на рабочих поверхностях деталей проточной части ГТД специальных теплозащитных покрытий (ТЗП). В работе проанализированы составы ТЗП, методы их формирования, и разработки по их усовершенствованию. При этом выделен газотермический плазменный метод нанесения покрытий, основные преимущества которого заключаются в технологической простоте и удобстве проведения процесса, а так же в

особенности микроструктуры, состоящей из упорядоченных кластеров, границы которых располагаются перпендикулярно внешним воздействиям.

Основной хорошо зарекомендовавшей себя системой ТЗП является двухслойное покрытие состава $Me-Co-Cr-Al-Y + ZrO_2 - 8Y_2O_3$, которое различными технологическими методами наносится на рабочие и сопловые лопатки турбины. Однако, нанесение покрытий на жаровые трубы из-за необходимости напыления на внутренние малоразмерные сложнопрофильные поверхности в настоящее время не проводится. Возможным методом нанесения теплозащитного покрытия на такие детали может стать плазменный газотермический, однако для использования этого метода необходимо разработать новое оборудование и новые методы, позволяющие регулировать нагрев напыляемой детали плазменным потоком и исключаящие перегрев стенок тонкостенных деталей. С целью увеличения дистанции и, снижения воздействия теплового потока на напыляемую деталь часто применяется использование наклонной плазменной струи к напыляемой поверхности. В связи с этим необходимо исследовать особенности формирования теплозащитных покрытий на малых дистанциях при наличии угла отличного от нормального между плазменной струей и напыляемой поверхностью. Эти исследования, прежде всего, должны включать моделирование скорости и нагрева напыляемых частиц на малых дистанциях с учетом того, что напыляемый порошок имеет на стадии поставки широкий фракционный состав, а затем оптимизацию свойств нанесенных слоев в зависимости от параметров процесса.

Эксплуатационные свойства плазменных покрытий определяются процессами взаимодействия порошкового материала с поверхностью. Исследованию процессов кинетики тепловых и деформационных явлений при плазменном напылении зависящей от таких физических параметров, как скорость, температура, теплосодержание напыляемых частиц посвящено достаточно много публикаций, среди которых необходимо выделить работы В.В. Кудинова, В.М. Иванова, А.В. Донского, В.С. Клубника, В.А. Барвинка, Н.Н. Рыкалина, В.И. Богдановича и др. Анализ явлений при плазменном напылении показал с одной стороны актуальность разработки математических моделей определения скоростей и температур напыляемых частиц, приобретаемых при их движении в плазменной струе, а с другой стороны, наличие вопросов, которые не рассмотрены или рассмотрены не в полном объеме или не вполне корректно, несмотря на наличие достаточно

большого числа публикаций по этой тематике. Проведенный анализ позволил сформулировать основную цель работы и задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований динамики движения и нагрева напыляемых частиц в плазменной струе на всей ее протяженности от плазмотрона до поверхности изделия. Научная новизна поставленной задачи заключается в том, что впервые корректно учтен феноменологический закон для коэффициента лобового сопротивления в соответствии с фактическим изменением числа Re в процессе ускорения частицы, учет потери импульса плазменной струей при ускорении частиц и учет влияния изменения параметров плазменного потока, связанных с расширением струи и ее смешиванием с окружающим воздухом. При постановке использовался ряд стандартных допущений. Математическая модель ускорения имеет следующий вид:

$$m(dV_x/dt) = \rho_G (U - V_x)^2 C_x S_M / 2, \quad (1)$$

$$V_y = V_{y,0} \quad V_x(0) = 0 \quad (2)$$

$$d(mV_x) = -d(m_G U) \quad (3)$$

где $m = \rho \pi D^3 / 6$, $S_M = \pi D^2 / 4$, и $C_x = C_0 / (Re)^k$ – масса, площадь миделевого сечения и коэффициент лобового сопротивления шаровой частицы, соответственно, V_x и V_y – компоненты скорости ее центра масс, ρ_G – плотность газового потока, m_G – масса газа, приходящаяся на одну частицу.

В работе показано, что известная двухчленная зависимость для коэффициента лобового сопротивления $C_x = (24/Re) + 4/(Re)^{1/3}$, применяемая при $Re = 1 \dots 500$ с учетом особенностей плазменного напыления, при котором диапазон изменения $Re = 1 \dots 30$, методом наименьших квадратов может быть сведена к более простой одночленной зависимости: $C_x = C_0 / (Re)^k$ с параметрами $C_0 = 24,4$ и $k = 0,739$, которая в указанном диапазоне чисел Re дает погрешность отклонения от экспериментальных данных в пределах не превышающих 4%. Установлено, что в большинстве анализируемых публикаций при получении аналитических выражений для скорости частиц неоправданно используется стоковский режим обтекания, дающий увеличение коэффициента лобового сопротивления более, чем в два раза, либо режим обтекания с $C_x = \text{const}$, возникающий в случаях $Re \gg 1$, либо

используются одночленные зависимости с другими значениями параметров без оценки погрешностей применения таких соотношений.

Плазменная струя моделировалась в соответствии с общепринятыми теоретическими и экспериментальными положениями, позволяющими представить ее состоящую из области ядра, где скорость плазмы и температура постоянны, области смешения и установившегося потока, где скорость, температура и другие параметры плазменного потока являются переменными и зависят от координат вдоль оси и радиуса струи.

В связи с этим задача моделирования разбивалась на две части: 1-я область, где задача моделирования решена в аналитическом виде и 2-я область, где из-за переменности динамических и теплофизических параметров плазмы решение найдено численным конечно-разностным методом. Полученные уравнения траектории движения частиц, в первой

$$\text{области имеют вид: } \alpha_G A_t t = \frac{1}{1-k} \left[\frac{1}{(1-\alpha_G \tilde{V}_x)^{1-k}} - 1 \right], \quad (4)$$

$$\alpha_G^2 A_x x = \frac{1}{1-k} \left[\frac{1}{(1-\alpha_G \tilde{V}_x)^{1-k}} - 1 \right] - \frac{1}{k} \left[1 - (1-\alpha_G \tilde{V}_x)^k \right], \quad (5)$$

$$y = 0,5d_c - V_{y,0} t, \quad (6)$$

где; $A_t = 3 \cdot C_0 \cdot \rho_r \cdot v^k U_0^{1-k} / 4 \cdot \rho \cdot D^{1+k}$; $A_x = 3 \cdot C_0 \cdot \rho_r \cdot v^k / 4 \cdot \rho \cdot D^{1+k} \cdot U_0^k = A_t / U_0$; $\alpha_G = 1 + (G/G_r)$; d_c - диаметр анодного канала плазмотрона, $V_{y,0}$ - проекция скорости напыления частицы при ее выходе из транспортного канала и попадании в анодный канал плазмотрона.

Для второй области конечно-разностная схема определения траекторий и скоростей частиц имеет вид:

$$\Delta \tilde{V}_x(i) = A_x(i-1) \frac{\tilde{U}(i-1) - \alpha_G(i-1) \cdot \tilde{V}_x(i-1)}{\tilde{V}_x(i-1)} \Delta x(i), \quad (7)$$

$$\Delta x(i) = x_i - x_{i-1}, \quad \alpha_G(i-1) = 1 + (G/G_r(i-1)), \quad (8)$$

$$\tilde{V}_x(i) = \tilde{V}_x(i-1) + \Delta \tilde{V}_x(i), \quad \Delta t(i) = \frac{\Delta x(i)}{U_0 \tilde{V}_x(i)}, \quad (9)$$

$$t(i) = t(i-1) + \Delta t(i), \quad y(i) = 0,5d_c - V_{y,0} t(i), \quad (10)$$

Анализ полученных уравнений показал существенное влияние вида феноменологического закона для коэффициента лобового сопротивления, конкретного значения k и учета потери импульса плазменной струей на скорость частиц различного диаметра и их траектории движения.

Установлено существенное влияние дисперсии диаметров напыляемых частиц на траектории и скорости их движения в плазменной струе. Показано, что на поверхность конденсации частицы различных диаметров попадают по различным траекториям и в разные места, что приводит к сепарации напыляемого материала по диаметрам в пятне напыления.

При моделировании процесса нагрева напыляемых частиц выделены стадии неупорядоченного и регулярного режима нагрева. В связи с тем, что стадия регулярного режима нагрева достигается в основном при выходе частицы из ядра плазменной струи, для определения температуры частиц в ядре струи использовано общее решение уравнения теплопроводности шаровой частицы при ее нагреве конвекцией, а вне ядра плазменной струи использовано приближение термически тонкой частицы. Для определения температуры поверхности частицы в процессе ее плавления и времени ее плавления использовано решение задачи Стефана методом дифференциальных рядов.

При моделировании процесса нагрева и плавления частиц основная новизна используемого подхода заключалось в том, что частицы различного диаметра летят по различным траекториям и для каждой из них изменяются условия нагрева. Расчет, проведенный по полученным моделям показывает, что при недостаточном нагреве плазменной струей часть порошка прогревается до температуры испарения с поверхности, часть находится в расплавленном состоянии, а некоторые не прогреваются до температуры плавления. Однако существует возможность подбора дисперсности фракции порошка и режима напыления, при которой на поверхность падает поток частиц находящихся в близком термическом состоянии, что гарантирует однородность формирования покрытия в пятне напыления.

Достоверность математических моделей подтверждена экспериментальными данными и показано, что погрешности расчетов не превышают 18%. При определении скорости частиц экспериментальная проверка проводилась методом стробоскопии. Для определения проплавления частиц использовался металлографический метод. При исследовании эффекта сепарации проводилось напыление частиц в емкость с водой, состоящей из трех секций и анализ гранулометрического состава фракций порошка из каждой секции с использованием разработанной методики с применением программы обработки изображения Image Expert Pro 3. Проведенные исследования позволили по результатам

математического моделирования сформулировать требования к допустимой дисперсии диаметров частиц, используемых для напыления, и за счет выбора режима напыления и способа подачи порошка в анодный канал уменьшить сепарацию частиц в пятне напыления и разработать способ, позволяющий использовать положительные стороны эффекта сепарации частиц в плазменном потоке.

В третьей главе показано, что нанесение теплозащитных покрытий методом плазменного напыления на внутренние поверхности малого диаметра, используя обычные схемы и оборудование не представляется возможным, и приводит к перегреву деталей, или к образованию покрытий с низкими физико – механическими свойствами. Такие сложные условия напыления требуют разработки и применения специальных способов, технологических приемов и оборудования.

Разработан способ формирования теплозащитных покрытий, заключающийся в том, что начальные слои напыляются на повышенной скорости поперечного перемещения плазмотрона, с увеличенной силой тока и с использованием порошкового материала меньшей грануляции по сравнению с режимами нанесения основных слоев. Такой способ напыления позволяет формировать плотные начальные слои, защищающие поверхность детали от перегрева и окисления. Разработанный способ защищен патентом № 2246557 от 20.02.2005 Бюл. № 5 «Способ напыления внутренних поверхностей малоразмерных деталей и деталей из материалов с высокой теплопроводностью».

Разработан способ установки плазмотрона. Показано, что процесс нанесения покрытий на внутренние цилиндрические поверхности малоразмерных деталей типа жаровая труба возможен только при реализации процесса напыления с использованием наклонной плазменной струи, а так же при условии наличия малогабаритного источника плазмы повышенной мощности.

Перечислены основные конструкционные принципы разработки малогабаритного плазмотрона, позволяющие уменьшить его размеры и увеличить ресурс при неизменной мощности. Реализация наклонной плазменной струи при напылении данным плазмотроном проведена за счет расположения токо и газо-подводящих магистралей под углом к оси анода. На конструкцию разработанного плазмотрона получен патент на полезную

модель № 31897 Бюл № 24 от 27.08.2003 «Плазменная горелка для напыления металлов и окислов».

Разработана специальная система, позволяющая проводить охлаждение детали в процессе нанесения плазменного покрытия во внутренних замкнутых полостях с одновременным отводом тепла и частиц не использованного порошкового материала непосредственно из зоны напыления.

В четвертой главе приводятся результаты исследования влияния параметров нанесения плазменного теплозащитного покрытия на их физико-механические и эксплуатационные свойства с использованием метода математического планирования эксперимента. В качестве входных параметров процесса при оптимизации были выбраны дистанция напыления (X_1), угол наклона плазменной струи (X_2), грануляция напыляемого материала (X_3). В качестве выходных параметров – пористость (P), прочность покрытия (σ'), количество циклов до разрушения (N) при испытаниях на термическую усталость, шероховатость поверхности (Ra), количество проходов, необходимых для нанесения теплозащитного покрытия заданной толщины (n).

Образцы напылялись согласно разработанному в главе 3 методу нанесения плазменных покрытий на малых дистанциях. Учитывая результаты, полученные в главе 2 и разработанные рекомендации по подаче порошкового материала, выбран двусторонний способ подачи порошка в канал анода плазмотрона. При напылении использовалась специальная оснастка, имитирующая нанесение покрытия в малоразмерных полостях.

Пористость определялась методом металлографии, прочность сцепления – изгибом стандартного образца вокруг оправок диаметрами $\varnothing 70$ мм, $\varnothing 65$ мм, $\varnothing 60$ мм, $\varnothing 55$ мм, $\varnothing 50$ мм, $\varnothing 45$ мм, $\varnothing 40$ мм, $\varnothing 35$ мм, $\varnothing 30$ мм последовательно, а также клеевой методикой, испытания на термическую усталость проводились на специально собранной установке для нагрева образцов проходящим током, шероховатость поверхности измерялась профилометром SJ-301.

Результаты проведенных исследований позволили получить следующие уравнения регрессии, адекватно описывающие связь входных и выходных параметров:

для пористости:

$$P = 11,19 + 4,86X_1 - 11,01X_2 + 2,49X_3 - 0,88X_1X_2 - 0,17X_1X_3 + 0,79X_2X_3 + 4,44X_1X_1 + 5,55X_2X_2 + 0,43X_3X_3,$$

для прочности покрытия:

$$\sigma' = \frac{30}{42,38 - 5X_1 - 2,33X_2 + 0,33X_3 - 1,88X_1X_2 - 1,46X_1X_3 - 0,21X_2X_3 + 0,16X_1X_1 + 0,46X_2X_2 + 0,16X_3X_3}$$

где вид уравнения регрессии для прочности покрытия получен из экспериментальных данных, в которых определялась величина обратно пропорциональная прочности покрытия σ' .

для количества циклов до разрушения при испытании на термическую усталость:

$$N = 2002,84 + 79,79X_1 + 382,35X_2 + 10,8X_3 + 164,0X_1X_2 + 64,33X_1X_3 + 24,83X_2X_3 - 342,58X_1X_1 - 237,07X_2X_2 - 331,97X_3X_3,$$

для шероховатости поверхности:

$$Ra = 9,44 - 1,04X_1 - 4,23X_2 + 2,04X_3 - 1,8X_1X_2 - 0,81X_1X_3 - 0,8X_2X_3 + 1,23X_1X_1 + 1,56X_2X_2 - 0,13X_3X_3$$

для количества проходов, необходимых для нанесения теплозащитного покрытия заданной толщины

$$n = 16,67 + 0,78X_1 - 5,65X_2 - 4,14X_3 - 0,96X_1X_2 - 1,29X_1X_3 - 0,46X_2X_3 + 2,07X_1X_1 + 2,19X_2X_2 - 0,89X_3X_3$$

Проведенные исследования и анализ уравнений регрессии показывает, что в исследуемой области факторного пространства все входные параметры оказывают существенное влияние на свойства покрытий. При этом можно выделить две области, характеризующиеся оптимальным сочетанием свойств с высокими значениями исследуемых параметров: 1-я - угол наклона 80° - 90° , дистанция 70-80 мм, грануляция 40-80 мкм; 2-я - угол наклона 55° , дистанция 45-55 мм, грануляция 40-80 мкм. В данных областях покрытия имеют оптимальные для теплозащитного покрытия значения пористости 6-15% анализ микроструктуры показывает, равномерное распределение пор округлой формы, отсутствие пустот размером более 10-15 мкм, хорошее сцепление с основой. Покрытия имеют удовлетворительные прочностные характеристики $\sigma \geq 27$ МПа, шероховатость поверхности $Ra=6-10$ мкм, количество необходимых проходов плазмотрона при напылении $n=15-17$.

В пятой главе приведена разработанная технология нанесения теплозащитного покрытия на внутреннюю поверхность жаровой трубы. Выбран оптимальный режим напыления ТЗП, позволяющий обеспечить комплекс свойств покрытия удовлетворяющих требованиям эксплуатации. Разработан комплекс автоматизированного оборудования управляемый с помощью персональной ЭВМ обеспечивающий высокую стабильность технологического процесса и воспроизводимость свойств напыленных покрытий. Разработана технологическая документация на технологический процесс нанесения

теплозащитного покрытия на внутреннюю поверхность трубы жаровой. Рассчитаны показатели экономической эффективности нанесения покрытий. Коэффициент экономической эффективности нанесения плазменного теплозащитного покрытия для детали жаровая труба (на примере для наземной газотурбинной установки) составляет 3,4, а для восстанавливаемых деталей- 6,9. Экономический эффект составляет 124 тыс. руб.

Основные результаты и выводы по работе

1. Проведенные исследования позволили решить важную народно-хозяйственную задачу по повышению эксплуатационных характеристик деталей горячего тракта ГТД, за счет разработки технологии плазменного газотермического нанесения теплозащитных покрытий на малоразмерные внутренние сложнопрофильные поверхности деталей типа жаровая труба.

2. Разработана математическая модель ускорения, нагрева и плавления порошковых частиц в плазменной газотермической струе плазмотрона в период их движения до напыляемой поверхности, обеспечивающая адекватность определения их скорости и температуры с погрешностью не более 18%.

3. В результате численного моделирования на разработанной математической модели и экспериментальных исследований установлено, что использование в процессе напыления частиц порошкового материала с диапазоном дисперсности их размера, определяемым технологическими условиями подготовки порошка к напылению, приводит к существенной сепарации траекторий движения частиц и сепараций частиц по размерам в пятне напыления.

4. Исследование различных диапазонов дисперсности напыляемых материалов, условий их ввода в плазменную струю, различных режимов и кинематических схем напыления позволило обосновать рекомендации на размеры и допустимые диапазоны дисперсности размеров с целью снижения влияния эффекта сепарации на локальное изменение свойств покрытий в различных его областях и использовать эффект регулируемой сепарации для повышения эксплуатационных свойств плазменных теплозащитных покрытий.

5. Методом математического планирования эксперимента установлено влияние дистанции напыления, угла наклона плазменной струи к напыляемой поверхности и грануляции порошкового материала на свойства теплозащитных покрытий методом математического планирования эксперимента. В области факторного пространства исследованы адгезионная прочность, пористость, термостойкость, шероховатость напыленных покрытий, а так же количество

проходов, необходимых для формирования теплозащитного покрытия заданной толщины. Проведенные исследования позволили обоснованно выбрать оптимальные технологические режимы напыления.

6. Разработанные новые теоретические положения и новые технологические решения, защищенные патентом, позволили спроектировать и изготовить автоматизированный управляемый персональной ЭВМ комплекс оборудования, создать новый способ формирования покрытия на малых дистанциях и разработать технологию плазменного газотермического напыления двухслойного теплозащитного покрытия на внутренние труднодоступные сложнопрофильные поверхности малоразмерных деталей горячего тракта ГТД.

7. Результаты исследования физико-механических и эксплуатационных свойств деталей с двухслойными покрытиями $Ni-Co-Cr-Al-Y$ и $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ показали, что выбранный оптимальный состав покрытия и оптимальный режим его напыления обеспечивают комплекс требований технического задания к ТЗП на деталях горячего тракта. Изготовленная партия прошла весь комплекс заводских испытаний по методике предприятия ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» в составе изделий НК – 38 СТ КГ – 101, НК 38 – СТ КГ 103, а разработанная технология внедрена в производство.

Публикации по теме диссертации

1. Барвинок В. А., Богданович В. И., Ананьева Е. А. Математическое моделирование динамики движения напыляемых частиц в плазменном газотермическом потоке / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева Самара, 2006 . С. 29-35.

2. Барвинок В. А., Богданович В. И., Ананьева Е. А., Лостышев В. А., Сима Л. И., Косырев С. А. Упрочнение периферии лопаток компрессоров авиационных двигателей с целью предотвращения снижения усталостной прочности после касания о статор / Материалы 5 – ой международной практической конференции «Технология ремонта, восстановления, упрочнения, обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций.» С.-Петербург, 2003. С.142-147.

3. Ананьева Е. А., рук. Барвинок В. А. Повышение эксплуатационных характеристик деталей горячего тракта ГТД за счет нанесения плазменных покрытий / Сборник трудов студентов и аспирантов факультета летательных аппаратов, СГАУ 2003. С.3-8.

4. Богданович В. И., Барвинок В. А., Лисянский А. С., Маринин С. Д., Докукина И. А., Ивашин А. С., Ананьева Е. А., Симин О. Н. Восстановление работоспособности и повышение ресурса лопаток паровых турбин / Материалы 6 – ой международной практической конференции «Технология ремонта, восстановления, упрочнения, обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций.» С.-Петербург, 2006. Апрель 2006г.

5. Барвинок В. А., Богданович В. И., Докукина И. А., Ананьева Е. А. Разработка плазменных покрытий для защиты деталей двигателей от высокотемпературного газового потока / Материалы XXIX академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики.» Москва, 2006. С.479.

6. Ананьева Е. А., Карасев В. М. Исследование свойств теплозащитных покрытий / Материалы XXX академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики.» Москва, 2005. С.423.

7. Наумов Л. А., Докукина И. А., Ананьева Е. А. Получение покрытий со специальными свойствами / Материалы XVI международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» Самара, 2006. С.121.

8. Патент на полезную модель № 31897 от 14.04.2003 «Плазменная горелка для напыления металлов и окислов».

9. Патент на изобретение № 2246557 «Способ напыления внутренних поверхностей малоразмерных деталей и деталей из материалов с высокой теплопроводностью».

10. Патент на полезную модель №38668 от 03.02.2004 «Устройство для линейного перемещения плазмотрона».

11. Патент на изобретение № 2262554 «Порошковый материал для нанесения износостойкого газотермического покрытия».

12. Патент на полезную модель №48140 от 10.03.2005 «Плазменная установка».