

На правах рукописи

НА 200
НЕ ВЫДАЕТС

Ню Липин

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПЛАЗМЕННО НАНЕ-
СЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ НА БАЗЕ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ОС-
ТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность:

05.02.08 – Технология машиностроения

05.03.06 – Технологии и машины сварочного производства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2005 г.

Ню Липин

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана на кафедре «Технологии ракетно-космического машиностроения» и Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тарасов В.А.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Пузряков А.Ф.

Официальные оппоненты: д. т. н., проф. **Моисеев В.А.**

к.т.н., доц. **Буткевич М.Н.**

Ведущее предприятие- НПО ТЕХНОМАШ

Защита диссертации состоится «26» октября 2005г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.06 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на реферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок: 267-09-63.

Автореферат разослан " 14 " сентября 2005 г.

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



Васильев А.С.

Актуальность темы.

Интенсификация экономики и повышение ее эффективности во многом определяются применением новых технологических процессов. Оборудование машиностроения, эксплуатирующееся в экстремальных условиях, применение защитных покрытий на рабочих поверхностях деталей машин и механизмов дает наибольший экономический эффект при наименьших дополнительных затратах. Конкретная совокупность этих условий определяет назначение покрытий термостойкие, жаростойкие, эрозионно-стойкие, износостойкие, антифрикционные, коррозионно-стойкие, отражающие или поглощающие различные виды излучения и т.д. Плазменное напыление является одним из перспективных технологических методов получения многофункциональных покрытий. Плазмой можно наносить покрытия практически из любых видов материалов, обладающих заданными физико-механическими свойствами.

К недостаткам метода плазменного напыления следует отнести их недостаточное сцепление с основой. Прочность сцепления газотермических покрытий зависит от многих технологических факторов, физико-химического состояния поверхности, а также в значительной степени зависит от величины и знака остаточных напряжений.

Остаточные напряжения в области, близкой к границе раздела напыляемой поверхности «деталь-покрытие», появляются в результате значительного градиента температур в элементах системы и различия в их коэффициентах линейного расширения. Остаточные напряжения являются одной из основных причин, вызывающих нежелательные структурные изменения в покрытиях – образование трещин и отслоений покрытий, полученных плазменным напылением. Трещина и отслаивание покрытий при последовательном напылении слоев объясняются ростом величины остаточных напряжений до критического уровня, определяющего прочность сцепления покрытия с подложкой.

Несмотря на принципиальное понимание основных физических процессов, приводящих к образованию остаточных напряжений в напыленных покрытиях, еще не разработаны инженерные методы их оценки. Это объясняется не только сложностью, но и многосторонностью теплофизических, физико-химических и других явлений, влияющих на формирование остаточных напряжений (ОН) в напыленных покрытиях.

Все выше изложенное свидетельствует о том, что вопрос технологических оценок уровня остаточных напряжений в покрытиях при плазменном напылении является актуальной задачей, имеющей научное и большое практическое значение.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1732225

Ю. Липин Технологическое о

МГТУ
ИМ. Н. Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

Цель и задачи исследования.

Повышение прочности сцепления покрытия с деталью на основе анализа механизма формирования остаточных напряжений и технологического управления ими.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Экспериментальное определение температуры частиц до момента ее удара о деталь.
2. Разработка теплофизической математической модели для оценки температуры покрытия и детали при напылении.
3. Построение термомеханической модели формирования остаточных напряжений в системе деталь-покрытие при плазменном напылении.
4. Разработка инженерной методики обоснованного выбора технологических параметров процессов плазменного напыления покрытий по требованиям к уровню остаточных напряжений.

Признаками научной новизны обладают:

1. Теоретическое и экспериментальное определение температуры нагрева частиц порошка с помощью измерения средней толщины напыленных слоев по шлифам.
2. Термомеханическая модель формирования остаточных напряжений в покрытиях машиностроительных деталей с учетом большого числа технологических параметров.
3. Экспериментальное подтверждение адекватности и точности термомеханической модели формирования остаточных напряжений в системе деталь-покрытие.
4. Научное обоснование области рациональных технологических параметров плазменного напыления многослойных покрытий, обеспечивающих снижение остаточных напряжений в системе деталь-покрытие.

Практической значимостью обладают:

1. Инженерная методика обоснованного выбора технологических параметров процессов плазменного напыления многослойных покрытий по требованиям к уровню остаточных напряжений, позволяющая:
 - Определять рациональную толщину слоя покрытия, напыляемого за один проход плазматрона, количество слоев в покрытии и подачу плазматрона;
 - Определять параметры композитных структур промежуточных слоев покрытия, обеспечивающих снижение уровня остаточных напряжений.
2. Рекомендации и технологический процесс плазменного нанесения запитных покрытий из материалов W и NiCr на элементы плазмохимического оборудования, которые обеспечили повышение ресурса работы

оборудования на 85% и снижение в 7 раз брака готовой продукции.

3. Разработанные в рамках диссертации программы расчета используются также в учебном процессе для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, проводимом на базе лаборатории плазменных технологий кафедры СМ12 Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность результатов исследования подтверждена корректным использованием математических и экспериментальных методов, сравнением расчетных зависимостей с экспериментальными данными, результатами лабораторных и эксплуатационных испытаний изготовленных натуральных деталей.

Апробация работы и публикации.

Материалы диссертации доложены на 2 Российских, международных научно-технических конференциях. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ.

Объем и структура диссертации.

Диссертационная работа изложена на 167 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы.

На защиту выносятся:

- Результаты экспериментального определения температуры нагрева частиц порошка в плазменной струе;
- Результаты расчета остаточных напряжений на базе теплофизического расчета в системе;
- Рекомендации по выбору технологических параметров напыления и выбору толщины при послойном напылении покрытия, а также параметров композитных структур промежуточных слоев между деталью и покрытием.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены методики исследований, показана новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе отмечено, что плазменное напыление является одним из перспективных технологических методов получения функциональных защитных покрытий (жаростойкие, износостойкие и т.д.). Од-

нако широкому внедрению этого метода препятствует ряд проблем, обусловленных отсутствием системы управления качеством плазменных покрытий. Плазменное напыление осуществляется с помощью плазменной струи, способной наносить покрытия практически из всех материалов.

Прочность сцепления газотермических покрытий зависит от многих технологических факторов, физико-химического состояния поверхности, а также непосредственным образом связана с действием остаточных напряжений. Отслаивание покрытий при последовательном напылении слоев объясняют ростом величины остаточных напряжений до критического уровня, определяющего прочность сцепления с подложкой одного слоя частиц. Прочность сцепления $\sigma_{сч}$ покрытия с основой качественно описывается в виде:

$$\sigma_{сч} = \sigma_{adh} - K\sigma_{ост},$$

где σ_{adh} - прочность адгезионной связи;

$\sigma_{ост}$ - остаточные напряжения;

K - эмпирический коэффициент, зависящий от условий напыления и свойств напыляемых материалов.

Как выше отмечено, остаточные напряжения являются одной из основных причин разрушения покрытий, полученных плазменным напылением. Управление качеством плазменных покрытий включает в себя выбор технологических параметров процесса, влияющих на показатели качества покрытий, и регулирование ими.

Из-за многообразия причин, влияющих на возникновение остаточных напряжений, сложности их математического описания и решения число публикаций не уменьшается. Кроме того, многие аспекты напряженного состояния покрытия остаются открытыми, особенно в области анализа влияния режимов напыления на величину и знак остаточных напряжений.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований по разработке теплофизической модели процесса нанесения покрытий, описывающей динамику изменения температур в системе деталь-покрытие с учетом технологических параметров процесса плазменного напыления (толщины слоя покрытия, создаваемого за 1-н проход, подача плазматрона и расход порошка с учетом коэффициента использования материалов, дистанция напыления и т.д.).

Повышение достоверности теплофизической модели достигается за счет разработки методики экспериментальной оценки температуры нагрева частиц порошка в плазме путем измерения параметров деформирования частиц при ударе о поверхность детали.

Суть методики состоит в том, что параметры деформирования частиц порошка легко устанавливаются с помощью микрошлифов структуры материала покрытия. Предложенная в работе модель пластического те-

чения материала частицы позволяет по параметрам деформирования частицы определить предел текучести нагретого материала частицы

$$\sigma_0 = \frac{\frac{\rho V_v^2}{2}}{\ln \frac{d_0}{\delta_{\min}} + \frac{\mu_1}{9} \left(\frac{d_0^{3/2}}{\delta_{\min}^{3/2}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где $\delta_{\min}$ - экспериментально измеренная толщина слоев в структуре материала покрытия; μ_1 - коэффициент трения на границе деформирующейся частицы и поверхности детали; ρ - плотность материала частицы; d_0 - диаметр частицы; V_v - скорость соударения частицы с деталью.

Последующее использование известных справочных данных о зависимости предел текучести от температуры нагрева материала позволяет определить температуру частиц порошка в плазме. В качестве примера в табл.1 приведены данные оценки температуры частиц порошка вольфрама при плазменном напылении как функции размера частиц и скорости их движения. Расчеты показали, что температура, приобретаемая частицами порошка в плазменной струе, составляет $0,847 \div 0,893$ от температуры плавления напыляемого материала $T_{\text{пл}}$.

Таблица 1.

Оценка температуры нагрева порошка вольфрама в плазменной струе

$d_0 [\text{мкм}]$	$\delta_{\min} [\text{мкм}]$	$\sigma_0 [\text{МПа}]$	$T_v [\text{град}]$	$T / T_{\text{пл}}$
100	10,265	11,3	3027	0,893
63	10,265	17,26	2869	0,847

Такой подход обладает рядом преимуществ по сравнению с известными теоретическими и экспериментальными методами оценки температуры частиц порошка. Так по сравнению с теоретическими методами исключается необходимость разработки теплофизической модели теплообмена между частицей порошка и плазмой и решается проблема неопределенности граничных условий. В силу нестационарности и неустойчивости параметров частиц порошка, плазменной струи и расхода порошка во времени представляет значительный интерес использование предложенного метода по сравнению с пирометрическим методом измерения температуры частицы, поскольку учитывается неоднородность температуры в различных слоях частицы.

Теплофизическая модель составлялась на основе баланса тепла в системе деталь - формируемое покрытие с учетом теплопроводности материалов лучистого теплообмена в окружающее пространство. В качестве параметров процесса теплопередачи выступают температура нагрева частиц в плазме и такие технологические параметры, как: расход порош-

ка; коэффициент использования материала; подача плазмотрона и дистанция напыления покрытия.

Установлено, что динамика изменения температур системы имеет 2 стадии. Начальная стадия соответствует нагреванию материала детали при незначительном изменении температуры покрытия и заканчивается в момент равенства температур детали и покрытия. На завершающей стадии температуры детали и покрытия одинаковы, монотонно увеличиваются до максимальной температуры, определяемой расходом порошка и подачей плазмотрона.

Получены зависимости, описывающие изменение температуры детали и покрытия во времени. Так на завершающей стадии процесса эта зависимость принимает вид

$$\frac{\beta + \bar{\delta}}{\beta + (\bar{\delta})_0} = \left(\frac{\sqrt[4]{\bar{T}_0} + \sqrt[4]{\gamma_0} \bar{T}_A}{\sqrt[4]{\bar{T}_0} + \sqrt[4]{\gamma_0} (\bar{T}_A)_0} \cdot \frac{\sqrt[4]{\bar{T}_0} - \sqrt[4]{\gamma_0} (\bar{T}_A)_0}{\sqrt[4]{\bar{T}_0} - \sqrt[4]{\gamma_0} \bar{T}_A} \right)^{\frac{A}{\sqrt[4]{\gamma_0}}} \exp \left[\arctg \frac{\sqrt[4]{\gamma_0} (\bar{T}_A - (\bar{T}_A)_0)}{\sqrt[4]{\bar{T}_0} \left(1 + \frac{\sqrt[4]{\gamma_0} \bar{T}_A (\bar{T}_A)_0}{\sqrt[4]{\bar{T}_0}} \right)} \right] \left(\frac{C}{\sqrt[4]{\gamma_0}} \right), \quad (2)$$

где $\beta = \frac{\rho_d c_d \delta_d}{\rho \delta_{\min}}$; $\bar{T}_A = T_A / 100$; $\bar{T}_0 = T_0 / 100$; $\bar{\delta} = \delta_T / \delta_{\min}$; $\gamma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ см} / \text{м}^2 \cdot \text{К}^4$ - постоянная Стефана – Больцмана; ρ, ρ_d - плотности материалов покрытия и детали; c, c_d - теплоемкости материалов покрытия и детали; δ_d - толщина детали; $\delta_{\min}$ - толщина слоя покрытия, создаваемого за один проход плазмотрона; A, C - параметры зависимости; T_A - абсолютная температура покрытия; T_0 - исходная температура детали с учетом возможного подогрева; δ_T - текущая толщина напыляемого слоя покрытия.

Третья глава посвящена экспериментально-теоретическому анализу механизмов формирования остаточных напряжений в системе «тонкостенная деталь-покрытие» при плазменном напылении. На базе рассмотрения совместного движения материалов покрытия и детали при охлаждении от максимальной температуры нагрева $(T_A)_{\max}$ в завершающей стадии формирования произвольного i -го слоя покрытия и решения уравнений термомеханики получены соотношения для напряжений в покрытии и детали:

$$\sigma_n = -E \frac{(\psi_n - \psi_o(i))(T_A)_{\max} \zeta(i)}{1 + \zeta(i) - (\zeta(i)\psi_n + \psi_o(i))(T_A)_{\max}(i)},$$

$$\sigma_o = +E_o(i) \frac{(\psi_o(i) - \psi_n)(T_A)_{\max}(i)}{1 + \zeta(i) - (\zeta(i)\psi_n + \psi_o(i))(T_A)_{\max}(i)}. \quad (3)$$

где i - число слоев покрытия, созданное на поверхности детали; $E, E_o(i)$ - модули упругости материалов покрытия и детали соответственно;

$\psi_n, \psi_o(i)$ - коэффициенты термического расширения материалов покрытия

и детали соответственно; $\zeta(i) = \frac{E_o(i)\delta_o(i)}{E_n\delta_{\min}}$ - безразмерная величина, исполь-

зубая в расчете напряженного состояния покрытия и детали. В работе предложены принципы назначения параметров $E_\delta(i)$ и $\psi_\delta(i)$ с учетом влияния свойств ранее нанесенных $i-1$ слоев покрытия.

На основе анализа экспериментальных исследований величины и характера распределения остаточных напряжений в покрытиях предложена схема суммирования (рис.1) напряжений при послойном нанесении покрытий.

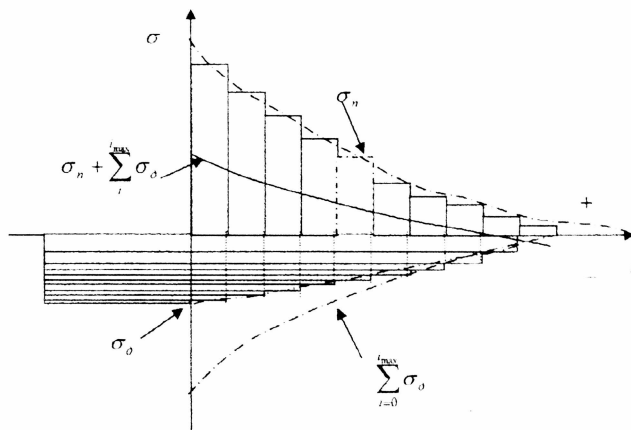


Рис. 1. Схема суммирования напряжений в системе «деталь - многослойное покрытие»

На рис.2, 3, 4 представлены результаты расчета (сплошные линии) остаточных напряжений в многослойных покрытиях систем «Ст.3-W», «Ст.3-NiCr» и «Ст.3-Al₂O₃» с помощью разработанной термомеханической модели и экспериментальные данные (точки, отмеченные крестиками).

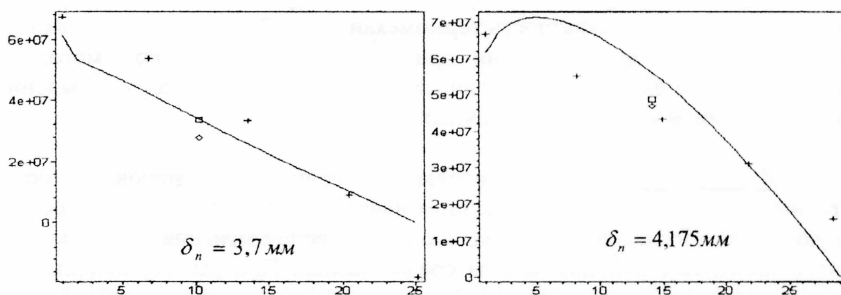


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в системе Ст.3-NiCr

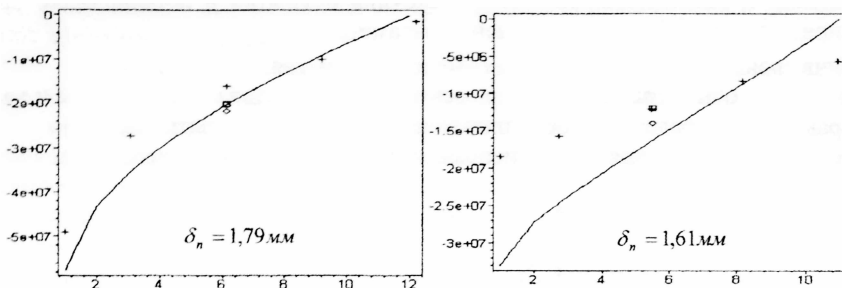


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в системе Ст.3-W

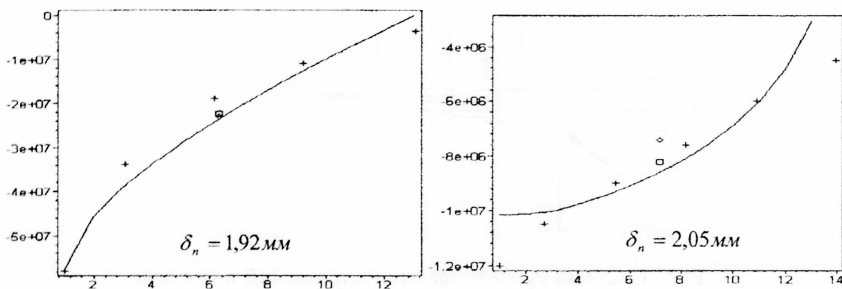


Рис.4. Распределение остаточных напряжений
в системах Ст.3-W и Ст.3-Al₂O₃.

Анализ полученных результатов показывает удовлетворительную согласованность между данными расчета и экспериментальных измерений, что подтверждает адекватность термомеханической модели и указывает на возможность её использования при разработке инженерной методики обоснованного выбора технологических режимов плазменного напыления по требованиям к уровню остаточных напряжений.

В четвертой главе исследованы особенности формирования остаточных напряжений при плазменном нанесении покрытий на толстостенную деталь. Исследование проведено на основе применения метода конечного элемента с использованием среды Nastran. При расчете использовались тороидальные конечные элементы, представленные на рис.5. Пример расчета компонент напряжений для системы сталь-вольфрам, представленный на рис.6, показывает, что интенсивное изменение напряжений происходит в окрестности границы напыленного покрытия и может явиться причиной его отслоения.

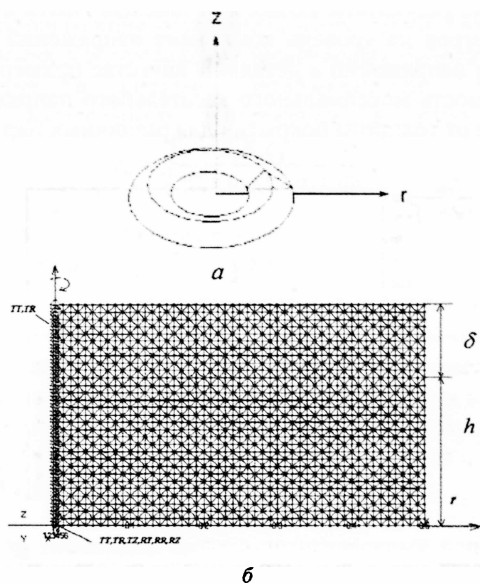


Рис. 5. Схема описания деформируемой системы «деталь-покрытие» с помощью тороидальных конечных элементов
 а.- тороидальный конечный элемент с треугольным сечением; б.- сетка конечных элементов в сечении системы «деталь-покрытие».

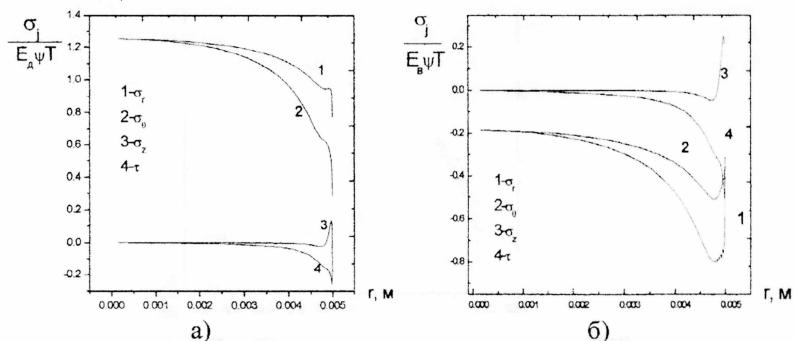


Рис. 6. Распределение компонент остаточных напряжений в системе Ст.3-W
 а.- напряжения в покрытии; б.- напряжения в детали.

Компоненты напряжения σ_j принимают обозначения σ_r , σ_θ , σ_z и τ (кривые 1, 2, 3 и 4)

Полученные результаты позволяют анализировать влияние технологических параметров на уровень компонент напряжений и глубину проникновения этих напряжений в деталь. В качестве примера на рис.7 представлена зависимость максимального касательного напряжения в системе деталь-покрытие от толщины покрытия для различных пар материалов.

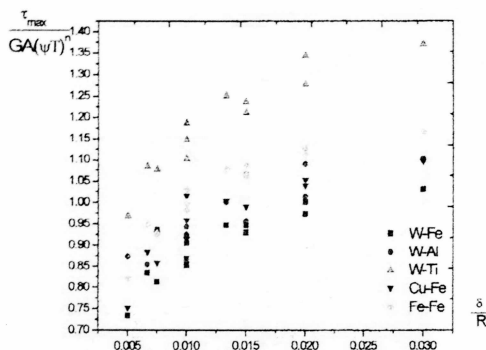


Рис. 7. Зависимость максимального значения касательных напряжений от безразмерной толщины покрытия δ / R ($A=0,1724$; $n=0,5793$)

На рис.8 приведен график глубины проникновения остаточных напряжений в деталь.

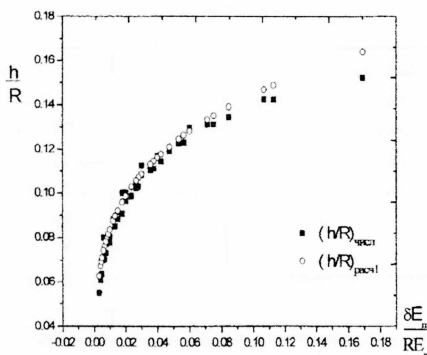


Рис. 8. Зависимость глубины проникновения остаточных напряжений h/R от безразмерной величины $x = \frac{\delta E_0}{R E_0}$

В работе проведено исследование механизмов формирования остаточных напряжений в системе «толстостенная деталь-покрытие» с учетом ряда теплофизических и механических безразмерных критериев,

влияющих на составляющие остаточных напряжений. Получены аналитические соотношения для проведения инженерных оценок уровня остаточных напряжений в системе деталь-покрытие. Например, для максимального касательного напряжения в работе предлагается зависимость

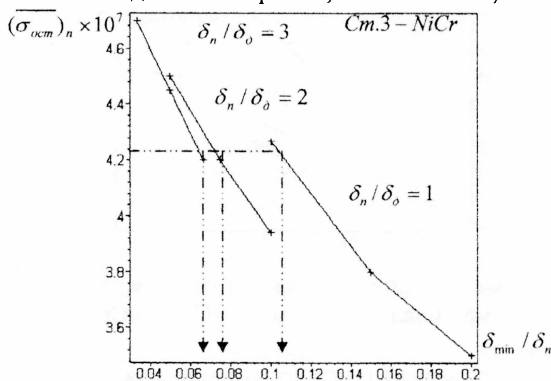
$$\tau_m = \sqrt{\frac{E_d E_n \zeta_3}{2(1 + \mu_d)(1 - \mu_n^2)}} \frac{\psi T}{\sqrt{h}}, \quad (4)$$

где $\zeta_3 = 1,36$, - поправочный коэффициент; E_d, E_n - модули упругости материалов детали и покрытия; μ_d, μ_n - коэффициенты Пуассона материалов детали и покрытия; ψ и T - коэффициент термического расширения и температура нагрева материала покрытия. Сравнение с численным расчетом показывает, что погрешность инженерной оценки не превышает 18,3%.

Таким образом, численное исследование формирования остаточных напряжений в системе «толстостенная деталь – покрытие» позволило обосновать и уточнить аналитические зависимости для оценки компонент остаточных напряжений.

Пятая глава посвящена научно-практическому использованию теплофизической и термомеханической моделей формирования остаточных напряжений в системе покрытие-деталь при проектировании процессов плазменного напыления покрытий.

Разработана инженерная методика выбора режимов плазменного напыления покрытий, обеспечивающая снижение уровня остаточных напряжений. В основу методики положена использование диаграмм связи между остаточными напряжениями и технологическими параметрами процесса плазменного напыления покрытий, представленных на рис.9 для таких пар материалов в системе деталь- покрытие, как Ст.3-NiCr, Ст.3-W, Ст.3-Al₂O₃.



а)

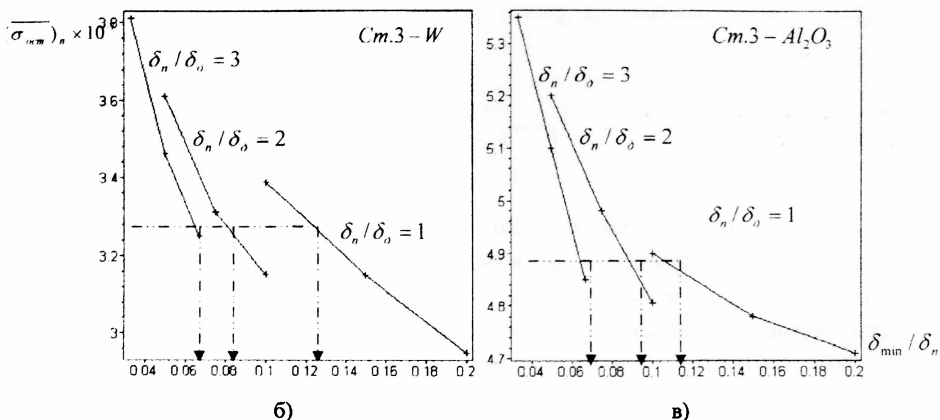


Рис. 9. Зависимость средних окружных остаточных напряжений $\overline{\sigma_{ост}}_n$ от соотношения минимальной толщины к толщине покрытий для систем «Cm.3 – NiCr», «Cm.3 – W» и «Cm.3 – Al₂O₃» при послойном формировании покрытия

Анализ диаграмм, показывает, что существует рациональная толщина слоя покрытия $\delta_{min} \approx 0,2 \text{ мм}$, создаваемая за один проход зависит от сочетания свойств покрытия и детали и обеспечивает снижение уровня остаточных напряжений.

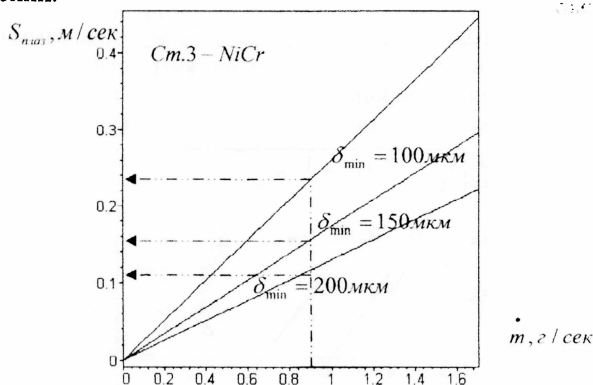


Рис. 10. Зависимость подачи плазмотрона от расхода порошка напыляемого материала для системы «Ст.3-NiCr»

На рис.10 представлена в графическом виде для системы «Ст.3-NiCr» зависимость подачи плазмотрона от расхода порошка напыляемого материала и толщины напыляемого за один проход слоя покрытия.

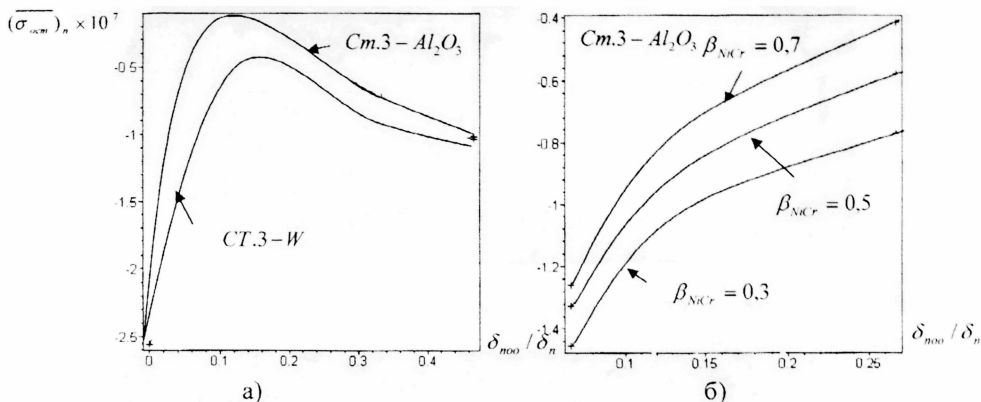


Рис. 11. Влияние параметров композитной структуры подслоя на уровень напряжений в покрытии.

а) влияние толщины подслоя NiCr для слоистых структур; б) влияние концентрации β материала NiCr в составе подслоя для объемных

Изучение характера изменения остаточных напряжений показал, что применение на границе деталь-покрытие промежуточного слоя с композитной структурой из сочетания материалов с резко отличающимися коэффициентами термического расширения позволяет существенно снизить уровень остаточных напряжений. Указывается, что композитная структура может иметь слоистый и объемно распределенный характер.

Проведенный анализ термомеханической модели показал, что при напылении вольфрама и окиси алюминия на стальные детали существует оптимальная толщина подслоя NiCr ($\delta_{нод} = 0,05 - 0,15$ мм), которая обеспечивает минимальный уровень остаточных напряжений (рис.11. а).

Установлены также тенденции изменения остаточных напряжений при использовании NiCr в промежуточном слое с объемным распределением материалов (рис.11. б).

Применение разработанной инженерной методики и предложенных рекомендаций при выборе технологических параметров нанесения покрытий из W и Al₂O₃ на детали плазмохимического оборудования позволило исключить растрескивание покрытия, снизить в 7 раз брак готовой продукции и повысить ресурс работы деталей на 85%. Фотографии элементов стола реакционных камер и микроструктуры покрытия представлены на рис.12, 13.

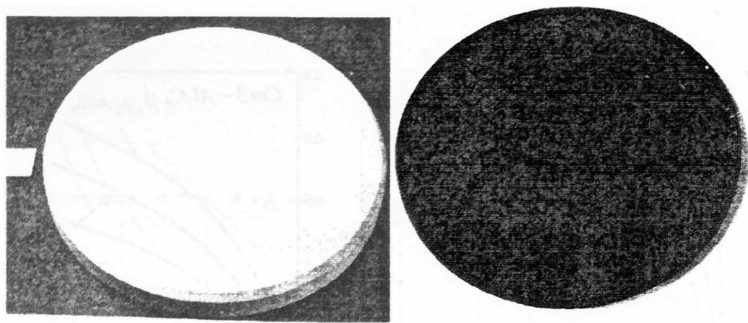


Рис.12. Элементы стола реакционных камер с покрытиями из Al_2O_3 и W

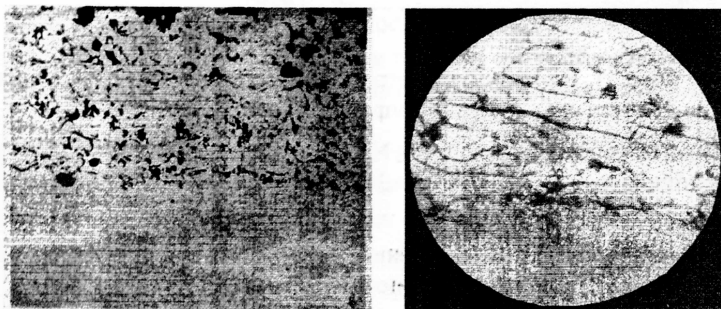


Рис.13. Микрофотография напыленного покрытия из Al_2O_3 и W $\times 125$

Выводы

1. На основе анализа пластического деформирования частицы порошка при ударе о деталь разработана методика экспериментальной оценки температуры нагрева частиц путем измерения параметров структуры покрытия на микрошлифах.

Установлено, что температуры нагрева частиц составляет 0,85-0,9 температуры плавления материала покрытия. При оценке температуры нагрева частиц порошка учитывается неоднородность состояния различных слоев частицы.

2. Разработана теплофизическая модель теплообмена в системе деталь-покрытие, где в качестве параметров процесса теплопередачи выступают температура нагрева частиц в плазме и такие технологические параметры, как: расход порошка; коэффициент использования материала; подача плазмотрона и дистанция напыления покрытия.

Установлено, что динамика изменения температур системы имеет 2 стадии. Начальная стадия соответствует нагреванию материала детали при незначительном изменении температуры покрытия и заканчивается в момент равенства температур детали и покрытия. На завершающей стадии температуры детали и покрытия одинаковы, монотонно увеличиваются до максимальной температуры, определяемой расходом порошка и подачей плазмотрона.

3. Разработана термомеханическая модель формирования остаточных напряжений в системе деталь-покрытие.

Установлено, что сцепление материалов покрытия и детали происходит на завершающей стадии процесса теплообмена в системе.

Предложена схема суммирования остаточных напряжений в системе деталь-покрытие при послойном плазменном напылении.

Сравнение с экспериментальными данными подтвердило адекватность теплофизической и термомеханической моделей и высокую точность расчетов с их помощью.

4. Разработана инженерная методика выбора технологических параметров плазменного напыления по уровню допустимых остаточных напряжений в покрытии.

а. Обоснована рациональная толщина слоя покрытия 0,2мм, создаваемого за один проход.

5. Показано, что применение композитных структур в покрытии с рациональным сочетанием коэффициентов термического расширения материалов снижает уровень остаточных напряжений.

а. Для слоистых композитных покрытий определена оптимальная толщина подслоя из материала NiCr 0,05-0,15 мм, обеспечивающая минимальный уровень остаточных напряжений.

б. Для объемных композитных покрытий установлены тенденции изменения уровня остаточных напряжений в зависимости от концентрации материала NiCr в подслое покрытия.

6. Применение разработанной инженерной методики при выборе технологических параметров нанесения покрытий из W и Al_2O_3 на детали плазмохимического оборудования позволило исключить растрескивание покрытия, снизить в 7 раз брак готовой продукции и повысить ресурс работы деталей на 85%.

Список опубликованных работ:

1. Нью Липин, Тарасов В. А, Пузряков А. Ф. Модель формирования остаточных напряжений в системе «деталь-покрытие» в процессах плазменного напыления // Сварочное производство. -2004. -№10. -С. 30-34.
2. Нью Липин, Тарасов В. А. Гипотетическая модель формирования остаточных напряжений в системе «деталь-покрытие» в процессах плазменного напыления //Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы. Тезисы докладов 2-ой международной научной конференции. Москва, -2003. – С. 20 – 21.
3. Нью Липин, Тарасов В. А. Роль остаточных напряжений в обеспечении прочности сцепления плазменного напыления деталей РКТ //Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Труды ХХІХ академических чтений по космонавтике. -2005. – С. 465 – 466.
4. L NYU, V. A. Tarasov and A. F. Puzryakov. A model of the formation of residual stresses in the component-coating system in plasma spraying processes // Welding international. -2005. -№ 19(3). -P. 238-242.
5. А.Ф. Пузряков, В.А. Тарасов, Липин Нью и Балдаев Л.Х Теплофизическая модель и расчет остаточных напряжений в газотермических покрытиях // Сварочное производство. -2005. -№12. - в печати.