

На правах рукописи

БАЛАШОВА Светлана Александровна

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПЛАЗМЕННЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирова-
ние, численные методы и комплексы программ.
05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Чащин Евгений Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Мизонов Вадим Евгеньевич,
доктор технических наук, профессор
Микипорис Юрий Анатольевич

Ведущая организация: КБ "Арматура" – филиал ГКНПЦ
им. М.В. Хруничева

Защита диссертации состоится 18 декабря 2009 г.
в 11⁰⁰ часов в ауд. Б-237 на заседании диссертационного совета
Д 212.064.03 при ГОУ ВПО «Ивановский государственный
энергетический университет им. В.И. Ленина» по адресу: 153003,
г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ, с
авторефератом можно ознакомиться на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан « 6 » ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А. А Шульпин

Общая характеристика работы

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Повышение ресурса техники возможно за счет улучшения эксплуатационных характеристик узлов, содержащих динамически взаимодействующие пары трения, путем поверхностного упрочнения деталей машин. Одним из возможных решений данной задачи является нанесение керамических покрытий, обладающих актуальными для трущихся пар положительными свойствами: высокой износостойкостью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью.

Каждый из известных методов нанесения покрытий обладает своими показателями затрат, перечнем используемых для напыления материалов и диапазоном технических показателей покрытий. Гальванические и химические методы обеспечивают с высокой эффективностью только нанесение металлических покрытий. Номенклатура изделий, обрабатываемых способами биметаллизации и вакуумной обработки, обеспечивающими высокую адгезионную прочность покрытий, ограничена массой и габаритами покрываемой поверхности. Кроме того, необходимость вакуумизации объема рабочей камеры вызывает значительное уменьшение производительности обработки. Плазменное напыление практически не имеет ограничений по габаритам напыляемых деталей и отличается высокой производительностью. Однако при напылении керамики, адгезионная прочность сцепления покрытия с основой ограничена. Поэтому метода, удовлетворяющего всем требованиям, предъявляемым к керамическим покрытиям трущихся пар, не существует. В работах А.Ф. Пузрякова и В.В. Кудинова отдается предпочтение разработке гибридных способов нанесения покрытий, объединяющих различные принципы воздействия на материал покрытия.

Повышение адгезионной прочности покрытий при плазменном напылении является актуальной задачей, которую можно решить за счет интенсификации теплового воздействия плазменного потока (ПП) на частицы напыляемого материала путем введения дополнительного источника энергии. Известен способ интенсификации теплового воздействия введением электронных пучков с длительностью импульса 10 – 100 нс и плотностью мощности $10^7 - 10^9$ Вт/см². Однако использование электронно-лучевой обработки невозможно без применения вакуумного оборудования.

Разработанные в последнее время источники лазерного излучения (ЛИ) обеспечивают генерацию импульсов с энергетическими и временными параметрами излучения, достигающими и превышающими приведенные параметры электронных пучков. При этом лазерная обработка не требует вакуумизации зоны воздействия. Это делает актуальным решение научно-технической задачи повышения трибологических характеристик пар трения за счет увеличения адгезионной прочности керамических покрытий, полученных лазерно-плазменным напылением. Решение поставленной задачи заключается в проведении, на основании современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента, комплексного исследования физико-технических основ интенсификации теплового воздействия ПП введением модулированного ЛИ.

Математическое моделирование с использованием численных методов позволит последовательно проанализировать процессы взаимодействия двух концентрированных потоков энергии, синтезировать установку для проведения лазерно-плазменного напыления и оптимизировать параметры ЛИ для достижения максимальной адгезионной прочности при минимальных энергозатратах. С помощью этой модели можно рассчитать оптимальные параметры ЛИ в узком диапазоне, что способствует сокращению времени для наладки оборудования и проведения экспериментов.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ. Целью исследования является разработка математической модели комплексного исследования физико-технических основ взаимодействия лазерного излучения с плазменным потоком для повышения трибологических характеристик пар трения за счет увеличения адгезионной прочности керамических покрытий, полученных лазерно-плазменным напылением.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Разработка математической модели, позволяющей провести анализ поглощения ЛИ плазменным потоком с температурой 6-20 кК, учитывающей влияние энергетических и пространственно-временных параметров импульсов модулированного излучения, ПП и их взаимного влияния.

2. Разработка математической модели, позволяющей определить влияние параметров ЛИ на температуру ПП, температуру частиц напыляемого материала и оценить пределы регулирования энергетических, временных и пространственных параметров ЛИ, обеспечивающих повышение эксплуатационного ресурса плазмен-

но-напыляемых керамических покрытий пар трения.

3. Определение адгезионной прочности формируемого керамического покрытия в зависимости от параметров ЛИ и начальной температуры ПП с помощью численного эксперимента.

4. Разработка методики, позволяющей определить параметры ЛИ с учетом температуры ПП, обеспечивающие при лазерно-плазменном напылении достижение максимальной адгезионной прочности керамических покрытий при одновременной минимизации непроизводительных потерь энергии ЛИ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Решение поставленных задач выполнено методами математического моделирования, применяемыми в газодинамике, лазерной физике, и описания процессов низкотемпературного плазменного воздействия.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. В ходе решения перечисленных задач автором получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен метод лазерно-плазменного напыления Al_2O_3 , заключающийся в создании плазмотроном ПП, подаче в него порошкообразного материала и нанесении напыляемого материала на поверхность подложки, причем, в отличие от известных аналогов на напыляемый материал перед нанесением на подложку воздействуют модулированным ЛИ, что приводит к возникновению оптического пробоя, в области которого поглощается до 95% энергии падающего ЛИ, до 3 раз увеличивает количество поглощенной парциальной энергии ЛИ и до 3-4 раз повышает адгезионную прочность керамических покрытий Al_2O_3 .

2. Разработана математическая модель, описывающая процесс лазерно-плазменного напыления покрытий Al_2O_3 .

3. Определены условия ввода ЛИ в ПП, обеспечивающие поглощение до 95% энергии ЛИ.

4. Разработан и реализован алгоритм расчета температуры частицы напыляемого материала при совместном воздействии на нее ЛИ и ПП с граничными условиями, включающими как ЛИ и ПП, так и потери за счет испарения и отражения излучения от поверхности частицы, без рассмотрения границы твердое тело-расплав, что учитывается в функции удельной теплоемкости.

5. Рассчитана адгезионная прочность формируемого керамического покрытия Al_2O_3 в зависимости от выбранных параметров ЛИ.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ результатов, полученных в диссертации, заключается в разработке методики, позволяющей определить параметры ЛИ с учетом температуры ПП, обеспечи-

вающие при лазерно-плазменном напылении достижение максимальной адгезионной прочности керамических покрытий при одновременной минимизации непроизводительных потерь энергии ЛИ.

Разработано программное средство для оценки температурного состояния плазменно-напыляемой частицы в зависимости от параметров ЛИ и ПП (свидетельство на регистрацию № 12240 от 29.01.2009 г.).

Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы для разработки новых плазмотронов для лазерно-плазменного нанесения покрытий, состоящих из корпуса, катода, анодного блока, сопла, оптических элементов для фокусировки и ввода лазерного излучения в ПП, систем подвода порошка напыляемого материала и плазмообразующего газа, и отличающихся тем, что оптические элементы для фокусировки и ввода ЛИ в ПП установлены на внешней стороне корпуса, с возможностью пересечения оптической оси ЛИ и оси ПП на выходе его из сопла (патент на полезную модель № 75391 от 01.04.08 г.).

Показана возможность увеличения прочности сцепления покрытия Al_2O_3 с подложкой до 3-4 раз с 30-40 МПа до 100-150 МПа.

Предложены научно-обоснованные рациональные режимы лазерно-плазменного напыления, обеспечивающие повышение относительной прочности сцепления покрытия Al_2O_3 с подложкой.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Программное средство "Расчет температуры частиц при воздействии плазменного потока" использовалось для определения области рациональных режимов лазерно-плазменного напыления покрытия из Al_2O_3 пар трения для оборудования фирмы "НОВОТЕХ".

Пары трения гидравлических узлов машин с керамическим покрытием из порошка Al_2O_3 использовались в ООО "Контейнекс-Монолит", эксплуатация этих узлов подтвердила увеличение ресурса в 1,8-2,0 раза за счет повышения адгезионной прочности.

Результаты исследований используются при разработке технологических процессов напыления керамических покрытий, повышающих износостойкость пар трения, входящих в состав гидроцилиндров на предприятии ФГУП "ВНИИ "Сигнал".

АПРОБАЦИЯ. По теме диссертации получен 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство на регистрацию программного средства. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались на международных конференциях: XXXIV Гагаринские чтения, Москва, 2008-2009гг.; "Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и

технологической оснастки", С.–Петербург, 15-18 апреля 2008г.; "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности", С.–Петербург, 28-30 апреля 2008г.; "XVI Туполевские чтения", Казань, 28 – 29 мая 2008г., "Молодежь и наука: реальность и будущее", г.Невинномысск, 3 марта 2009 г., XV Бенардосовские чтения, г. Иваново, 27-29 мая 2009 г.; а также на научно-практических конференциях: III и IV научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых, Ковров, 2008-2009гг.; молодежной школе-семинаре "Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства", г. Владимир, ноябрь 2008г.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации лично автором и в соавторстве опубликовано 16 работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, получен 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство об отраслевой регистрации разработки.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения, она содержит 124 листа, 39 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 103 названий.

Содержание работы

ВО ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ рассмотрены предпосылки, обусловившие необходимость проведения разработки, исследования и обоснования математической модели взаимодействия двух концентрированных потоков энергии в виде ЛИ и ПП. Проведены исследования методов напыления для повышения эксплуатационных характеристик пар трения узлов и агрегатов машин. Определены роль и место газотермических методов напыления при решении задач обеспечения показателей безотказности и долговечности техники. Выполнен анализ способов нанесения керамических покрытий. Отмечено, что повышение теплового воздействия на частицу напыляемого материала приведет к увеличению адгезионной прочности. Однако решение этой задачи традиционными методами может сопровождаться значительным ростом затрат на оборудование, невысокой производительностью метода и ограничениями на размеры напыляемых деталей.

Показано, что разработка гибридных способов нанесения покрытий является наиболее актуальным направлением развития поверхностного упрочнения, которое нельзя осуществить без математического моделирования сложных физических процессов взаимодействия, объединяющих различные принципы воздействия

на материал покрытия.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ методом конечных приращений исследована зависимость температур частиц мелкодисперсной фазы от параметров ПП. Анализ результатов вычислительного эксперимента показал, что для увеличения прочности сцепления плазменно напыляемых керамических покрытий необходимо интенсифицировать тепловое воздействие ПП на частицу напыляемого порошка введением модулированного ЛИ. Показано, что в случае образования ЛИ оптического пробоя и совмещения его зоны с ПП в области оптического пробоя поглощается до 95 % энергии падающего ЛИ:

$$\alpha_{ис} = \frac{16\pi^2}{3\sqrt{3}} \frac{e^6 Z^2 k T n}{c \cdot h^4 v^3} \exp\left(-\frac{\varepsilon^* - hv}{kT}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{hv}{kT}\right)\right),$$

где c – скорость света; v – частота излучения; Z – заряд иона; ε^* – потенциал ионизации атома; T – температура ПП; n – концентрация в нем атомов; k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка.

Совмещение ПП в зоне его выхода из плазмотрона с областью оптического пробоя обеспечивает повышение температуры плазмы, а, следовательно, и напыляемого материала, за счет поглощения энергии ЛИ. По результатам проведенных исследований математического объекта разработана укрупненная модель взаимодействия ЛИ с ПП. Определено, что наиболее подходящим режимом распространения фронта ионизации для поперечного прогрева ПП является режим СДВ поглощения, который реализуется при умеренных значениях интенсивности ЛИ, а скорость ее распространения стабильна и задается интенсивностью излучения:

$$V_{СДВ} = (2(\gamma^2 - 1))^{1/3} \left(\frac{I}{\rho_0}\right)^{1/3},$$

где I – интенсивность ЛИ; ρ_0 – плотность газовой среды; γ – показатель адиабаты газа.

Обязательным условием возникновения пробоя является нарастание концентрации возбужденных электронов при превышении частоты ионизации над частотой диффузионных потерь

$$I = c\varepsilon\varepsilon_0 E^2,$$

при напряженности электрической составляющей электромагнитного поля квантов ЛИ

$$E = \omega / (2\pi v / a \cdot n \cdot \sigma \cdot e) [m_e \varepsilon^* / 3]^{1/2},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость вещества, ε_0 – диэлектрическая постоянная, a – характерный размер области воздействия луча,

ω - круговая частота излучения, σ – сечение взаимодействия электрон-атом.

Определены условия введения ЛИ в ПП. Показано, что наиболее рациональным режимом распространения фронта ионизации для поперечного прогрева ПП является режим СДВ поглощения, который реализуется при значениях интенсивности ЛИ до 1 ГВт/см^2 , длительность импульса - порядка 100 нс, при этом начальная температура ПП - не менее 10 кК. Получена зависимость пороговой интенсивности пробоя в ПП от начальной температуры плазмы на выходе из плазмотрона.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ разработана модель взаимодействия ЛИ с ПП, содержащим частицы напыляемого материала. Исходя из допущения, что со всех сторон на частицу оказывается равномерное воздействие по причине малых размеров; форма частицы условно принята сферической. Процессы нагрева и плавления в конденсированной среде рассмотрены в рамках единой расчетной области без разделения на твердое тело и расплав. Для моделирования области нагрева с плавлением использованы уравнения теплопроводности:

$$\partial T / \partial t + (\vec{V}, \text{grad} T) = a(T) \Delta T,$$

где $a(T) = \lambda_T(T) / c(T) \rho$ - температуропроводность; $\lambda_T(T)$ – теплопроводность; ρ - плотность материала; \vec{V} – вектор скорости фронта испарения; $c(T)$ – эффективная сглаженная функция удельной теплоемкости $c(T)$, которая, кроме сглаживания перепада в значении при фазовом переходе «твердое тело – расплав», включает в себя удельную энергию плавления. Граничные условия на поверхности поглощения-испарения:

$$-\lambda_T \frac{\partial T}{\partial n} = q_T(t),$$

$q_T(t) = (1 - R(T_S)) \cdot I_{\perp}(r, t) - I_V(T(r)) + q_V$ заданы с учетом $I_{\perp}(r, t)$ - распределения интенсивности падающего излучения в плоскости, нормальной оси луча,

$$I_V = \alpha_1(M_a) \frac{P_H(T_S)}{R_U T_S} M_a \sqrt{\left(\frac{5}{3} \alpha_2(M_a) \frac{R_U T_S}{M} \right)^3 M_a (1 + 3M_a^2) + \dot{m}(T_S, M_a) \frac{L_V}{M}}$$

– потерь плотности мощности на испарение, R – отражательной способности поверхности, учитывающей ее температуру, $q_V = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_S^4 - T_n^4)$ – лучистого обмена между поверхностью частицы и ПП.

По неявной конечно-разностной схеме разработан и реализован алгоритм, представленный на рис. 1.

Результаты вычислительного эксперимента показали, что параметры ЛИ, обеспечивающие возникновение оптического пробоя и нагрев частицы порошка Al_2O_3 до температур 3-3,5 кК при поверхностном испарении 20-30% (рис. 2), должны лежать в пределах: длительность импульса ЛИ 100-300 нс, энергия импульса 0,2-0,4 Дж. Показано, что при воздействии импульсов ЛИ длительностью выше 400 нс происходит полное испарение частицы, воздействие импульсов ЛИ с длительностью 10-60 нс и менее вызывает испарение частицы на 70-80%.

Так как промышленно выпускаемые лазеры имеют отклонения от требуемых временных и энергетических параметров, в качестве источника ЛИ необходимо использовать Nd: YAG – лазер с линейным четырехзеркальным резонатором, который полностью удовлетворяет условиям лазерно-плазменного напыления. Для лазерно-плазменного напыления подходит установка «Киев - 7» с плазматроном ПУН – 1, обеспечивающая температуру плазмы в пределах 6 – 20 кК.

С использованием рекомендаций главы 1 по способу введения ЛИ в ПП разработан комбинированный узел для лазерно-плазменного напыления и проведены прочностные расчеты для элементов конструкции блока совмещения ЛИ с ПП.

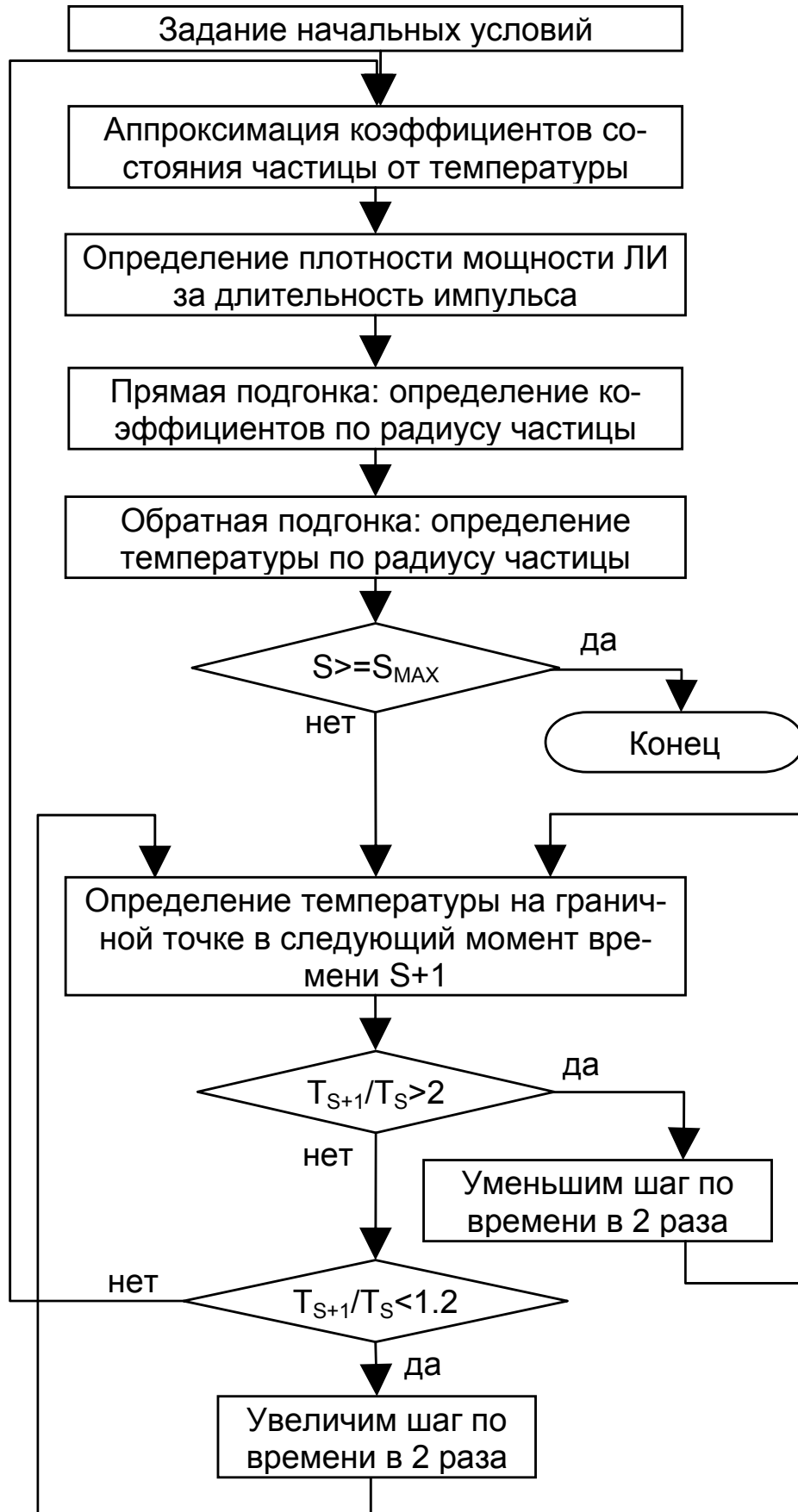


Рис. 1. Блок-схема расчета температуры частицы

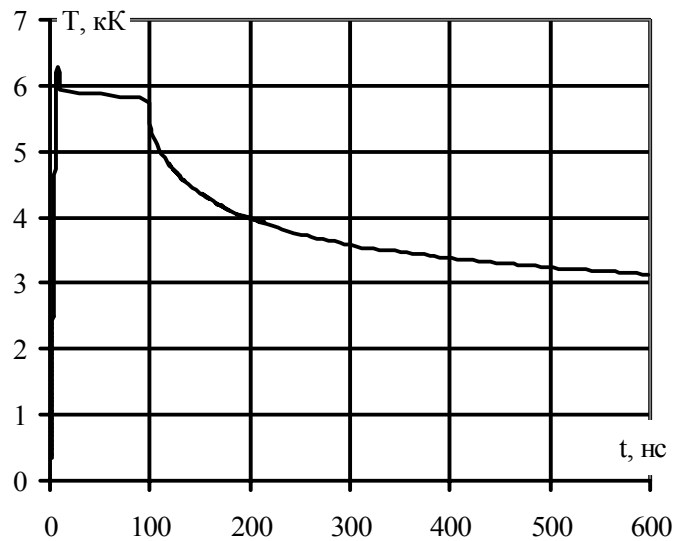


Рис. 2. Зависимость изменения температуры T поверхности частицы Al_2O_3 от времени t при длительности импульса ЛИ 100 нс и энергии 0,2 Дж

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ исследовано влияние температуры нагрева и скорости полета частицы при лазерно-плазменном напылении на свойства получаемых керамических покрытий. Рассчитана относительная прочность сцепления покрытия с подложкой:

$$N(t)/N_0 = 1 - \exp[-(v \cdot t) / \exp(E_a / k \cdot T_k)],$$

где v – частота собственных колебаний атомов, находящихся в контакте; t – время затвердевания частицы порошка; E_a – энергия активации поверхности подложки, $T_k = [K_\varepsilon \cdot (T_q - T_0) / (K_\varepsilon + \Phi(\alpha_k))] + T_0$ – температура в зоне контакта, T_q и T_0 – температура частицы и подложки в момент осаждения покрытия; $\Phi(\alpha_k)$ – функция интеграла вероятности; $K_\varepsilon = (\lambda_1 / \lambda_2) \cdot \sqrt{a_2 / a_1}$ – критерий тепловой активности частицы по отношению к подложке; λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности порошка и подложки; a_1 и a_2 – коэффициенты температуропроводности порошка и подложки.

Результаты расчета представлены на рис. 3.

Анализ результатов вычислительного эксперимента показал наличие максимального значения относительной прочности сцепления, которое, применительно к частицам диаметром до 60 мкм. достигается при нагреве напыляемых частиц от температуры 3 кК. Принимая за критерий оптимизации отсутствие непроизводительных потерь дополнительной энергии модулированного ЛИ, энергетические и временные параметры ЛИ должны удовлетворять следующим значениям: энергия импульса – 0,2 – 0,4 Дж, длительность импульса

ЛИ – 100 – 300 нс. (рис. 3). При этом адгезионная прочность увеличивается до 3 – 4 раз по сравнению с плазменным напылением с 30-40 МПа до 100-150 МПа.

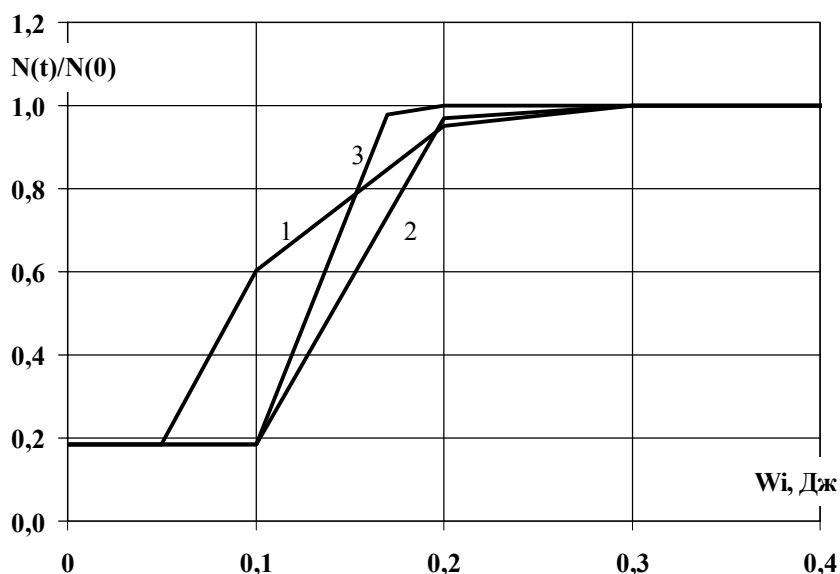


Рис. 3. Относительная прочность сцепления частиц с подложкой $N(t)/N_0$ в зависимости от энергии импульса ЛИ: 1) длительность импульса 100 нс, 2) 200 нс; 3) 300 нс

Введение ЛИ в ПП, содержащий частицы напыляемого материала, способствует нагреву и ускорению частицы. Скорость частицы рассчитана как

$$v_{\text{ч}} = 1,4 \cdot v_{\text{п}}^{0,7} / d_{\text{ч}}^{0,4} \cdot \rho_{\text{ч}}^{0,5},$$

что в приближении кинетической энергии движения составляет

$$v_{\text{ч}} = (2W_{\text{к}} / \rho_{\text{ч}} V)^{1/2},$$

где $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы; $v_{\text{п}}$ – скорость плазмы; $V_{\text{ч}}$ – объем частицы; $W_{\text{к}}$ – кинетическая энергия частицы.

В результате оценки скорость частицы при воздействии на нее СДВ увеличивается до 800-820 м/с, что превышает значение 300-310 м/с при плазменном напылении. Это приводит к увеличению ударного давления:

$$P_{\text{у}} = 0,5 \cdot \mu \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot c_3 \cdot v_{\text{ч}},$$

где μ – коэффициент жесткости частицы; c_3 – скорость звука в жидкости,

и к образованию физико-химического взаимодействия покрытия с подложкой при отсутствии подогрева основы. С учетом увеличения скорости напыляемых частиц в 2,5-2,7 раза увеличится и скорость напыления. Это приведет к локальному нагреву поверхности дета-

ли и, как следствие, к отсутствию ее коробления.

При увеличении скорости и температуры частиц напыляемого материала существует возможность значительного увеличения производительности метода, уменьшения пористости и увеличения прочности сцепления покрытия с подложкой. Увеличение относительной адгезионной прочности до 3-4 раз позволит уменьшить массогабаритные показатели деталей до 2,0-2,5 раз.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ приведены результаты вычислительного эксперимента, выполненного численными методами, дана оценка относительной прочности сцепления напыляемых частиц с подложкой, по результатам математического моделирования взаимодействия ПП и ЛИ, а также по результатам математического моделирования взаимодействия ЛИ с ПП, содержащим мелкодисперсную фазу. Разработана методика выбора параметров ЛИ, обеспечивающих получение максимальной адгезионной прочности плазменно напыляемых покрытий, позволяющая: определять энергетические и пространственно-временные характеристики импульсов ЛИ в зависимости от параметров ПП, которые обеспечивают оптический пробой с формированием фронта поглощения в режиме СДВ; определять предельно допустимые температуры нагрева частиц напыляемого материала, содержащихся в ПП, в зависимости от его температуры, параметров ЛИ и обеспечивающей поверхностное испарение частиц не более 30 %; исследовать влияние параметров ЛИ на адгезионную прочность формируемых керамических покрытий; оптимизировать параметры ЛИ и ПП из условия достижения адгезионной прочности покрытия 100-150 МПа при минимизации непроизводительных потерь энергии ЛИ.

По предложенной методике определены параметры воздействия установки лазерно-плазменного напыления на базе комплекса «Киев-7» и построен график, представленный на рис. 4, на котором изображена область оптимальных режимов процесса лазерно-плазменного напыления для достижения адгезионной прочности 100-150 МПа при максимальной эффективности использования энергии ЛИ. Приведены результаты экспериментов, подтверждающих адекватность разработанной математической модели.

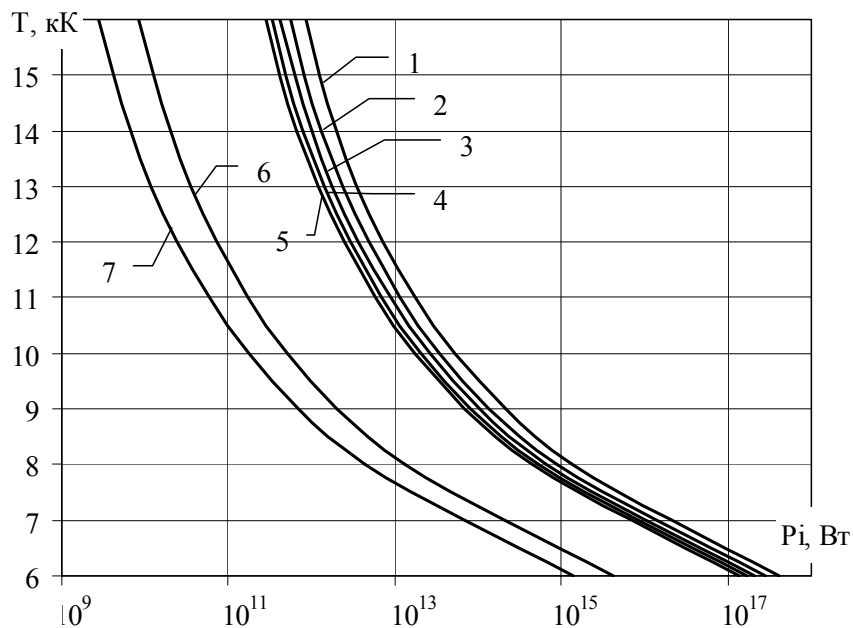


Рис. 4. Область оптимальных режимов реализации лазерно-плазменного напыления: 1)- длительность импульса 100 нс, 2)- 150 нс, 3)- 200нс, 4)- 250 нс, 5)- 300 нс для ЛИ с диаметром 1 мм; 6)- длительность импульса 100 нс и 7)- 300 нс для ЛИ с диаметром 10 мм

ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан метод и плазматрон для лазерно-плазменного напыления керамических покрытий.

2. Разработана математическая модель, описывающая процесс лазерно-плазменного напыления покрытий Al_2O_3 .

3. Определены условия ввода ЛИ в ПП, обеспечивающие поглощение до 95% энергии ЛИ.

4. Определен оптимальный режим распространения фронта ионизации - режим СДВ поглощения, который реализуется при значениях интенсивности ЛИ до 1 ГВт/см^2 , длительность импульса порядка 100 нс, при этом начальная температура ПП не менее 10 кК.

5. Установлена зависимость пороговой интенсивности пробоя в ПП от начальной температуры плазмы на выходе из плазматрона.

6. Разработан и реализован алгоритм расчета температуры частицы напыляемого материала, показавший, что частица нагревается до значений порядка 3 кК, при этом энергетические и пространственно-временные параметры импульса ЛИ должны находиться в пределах: длительность импульса 100-300 нс, энергия импульса 0,2-0,4 Дж, диаметр луча 1-10 мм.

7. С помощью численного эксперимента определена относительная прочность сцепления формируемого керамического покры-

тия Al_2O_3 со стальной подложкой 12Х18Н9Т при лазерно-плазменном напылении, которая увеличивается до 3-4 раз и достигает максимального значения при использовании импульсов ЛИ с энергией 0,3-035 Дж.

8. Разработана методики, позволяющая определить параметры ЛИ с учетом температуры ПП, обеспечивающие при лазерно-плазменном напылении достижение максимальной адгезионной прочности керамических покрытий при одновременной минимизации непроизводительных потерь энергии ЛИ.

9. Предложены научно-обоснованные рациональные режимы лазерно-плазменного напыления, обеспечивающие повышение относительной прочности сцепления покрытия Al_2O_3 с подложкой.

Список литературы, опубликованной по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК:

1. Плазмотрон для лазерно-плазменного нанесения покрытий [Текст]: пат.№75391 Рос.Федерация: МПК С 23 С 4/12, Н 05 Н 1/42/ Курганов И.А., Митрофанов А.А., Федин А.В, Чащин Е.А., Шилов И.В., Балашова С.А.; заявитель и патентообладатель ООО "Лазерно-плазменные технологии".- №2008112130; заявл. 01.04.08; опубл. 10.08.08, Бюл. №22. – ил.

2. Свид-во об отраслевой регистрации разработки. Расчет температуры частицы при воздействии плазменного потока [Текст]/ С.А.Балашова, Е.А.Чащин, П.В.Воротнев (РФ). - № 12240; заявл. 29.01.2009г; опубл. 11.02.2009.

3. Балашова, С.А. Продление ресурса оборудования для наземных отработок космических аппаратов [Текст] / С.А.Балашова, Е.А.Чащин, И.В.Шилов, А.А.Митрофанов // Информация и космос. – 2009. – №2. – С.115-119.

4. Балашова, С.А. Повышение эксплуатационных характеристик керамических покрытий [Текст] / С.А.Балашова, Е.А.Чащин, И.В.Шилов, А.А.Митрофанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – №2 (38). – Вып. 1. – С. 72-79.

5. Балашова, С.А. Повышение эксплуатационных свойств покрытий, нанесенных лазерно-плазменным напылением [Текст] / Е.А. Чащин, С.А. Балашова // Приводная техника.-2009.- № 3 (79).- С.37-40.

Публикации в других изданиях:

6. Балашова, С.А. Взаимодействие импульсного лазерного излучения с плазменным потоком, содержащим мелкодисперсную

фазу [Текст] / Е.А. Чащин, И.В. Шилов, С.А. Балашова // Материалы 10-й международной научно-практической конференции. Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: Ч. 1.- С.-Пб., 2008. – С. 312.

7. Балашова, С.А. Лазерно-плазменное напыление керамических покрытий [Текст] / Е.А. Чащин, И.В. Шилов, С.А. Балашова // XXXIV Гагаринские чтения. Международная молодёжная научная конференция: сборник научных трудов: Ч. 3.- М., С.126-127.

8. Балашова, С.А. Модель взаимодействия лазерного излучения с плазменным потоком, содержащим мелкодисперсную фазу [Текст] / С.А. Балашова, Е.А. Чащин, И.В. Шилов, А.А. Митрофанов // Сб. трудов пятой международной научно-практической конференции. Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности; под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко. - С.-Пб. – Т.12. – 2008. - С. 151 - 152.

9. Балашова, С.А. Модель теплового состояния мелкодисперсной частицы, находящейся под совместным воздействием плазменного потока и лазерного излучения [Текст] / С.А. Балашова, М.А. Кузнецов, А.А. Митрофанов, И.В. Шилов // Материалы III научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых: Ч 2.- Ковров: ГОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярева", 2008. - С.13-18.

10. Балашова, С.А. Плазмотрон для лазерно-плазменной обработки [Текст] / С.А. Балашова, А.В. Федин, Е.А. Чащин, А.А. Митрофанов, И.В. Шилов. // Материалы III научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых: Ч 2.- Ковров: ГОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярева", 2008. – С.3-7.

11. Балашова, С.А. Выбор источника излучения для лазерно-плазменного напыления / Е.А. Чащин, И.В. Шилов, С.А. Балашова // Научно-технический сборник к 100-летию со дня рождения Д.Ф. Устинова, 2008. – С. 56-61.

12. Балашова, С.А. Источник лазерного излучения для лазерно-плазменного нанесения покрытий [Текст] / Е.А. Чащин, И.В. Шилов, С.А. Балашова // Молодежная школа-семинар "Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства". – ВлГУ, – 2008. – С.29-30.

13. Балашова, С.А. Влияние параметров лазерного излучения на свойства покрытий при лазерно-плазменном напылении [Текст] / С.А. Балашова, Е.А. Чащин, И.В. Шилов // II Международная научно-практическая конференция "Молодежь и наука: реальность и будущее". – Невинномысск, – 2009. – С.261-263.

14. Балашова, С.А. Влияние лазерно-плазменного напыления на прочностные характеристики получаемых покрытий [Текст] / С.А. Балашова, Е.А. Чащин // Материалы IV научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых: Ч 1.- Ковров: ГОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярева", 2009. – С.13-22.

15. Балашова, С.А. Влияние параметров лазерного излучения на прочность сцепления плазменно напыляемых покрытий [Текст] / С.А. Балашова, Е.А. Чащин. // Материалы международной научно-технической конференции "XV Бенардосовские чтения": Ч 1.- Иваново: ГОУ ВПО "ИГЭУ им. В.И. Ленина", 2009. - С.94-95.

16. Балашова, С.А. Выбор рабочих режимов процесса лазерно-плазменного напыления [Текст] / Е.А. Чащин, С.А. Балашова // XXXV Гагаринские чтения: международная молодёжная научная конференция: Ч 3. – М., С.78-79.

Изд. лиц. № 020354 от 05.06.97 г. Подписано в печать. 05.11. 2009 г. Формат 60x84/16. Бумага писчая № 1. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Усл.-печ. л. 0,93. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 751.

*Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ковровская государственная технологическая академия имени
В.А.Дегтярева».
601910, Ковров, ул. Маяковского, 19.*