

На правах рукописи

КРАСКО АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ
СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ
ПОКРЫТИЯМИ В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО
НАПЫЛЕНИЯ И АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель:

Ковалев Артем Александрович, кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Ерофеев Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им.
А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), г. Москва

Перевислов Сергей Николаевич, доктор технических наук, начальник
лаборатории федерального государственного унитарного предприятия
«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных
материалов «Прометей» имени И.В. Горынина национального
исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский
институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»), г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Воронежский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «ВГТУ»), г. Воронеж

Защита диссертации состоится «15» июня 2022 г. в 14:30 на заседании
диссертационного совета 24.2.331.02 в Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью
организации, просим направлять на имя ученого секретаря Диссертационного
Совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана,
на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Богданов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Высокие требования, предъявляемые к эксплуатационно-техническим характеристикам современной технологической оснастки, приводят к необходимости обеспечения защиты рабочих поверхностей деталей станочных приспособлений (СП) от существенного износа, который обусловлен, в частности, интенсивным изнашиванием установочных элементов СП под воздействием значительных силовых и температурных факторов в процессе механической обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов при изготовлении изделий авиа- и двигателестроения.

В настоящее время к наиболее перспективным технологическим методам защиты поверхностей деталей СП относят нанесение износостойких покрытий, в частности, из карбида вольфрама высокоскоростным газопламенным напылением (ВГН), являющимся одним из способов газотермического напыления. Преимуществами способа ВГН является низкое температурное воздействие на напыляемую поверхность заготовки, универсальность, выраженная в возможности обработки поверхностей изделий различных размеров, форм и широкой номенклатурой напыляемых материалов, а также возможность увеличения ресурса СП путем восстановления покрытия. Высокая гибкость ВГН, обусловленная низкой трудоёмкостью переналадки при замене напыляемого материала и обрабатываемых изделий, позволяет применять данный способ для защиты рабочих поверхностей деталей специальных и групповых приспособлений.

Проблема нанесения рассматриваемых износостойких покрытий способом ВГН связана с образованием дефектов покрытий (отслоения, трещины, сколы) в процессе изготовления деталей СП, вызванных низкими значениями прочности сцепления ($\sigma_{\text{сц}}$) на этапе нанесения и последующей абразивной обработки. Например, значения $\sigma_{\text{сц}}$ покрытий из материала WC-Co-Cr, полученных способом ВГН на деталях СП, находятся в диапазоне от 58 до 140 МПа. В результате последующего шлифования $\sigma_{\text{сц}}$ уменьшается в среднем на 15-40%, что в 30-40% случаев приводит к образованию дефектов в покрытиях с изначально низкими значениями $\sigma_{\text{сц}}$. Анализ приведенных значений показывает необходимость обеспечения стабильно высоких значений прочности сцепления ($\sigma_{\text{сц}}$) на этапах технологического процесса, связанных с нанесением и обработкой покрытий.

Несмотря на выполненные исследования, посвященные изучению закономерностей формирования прочности сцепления, в настоящее время отсутствует методика разработки технологических процессов изготовления изделий с износостойкими покрытиями, полученными способом ВГН, учитывающая влияние показателей качества поверхности заготовки и покрытия, а также технологических параметров и режимов операций подготовки, напыления и абразивной обработки на формируемую прочность сцепления.

В этой связи представляется актуальной, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на повышение выхода годных деталей СП с износостойкими покрытиями, посредством разработки инженерной методики принятия технологических решений, направленных на повышение и увеличение стабильности значений прочности сцепления покрытий, полученных способом ВГН с последующей абразивной обработкой.

Объект исследования – технологический процесс изготовления изделий с газотермическими покрытиями.

Предмет исследования – взаимосвязь показателей качества изделий с газотермическими покрытиями с технологическими параметрами и режимами операций технологического процесса.

Целью диссертационной работы является разработка инженерной методики выбора технологических решений, обеспечивающих повышение и стабильность значений прочности сцепления износостойких покрытий, с целью увеличения выхода годных деталей станочных приспособлений, изготавливаемых с использованием высокоскоростного газопламенного напыления и абразивной обработки.

Основные задачи исследования:

1. Исследование закономерностей формирования прочности сцепления покрытий, полученных способом ВГН и абразивной обработкой.

2. Разработка расчетно-экспериментальной методики определения технологических параметров и режимов операции ВГН, обеспечивающих стабильность высоких значений прочности сцепления формируемых покрытий.

3. Определение режимов операции шлифования, обеспечивающих минимальное изменение значений прочности сцепления обрабатываемых покрытий.

4. Разработка инженерной методики выбора технологических решений, обеспечивающих повышение и стабильность значений прочности сцепления износостойких покрытий, полученных способом ВГН с последующей абразивной обработкой в процессе изготовления деталей СП.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось посредством теоретических и экспериментальных исследований. При решении теоретических задач использованы положения технологии машиностроения, в частности теории направленного формирования показателей качества, теории механики сплошных сред и численных методов с использованием специализированных средств моделирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием следующего оборудования: установка для ВГН, универсальная испытательная машина, плоскошлифовальный станок, профилометр, машина трения и лабораторные весы.

Научная новизна:

1. Формализована функциональная зависимость, учитывающая влияние показателей качества поверхности заготовки и покрытия, а также технологических параметров и режимов операций ВГН и абразивной обработки на прочность сцепления формируемых покрытий.

2. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения технологических параметров и режимов операций ВГН и абразивной обработки, обеспечивающих повышение и стабильность значений прочности сцепления износостойких покрытий.

3. Формализован подход к созданию базы данных значений прочности сцепления покрытий, полученных газотермическим напылением, в зависимости от выбранных технологических параметров и режимов операций подготовки, напыления и механической обработки покрытий.

Практическая значимость работы состоит в разработанной инженерной методике проектирования технологических процессов изготовления изделий

машиностроения с износостойкими газотермическими покрытиями, включающей определение состава операций, выбор технологических параметров и режимов ВГН и абразивной обработки, обеспечивающих повышение и стабильность значений прочности сцепления формируемых покрытий.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертационной работе автором, подтверждена обеспечением высоких и стабильных значений прочности сцепления износостойких покрытий, изготовленных с применением технологических параметров и режимов ВГН и абразивной обработки, полученных на основе разработанной расчетно-экспериментальной методики, а также результатами производственного внедрения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установленная зависимость прочности сцепления покрытий, полученных способом ВГН с последующей абразивной обработкой, от параметров технологического процесса изготавливаемых деталей.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению технологических параметров и режимов операций ВГН и абразивной обработки, обеспечивающих стабильность высоких значений прочности сцепления формируемых покрытий.

3. Разработанная инженерная методика выбора технологических решений, обеспечивающих повышение количества годных деталей СП, изготавливаемых с использованием ВГН и абразивной обработки.

Личный вклад автора. Автором проведен анализ особенностей изготовления деталей СП с износостойкими покрытиями, полученными ВГН и абразивной обработкой, на основании которого показана необходимость обеспечения повышения и стабильности значений прочности сцепления с целью увеличения выхода годной продукции. На основе теории направленного формирования показателей качества автором выполнен анализ закономерностей обеспечения значений прочности сцепления газотермических покрытий. В результате анализа получены функциональные зависимости, учитывающие влияние показателей качества поверхности заготовки и покрытия, технологических параметров и режимов операций подготовки, напыления и абразивной обработки на прочность сцепления покрытий. Автором выявлены технологические параметры и режимы операций ВГН и абразивной обработки, обеспечивающие стабильность высоких значений прочности сцепления покрытий, а также предложены регрессионные зависимости для их определения. Автором разработана инженерная методика выбора рациональных технологических решений с учетом направленного формирования прочности сцепления износостойких покрытий, полученных ВГН и абразивной обработкой.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр технологии машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана и цифровых и аддитивных технологий РТУ МИРЭА. Москва, 2019-2022; на III-й международной научно-практической конференции «Наука и практика». Санкт-Петербург, 2020; на 10-й Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология». Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020; на VII Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», ИМАШ РАН. Москва, 2021.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы внедрены в АО «Плакарт» и ЗАО ПК «СтанкоПресс», что подтверждено соответствующими актами.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 7 научных работах, из них 4 в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, общим объемом 2,18 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка используемой литературы из 136 наименований. Содержит 137 страниц, в том числе 49 иллюстраций и 27 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи работы, показана её актуальность, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В Главе 1 проведен анализ особенностей изготовления деталей СП с износостойкими покрытиями, получаемыми способом ВГН с последующей абразивной обработкой, и сформулирована задача разработки инженерной методики выбора технологических решений, обеспечивающих повышение и стабильность значений прочности сцепления формируемых покрытий.

С целью обеспечения возрастающих требований к эксплуатационно-техническим характеристикам технологической оснастки на сегодняшний момент наибольшее применение нашли технологические методы защиты рабочих поверхностей деталей СП посредством нанесения износостойких покрытий. На основании работ Пузрякова А.Ф., Говорова И.В., Davis J.R. и др. можно сделать вывод о том, что в условиях серийного производства на чистовых операциях механической обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов перспективным методом защиты рабочих поверхностей деталей СП является газотермическое напыление износостойких покрытий, в частности способами высокоскоростного газопламенного и плазменного напыления.

В работах Войнова Б.А., Рыжкова Э.В., Самсонова Г.В., и др. установлено, что в качестве износостойких материалов для защиты рабочих поверхностей деталей СП указанными способами наибольшую износостойкость показали покрытия на основе карбида вольфрама в связке с кобальтом (WC-Co). Однако, вследствие высоких температур при плазменном напылении существует проблема разрушения структуры WC-Co. В связи с этим, в качестве способа напыления предлагается применять ВГН.

В работах Кудинова В.В., Борвинка В.А., Боброва Г.В., Борисова Ю.С., Хасуи А., Ильющенко А.Ф., Пузрякова А.Ф., Кравченко И.Н., Балдаева Л.Х., Davis J.R., Pierre L.F., Tillmann W. и др. показано, что образование таких дефектов, как отслоения, трещины и сколы в процессе механической обработки газотермических покрытий, зависит от адгезионной и когезионной прочности, а также от возникающих остаточных напряжений, формирующих прочность сцепления покрытий ($\sigma_{сц}$) на этапах подготовки поверхности заготовки и напыления.

Анализ указанных работ и производственного опыта показал, что в настоящее время существует проблема обеспечения стабильно высоких значений $\sigma_{сц}$, что приводит к образованию дефектов покрытия в процессе последующей механической обработки. Указанная проблема вызвана отсутствием обобщённой методики и практических рекомендаций, позволяющих выбрать технологические параметры и режимы операций подготовки поверхности заготовки, напыления и

механической обработки покрытий, в частности, температуры нагрева частиц и дистанции напыления, позволяющих обеспечить наибольшее значение $\sigma_{\text{сц}}$ при напылении порошком определенного фракционного состава.

В работах Ящерицина П.И., Хейфеца М.Л., Рыжова Э.В., Сулова А.Г., Безъязычного В.Ф., Дальского А.М., Васильева А.С., Кондакова А.И. и др. приводятся основные положения теории технологической наследственности и управления показателями качества в процессе изготовления изделий машиностроения. Анализ указанных работ показал возможность решения задачи повышения $\sigma_{\text{сц}}$ износостойких покрытий посредством направленного формирования показателей качества в процессе изготовления деталей СП.

Исходя из проведенного анализа представляется актуальной задача разработки инженерной методики выбора технологических решений, обеспечивающих повышение и стабильность значений $\sigma_{\text{сц}}$ износостойких покрытий, с целью увеличения выхода годных деталей СП, изготавливаемых с использованием ВГН и абразивной обработки.

Глава 2 посвящена исследованию закономерностей направленного формирования прочности сцепления износостойких покрытий в процессе изготовления деталей СП, а также разработке расчетной методики определения технологических параметров и режимов ВГН, обеспечивающих стабильность высоких значений прочности сцепления формируемых покрытий.

С целью реализации стратегии направленного формирования показателей качества необходимо формализовать зависимости, раскрывающие влияние параметров ТП на формируемую прочность сцепления ($\sigma_{\text{сц}}$) износостойких газотермических покрытий рабочих поверхностей деталей СП. В функциональном виде зависимость i -ого показателя качества, в частности $\sigma_{\text{сц}}$, сформированного или измененного на j -й операции, от параметров ТП представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} (\text{ПК}_i)_j &= f \left[(\text{ПК}_i)_{j-1}, \{ \text{ПК}_k \}_j, \{ \text{ПК}_u \}_l, \{ Z \}_j, \{ K_2 \}_j, \{ K_3 \}_j \right], \\ i &= 1, \dots, n, \quad k, u = 1, \dots, (n-1), \quad 1 \leq l \leq (j-1), \end{aligned} \quad (1)$$

где $(\text{ПК}_i)_j$ – i -й показатель качества, формируемый на j -й операции ТП; $(\text{ПК}_i)_{j-1}$ – i -й показатель качества, полученный на предыдущей операции ТП; $\{ \text{ПК}_k \}_j$ – множество k -х показателей качества, формируемых на j -й операции ТП и оказывающих влияние на i -й показатель качества; $\{ \text{ПК}_u \}_l$ – множество u -х показателей качества, сформированных на l -й операции ТП и оказывающих влияние на i -й показатель качества на j -й операции; $\{ Z \}_j$ – множество технологических параметров и режимов j -й операции ТП; $\{ K_2 \}_j$ – условия реализации метода воздействия (обработки) j -й операции ТП; $\{ K_3 \}_j$ – воздействия случайного характера j -й операции ТП; n – число показателей качества.

Анализ взаимного влияния показателей качества газотермических покрытий показал, что непосредственное влияние на $\sigma_{\text{сц}}$ оказывают прочность адгезии покрытия с материалом заготовки ($\sigma_{\text{адг}}$) и когезионная прочность между слоями покрытия ($\sigma_{\text{ког}}$), а также остаточные напряжения в покрытии ($\sigma_{\text{ост(П)}}$). Тогда, прочность сцепления будет определяться минимальным напряжением сопротивления покрытия разрушению:

$$\sigma_{\text{сц}} = K_1 \left(\min \left[\sigma_{\text{адг}}, \sigma_{\text{ког}}^i, i = 1, \dots, N_{\text{сл}} \right] - \sigma_{\text{ост(П)}} \right), \quad (2)$$

где K_1 – свойства материалов поверхности заготовки и покрытия; $\sigma_{\text{адг}}$ – прочность

адгезии покрытия с поверхностью заготовки, МПа; $\sigma_{\text{ког}}$ – когезионная прочность, МПа; $\sigma_{\text{ост(п)}}$ – остаточные напряжения 1-ого рода в покрытии, МПа; $N_{\text{сл}}$ – число слоев покрытия.

Остальные показатели качества покрытия (ПКп) имеют опосредованное влияние на $\sigma_{\text{сц}}$ через показатели $\sigma_{\text{адг}}$, $\sigma_{\text{ког}}$ и $\sigma_{\text{ост(п)}}$, которые можно представить как сумму ПКп, положительно влияющих на $\sigma_{\text{сц}}$ с вычетом ПКп, отрицательно влияющих на $\sigma_{\text{сц}}$:

$$\sigma_{\text{сц}} = K_1 \left(\sigma_{\text{адг}} + \sigma_{\text{ког}} - \sigma_{\text{ост(п)}} - u_1 h - u_2 \Delta_h - u_3 \Pi - u_4 H_{\mu} \right), \quad (3)$$

где h – толщина покрытия, мкм; Δ_h – отклонение от равномерности толщины покрытия, мкм; Π – пористость покрытия, %; H_{μ} – поверхностная микротвердость, МПа; u_i – коэффициент, учитывающий размерность и степень влияния i -ого ПК.

Показатели качества уравнения (3) формируются на этапе напыления (ПКп) и изменяются на этапе механической обработки покрытия. При этом, значительное влияние на формируемые ПКп оказывает состояние поверхности напыления, которое характеризуется показателями качества поверхности заготовки (ПКо):

$$\text{ПКо} = \left(Ra, S_{\text{ч}}, \sigma_{\text{ост(о)}} \right), \quad (4)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности, мкм; $S_{\text{ч}}$ – степень очистки поверхности от загрязнений; $\sigma_{\text{ост(о)}}$ – остаточные напряжения 1-ого рода в поверхности заготовки, МПа.

На следующем этапе были проведены исследования влияния технологических параметров и режимов операций подготовки поверхности заготовки, ВГН и абразивной обработки на показатель прочности сцепления покрытий.

На этапе напыления адгезия покрытия с поверхностью заготовки или когезия слоя покрытия с промежуточными слоями определяются механической и химической связями, которые зависят от температуры ($\Theta_{\text{к}}$), давления ($p_{\text{к}}$), времени контакта ($\tau_{\text{к}}$) частиц с поверхностью напыления, а также от показателей качества поверхности заготовки (ПКо). Помимо этого, указанные параметры влияют на остаточные напряжения, возникающие в покрытии ($\sigma_{\text{ост(п)}}$). Таким образом, прочность сцепления представляет следующую зависимость:

$$\left(\sigma_{\text{сц}} \left(\sigma_{\text{адг}}, \sigma_{\text{ког}}, \sigma_{\text{ост(п)}} \right) \right)_2 \approx f \left(\Theta_{\text{к}}, p_{\text{к}}, \tau_{\text{к}}, \text{ПКо} \right). \quad (5)$$

Посредством раскрытия взаимосвязей параметров процесса напыления с температурой ($\Theta_{\text{к}}$) и давлением ($p_{\text{к}}$) на контакте частиц с поверхностью заготовки, а также учитывая время контакта частицы как постоянную величину, были получены технологические параметры и режимы операции ВГН $\{Z\}_2$, оказывающие влияние на прочность сцепления формируемого покрытия:

$$\left(\Theta_{\text{к}}, p_{\text{к}} \right) \approx f \{Z\}_2 = \left\{ K_{\text{р}}, G_{\text{р}}, d_{\text{с}}, l_{\text{с}}, K_{\text{а}}, K_{\text{м}}, G_{\text{м}}, D_{\text{ч}}, L, \Theta_{\text{о}} \right\}_2, \quad (6)$$

где $K_{\text{р}}$ – теплофизические свойства распыляющего газа; $G_{\text{р}}$ – скорость подачи (расход) топливной смеси, л/мин; $d_{\text{с}}$ и $l_{\text{с}}$ – диаметр и длина сопла распылителя, мм; $K_{\text{а}}$ – свойства окружающей среды (атмосферы); $K_{\text{м}}$ – химический состав и теплофизические свойства материала напыляемых частиц; $G_{\text{м}}$ – скорость подачи (расход) распыляемого материала, кг/мин; $D_{\text{ч}}$ – средний диаметр сферических частиц напыляемого материала, мм; L – дистанция напыления, мм; $\Theta_{\text{о}}$ – температура поверхности заготовки, К.

На этапе напыления показатель $\sigma_{\text{сц}}$ формируется впервые, поэтому с учетом (6), (4) и (3) зависимость (1) для операции ВГН будет иметь следующий вид:

$$\left(\sigma_{\text{сц}}\left(\sigma_{\text{адг}}, \sigma_{\text{ког}}, \sigma_{\text{ост(п)}}\right)\right)_2 = f\left[\left\{h, \Delta_h, \Pi, H_\mu\right\}_2, \left\{Ra, S_{\text{ч}}, \sigma_{\text{ост(о)}}\right\}_1, \left\{K_p, G_p, d_c, l_c, K_a, K_M, G_M, D_{\text{ч}}, L, \Theta_o\right\}_2, \left\{K_2\right\}_2, \left\{K_3\right\}_2\right]. \quad (7)$$

На этапе механической обработки показатель $\sigma_{\text{сц}}$ изменяется в результате влияния температуры (Θ_p) и давления (p_p) в зоне резания, а также времени контакта режущего инструмента с обрабатываемым покрытием (τ_p).

$$\left(\sigma_{\text{сц}}\left(\sigma_{\text{адг}}, \sigma_{\text{ког}}, \sigma_{\text{ост(п)}}\right)\right)_3 \approx f\left(\Theta_p, p_p, \tau_p\right). \quad (8)$$

Посредством раскрытия взаимосвязей параметров процесса абразивной обработки с Θ_p , p_p и τ_p были получены технологические режимы операции плоского шлифования $\{Z\}_3$, оказывающие влияние на $\sigma_{\text{сц}}$ обрабатываемого покрытия:

$$\left(\Theta_k, p_k, \tau_p\right) \approx f\{Z\}_3 = \left\{v_k, t, S_{\text{пр}}, S_{\text{п}}\right\}_3, \quad (9)$$

где v_k – скорость вращения круга, м/с; $S_{\text{пр}}$ – скорость продольной подачи, м/мин; t – глубина резания, мм; $S_{\text{п}}$ – величина поперечной подачи, мм/ход.

Зависимость $\sigma_{\text{сц}}$ (1) для операции абразивной обработки, с учетом показателей качества, сформированных на предыдущем этапе ТП и (9), принимает вид:

$$\left(\sigma_{\text{сц}}\left(\sigma_{\text{адг}}, \sigma_{\text{ког}}, \sigma_{\text{ост(п)}}\right)\right)_3 = f\left[\left(\sigma_{\text{сц}}\right)_2, \left\{h, \Delta_h, \Pi, H_\mu\right\}_3, \left\{v_k, t, S_{\text{пр}}, S_{\text{п}}\right\}_3, \left\{K_2\right\}_3, \left\{K_3\right\}_3\right]. \quad (10)$$

Полученные функциональные зависимости (7) и (10) учитывают ПК, а также технологические параметры и режимы операций подготовки заготовки, ВГН и абразивной обработки, оказывающие основное влияние на прочность сцепления износостойких покрытий, что позволяет реализовать стратегию направленного формирования $\sigma_{\text{сц}}$ в процессе изготовления деталей СП.

Используя приведенные выше зависимости, было проведено численное моделирование процессов нагрева, ускорения и соударения частиц напыляемого материала с поверхностью заготовки с целью оценки технологических параметров и режимов ВГН, обеспечивающих повышение и стабильность значений прочности сцепления формируемых покрытий.

Поставленная задача была разделена на два этапа (Рис. 1). На первом этапе проводилось моделирование нагрева, ускорения и переноса частиц напыляемого материала в струе распыляющего газа. Это позволило оценить температуры и скорости частиц напыляемого материала ($\Theta_{\text{ч}}, v_{\text{ч}}$) и струи газа ($\Theta_{\text{с}}, v_{\text{с}}$) в зависимости от дистанции напыления (L), а также температуру поверхности заготовки (Θ_o) и минимальную дистанцию напыления (L_{min}). В начале была определена температура горения топливной смеси ($\Theta_{\text{г}}$) в зависимости от среднего диаметра ($D_{\text{ч}}$) и максимальной температуры нагрева частиц ($\Theta_{\text{ч max}}$) из материала WC-Co-Cr, превышение которой приводит к разрушению связки напыляемого порошка. На втором этапе, на основании полученных данных, проводилось моделирование соударения частицы напыляемого материала с поверхностью заготовки, что позволило предварительно оценить технологические режимы, обеспечивающие высокие значения прочности сцепления $\sigma_{\text{сц}}$ по характеру деформации частицы.

Моделирование газодинамического потока проводилось в программной среде Fluent (ANSYS CFD Premium) и основано на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с использованием k - ϵ модели турбулентности. Моделирование переноса частиц напыляемого материала проводилось с использованием лагранжевой модели (Lagrangian particle transport).



Рис. 1. Определение рациональных технологических параметров и режимов ВГН

Граничные условия модели соответствуют параметрам установки ВГН системы керосин-кислород мод. HV-2 и геометрическим параметрам камеры сгорания и сопла горелки К-2, исходя из которых были определены управляющие параметры операции напыления: Θ_r , $D_{ч}$ и L .

В качестве факторов численного эксперимента принимались температура горения топливной смеси (Θ_r) в диапазоне от 2253 до 2750 К, которая зависит от соотношения кислорода к керосину ($G_{p1}/G_{p2} = 2,9-3,4$), и средний диаметр частиц ($D_{ч}$) в диапазоне от 25 до 60 мкм. Расход топливной смеси (G_p), напыляемого материала (G_M) и транспортирующего газа (G_T) устанавливались постоянными: $G_p = 0,0263$ кг/с, $G_M = 0,0017$ кг/с и $G_T = 0,0003$ кг/с.

В результате получена зависимость максимальной температуры частиц напыляемого материала от их среднего диаметра и температуры горения топливной смеси:

$$\Theta_{ч\ max} = 0,9025 \cdot \Theta_r + 8,039 \cdot D_{ч} - 0,004117 \cdot \Theta_r \cdot D_{ч} - 0,02968 \cdot D_{ч}^2 - 191,3. \quad (11)$$

В составе частиц из материала WC-Co-Cr наименьшей температурой плавления обладает кобальт: $\Theta_{ч\ max} = 1768$ К. Учитывая это ограничение, была получена область допустимых значений Θ_r в диапазоне от 2253 до 2416 К и $D_{ч}$ в диапазоне от 33,27 до 60 мкм, в рамках которой обеспечивается рациональная температура нагрева частиц (Рис. 2, а). Выбрав значение $D_{ч} = 45$ мкм по выражению (11), была определена температура $\Theta_r \approx 2311$ К (Рис. 2, б), которая соответствует соотношению смеси кислорода к керосину $G_{p1}/G_{p2} = 2,95$.

При прочих равных условиях, частицы напыляемого порошка, имеющие диаметр более 45 мкм, достигают меньшей температуры нагрева, что приводит к недостаточной пластической деформации на контакте с поверхностью заготовки для образования прочной связи. С другой стороны, частицы с диаметром менее 45 мкм достигают температур выше 1768 К, что приведет к разрушению кобальтовой связки. Исходя из этого, для повышения стабильности значений $\sigma_{сц}$ необходимо применять методы, уменьшающие величину диапазона размеров частиц ($T_{ч}$), в частности, предварительный ситовой рассев порошка.

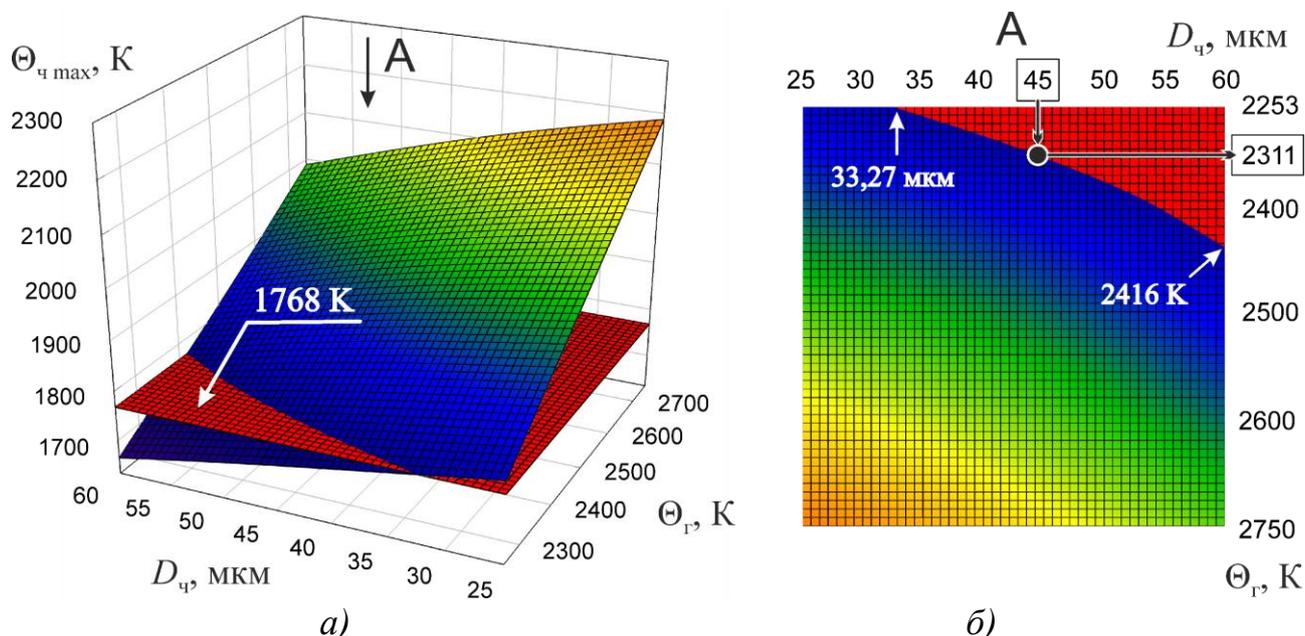


Рис. 2. Определение температуры горения топливной смеси ($\Theta_{\text{г}}$) при заданном диаметре ($D_{\text{ч}}$) и максимальной температуре ($\Theta_{\text{ч max}}$) напыляемых частиц

В дальнейшем определялась минимальная дистанция напыления (L_{min}), которая должна обеспечивать температуру нагрева поверхности заготовки (Θ_{o}) не выше заданной с целью исключения изменения физико-механических свойств поверхности напыления. В качестве материала заготовки применялась сталь 45 со следующими параметрами: изначальная температура поверхности 300 К; толщина стенки детали 22 мм; коэффициент теплоотдачи 50 Вт/м³. Численный эксперимент проводился на дистанциях напыления от 150 до 400 (с шагом 50 мм) и 500 мм. В результате обработки данных получена следующая зависимость:

$$L_{\text{min}} = 0,0014 \cdot \Theta_{\text{o max}}^2 - 1,4666 \cdot \Theta_{\text{o max}} + 528,85. \quad (12)$$

Задаваясь допустимой температурой поверхности заготовки, например $\Theta_{\text{o max}} = 250$ °С, по зависимости (12) была определена минимальная дистанция напыления: $L_{\text{min}} \approx 249,7$ мм.

На Рис. 3 показаны графики изменения температур и скоростей струи распыляющего газа ($\Theta_{\text{с}}, v_{\text{с}}$) и напыляемых частиц ($\Theta_{\text{ч}}, v_{\text{ч}}$), а также температуры поверхности заготовки (Θ_{o}) от дистанции напыления (L), полученные в ходе проведения численного моделирования нагревания и ускорения частиц напыляемого материала.

В результате обработки данных были получены уравнения изменения значений $\Theta_{\text{ч}}, v_{\text{ч}}, \Theta_{\text{с}}$ и $v_{\text{с}}$ при $L = 150-500$ мм, $\Theta_{\text{г}} \approx 2311$ К, $D_{\text{ч}} = 45$ мкм:

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{ч}} &= 2 \cdot 10^{-5} \cdot L^3 - 0,0343 \cdot L^2 + 20,355 \cdot L - 1922,1, \\ v_{\text{ч}} &= L^3 \cdot 10^{-7} - 0,0023 \cdot L^2 + 2,2396 \cdot L + 50,213, \\ \Theta_{\text{с}} &= 3 \cdot 10^{-5} \cdot L^3 - 0,055 \cdot L^2 + 30,499 \cdot L - 4230,2, \\ v_{\text{с}} &= L^3 \cdot 10^{-5} - 0,0159 \cdot L^2 + 6,9917 \cdot L - 367,82. \end{aligned} \quad (13)$$

На втором этапе моделирования при создании геометрии поверхности заготовки учитывался её микрорельеф. Исходя из среднего диаметра частиц ($D_{\text{ч}}$) напыляемого материала были определены параметры лунок после пескоструйной обработки.

Значения температур и скоростей потока струи распыляющего газа ($\Theta_{с.к.}$, $v_{с.к.}$) и напыляемых частиц ($\Theta_{ч.к.}$, $v_{ч.к.}$) на контакте с поверхностью заготовки рассчитывались по зависимостям (13) для трех дистанций напыления: 250, 300 и 350 мм (Таблица 1). На Рис. 4 представлено состояние частиц после взаимодействия с поверхностью заготовки. Основными результатами взаимодействия являются характер пластической деформации и относительная площадь контакта ($l_{от}$), которая определялась как соотношение длины границы материала частицы (красный цвет) и поверхности заготовки (серый цвет) без промежуточных фаз (воздух и другие газы) к общей длине границы прилегания.

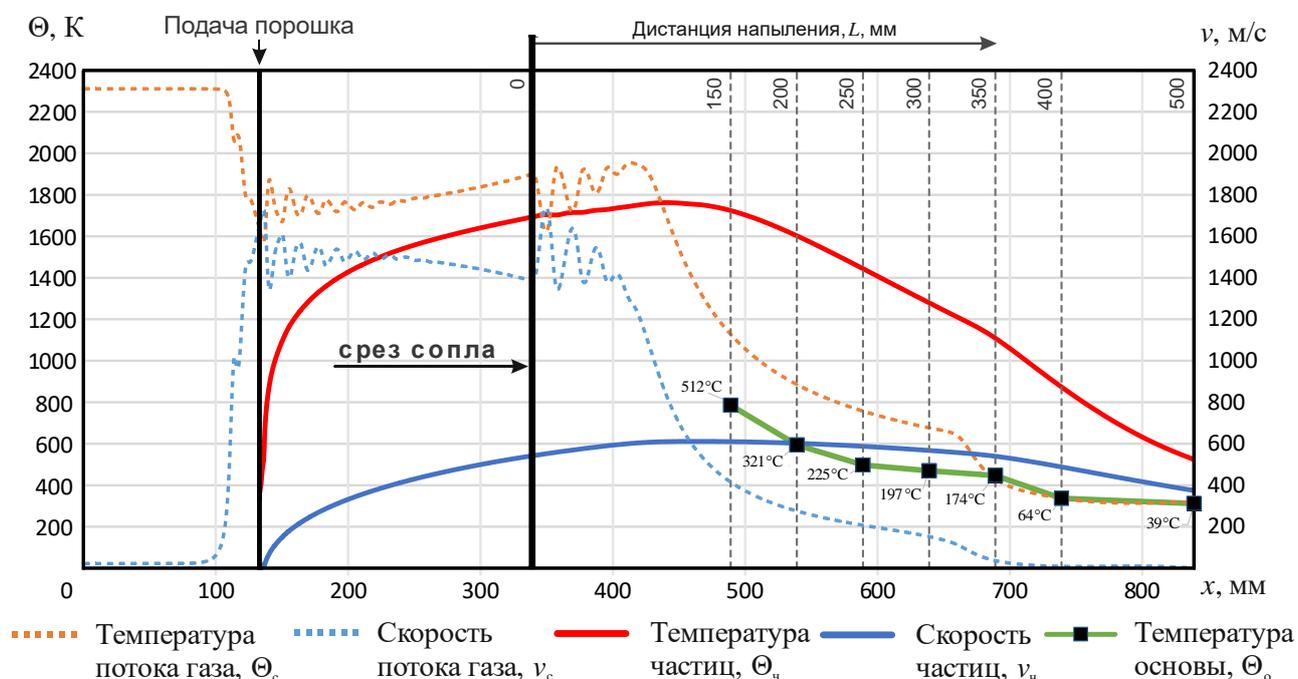


Рис. 3. Изменение температуры и скорости напыляемых частиц в срезе струи распыляющего газа в зависимости от дистанции напыления L при $\Theta_r \approx 2311$ К, $D_{ч} = 45$ мкм

Таблица 1.

Результаты моделирования процесса соударения частицы напыляемого материала с поверхностью заготовки при различных L

№	Исходные данные						Результаты моделирования
	L , мм	$\Theta_{ч.к.}$, К	$v_{ч.к.}$, м/с	Θ_o , К	$\Theta_{с.к.}$, К	$v_{с.к.}$, м/с	Относительная длина контакта, $l_{от}$, %
1	250	1444	589,1	224,6	755,8	205,9	42
2	300	1280	567,7	196,7	676,4	151,9	36
3	350	1112	540,1	173,7	430,3	36,5	25

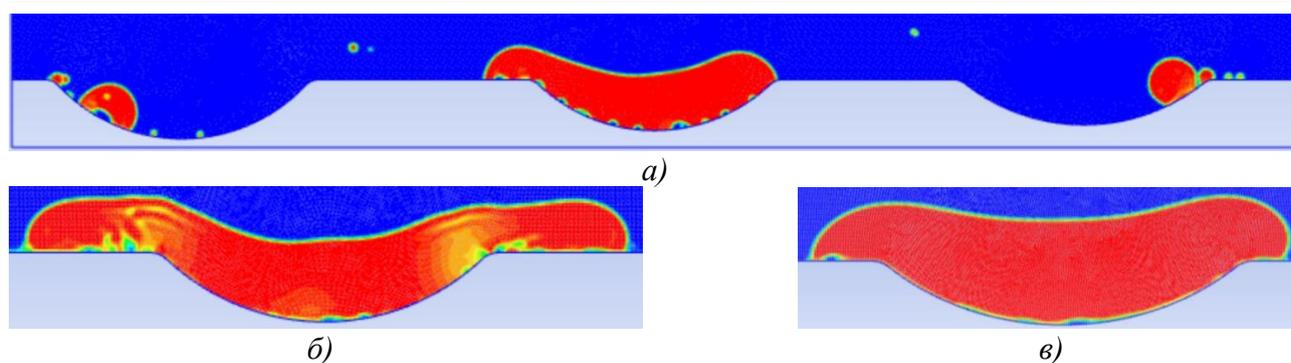


Рис. 4. Результаты моделирования процесса соударения частицы напыляемого материала с поверхностью заготовки при различных L

Из Таблицы 1 и Рис. 4 видно, что наибольшая $l_{от}$ наблюдается при дистанции напыления 250 мм (Рис. 4, а). Однако, в этом случае происходит частичное разбрызгивание частицы, что впоследствии приводит к образованию повышенной пористости покрытий и снижению $\sigma_{сц}$. Сравнение результатов пластической деформации частиц при $L = 300$ (Рис. 4, б) и 350 (Рис. 4, в) мм показывает, что наиболее рациональный вариант формообразования частицы, имеющей на границе раздела наименьшее содержание включений при отсутствии разбрызгивания, соответствует дистанции напыления 300 мм.

Применение разработанной расчетной методики позволило определить технологические параметры и режимы ВГН, обеспечивающие высокие значения $\sigma_{сц}$ формируемых покрытий из материала WC-Co-Cr. Необходимо отметить, что ввиду ограничений вычислительной мощности и времени моделирования были приняты допущения, связанные с упрощенным представлением напыляемых частиц, поверхности заготовки и струи газа. На этапе моделирования соударения частицы с поверхностью заготовки не учитывается соударение последующих частиц. В связи с этим, разработанную методику целесообразно использовать для предварительной оценки технологических параметров и режимов ВГН на этапе технологической подготовки производства. Достоверность полученных результатов должна проверяться посредством экспериментального определения $\sigma_{сц}$ при полученных технологических параметрах и режимах напыления.

Глава 3 посвящена экспериментальным исследованиям влияния технологических параметров и режимов операций ВГН и абразивной обработки на значения прочности сцепления износостойких покрытий.

Экспериментальные исследования проводились в следующей последовательности: 1) определение дистанции напыления (L_r), обеспечивающей наибольшее значение прочности сцепления при напылении покрытий ($\sigma_{сц}$)₂ с целью проверки расчетной методики; 2) определение режимов плоского шлифования $\{Z_r\}_3$, обеспечивающих минимальное изменение значений прочности сцепления обрабатываемых покрытий на операции абразивной обработки; 3) анализ дефектов покрытий, полученных при выбранных режимах напыления и плоского шлифования; 4) испытание покрытий для определения износа с целью проверки выбранных технологических параметров и режимов.

На первом этапе экспериментальных исследований на основании данных, полученных в результате моделирования процессов нагрева, ускорения и соударения частицы напыляемого материала с поверхностью заготовки, проверялась достоверность численной модели и уточнялась дистанция напыления (L). Образцы для испытаний на прочность сцепления штифтовым методом подвергались совместной пескоструйной обработке и нанесению покрытия способом ВГН на трех дистанциях напыления 250, 300 и 350 мм. С целью проверки влияния величины диапазона размеров частиц ($T_ч$) напыляемого порошка на прочность сцепления ($\sigma_{сц}$)₂ был выбран порошок марки Плакарт-0.08Н (WC-Co-Cr) с $D_ч = 47,5 \pm 27,5$ мкм без применения сита и $D_ч = 45 \pm 3$ мкм после ситового сита (номер сетки 045 по ГОСТ 6613-86).

После напыления проводились испытания на прочность сцепления ($\sigma_{сц}$)₂ штифтовым методом на универсальной испытательной машине мод. TIME WDW-300E. Результаты исследований приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Результаты экспериментального определения прочности сцепления покрытий после напыления для различных $D_{\text{ч}}$ и L

№	L , мм	Среднее значение $(\sigma_{\text{сц}})_2$, МПа при $D_{\text{ч}}$, мкм		Расхождение, %
		47,5±27,5	45±3	
1	250	96,2	116,2	20,8
2	300	119,4	160,4	34,3
3	350	69,4	94,1	35,6

Наибольшие значения $(\sigma_{\text{сц}})_2$ для обоих значений $D_{\text{ч}}$ получены при $L_r = 300$ мм, что подтверждает выбранную дистанцию напыления в результате численного эксперимента. Величина диапазона размеров частиц ($T_{\text{ч}}$) напыляемых порошков оказывает значительное влияние на $(\sigma_{\text{сц}})_2$, которая увеличивается с уменьшением $T_{\text{ч}}$. Применение порошка из материала WC-Co-Cr при $D_{\text{ч}} = 45 \pm 3$ мкм позволило повысить прочность сцепления покрытий после напыления $(\sigma_{\text{сц}})_2$ на 41 МПа (34,3 %) по сравнению с порошком при $D_{\text{ч}} = 47,5 \pm 27,5$, что подтверждает необходимость предварительного ситового отсева. Снижение $(\sigma_{\text{сц}})_2$ при большем значении $T_{\text{ч}}$ объясняется наличием значительного числа частиц диаметром больше среднего значения (45 мкм), которые не достигли достаточной температуры для образования прочного сцепления с поверхностью заготовки в процессе пластической деформации.

На втором этапе экспериментального исследования проводилось определение режимов абразивной обработки, обеспечивающих минимальное снижение прочности сцепления $(\sigma_{\text{сц}})_3$ покрытий. Подготовка и напыление покрытий на образцы выполнялись при технологических параметрах и режимах, выбранных на первой стадии экспериментального исследования с использованием двух порошков $D_{\text{ч}} = 47,5 \pm 27,5$ и 45 ± 3 мкм. В связи с тем, что покрытие наносилось на торцевую поверхность образцов, в качестве метода абразивной обработки выбрано плоское шлифование периферией круга. В качестве инструмента применялся алмазный круг АС6 диаметром 150 мм зернистостью 125/100 на связке В2-01. Управляющими параметрами принимались глубина резания t в диапазоне от 0,005 до 0,02 мм, скорость продольной подачи $S_{\text{пр}}$ в диапазоне от 10 до 15 м/мин. Скорость вращения круга составляла $v_{\text{к}} = 15$ м/с, величина поперечной подачи $S_{\text{п}} = 4$ мм/ход. Применялось охлаждение водным раствором 5% Multan 46-81 при расходе 2,5 л/мин.

В результате проведенного исследования были получены регрессионные уравнения, раскрывающие зависимость прочности сцепления $(\sigma_{\text{сц}})_3$ и формируемой шероховатости (Ra) поверхности износостойкого покрытия из материала WC-Co-Cr от технологических режимов плоского шлифования:

$$\begin{cases} (\sigma_{\text{сц}})_3 = 78,56 - 87,78 \cdot t + 2,903 \cdot S_{\text{пр}} - 44 \cdot S_{\text{пр}} \cdot t - 0,1467 \cdot S_{\text{пр}}^2, \\ Ra = 4,026 - 45,78 \cdot t - 0,6067 \cdot S_{\text{пр}} + 5,867 \cdot S_{\text{пр}} \cdot t + 0,02293 \cdot S_{\text{пр}}^2, \\ \text{при } D_{\text{ч}} = 47,5 \pm 27,5 \text{ мкм,} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} (\sigma_{\text{сц}})_3 = 109,5 - 310 \cdot t + 6,957 \cdot S_{\text{пр}} - 57,33 \cdot S_{\text{пр}} \cdot t - 0,3413 \cdot S_{\text{пр}}^2, \\ Ra = 4,291 - 39,56 \cdot t - 0,656 \cdot S_{\text{пр}} + 5,333 \cdot S_{\text{пр}} \cdot t + 0,02507 \cdot S_{\text{пр}}^2, \\ \text{при } D_{\text{ч}} = 45 \pm 3 \text{ мкм.} \end{cases}$$

На Рис. 5 показаны диаграммы зависимостей прочности сцепления и шероховатости поверхности покрытия от режимов плоского шлифования для $D_{\text{ч}} = 45 \pm 3$ мкм при $v_{\text{к}} = 15$ м/с, $S_{\text{п}} = 4$ мм/ход, $t = 0,005-0,02$ мм и $S_{\text{пр}} = 10-15$ м/мин.

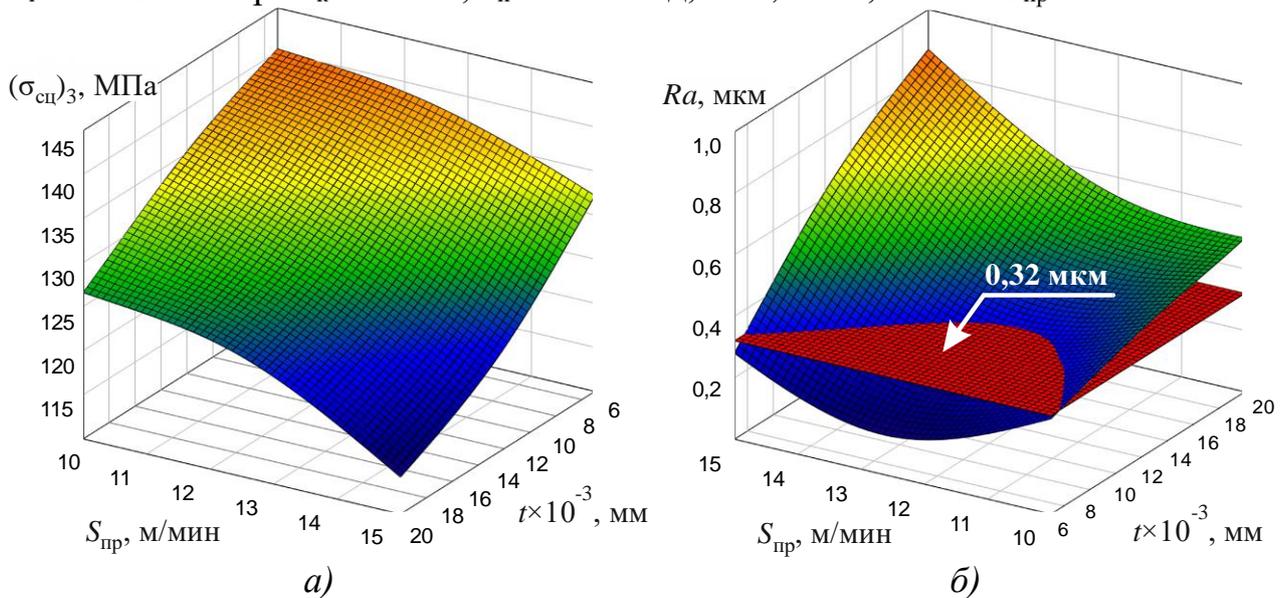


Рис. 5. Диаграммы зависимости прочности сцепления (а) и шероховатости (б) поверхности покрытия от режимов плоского шлифования

Зависимости (14) и диаграмма на Рис. 5, б позволяют определить рациональные режимы плоского шлифования, при заданной шероховатости. На Рис. 6 построены графики для определения сочетания t и $S_{\text{пр}}$, обеспечивающие $Ra = 0,32$ мкм. Исходя из того, что $(\sigma_{\text{сц}})_3$ изменяется незначительно, целесообразно принять $t = 0,012$ мм и $S_{\text{пр}} = 12$ м/мин, соответствующие наибольшей производительности шлифования (Q).

С целью проверки выбранных технологических решений были проведены ускоренные испытания для определения износа при трении образцов с износостойкими покрытиями из материала WC-Co-Cr с размерами частиц $D_{\text{ч}} = 47,5 \pm 27,5$ и 45 ± 3 мкм о контртело из стали ШХ15. Испытания проводились на установке модели 2168 УМТ по схеме диск-диск при частоте вращения контртела 1000 об/мин и усилии прижима 400 Н в течении восьми часов. Коэффициент ускорения составляет $K_{\text{ус}} = 2$. Износ определялся посредством взвешивания образцов с покрытием до и после испытаний.

Испытания показали, что образцы с покрытиями, сформированными по выбранным технологическим параметрам и режимам, имеют суммарный массовый износ на 20,1% меньше, чем у образцов с покрытиями, полученными по исходным режимам предприятия (без применения разработанной методики).

Результаты исследований приведены в Таблице 3. На Рис. 7 показана диаграмма одномерного распределения вероятностей значений $(\sigma_{\text{сц}})_2$ и $(\sigma_{\text{сц}})_3$ покрытий, полученных с применением выбранных технологических решений, а также значения $(\sigma_{\text{сц}})_2$ и $(\sigma_{\text{сц}})_3$ покрытий, полученных по исходным режимам.

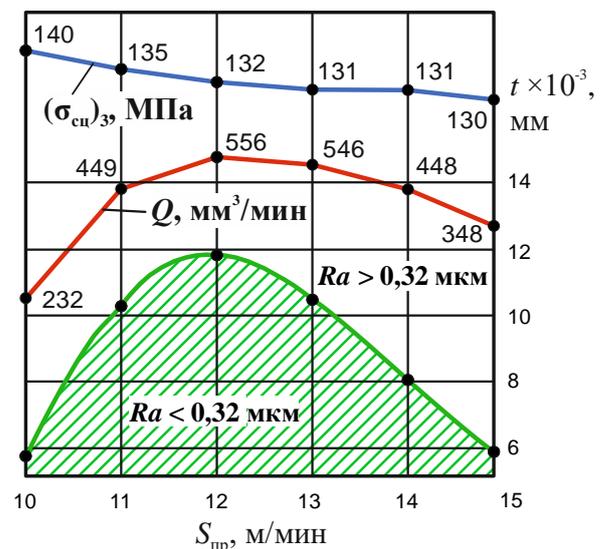
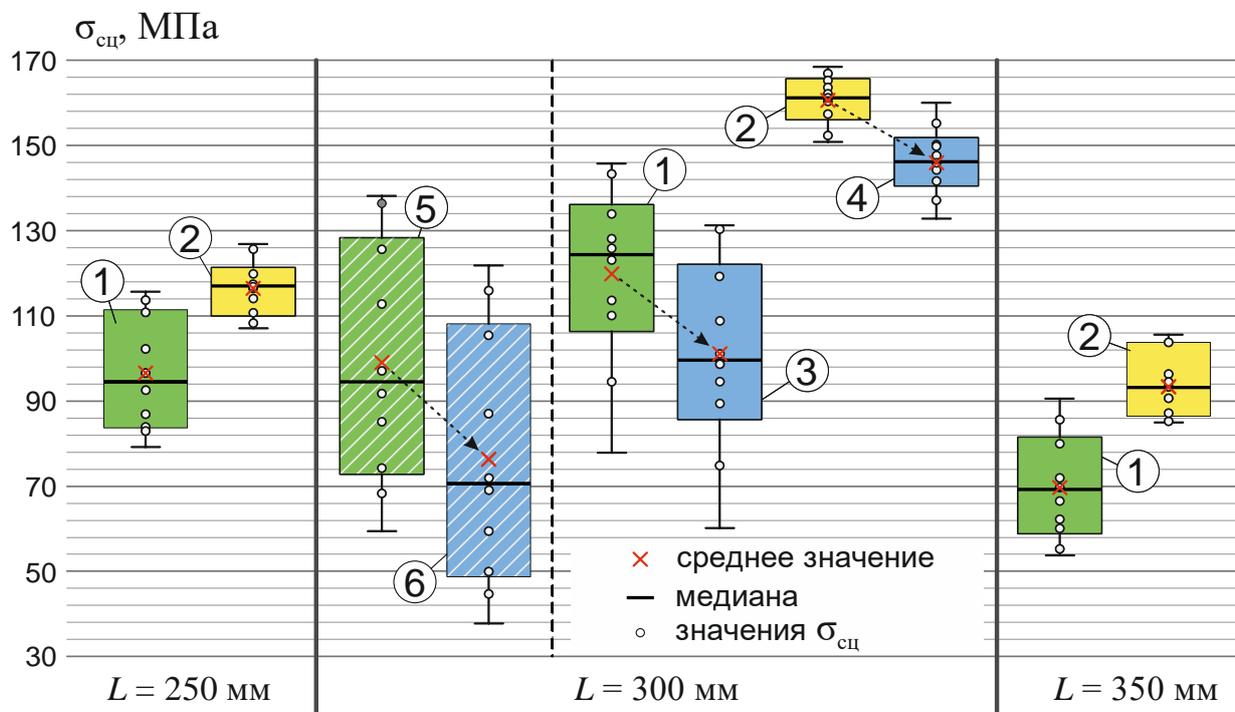


Рис. 6. Определение t и $S_{\text{пр}}$

Таблица 3.

Сравнение значений прочности сцепления, полученных на этапах напыления и абразивной обработки покрытий

$D_{\text{ч}}$, мкм	Средние значения прочности сцепления, МПа		Снижение $\Delta\sigma_{\text{сц}}$, %	Выход годового, %
	после напыления, $(\sigma_{\text{сц}})_2$	после обработки, $(\sigma_{\text{сц}})_3$		
$47,5 \pm 27,5$ (без методики)	98,7	76,0	22,9	70%
$47,5 \pm 27,5$	119,4	100,5	15,8	90%
45 ± 3	160,4	146,1	8,9	100%



1, 2 – распределения значений $(\sigma_{\text{сц}})_2$ при $D_{\text{ч}} = 47,5 \pm 27,5$ и 45 ± 3 мкм соответственно; 3, 4 – распределения значений $(\sigma_{\text{сц}})_3$ при $D_{\text{ч}} = 47,5 \pm 27,5$ и 45 ± 3 мкм соответственно; 5, 6 – распределения значений $(\sigma_{\text{сц}})_2$ и $(\sigma_{\text{сц}})_3$ при $D_{\text{ч}} = 47,5 \pm 27,5$ мкм без применения методики

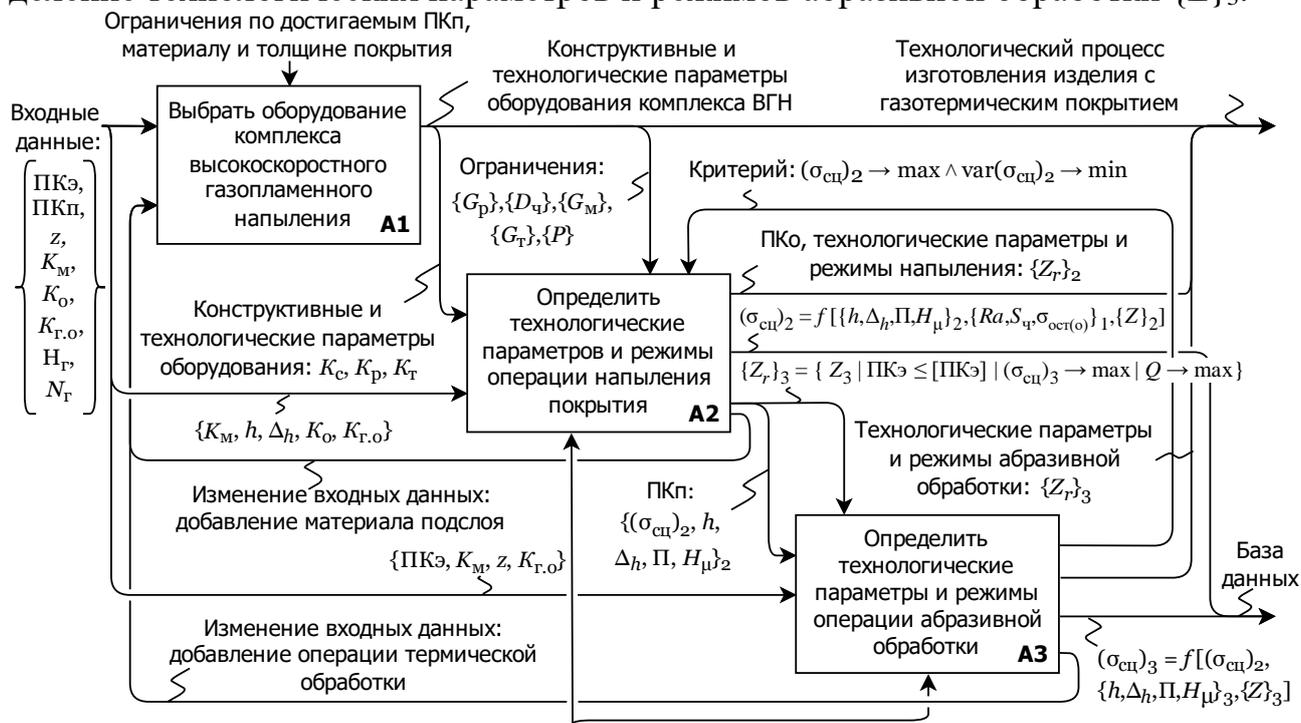
Рис. 7. Сравнение распределений значений прочности сцепления, полученных на этапах ВГН и абразивной обработки покрытий при различных L и $D_{\text{ч}}$

В результате теоретических и экспериментальных исследований были получены образцы с покрытиями без сколов, трещин и отслоений в следствии увеличения прочности сцепления, функционально связанной с показателями качества поверхности заготовки и покрытия, а также с технологическими параметрами и режимами операций напыления и абразивной обработки, что подтверждает целесообразность применения выбранных технологических параметров и режимов ВГН и абразивной обработки.

В Главе 4 приведена инженерная методика проектирования технологических процессов изготовления изделий с износостойкими покрытиями, включающая определение состава операций, выбор технологических параметров и режимов ВГН и абразивной обработки, обеспечивающих повышение и стабильность значений прочности сцепления износостойких покрытий изделий машиностроения (Рис. 8).

Разработанная инженерная методика состоит из следующих основных этапов: 1) задание входных данных – показатели качества поверхности детали с

покрытием (ПКЭ), показатели качества покрытия ($h, \Delta h, \Pi, H_{\mu}$), припуск на абразивную обработку (z), материал покрытия (K_M) и заготовки (K_O), геометрическая и размерная характеристика напыляемой поверхности ($K_{Г.О}$), а также номенклатура (N_T) и объем выпуска изготавливаемого изделия (N_T); 2) выбор оборудования комплекса ВГН и определение конструктивных параметров зоны ускорения (K_C), свойств топливной смеси (K_P) и транспортирующего газа (K_T), а также диапазонов расхода топливной смеси $\{G_P\}$, материала $\{G_M\}$, транспортирующего газа $\{G_T\}$, размера частиц порошка $\{D_{\text{ч}}\}$ и давлений $\{P\}$; 3) определение технологических параметров и режимов операции напыления покрытия $\{Z\}_2$; 4) определение технологических параметров и режимов абразивной обработки $\{Z\}_3$.



Расчетно-экспериментальная методика определения рациональных технологических параметров и режимов

Рис. 8. Структурная диаграмма инженерной методики проектирования технологических процессов изготовления изделий с износостойкими покрытиями, полученными способом ВГН и абразивной обработкой

Методика включает алгоритм действий в случае образования дефектов в покрытиях на этапах валидации модели и абразивной обработки, заключающийся в определении вида дефектов и выработки дополнительных действий, направленных на повышение $\sigma_{\text{сц}}$, таких как изменение технологического процесса путем добавления операции термической обработки после операции напыления покрытия или добавление подслоя материала.

Разработанная методика позволяет получать значения $\sigma_{\text{сц}}$ покрытий в зависимости от выбранных технологических решений и, тем самым формировать базу данных технологических параметров и режимов операций подготовки поверхности заготовки, напыления и механической обработки газотермических покрытий, обеспечивающих повышение и стабильность значений прочности сцепления износостойких покрытий.

С целью реализации базы данных необходимо расширение номенклатуры материалов износостойких покрытий. В частности, по разработанной методике было исследовано напыление и обработка износостойкого покрытия из

материала Плакарт-0.05Н ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$), выбраны технологические параметры и режимы операций ВГН и плоского шлифования, которые позволили обеспечить повышение и стабильность значений прочности сцепления покрытий.

Выводы диссертационной работы:

1. Предложены функциональные зависимости прочности сцепления износостойких покрытий от показателей качества поверхности заготовки и покрытия, а также от технологических параметров и режимов операций подготовки поверхности заготовки, ВГН и абразивной обработки. Установлено, что основными управляющими факторами, определяющими величину и стабильность значений прочности сцепления покрытий являются: на этапе напыления – температура зоны нагрева (Θ_r), средний диаметр напыляемых частиц ($D_{\text{ч}}$) и дистанция напыления (L); на этапе абразивной обработки – глубина резания (t) и скорость продольной подачи стола плоскошлифовального станка ($S_{\text{пр}}$).

2. В результате численного моделирования получены регрессионные зависимости, позволяющие определять температуру зоны нагрева (Θ_r), обеспечивающую рациональную температуру частиц из материалов WC-Co-Cr и $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ заданного среднего диаметра ($D_{\text{ч}}$) в диапазоне от 5 до 60 мкм при ВГН на установке HV-2 распылителем К-2, а также зависимости, позволяющие определять минимальную дистанцию напыления (L_{min}). Разработанные численные параметрические модели целесообразно использовать для определения рациональных параметров операции напыления покрытий из различных износостойких материалов.

3. Экспериментально подтверждено значительное влияние диапазона размеров частиц напыляемого порошка на величину прочности сцепления формируемого покрытия на этапах напыления и абразивной обработки. Применение порошков из материалов WC-Co-Cr и $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ при средних диаметрах частиц $D_{\text{ч}} = 45 \pm 3$ и 56 ± 4 мкм позволило повысить прочность сцепления покрытий после напыления ($\sigma_{\text{сц}})_2$ на 41,0 МПа (34,3 %) и 21,7 МПа (16,0 %) по сравнению с $D_{\text{ч}} = 47,5 \pm 27,5$ и $58,5 \pm 47,5$ мкм соответственно, что предопределяет необходимость дополнительного ситового отсева порошков.

4. В результате экспериментальных исследований получены регрессионные зависимости прочности сцепления ($\sigma_{\text{сц}})_3$ и шероховатости обработанных покрытий от технологических режимов плоского шлифования – глубины резания (t) и скорости продольной подачи стола станка ($S_{\text{пр}}$) при скорости вращения круга $v_{\text{к}} = 15$ м/с и поперечной подаче $S_{\text{п}} = 4$ мм/ход, позволяющие определить t и $S_{\text{пр}}$, обеспечивающие минимальное изменение значений прочности сцепления покрытий из материалов WC-Co-Cr и $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ при заданной шероховатости поверхности в пределах $Ra = 0,13\text{-}0,87$ мкм.

5. На основе полученных функциональных зависимостей, численного моделирования и экспериментальных исследований разработана расчетно-экспериментальная методика, применение которой позволяет определять технологические параметры и режимы операций ВГН и абразивной обработки, обеспечивающие повышение и стабильность значений прочности сцепления износостойких покрытий.

6. На основе разработанной расчетно-экспериментальной методики сформирована инженерная методика проектирования технологических процессов изготовления изделий с износостойкими покрытиями, полученными способом

ВГН и абразивной обработкой, обеспечивающая уменьшение числа дефектов покрытий. Применение предложенной инженерной методики позволило увеличить выход годных деталей СП на 30%.

7. Предложен подход к созданию базы данных значений прочности сцепления покрытий, полученных газотермическим напылением, в зависимости от выбранных технологических параметров и режимов операций подготовки, напыления и механической обработки. Использование такой базы данных позволит расширить область применения предложенной инженерной методики и сократить трудоемкость технологической подготовки производства посредством выявления новых зависимостей прочности сцепления от параметров технологического процесса изготовления изделий с газотермическими покрытиями.

Приложение включает материалы, не вошедшие в основные разделы работы.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Ковалев А.А., Краско А.С. Перспективы сокращения трудоемкости изготовления деталей машин за счет применения функциональных покрытий // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы III международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург (11 декабря 2020). 2020. С. 27-30. (0,23 п.л./0,16 п.л.).

2. Ковалев А.А., Краско А.С. Перспективы и проблемы применения сверхзвукового плазменного напыления в условиях мелкосерийного производства // Современные материалы, техника и технология: сборник научных статей 10-й Международной научно-практической конференции (30 декабря 2020). Курск: Юго-Западный государственный университет. 2020. С. 174-177. (0,17 п.л./0,10 п.л.).

3. Албагачиев А.Ю., Ковалев А.А., Краско А.С. Выбор метода упрочняющей обработки деталей машин в условиях автоматизированного мелкосерийного производства // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 2. С. 4-12. (0,81 п.л./0,35 п.л.).

4. Ковалев А.А., Краско А.С. Влияние параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 3. С. 31-39. (0,93 п.л./0,50 п.л.).

5. Краско А.С. Направленное формирование показателей качества при разработке технологических процессов изготовления изделий машиностроения с функциональными газотермическими покрытиями // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении-2021 (FRITME-2021): сборник научных статей VII Международной научной конференции, М.: ИМАШ РАН. 2021. С. 138-140. (0,17 п.л.).

6. Ковалев А.А., Краско А.С., Сидоров П.А. Моделирование ударного взаимодействия напыляемых частиц с поверхностью детали при формировании плазменных покрытий // Вестник московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 257-266. (1,15 п.л./0,4 п.л.).

7. Ковалев А.А., Краско А.С. Исследование влияния параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий // Технология металлов. 2022. № 1. С. 14-22. (0,98 п.л./0,50 п.л.).