

На правах рукописи



СИЛАЕВ Денис Васильевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОДГОТОВКИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК ПОД ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ
ПОКРЫТИЕ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Воронеж – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Научный руководитель **Сухочев Геннадий Алексеевич**,
доктор технических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Бойко Анатолий Федорович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова», кафедра
«Технология машиностроения»,
профессор;

Норман (Перова) Анна Валерьевна,
кандидат технических наук,
ГБПОУ ВО «ВАТ им. В. П. Чкалова»,
преподаватель

Ведущая организация Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Донской государственный
технический университет»
(г. Ростов-на-Дону)

Защита состоится 20 ноября 2019 года в 13⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ), ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (БГТУ), по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» www.cchegeu.ru.

Автореферат разослан «21» сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кириллов
Олег Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одним из эффективных направлений получения высокоресурсных лопаточных деталей является нанесение теплозащитных плазменных покрытий. При этом постоянно возникают вопросы сцепления покрытия с основным материалом. Множество ответственных лопаточных деталей в настоящее время получают с использованием электроэрозионной обработки. Традиционно перед покрытием наследованный от электроэрозионной обработки измененный поверхностный слой лопаток подвергают абразивной зачистке, что приводит к внедрению частиц абразива в поверхностный слой детали, появлению приповерхностных микротрещин и остаточных растягивающих напряжений, а последующее химическое травление усугубляет наследованные дефекты. Это приводит к нарушению адгезии покрытия с основным материалом, к тому же такие методы технологически не могут быть реализованы для лопаток турбин из цельных заготовок.

Степень разработанности. Широко известны как механические, так и до настоящего времени созданные отечественными научными школами (СПГУ, г. Санкт-Петербург, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, ВГТУ, г. Воронеж и др.) новые способы активации поверхности физико-техническими воздействиями, в полной мере не обеспечивают достаточный уровень эксплуатационных характеристик покрытий на поверхностях сложного профиля межлопаточных каналов, подвергаемых экстремальным знакопеременным и ударным высокочастотным нагружениям таких лопаточных деталей, и в ряде случаев - удорожают производственный процесс. Остались неизученными актуальные вопросы теоретического описания процессов формирования заданного микрорельефа труднодоступной поверхности при предварительной эрозионно-химико-термической обработке и **научно-методического** обоснования ее последующей активации под плазменное покрытие. Решить этот вопрос предполагается интенсификацией процесса электроэрозионной обработки поверхности сложного профиля за счет термической составляющей и введением в комбинированный технологический процесс активирующей обработки микрошариками в слабопроводящей среде. Решение задач создания теоретических и методических основ форсированной эрозионно-химико-термической обработки поверхности сложного профиля и выравнивания микрорельефа с одновременной его активацией электро-химико-механической комбинированной обработкой под плазменное покрытие позволит заполнить существующий пробел в научно обоснованных методах и средствах технологического обеспечения оптимальных условий эффективной комбинированной обработки под плазменные покрытия поверхностей сложного профиля нагруженных лопаточных деталей. Работа выполнена в соответствии с федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Целью работы является разработка теоретических основ и новых технологий подготовки поверхности сложного профиля межлопаточных каналов для плазменного нанесения покрытий, основанных на интенсификации процесса предварительного электроэрозионного формирования заданного микрорельефа и последующей его активации комбинированной электро-химико-механической обработкой, технологически обеспечивая получение ранее не получаемых характеристик микрогеометрии за счет управления технологическими параметрами комбинированных воздействий. Для достижения поставленной цели определены такие **задачи**:

1. Установить взаимосвязи эрозионно-химико-термических (анодных и

высокотемпературных) явлений, воздействующих на элементную зону поверхности лопатки, которые являются научно-методической основой интенсификации тепловых и эрозионных процессов и иных процессов при формировании заданного микропрофиля на тугоплавкой поверхности лопатки.

2. Обосновать физические и математические модели технологических схем: «электрод-инструмент–термодинамический поток–микрорельеф» при интенсивной электроэрозионной обработке; «микрошарики–токопроводящая среда–активированный слой» при электро-химико-механической обработке.

3. Получение заданной величины выступов, поиска эффективных электрических и термических параметров формообразования для получения требуемого микрорельефа поверхности с учетом граничных условий реализации процесса активации поверхности.

4. На основе экспериментальных исследований определить порядок и закономерности влияния параметров комбинированных воздействий в процессах предварительной обработки и активации поверхности лопатки на ее эксплуатационные характеристики; создать технологическое обеспечение требуемых показателей поверхности, осуществляемое комбинированными воздействиями.

5. Предложить методику технологического обеспечения подготовки поверхности для плазменного нанесения износостойких покрытий, обеспечивающую равномерность распределения энергетического уровня поверхности детали сложного профиля и повышенной адгезии покрытия с учётом конструктивных особенностей детали.

6. Разработать новый патентоспособный технологический способ подготовки лопаток для плазменного нанесения износостойких покрытий с применением комбинированного способа активации поверхности.

Научная проблема заключается в наличии пробела в научном обосновании методов и средств технологического обеспечения оптимальных условий эффективной обработки под плазменные покрытия в области комплексного использования комбинированных эрозионно-химико-термических и анодно-химико-механических воздействий на труднодоступные поверхности лопаток при угле раскрытия межлопаточного канала не более 45° .

Объекты исследования: процессы комбинированной обработки с заданным уровнем активации и требуемой шероховатостью для нанесения плазменных покрытий на нагруженные детали лопаточных машин.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились на научных основах технологии машиностроения, теорий физико-технической обработки, тепловых и анодных процессов в зоне обработки, методов математического моделирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием современных измерительных средств, с применением методик оценки режимных параметров процесса, разработанных автором.

Предметом исследования явились закономерности изменения параметров в технологической системе обрабатываемых воздействий на поверхность при управлении режимами процессов на этапе подготовки под покрытие, методы расчета режимов обработки, прогнозирование достижимых параметров и технологические рекомендации для их получения.

Достоверность результатов обеспечена корректностью постановки задач, обоснованным использованием аналитических зависимостей, математического аппарата, корректной постановкой экспериментов, и обработкой их данных и подтверждается качественным и количественным соответствием теоретических

исследований с экспериментальными данными, а также практическим применением результатов исследований.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Определён механизм взаимосвязи эрозионно-химико-термических воздействий на поверхности сложного профиля лопаточной детали, на основе которого может проводиться интенсификация тепловых и эрозионных процессов с использованием соотношения, которое можно выразить коэффициентом схватывания $k_{св.} = S_{кф}/S_{кmax}$. Он должен быть не менее 0,7 и здесь $S_{кф}$ – площадь фактического схватывания частицы с подложкой; $S_{кmax}$ – максимально возможная площадь контакта, которая и определяется энергии активации E_a , (1) за счет увеличения объема контактирующих элементов $N_{(г)}$.

2. Найден пути передачи кинетической и тепловой энергии для интенсивного термического воздействия на элементную зону поверхности лопатки сложного профиля для ее предварительной активации инструментом имеющем допустимую склонность к трещинообразованию (до 0,02 мкм), а также минимальный разброс неровностей по профилю детали, что приводит к требуемой равномерности свойств покрытий деталей (3) и (4).

3. Установленные параметры физико-механических точностных свойств поверхностного слоя и их распределение по профилю лопатки позволяют применять такие режимы, что интенсификация эрозионно-термических процессов высотных величин шероховатости проводится электродами сложного профиля с термоактивным покрытием с помощью программных средств с учетом текущего сгорания этого покрытия (0,05-0,3 мм в зависимости от технологического перехода).

4. Создана методология технологического обеспечения подготовки поверхности сложного профиля под нанесение плазменных покрытий заданного качества с комплексным и последовательным использованием механизма эрозионно-химико-термической и электро-химико-механической обработок, включающая отдельные патентоспособные способы, расчетные методики и разработанные средства для их реализации.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

– создана методика, отдельные операции так и в целом технологическое обеспечение для комбинированных процессов подготовки поверхности сложного профиля под нанесение плазменных покрытий с учетом параметров детали и заданной адгезии покрытия;

– разработан технологический способ интенсификации процессов подготовки поверхности сложного профиля для плазменного нанесения покрытий с помощью управления режимами процессов предварительной обработки, обеспечивающий наибольшее повышение прочности сцепления покрытий с основой (при энергии импульса до 1,2 Дж);

– разработаны рекомендации по выбору рациональных режимов окончательной комбинированной обработки поверхности лопаток сложного профиля для плазменного нанесения покрытий с управлением режимами, обеспечивая получение высококачественных покрытий с заданными значениями их сцепляемости с основой и учетом условий эксплуатации.

Результаты, выносимые на защиту, созданные соискателем:

– разработанные теоретические основы интенсификации комбинированного эрозионно-термического процесса по формированию требуемого микропрофиля поверхности за счет управления режимами;

– компоновочные решения для средств технологического обеспечения процессов формирования микропрофиля «анкерного» типа, повышающего прочность механического сцепления частиц покрытия с основной лопатки;

– закономерности формирования физико-механических свойств поверхности под плазменное покрытие комбинированными воздействиями, позволяющие провести оптимизацию режимов процессов для получения заданных эксплуатационных условий для лопаточных деталей с углом раскрытия межлопаточного канала - не более 45°;

– методика технологического обеспечения качества предварительной обработки поверхности сложного профиля для плазменных покрытий в режиме взаимосвязанных комбинированных воздействий с патентоспособным технологическим решением для предварительной комбинированной обработки поверхности сложного профиля под покрытие лопатки.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.02.08 – Технология машиностроения по пунктам: 3 – Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения; 4 – Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска; 7 – Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин.

Реализация работы. В 2015-2016 гг. результаты работы переданы для апробации и внедрения на ВМЗ филиал АО ГКНПЦ Хруничева (г. Воронеж), в ОАО «КБХА» (г. Воронеж) и ряд других предприятий. Результаты работы были апробированы и внедрены в производственных условиях с общим годовым эффектом 370 тысяч рублей. Основные научные положения и методические материалы используются при выполнении ГБ НИР на кафедре «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах: IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (IV Козловские чтения, Самара, 2015), VIII Международной научно-технической конференции «Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе СИНТ'15 (Воронеж, 2015), VIII-ой Международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения» (Москва, 2016), X Международной научно-технической конференции «Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике» (Воронеж, 2018), научных конференциях Воронежского механического завода (Воронеж) и семинарах кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (Воронеж, 2014-2018).

Публикации. Автор опубликовал 24 научные работы общим объемом 11,4 п.л., доля которых по теме диссертации составляет 23 научные работы общим объемом 10,5 п.л., а лично соискателю принадлежит 6,2 п.л.). В это число входит одна публикация в издании, индексируемом в цитатно-аналитической базе данных Scopus, 5 публикаций в изданиях из перечня ВАК и 2 патента.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 166 страницах, содержит 40 рисунков и 10 таблиц. состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка библиографических источников и

приложений.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показана научная и практическая значимость работы.

Первая глава содержит результаты анализа известных процессов комбинированной обработки с заданным уровнем активации и требуемой шероховатостью для нанесения плазменных покрытий на поверхности сложного профиля деталей машин и позволяет сделать вывод: в настоящее время отсутствуют эффективные технологические методы комбинированной предварительной обработки труднодоступных поверхностей деталей сложного профиля, особенно если лопатка выполнена в цельной заготовке из труднообрабатываемого материала; известные материалы по механизму влияния различных физико-механических воздействий на протекающие при комбинированной обработке процессы не дают однозначного и обоснованного представления о методах управления технологическими режимами для достижения заданных технологических показателей.

В результате анализа имеющихся данных показано, что рассматриваемая в работе технология комплексной комбинированной эрозионно-термической и электро-химико-механической обработки перспективна для достижения высокой степени активации поверхностного слоя под плазменное покрытие, сформулированы цели и задачи исследований.

Вторая глава посвящена разработке рабочих гипотез, и созданию патентоспособного способа применительно.

При этом граничными условиями для моделирования комбинированных воздействий являются геометрические и технологические параметры: угол раскрытия межлопаточного канала - не более 45° , когда традиционный инструмент невозможно доставить в зону обработки; площадь фактического контакта частиц покрытия с основой (не менее 70 % от расчетной); высотные значения шероховатости в интервале 60-80 мкм; форма микровыступов шероховатой поверхности (анкерный характер); мощность эрозионно-термического импульса (не менее 10^7 Вт/см²); напор потока газожидкостной токопроводящей среды (до 0,4 МПа).

Предложенные концепции и обоснованные гипотезы позволили разработать новый способ комбинированной обработки при подготовке поверхности сложного профиля лопаток из труднообрабатываемых материалов перед нанесением жаростойких покрытий с эрозионно-термическим, механическим и электрохимическими воздействиями на зону обработки. К особенностям предложенного способа относится возможность формирования в едином технологическом процессе обоснованной очередности комбинированных воздействий на поверхность сложного профиля при обработке под последующее покрытие.

Первое, эрозионно-термическое, позволяет получить стабильную высокую шероховатость с минимально возможной величиной дефектного слоя и заданную геометрическую точность на всей длине образующей. Второе комбинированное воздействие – электро-химико-механическое, работая по явно выступающим вершинам, удаляет дефектный слой от первого технологического перехода.

При этом за счет ускоренного анодного растворения термоупрочненных вершин микровыступов достигается большая интенсивность снижения высоты микронеровностей. Но необходимо знать, когда завершить доводку микропрофиля, достигнув требуемой степени активации поверхности под

покрытие и получив от деформации вершин шероховатости «анкерный» характер выступов. Предлагаемая технология как раз и направлена на стабилизацию показателей шероховатого поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, самого микропрофиля и поверхностной энергии за счет взаимоувязанного совмещения и последовательности комбинированных воздействий (рисунок 1).

В момент первичного импульса с от генератора из-за разряда между электродом с термоактивным покрытием заготовки 2 в слабопроводящей среде 3 (рисунок 1, а) образуется направленный поток электронов 4, формируя углубление 5 первоначальной глубиной h_1 с единичным термическим воздействием на глубину δ_{t1} за пределами лунки. На поверхности покрытия часть потока электронов, отраженная поверхностью заготовки, за счет протivotока энергии также образует лунку. Кислород, образующийся в процессе диссоциации рабочей среды (технической воды) в зоне плазмы, способствует проявлению кумулятивного эффекта и образованию высокоскоростного плазменного потока тепловой энергии 7 с плотностью мощности излучения более 10^7 Вт/см². В такой термодинамической системе направление самопроизвольного теплообмена между телами постоянно меняется, но форма лунки на покрытии повышает удельную мощность излучения, фокусируя поток тепловой энергии в лунку на заготовке, предварительно нагретой первичным импульсом. Далее при последующих импульсах тока формируется более глубокая (h_{max} на рисунке 1, а) лунка 8 уже с значительно большей зоной прогрева δ_{tmax} . При этом удельный съем материала и радиус лунки увеличиваются ($r_{tmax} > r_1$), а диаметр лунки и глубина микротрещин остаются в значениях примерно одного порядка с аналогичными параметрами при традиционной электроимпульсной обработке. Одновременно с эрозионно-термическим воздействием за счет слабой проводимости технической воды происходит анодное растворение материала в зоне термического

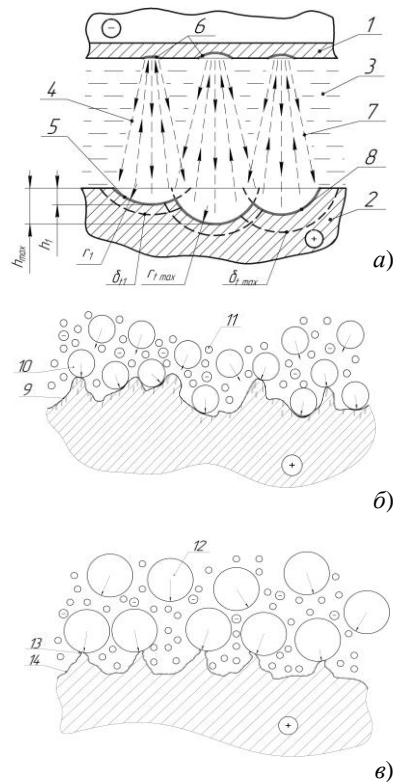


Рисунок 1 - Схема формирования комбинированной обработкой регулярного микрорельефа поверхности с заданной шероховатостью: а – механизм эрозионно-термического воздействия электродом-инструментом с термоактивным покрытием 2; б – основной этап удаления дефектного слоя; в – окончательное удаление дефектного слоя и деформирование вершин выступов микрошариками

воздействия и частично удаляется измененный дефектный слой от интенсивной эрозионно-термической обработки. Сформированные регулярные микровыступы величиной до 80 мкм и дефектный слой, оставшийся от предыдущей обработки, не удаляют как в существующей практике, значительно экономя время всего технологического цикла. Вместо этого проводят комбинированную обработку микрошариками (рисунки 1, б и 1, в). Оставшийся на микровыступах поверхности измененный слой материала снимают комбинированной обработкой микрошариками. Для этого на поверхность 9 с оставшимися после предыдущей обработки дефектами поверхности (рисунок 1, б) сначала подают микрошарики 10 диаметром фракции 50 мкм и газожидкостную слабопроводящую среду 11, которые с помощью контактного взаимодействия и эффекта анодного растворения в основном разрушают и удаляют измененный слой материала. Затем подают шарики 12 диаметром около 100 мкм, которые вместе с токопроводящей средой завершают удаление дефектного слоя и за счет деформационного сдвига сминают и несколько осаживают вершины микровыступов (рисунок 1, в). Так как шероховатость под покрытие должна быть оптимальной не только количественной по показателю R_z , но и особой формы, то в результате сминания острых вершин микровыступов обеспечивается анкерный (якорный) вид соединения покрытия с поверхностью, при котором вершины микровыступов 13 несколько нависают над лункой и под них в последующем затекают или забиваются в пластичном состоянии напыляемые частицы. Наличие газожидкостной токопроводящей среды препятствует перегреву мест соударений гранул с поверхностью и образованию остаточных напряжений растяжения, а также ускоряет процесс за счет явления анодного растворения материала. Удаление дефектного слоя значительно зависит от скорости анодного растворения в месте соударения, которая в момент контакта шарика с деталью через жидкостную токопроводящую пленку 14 резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения до 2-х раз и составляет не более 15-20 с на участок пятна распыла. Таким образом, за это время микрошарики незначительно снижают высокую шероховатость и обеспечивают ее осаживание микрошариками до получения вершин анкерного типа.

В третьей главе после разработанного способа (глава 2) проанализированы явления, происходящие при формировании заданного микропрофиля поверхности лопатки, и предложена интенсификация тепловых и эрозионных составляющих, при этом используется соотношение, которое можно выразить коэффициентом схватывания (страница 5) в котором $S_{k\ max}$ – максимально возможная площадь контакта, которая и определяется энергией активации E_a , (1) за счет увеличения объема контактирующих элементов $N_{(t)}$. Итоговая задача – поднять шероховатость и затем ее активировать в условиях труднодоступных мест лопаточной детали

Сущность решения 1 и 2 задач найдена. Но для получение нужной величины выступов, поиска эффективных электрических и термических параметров формообразования на получение заданной формы неровностей с учетом граничных условий реализации процесса активации поверхности отсутствовали нормированные режимы. На начальном этапе это выглядело таким образом, что при формообразовании поверхности сложного профиля в условиях межлопаточного канала с углом раскрытия не более 45° проводили эрозионно-термическую обработку электродом с покрытием из термоактивного материала (цинка), образующего кумулятивное термическое воздействие на зону обработки при действии электроэрозионного разряда до достижения

значения шероховатости поверхности неуправляемого профили с выступами в интервале 80 мкм (рисунок 2), требуемой для механического сцепления покрытия с основным материалом. Чтобы разобраться с некоторыми ограничениями по мощности, был проведен анализ управляемых и неуправляемых факторов при нанесении покрытия. В общем виде адгезия зависит от ряда факторов:

$$\sigma_{adh} = f(E_a, T_k, \tau, v, N_{(\tau)}), \quad (1)$$

где E_a - энергия активации в зоне контакта частицы покрытия с поверхностью; T_k - температура в зоне контакта частицы с поверхностью; τ - длительность взаимодействия в контакте, определяемая периодом кристаллизации частицы; v - скорость соударения частицы с подложкой; $N_{(\tau)}$ - количество атомов из общего числа N_0 , прореагировавших за время τ в зоне контакта частицы с поверхностью. Это формула является основополагающей для процесса нанесения покрытий.

Все эти системные элементы взаимосвязаны и в достаточной мере управляются режимными параметрами процесса напыления покрытий. При подготовке поверхности к нанесению покрытий мы с помощью режимов комбинированной обработки управляем энергией активации E_a через увеличение объема контактирующих элементов $N_{(\tau)}$. Переходя на нормируемый размерный (технологический) уровень, полагаем, что

$$\frac{\sigma_{(T_k, \tau)}}{\sigma_{max}} = \frac{N_{(\tau)}}{N_0} = \frac{S_{kf}}{S_{kmax}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{(T_k, \tau)}$ - прочность сцепления отдельной частицы с подложкой при напылении покрытия; σ_{max} - максимально возможная прочность сцепления при напылении, определяющая уровень нормирования адгезии; S_{kf} и S_{kmax} влияют на максимально возможную площадь контакта. Фрагменты атомарного контактирования ($N_{(\tau)}$ и N_0) в дальнейшем не рассматриваются, так как их взаимодействие недостаточно надежно нормировано в машиностроении.

Экспериментально установлено, что покрытие будет достаточно прочным при значении соотношения (2) более 0,7. Это определяется тем, что очаги схватывания не заполняют всю шероховатую поверхность площади контакта S_{kmax} , а площадь фактического схватывания S_{kf} , что можно выразить коэффициентом $k_{схв} = S_{kf}/S_{kmax}$. Величина $k_{схв}$ в большей мере зависит от энергии активации E_a , которая проявляется площадью фактического схватывания S_{kf} , который должен быть не менее 0,7 и будет характеризовать прочность сцепления с подложкой одного слоя частиц покрытия, не связанных между собой, в большинстве случаев толщиной не более 15 мкм в соответствии с размерами кристаллизовавшихся частиц. Реальная прочность покрытия будет являться разностью между прочностью соединяемых в зонах схватывания частиц и остаточными микронапряжениями, т. е. $\sigma_{(T_k, \tau)} - \sigma_{ост}$.

Для частичного решения задачи третьей рассмотрены в технологическом плане эрозионно-термическая обработка и микрошарики. Они каждый



Рисунок 2 - Фрагмент лопаточной детали после интенсивной эрозионно-термической обработки

последовательно должны сформировать свою развитую поверхность, характеризующуюся дополнительными коэффициентами k_{R_3} и $k_{R_{\text{мкш}}}$.

Действительно, площадь схватывания больше зависит от реальной площади шероховатой и активированной поверхности, которая значительно больше номинальной геометрической на величину коэффициента увеличения площади шероховатой поверхности k_R , представляющего собой отношение фактической площади шероховатой поверхности к площади контакта S_k в проекции на горизонтальную плоскость. Его нормирование необходимо для прогнозирования $S_k \phi$ в различных условиях обработки. В случае эрозионно-термического формообразования k_{R_3} обосновывается радиусом r_l и глубиной лунки h_l от локального эрозионно-термического воздействия. Приведенный радиус лунки определяется выражением

$$r_l = k_{\Delta h} h_l \sqrt{\frac{3h_l E_u^q}{k_{ЭТ}} - 1}, \quad (3)$$

где $k_{\Delta h}$ – коэффициент, который учитывает снижение глубины лунки за счет удаления материала с вершины сопрягаемых углублений из-за взаимного перекрытия (при эрозионно-термической обработке может изменяться от 0,5 до 0,7); q – показатель степени, определяемый экспериментально; $k_{ЭТ}$ – эмпирический размерный коэффициент увеличения глубины лунки во время действия единичного импульса, учитывающий теплофизические свойства термоактивных покрытий электродов и воздействие на процесс кумулятивных параметров эрозионно-термической обработки (может изменяться от 0,6 до 0,7 мкм·Дж, на малых толщинах не вводится); E_u – энергия единичного импульса (в наших ранних работах достаточно изучена); обработка проводилась на копировально-прошивочных станках с ЧПУ.

Очевидно, что для стабильного увеличения неровностей требуется форсирование режимов с кумулятивным воздействием за счет поджига термоактивного покрытия электрода предшествующим импульсом (глава 2).

Из геометрических соотношений и с учетом (3) получаем

$$k_{R_3} = \frac{\left(\frac{k_{ЭТ}}{3k_{\Delta h}^2 h_l E_u^q} + 2 \right)}{k_{\text{пер}}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{пер}}$ – коэффициент взаимного перераспределения впадин и сглаживания выступов в плоскости обрабатываемой поверхности. При равновероятном импульсном термодинамическом воздействии на каждую точку обрабатываемой поверхности и 100 % равномерности обработки $k_{\text{пер}}$ достигает 6. Такая равномерность и высота неровностей 80 мкм позволяет наносить покрытие, но сцепление очень мало.

При обработке микрошариками $k_{R_{\text{мкш}}}$ обосновывается параметрами пластического отпечатка шарика диаметром $d_{ш}$. Для прогнозирования достижимой шероховатости обработанной поверхности необходимо учитывать, что количество указанных серий на рисунке 3 соответствует коэффициенту перекрытия отпечатков $k_{\text{пер}}=3$, а сплошность обработки при этом составляет 95 %. Показанные на рисунке 3 вершины микронеровностей регулярного микрорельефа поверхности находятся на максимально упакованных по

обработанной поверхности при диаметрах впадин $d_{в}$. В итоге прогнозирование прочности сцепления покрытия с основной определяется соотношением

$$\sigma_{адс} = \frac{k_{сва} \cdot k_R (F_{кр} \pm \sigma_{ост})}{S_k}, \quad (5)$$

где $F_{кр}$ – критическое усилие, приложенное к покрытию, и при многократном контакте приводит к отслаиванию покрытия от подложки (обычно число контактов не превышает 12 (получено экспериментально в ранних работах), но для новых материалов уточняется экспериментом на имитаторе); S_k – геометрическая площадь контакта покрытия с подложкой; $k_R = k_{R2} \cdot k_{Rмкш}$ – для двух последовательных этапов обработки, где $k_{Rмкш}$ – коэффициент электро-химико-механического воздействия микрошариками, обосновывающий величину увеличения площади развертки шероховатой поверхности на различных режимах обработки, характеризуется условиями перекрытия поверхности отпечатками (рисунок 3). В (4), (5) присутствуют такие величины, как энергия импульса и усилие в зоне контакта.

Таким образом, они в достаточной мере управляемы с помощью режимных параметров комбинированных процессов: сила тока, напряжение, давление потока, расход среды и др. При большой толщине покрытия прочность сцепления коррелируется экспериментальным коэффициентом k_{δ} , приводящим прочность сцепления к толщине $\delta=0,3$ мм, а уровень остаточных напряжений принимаем равным 0. Так как при напылении покрытия в зоне контакта частицы с подложкой образуются остаточные микронапряжения растяжения, а контакт очень непродолжителен, то с помощью микрошариков в итоге напряженное состояние приводится практически к нулевой отметке.

Это возможно обеспечить, создавая во время активации поверхности нормируемый уровень остаточных напряжений сжатия со степенью наклепа 2-3,5 %.

Четвертая глава содержит результаты экспериментального исследования режимов комбинированной обработки и формирования системы технологического обеспечения активации поверхности лопатки под покрытие. Высотные показатели шероховатости неровностей после обработки электродами с термоактивным покрытием превышают значения, полученные при использовании электрода без покрытия. Усталостная прочность покрытия в большой степени зависит от измененного слоя углубления, в котором являются концентраторами напряжений. Теоретически глубина микротрещин может быть на 20–60 % больше глубины лунки. Проведенные эксперименты выявили – такое соотношение справедливо только для разрядов с энергией до 1,2 Дж (рисунок 4), когда глубина трещиноватого слоя составляет до 0,02 мм. То есть тепловая энергия при кумулятивном эффекте вызывает значительные нарушения качества поверхностного слоя (2 на рисунке 4) в области малых энергий

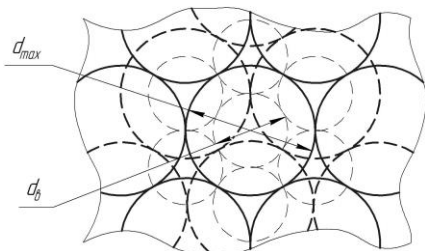


Рисунок 3 - Схема равномерного покрытия плоской поверхности пластическими отпечатками диаметром d_{max} при $k_{пер}=3$

импульса, далее такой эффект не оказывает значительного влияния, и глубина микротрещин становится примерно одинаковой и при воздействии импульса тока, и при последующем интенсивном термодинамическом воздействии (1, 2 на рисунке 4). Таким образом, мы можем интенсифицировать эрозионно-термический процесс до энергии импульса 1,2 Дж.

Проведенные исследования также показали, что при последующей комбинированной обработке микрошариками в газожидкостной слабопроводящей среде глубина микротрещин снижается до 1–2 мкм. В качестве рабочей среды использовались стальные микрошарики диаметром 0,05...0,3 мм. Расстояние вдоль оси сопла от его среза и до обрабатываемой поверхности составляло 100±50 мм. Диаметр активной зоны потока рабочей среды на этом расстоянии составлял 30-50 мм; напряжение тока - 2-10 В; расход слабопроводящей среды – 1-3 м³/мин. Обработку образцов осуществляли при их вращении в одной плоскости при $n_{вр}=100$ об/мин. Время обработки участка поверхности t_1 устанавливалось в соответствии с временем $t_{обр}$ обработки вращающихся с оснасткой плоских образцов:

$$t_{обр} = \left(\frac{\pi D_{ар}}{d_{аз}} \right) t_1, \quad (6)$$

где $D_{вр}=100$ мм – диаметр для оснастки для образцов в процессе обработки; $d_{аз}=30$ мм – диаметр активной зоны потока рабочей среды на расстоянии 50 мм от среза сопла. Подтверждена эффективность снятия дефектного слоя с сохранением активированной шероховатой поверхности. Установка для проведения исследований с имитатором и образцами показана на рисунке 5. Затем была проведена обработка штатной детали. Поверхности лопаток сложного профиля предварительно спрофилированы электроэрозионной обработкой электродом без покрытия по существующей технологии на черновых режимах при достижимой для данного материала производительности, и оставлен припуск в 0,2 мм на каждую сторону

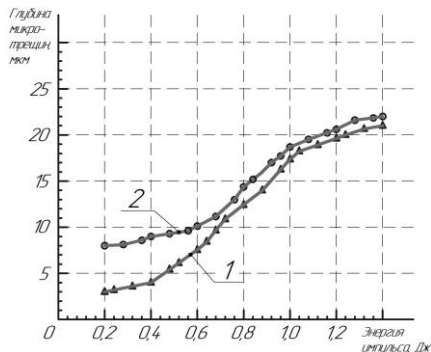


Рисунок 4 - Глубина микротрещин при обработке электродом с цинковым покрытием в слабопроводящей среде (1) и без покрытия в деионизированной среде (2)



Рисунок 5 – Имитатор вогнутой поверхности с плоскими образцами в камере струйно-динамической установки

канала. При включении напряжения 90 В сила тока составила около 8-10 А, скорость подачи 1,5 мм/мин. Выполнена эрозионно-термическая обработка всего контура лопатки. Достигнута шероховатость в интервале 80 мкм, глубина трещиноватого слоя составила не более 20 мкм.

Оставшийся на микровыступах измененный слой материала был удален комбинированной обработкой микрошариками. Обработка лопаток проводилась на установках эжекторного типа микрошариками диаметром 50 и 100 мкм с наложением тока низкого напряжения на следующих режимах: время обработки каждого соседнего участка поверхности 20 с; угол соударения потока микрошариков с поверхностью 90°; скорость вращения шпинделя установки 30 мин⁻¹; давление подаваемого сжатого воздуха 0,2 МПа; напряжение 4–8 В; расход газожидкостной слабопроводящей среды 2 м³/мин. В качестве рабочей среды использовались микрошарики диаметром 0,05-0,1 мм из никелевого высокопрочного сплава, идентичного материалу детали для исключения шаржирования. Снижение шероховатости в большей мере зависит от скорости анодного растворения дефектного слоя в месте микровыступа, которая в момент контакта шарика с деталью резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения (рисунок 6). Из графика очевидно, что превышение степени наклепа более 3 % не дает ощутимого результата по увеличению съема материала.

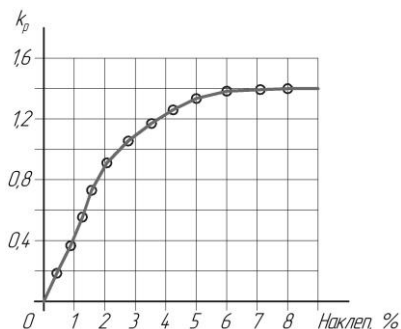


Рисунок 6 - Зависимость коэффициента интенсификации анодного растворения в момент соударения микрошарика с поверхностью детали от степени наклепа

После обработки всех поверхностей за два этапа в течение 10 минут ее шероховатость составила 60 мкм, характер шероховатости имел на выступах «анкерный» характер, измененный слой практически отсутствовал. Степень наклепа получена в интервале 1,4÷2,3 %, что отвечает заданным техническим требованиям к поверхности под покрытие. После напыления традиционного плазменного покрытия группы Ni-Cr по новой методике подготовки поверхности прочность сцепления покрытия составила до 90 МПа, что на 25 % выше ранее достигнутой по традиционной методике подготовки, что соответствует выражению 5, подтвержденному отрывом покрытия на образце. Металлографические исследования не выявили отслоений покрытия от основы по всему профилю лопатки (рисунок 7). Усталостные испытания в условиях знакопеременных нагрузок показали снижение числа отказов лопаточных машин на 7 %.

Полученные результаты позволили разработать *новую методику технологического обеспечения подготовки поверхностей лопаток под покрытие*, в которую входят основные операции:

1. Предварительная включает: оценку возможности комбинированной обработки поверхностей сложного профиля, применяемой на участках, не доступных для традиционных технологий зачистки под покрытие; расчет режимов обработки (для электроэрозии по (4), (5), справочникам и данных

рисунка 4, например – напряжение 90 В, сила тока 10-8 А, плотность мощности излучения 10^7 Вт/см²), их контроль с учетом требований к поверхностному слою и геометрии лопатки; контроль состояния электроинструментов и сплошности термоактивного покрытия, обработку режимов на образце до достижения расчетных величин; для микрошариков – выбор режимов настройкой на имитаторе до достижения прогиба нужного значения (например - давление сети газожидкостной среды 0,4 В, расстояние от среза сопла до поверхности 100 мм, размер фракции шариков 50 мкм, скорость вращения шпинделя установки 30^{-1} , время обработки по выражению (6)), окончательная настройку имитатора под размеры лопатки; проверка состояния микрошариков, оформление опытной документации.

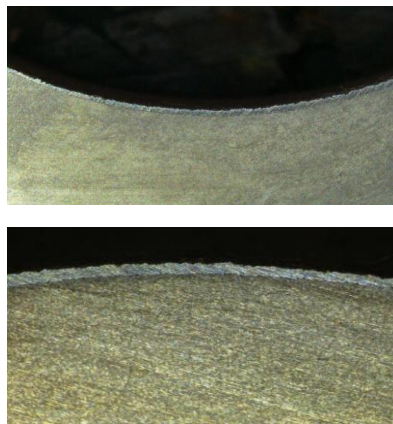


Рисунок 7 – Элементы сечения поверхности с покрытием

2. Операция обработки включает в себя не зачистку наследованных дефектов, а два перехода:

1) тщательный установ на станок, так как на эрозионно-термическую обработку лопатки оставлен лишь один проход с припуском в 0,02 мм и геометрическая ошибка здесь при базировании исключается станком, далее проводят обработку на режимах, выбранных при проведении операции 1 с текущим контролем ее параметров системами ЧПУ;

2) анодно-химико-механическую доводку поверхности микропрофиля анкерного типа на режимах по результатам настройки имитатора, с преследующей проверкой характера остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, которые согласно выражению (5), при растягивающем направлении могут снижать прочность сцепления с основой; шероховатость от 20 до 160 мкм по ГОСТ 2789-73, ее характер по эталону; плановый контроль геометрических размеров на случайные ошибки, хотя режимы обеспечивают их технологически, необходимую корректировку технологических режимов.

3. Заключительный этап: эталонирование поверхности детали и нормирование режимов обработки; назначение метода межоперационного хранения деталей, необходимость и состав раствора для промывки (обезжиривания), определение интервала времени до выполнения последующей операции (не более 3 ч - в зависимости от категории размещения деталей по ГОСТ 15150-69), проектирование вспомогательных операций; разработка технологической документации, инструкций; нанесение покрытия; контроль адгезии на образцах; усталостные испытания; оформление протокола испытаний и технического акта внедрения назначение вспомогательных операций (промывки, межцехового транспортирования, входного контроля и др.).

Общие выводы

1. Установлен научно обоснованный механизм влияния взаимосвязанных комбинированных воздействий различного вида (электрических, эрозионных,

химических, термических и механических) на максимально возможную прочность сцепления при напылении σ_{\max} , которая определяет уровень нормирования адгезии, площадь фактического схватывания частицы с подложкой $S_{к\phi}$ и максимально возможную площадь контакта частиц покрытия с основой $S_{к\max}$ по результатам подготовки труднодоступной поверхности лопатки под покрытие через энергетические параметры процесса.

2. Установлено, что высота неровностей при обработке электродами с термоактивным покрытием в межлопаточном канале может быть получена 80 мкм, что не достижимо при обработке электродами без покрытия, а толщина дефектного слоя при этом составляет не более 0,02 мм. При последующей комбинированной обработке микрошариками за счет анодного растворения дефектный слой устраняется, а вершины микровыступов «анкерного» типа получают регулярное распределение (до 95 %), чего ранее не достигалось даже при обработке плоской поверхности.

3. Впервые предложена обоснованная схема технологического обеспечения комплексной интенсификации комбинированных эрозионно-химических, термических, электрохимических и механических процессов по получению заданного микропрофиля поверхности за счет управления энергией кумулятивного воздействия и анодного растворения. Это позволило обеспечить получение активированного микропрофиля бездефектной поверхности с высотой шероховатостью $R_a=60$ мкм с выступами анкерного типа, что недостижимо для других методов обработки в условиях межлопаточного канала с углом раскрытия не более 45° .

4. Обоснование рабочих диапазонов комбинированной обработки микрошариками в слабопроводящей газожидкостной среде при анодном растворении измененного слоя в условиях канала с углом раскрытия не более 45° позволило разработать режимы процесса, обеспечивающие удаление дефектов с микровыступов поверхности после эрозионно-термической обработки для обеспечения показателей, недостижимых ранее, за счет увеличения скорости в 2–3 раза анодного растворения дефектного слоя в месте микровыступа в момент контакта шарика с деталью. После обработки всей поверхности в течение 10 мин (время снижено в 3 раза) по требованию разработчика получена шероховатость 60 мкм, степень равномерно распределенного наклепа составила $1,4\div 2,3$ %.

5. Разработанные закономерности комбинированного воздействия потока газожидкостной токопроводящей среды с микрошариками позволили рассчитать эффективные режимы протекания процесса обработки для угла раскрытия канала 45° , а именно: время обработки каждого соседнего участка поверхности – 20 с; угол соударения потока микрошариков с поверхностью – 90° ; скорость вращения шпинделя установки – 30 мин^{-1} ; давление сжатого воздуха – 0,2 МПа; напряжение 4–8 В; расход газожидкостной среды – $2 \text{ м}^3/\text{мин}$. Эти стабильные режимы обеспечивают такие же стабильные размеры в рамках технологического обеспечения подготовки поверхностей под покрытие и периодический контроль нужен только для исключения случайных ошибок.

6. Полученные результаты позволили предложить отличную от традиционной методику технологического обеспечения подготовки поверхностей под покрытие, которая включает в себя не зачистку наследованных дефектов, а интенсивную (E_n до 1,2 Дж) эрозионно-термическую обработку лопатки под покрытие с использованием кумулятивного эффекта; ускоренную в несколько раз анодно-химико-механическую доводку поверхности микропрофиля анкерного типа с последующим эталонированием

поверхности детали и нормированием режимов обработки, что позволяет совместить все комбинированные воздействия в комплексной технологии подготовки поверхности лопатки под покрытие.

7. Разработаны технологические операции и средства технологического оснащения, встраиваемые в существующие технологии лопаточных деталей для комбинированной обработки для подготовки поверхности лопаток из труднообрабатываемых материалов с комплексным эрозионно-химико-термическим, механическим и электрохимическим воздействиями на зону обработки под нанесение жаростойких покрытий с обеспечением сцепляемости покрытия с основой на 25 % более значений, достижимых ранее. Результаты исследований внедрены с значительным экономическим эффектом.

Заключение

В работе решена проблема научного и технического обоснования методов и средств технологического обеспечения эффективной обработки под плазменное покрытие в области комплексного использования комбинированных эрозионно-химико-термических и анодно-химико-механических воздействий на труднодоступные поверхности сложного профиля с учетом эксплуатационных показателей нагруженных лопаточных деталей.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Сухочев, Г. А. Интенсификация электроэрозионной обработки поверхностей гидрооборудования под напыление покрытий [Текст] / Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев, С. Н. Коденцев // Насосы. Турбины. Системы. – 2016. – № 1(18). – С. 33-40.

2. Сухочев, Г. А. Технологическое обеспечение качества покрытий лопаточных деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, Д. В. Силаев // Насосы. Турбины. Системы. – 2017. – № 1(22). – С. 25-33.

3. Сухочев, Г. А. Технологическое обеспечение качества газотермических покрытий на поверхностях сложной формы [Текст] / Г. А. Сухочев, А. М. Кадырметов, Д. В. Силаев // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – 2017. – № 2(41). – С. 26-32.

4. Силаев, Д. В. Комбинированная обработка поверхностей сложного профиля под покрытие [Текст] / Д. В. Силаев, Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 6(150). – С. 269-272.

5. Силаев, Д. В. Технологические возможности комбинированной обработки по активации поверхностей под покрытие [Текст] / Д. В. Силаев, Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – № 4 (160). – С. 114-117.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе цитирования Scopus

6. Achievement of Required Surface Roughnesses in Complex Profile Channels by Dynamic Combined Processing [Электронный ресурс] / A. Boldyrev, G. Sukhochev, A. A. Boldyrev, D. Silaev, V. Sokolnikov // International Scientific Technical Conference «Dynamics of Technical Systems» (DTS) (Rostov-na-Donu, Russia, September 12-14, 2018) : MATEC Web of Conferences 226, 01021 (2018) DTS-2018; https://doi.org/10.1051/mateconf/2018226_01021.

Статьи и материалы конференций

7. Родионов, А. О. Процессы комбинированного воздействия при обработке узких каналов деталей гидрооборудования [Текст] / А. О. Родионов, Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев // Насосы. Турбины. Системы. – Воронеж: Научная книга, 2014. – № 4(13). – С. 49-56.

8. Комбинированная обработка узких каналов деталей высоконапорных систем подачи [Текст] / А. О. Родионов, Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев, В. Н. Сокольников // Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2014. – Вып. 14. – С. 87-92.

9. Смоленцев, В. П. Электрохимическая обработка лопаток машин [Текст] / В. П. Смоленцев, А. И. Портных, Д. В. Силаев // Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2014. – Вып. 12. – С. 86-92.

10. Журавский, А. К. Исследование путей повышения точности электрохимической размерной обработки лопаток авиационных двигателей [Текст] / А. К. Журавский, С. В. Сафонов, Д. В. Силаев // Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2014. – Вып. 12. – С. 106-112.

11. Сухочев, Г. А. Комбинированная обработка теплозащитных покрытий типа «Кермет» [Текст] / Г. А. Сухочев, С. С. Юхневич, Д. В. Силаев // Актуальные проблемы ракетно-космической техники: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. - Самара: СамНЦ РАН, 2015. - С. 349-351.

12. Сухочев, Г. А. Доводка узких каналов комбинированными методами [Текст] / Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев, В. Н. Сокольников // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2015. – Вып. 9. – С. 4-14.

13. Сухочев, Г. А. Доводка узких каналов комбинированными методами [Текст] / Г. А. Сухочев, Д. М. Небольсин, Е. Г. Смольяникова, Д. В. Силаев // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2015. – Вып. 9. – С. 27-38.

14. Сухочев, Г. А. Процесс отделочно-упрочняющей обработки поверхности лопаточных деталей с учетом технологической наследственности [Текст] / Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев // Насосы. Турбины. Системы. – Воронеж: Научная книга, 2015. – № 2(15). – С. 22-33.

15. Сухочев, Г. А. Формирование упрочненного слоя у лопаточных деталей с учетом явления Баушингера [Текст] / Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев, Н. М. Кондрационов // Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе: труды VIII междунар. науч.-техн. конф. «СИНТ'15». – Воронеж: Научная книга, 2015. – С. 158-166.

16. Сухочев, Г. А. Комбинированная обработка мелкогабаритных каналов деталей систем охлаждения [Текст] / Г. А. Сухочев, А. О. Родионов, Д. В. Силаев // Антропометрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности: материалы II-ой междунар. науч.-практ. конф.: Воронеж: ВГТУ, 2015. Ч. 2. – С. 267-273.

17. Сухочев, Г. А. Формирование упрочненного слоя лопаточных деталей не профилированным инструментом [Текст] / Г. А. Сухочев, Н. М. Кондрационов, Д. В. Силаев // Насосы. Турбины. Системы, – Воронеж: Научная книга, 2015. – № 3(16). – С. 37-43.

18. Сухочев, Г. А. Формирование комбинированными методами поверхностей сложного профиля под нанесение износостойких покрытий [Эл. рес.] / Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев, С. Н. Коденцев // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. – № 2 (16). – С. 56-65. Режим доступа: http://vestnikvgtu.ru/arhiv/2016/2/10_2_16_2016.pdf

19. Коденцев, С. Н. Интенсификация процесса электроэрозионной обработки материалов аэрокосмической техники [Текст] / С. Н. Коденцев, Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев // Научно-технические технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016): труды VIII-ой междунар. научн. техн. конф. – М.: МАДИ 2016. – С. – 82-84.

20. Сухочев, Г. А. Технологическое обеспечение стабильности процесса электроэрозионного формообразования каналов [Текст] / Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ. – 2016. Вып. 10. – С. 77-89.

21. Силаев, Д. В. Обработка хрупких материалов и функциональных покрытий комбинированными методами [Текст] / Д. В. Силаев, С. С. Юхневич // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. - Самара: Самарский университет, 2016. - Ч. 1. - С. 229-230.

Патенты на способы и устройства

22. Патент № 2634398 Российская Федерация, МПК6 В23Н 5/06, 5/10. Способ комбинированной обработки узких каналов деталей [Текст] / Г. А. Сухочев, А. О. Родионов, С. Н. Коденцев, Д. В. Силаев, В. Н. Сокольников; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2015101018, заявл. 12.01.2015; опубл. 26.10.2017, Бюл. № 30. - 6 с.

23. Патент № 2680333 Российская Федерация, МПК6 В23Н 7/02, В23Н 9/10. Способ подготовки поверхности сложного профиля под газоплазменное напыление [Текст] / Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев, С. Н. Коденцев; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2017120700, заявл. 13.06.2017; опубл. 19.02.2019, Бюл. № 5. - 7 с.

Подписано в печать 12.09.2019.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 80 экз. Заказ № 69

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14