

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.793

СУХОЦКИЙ
Павел Геннадьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ
ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОВОЛОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ
С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ АКТИВИРОВАНИЕМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности **05.02.07** – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2014

Работа выполнена в государственном научном учреждении «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» и Белорусском национальном техническом университете

Научный
руководитель

Белоцерковский Марат Артемович,
доктор технических наук, доцент,
зав. лабораторией газотермических методов упрочнения
деталей машин ГНУ «Объединенный институт
машиностроения НАН Беларуси»

Официальные
оппоненты:

Рубаник Василий Васильевич, доктор технических наук,
доцент, директор ГНУ «Институт технической
акустики НАН Беларуси»;

Шевцов Александр Иванович, кандидат
технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
Государственного научно-производственного объединения
порошковой металлургии НАН Беларуси

Оппонирующая
организация

Государственное научное учреждение «Физико-
технический институт НАН Беларуси»

Защита состоится «27» июня 2014 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, Минск, ул. Б. Хмельницкого, 9, учебный корпус 6, ауд. 405, тел. ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «27» мая 2014 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор

Девойно О.Г.

© Сухоцкий П.Г., 2014
© Белорусский национальный
технический университет, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Использование высокоэффективных технологий упрочнения-восстановления деталей машин с применением газотермических покрытий является одним из основных показателей, определяющих на сегодняшний день технический уровень как производства новой, так и ремонта бывшей в эксплуатации техники. Среди методов газотермического напыления особое место занимает процесс газопламенного напыления проволочными материалами (ГПН), отличающийся низкой себестоимостью, более высокими эксплуатационными свойствами покрытий (адгезией, плотностью) по сравнению с напылением порошков, простотой реализации. Как область применения, так и показатели эксплуатационной долговечности ГПН покрытий зависят не только от свойств наносимого материала, но и от величины адгезии и пористости. Все известные зарубежные и отечественные проволочные термораспылители обеспечивают относительно высокую производительность нанесения стальных покрытий (4–10 кг/ч), но при этом их плотность не превышает 90%, а прочность сцепления на отрыв (без специального подслоя) – менее 32 МПа, что обусловлено относительно большими размерами (30–100 мкм) частиц распыленного проволочного материала. Однако для формирования антифрикционных покрытий на крупногабаритных деталях узлов трения скольжения необходимо обеспечить величину прочности сцепления покрытий на отрыв не менее 40 МПа, а для защиты деталей от коррозии требуется наносить покрытия плотностью более 95%. Одними из наиболее эффективных являются методы активирования процессов распыления металлов и газотермического нанесения покрытий, основанные на использовании ультразвуковых колебаний, однако, отсутствуют методы активирования, использующие ультразвуковые колебания при распылении проволочных материалов.

Таким образом, для дальнейшего развития процесса ГПН проволочными материалами весьма актуальным является разработка метода, позволяющего активировать процесс распыления с получением частиц размером в 2–3 раза меньшим, чем в традиционной технологии. При этом важно не только повысить качество покрытий, но и остаться в той ценовой области, которую занимает себестоимость ГПН.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами Научные исследования по теме диссертации проводились в соответствии с заданием 3.21 (№ гос. рег. 20015283) ГНТП «Создать для приоритетных отраслей народного хозяйства Беларуси материалы и технологии их получения и переработки в изделия, в том числе в изделия с заданными эксплуатационными

ми, коррозионно-стойкими и другими свойствами поверхности» («Новые материалы и защита поверхностей»), подпрограмма «Инженерия поверхности», утвержденной Постановлением СМ РБ №141 от 1.02.2001 г.; заданием 6.02 (№ гос. рег. 20041341) ГППИ «Создание новых компонентов машин и оборудования для машиностроительного комплекса Республики Беларусь» («Новые компоненты в машиностроении»), утвержденной Постановлением Президиума НАН Беларуси от 26 ноября 2003г. № 104; заданием «Механика 3.16» (№ гос. рег.20067-83) ГКПНИ «Механика 2006 – 2010».

Цель работы и задачи исследования Целью работы является разработка технологии и оборудования для формирования высокоплотных покрытий газопламенным напылением проволоочных материалов с ультразвуковым активированием.

В соответствии с поставленной целью в процессе исследований необходимо было решить следующие задачи:

- создать теоретическую модель ультразвукового активирования процесса диспергирования проволок при газопламенном напылении и на ее основе предложить способ ГПН покрытий из проволоочных материалов с повышенными физико-механическими свойствами;

- разработать газопламенное оборудование для формирования покрытий с ультразвуковым активированием процесса напыления проволоочными материалами;

- исследовать влияние параметров ультразвукового активирования на свойства наносимых покрытий и установить оптимальный диапазон режимов напыления;

- определить влияние размеров частиц распыленных проволок из сталей и цветных металлов на физико-механические свойства покрытий;

- разработать технологический процесс газопламенного напыления защитных покрытий проволоочными материалами с ультразвуковым активированием и рекомендации по применению созданных технических средств для повышения долговечности деталей узлов трения скольжения, провести их апробацию и внедрить в производство.

Объект и предмет исследования Объект исследований – покрытия, формируемые газопламенным напылением проволок с ультразвуковым активированием.

Предмет исследований – технология формирования покрытий на деталях узлов трения скольжения газопламенным напылением проволоочных материалов с ультразвуковым активированием.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- математическая модель растяжения расплавленного материала проволоки в струю под действием распыляющего воздушного потока и упрощенная методика определения кинетики изменения диаметра расплава на конце распы-

ляемой проволоки, основанные на разбивке исходного расплава на элементарные объемы с равными радиусами вдоль оси и установке соответствующих связей на их границах, что позволяет последовательно проследить изменение геометрии жидкой фазы расплавленной проволоки, проанализировать динамику формирования капли, переносимой на подложку при газопламенном напылении, и по утончению шейки капли со временем прогнозировать ее отрыв от проволоки;

- результаты теоретического анализа процесса отрыва капли расплавленного металла от распыляемой проволоки при наложении ультразвуковых колебаний интенсивностью $W > 10^4$ Вт/м², учитывающего стохастичность генерации кавитационных пузырьков в расплаве и дробление жидкой фазы за счет хаотических кумулятивных микровихрей, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков, что позволяет анализировать влияние технологических параметров активирования на развитие ультразвуковой кавитации;

- результаты экспериментальных исследований влияния уровня звукового давления, диаметра и амплитуды колебаний распыляемой проволоки на количество частиц мелких фракций, позволившие с использованием метода математического планирования определить оптимальные условия ультразвукового активирования с получением распыленных частиц фракции 5–20 мкм в количестве не менее 80%;

- результаты экспериментальных исследований структуры и фазового состава покрытий, полученных активированным газопламенным напылением сталей мартенситного класса, позволившие впервые установить зависимость количества остаточного аустенита в покрытиях и интенсивность протекания деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения от размера частиц распыленных проволок;

- результаты экспериментальных исследований влияния режимов газопламенного напыления проволочных материалов с ультразвуковым активированием на прочность сцепления напыленных покрытий, их триботехнические характеристики и коррозионную стойкость, позволившие осуществить обоснованный выбор режимов и материалов для разработки технологического процесса нанесения антифрикционных покрытий на роторы компрессоров и штоки газоперекачивающих насосов, а также технологических рекомендаций по нанесению коррозионностойких покрытий.

Личный вклад соискателя Основные научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его непосредственном участии. Соискатель лично разработал математическую модель растяжения расплавленного материала проволоки в струю под действием распыляющего воздушного потока и упрощенную методику определения кинетики изменения диаметра расплава на конце распыляемой проволоки, выполнил теоретические и экспериментальные иссле-

дования, разработал и внедрил в производство технологический процесс и устройство для формирования антифрикционных покрытий на крупногабаритные поршни газомоторных компрессоров газопламенным напылением проволоочных материалов с ультразвуковым активированием.

Совместно с руководителем работы д.т.н., доцентом Белоцерковским М.А. выбрано научное направление и определены задачи исследования, разработан способ ультразвукового активирования и устройства для его реализации, проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, внедрены результаты в производство. Основными соавторами по опубликованным работам являются д.т.н., доцент Белоцерковский М.А. – научный руководитель, академик, д.т.н., профессор Витязь П.А. и д.т.н., профессор Шелег В.К., с которыми обсуждались результаты теоретических и экспериментальных исследований, д.ф.-м.н. Кукареко В.А., с которым выполнены совместные исследования структуры покрытий. Конструкции установок разработаны совместно с Полупаном Ю.В.

Апробация результатов диссертации Результаты выполненных исследований по диссертационной работе были представлены на: МНТК «Материалы и технологии – 2000» (Гомель, 2000); МНТК «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин» (г. Кіровоград, 2001); МНТК «Надежность машин и технических систем» (Минск, 2001); МНТК «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, 2002); 5-ой МНТК «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия» (Минск, 2002); III МНТК «Современные методы и технологии создания обработки материалов» (Минск, 2008); МНТК, посвященной 35-летию машиностроительного факультета Полоцкого государственного университета «Инновационные технологии в машиностроении» (Новополоцк, 2011); 30-ой МНТК «Технология – оборудование-инструмент-качество» (Минск, 2014).

Опубликованность результатов диссертации Основные положения диссертации изложены в 21 публикации, в том числе в 7 статьях (2,86 а. л.) в изданиях, входящих в Перечень ВАК Республики Беларусь, а также в 5 статьях в сборниках научных трудов и материалов научных конференций, 4 тезисах докладов на конференциях. По материалам исследования получены 4 патента на изобретения Республики Беларусь и подана 1 заявка на патент.

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами, заключения, списка использованных библиографических источников и приложений. Общий объем диссертации составляет 154 страницы, включая 94 страницы машинописного текста, 13 таблиц и 59 рисунков на 49 страницах, библиографию из 129 наименований использованных источников на 9 страницах и списка

публикаций соискателя из 21 наименования на 3 страницах, 2 приложения на 16 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ особенностей методов газотермического и, в частности, газопламенного нанесения покрытий (ГПН) порошковыми и проволочными материалами. Отмечен большой вклад в разработку технологических процессов ГПН и материалов для формирования защитных, износостойких покрытий, который внесли отечественные и зарубежные ученые. Показано, что значительными преимуществами по сравнению с другими технологиями восстановления-упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин общемашиностроительного профиля и защиты элементов конструкций обладают методы формирования покрытий из проволочных материалов. При себестоимости процессов электрометаллизации и газопламенного напыления проволок в 3–10 раз ниже, чем нанесения порошковых материалов, их производительность выше в 1,3–2,4 раза, и для реализации процесса не требуется использование дорогостоящего оборудования. Вместе с тем, серьезными недостатками метода ГПН, ограничивающими его использование особенно в тяжело нагруженных узлах трения, являются относительно низкая прочность сцепления покрытий с основой (максимальные значения 33 МПа) и их высокая пористость (не менее 10%). Отмечено, что газопламенные установки, использующие в качестве рабочих газов для напыления проволок кислород, пропан и воздух наиболее экономичны, однако не позволяют в результате распыления получать частицы средним размером менее 30 мкм, что отрицательно сказывается на физико-механических характеристиках покрытий. Кроме того, невозможно осуществить в процессе напыления введение наполнителя, например, твердой смазки, в состав покрытия. Отмечено, что снижение размера частиц, формирующих покрытие положительно влияет на их адгезию и плотность, однако практически не изучены особенности трения и изнашивания ГПН покрытий, полученных из частиц размером 5–20 мкм. Известных данных не достаточно, чтобы прогнозировать показатели работоспособности таких покрытий в узлах трения скольжения. Показана эффективность методов активирования процессов распыления металлов и газотермического нанесения покрытий с использованием ультразвуковых колебаний.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Вторая глава содержит описание объектов, оборудования и методик исследований.

Объектом исследования являлись покрытия, формируемые газопламенным напылением проволок с ультразвуковым активированием. Для формирования покрытий использовались проволоки диаметром 2 мм из стали ферритного

класса Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70), стали мартенситного класса 40Х13 (ГОСТ 18143-72), стали аустенитного класса Х18Н10Т (ТУ 3-10022-77), алюминия ПрАД1, нихрома Х20Н80 (ТУ 3-1002-77), бронз ПрБрАЖ9-4 и БрКМЦ3-1 (ГОСТ 5222-72).

Учитывая результаты анализа эффективности использования газоструйных излучателей было предложено встроить генератор типа Гартмана в систему распыления расплавленной проволоки воздухом. С этой целью в головке термораспылителя ТЕРКО-2 была выполнена глухая кольцевая канавка, позволяющая генерировать в воздушном потоке высокочастотные колебания с высоким уровнем звукового давления (рисунок 1).

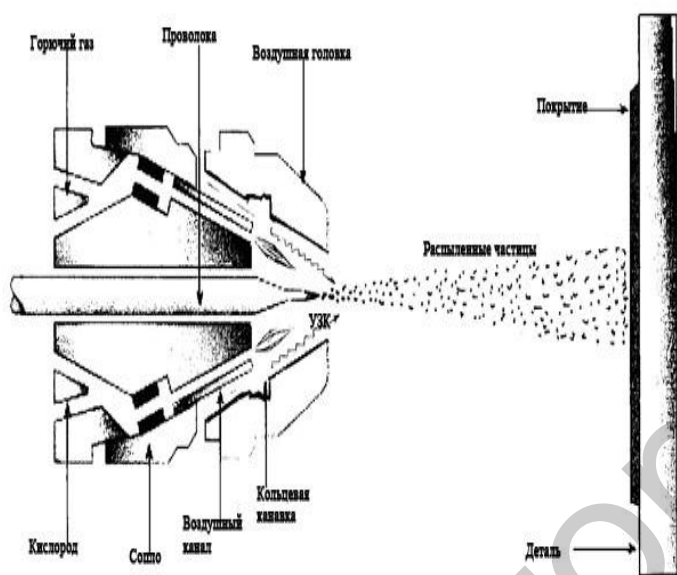


Рисунок 1 – Схема процесса активированного газопламенного напыления покрытий проволоками

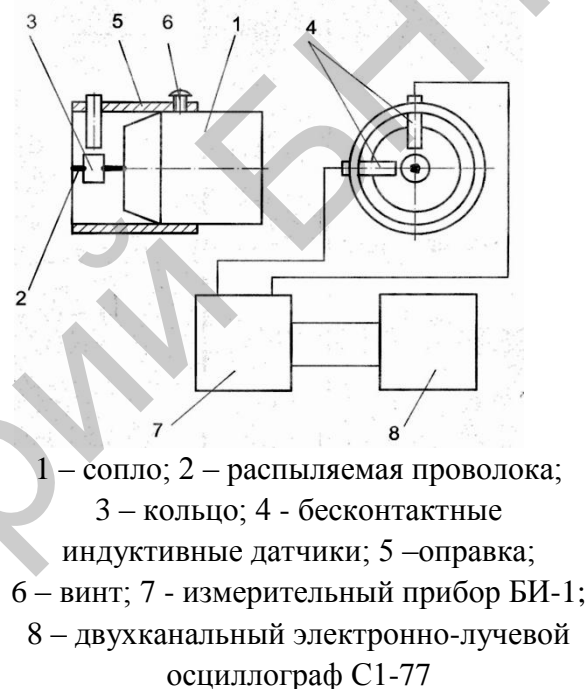


Рисунок 2– Схема измерительного комплекса для контроля амплитуды колебаний проволоки

Используя номограммы для расчета газоструйных излучателей, и имея в виду, что давление распыляющего воздуха составляет 0,40–0,55 МПа, а расход более 0,5 м³/мин, была изготовлена сопловая система с глубиной резонатора от 2,5 до 4,5 мм. Выполненный акустический активатор позволял генерировать в распыляющем расплавленную проволоку воздушном потоке колебания с частотой до 50 кГц и уровнем звукового давления от 110 до 140 дБ. Уровень звукового давления измеряли с помощью аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер» (микрофон типа 4136, анализатор типа 2107). Частоту ультразвуковых колебаний измеряли по методике, основанной на регистрации переменного электромагнитного поля, возникающего в катушке индуктивности, охватывающей постоянный магнит на распыляемой проволоке. Амплитуду колебаний исследовали с помо-

щью специально разработанной методики, оценивая траекторию движения конца проволоки в плоскости перпендикулярной ее оси (рисунок 2).

Для исследования фазовых и структурных превращений в покрытиях использовали рентгеноструктурный анализ (дифрактометр ДРОН-3,0 монохроматизированное $\text{CoK}\alpha$ излучение). Металлографические исследования осуществлялись на электронном микроскопе JSM-840 и оптическом универсальном микроскопе Axiovent 200 MAT. Объемная пористость покрытий определялась методом планиметрии, реализованном в прикладном пакете AxioVizion применительно к микроскопу Axiovent 200 MAT. Твердость покрытий определяли по методу Виккерса на твердомере ТП. Микротвердость измерялась на микротвердомере НХ 1000ТМ при нагрузке 0,2-1,0 Н.

Для исследования адгезии покрытий использовали штифтовой метод оценки прочности сцепления, заключающийся в отрыве штифта от слоя нормально приложенной нагрузкой с помощью универсальной испытательной машины Instron.

Триботехнические испытания проводили на трибометре АТВП и на специальном стенде, работающем по принципу машины трения АЕ-5, отличающемся возможностью использования динамической составляющей силы трения, большим диапазоном скоростей скольжения и нагрузок.

Оценку коррозионной стойкости напыленных покрытий производили в водном 15 об.% растворе NaCl путем построения и анализа кривых катодной и анодной поляризации.

Обработка экспериментальных данных проводилась в соответствии с общими принципами математической статистики с использованием ПЭВМ.

В третьей главе приведены результаты теоретических исследований процесса диспергирования расплавленного материала проволоки при наличии ультразвуковых колебаний в распыляющем воздушном потоке. При построении математической модели, описывающей процесс утончения и отрыва расплавленного объема проволоки, принимали, что в начальный момент расплавленная проволока представляет собой цилиндр с диаметром D_0 и образующей длины L_0 . Одно основание цилиндра граничит с твердой частью проволоки. Остальная поверхность цилиндра обдувается горячим газом под углом α со скоростью v_g (рисунок 3). Поскольку при рассмотрении математической модели движения расплава силой тяжести можно пренебречь, задача рассмотрена в цилиндрической системе координат (прямоугольник со сторонами R_0 и L_0). Для однозначного решения задачи были также проанализированы граничные условия, определяющие вид области течения. Была получена система уравнений, включающая уравнения, описывающие закон сохранения массы, закон сохранения коли-

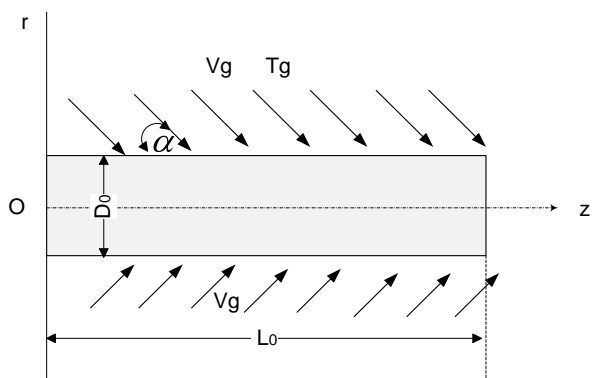


Рисунок 3 - Схема физической модели процесса (начальный момент воздействия газового потока на выделенный элемент расплава проволоки)

чества движения в интегральной и дифференциальной формах, граничные и начальные условия, являющаяся системой нестационарных уравнений в частных производных относительно неизвестных компонент скорости и давления. Дальнейший расчет включал приведение задачи к безразмерному виду с соответствующими переменными к численным конечно-разностным методам и последующее решение системы на декартовых сетках. Полученные результаты показали, что алгоритм решения в полной постановке достаточно трудоемок и требует

предварительной работы по описанию и согласованию различных видов и типов ячеек. Был предложен упрощенный вариант решения для описания уменьшения диаметра (утончения) жидких цилиндров (расплава на конце распыляемой проволоки). Задача упрощается при разбивке исходного цилиндра на элементарные объемы вдоль оси z (цилиндрами с равными радиусами) и установке соответствующих связей на их границах. В соответствии с этой моделью жидкий цилиндр утончается и трансформируется в капиллярную нить.

На основании численной реализации модели построен график кинетики удлинения (утончения) расплава в шейке стальной проволоки диаметром 2 мм под воздействием теплового газового потока, истекающего со скоростью 160 м/с под углом 30° к оси струи при давлении 0,3 МПа (рисунок 4). Таким образом, разработанная модель позволяет проанализировать динамику формирования капли, переносимой на подложку при газопламенном распылении проволоки. При этом по утончению шейки капли со временем можно прогнозировать её отрыв от твердофазной проволоки, что необходимо учитывать при назначении скорости подачи проволочного материала в распылительное устройство. Согласно уравнениям модели необходимые диаметры капель могут быть достигнуты надлежащим выбором динамических параметров напыления v_g, P_g .

Далее был рассмотрен процесс отрыва капли расплавленного металла от распыляемой проволоки при наложении ультразвуковых колебаний интенсивностью $W > 10^4$ Вт/м². В процессе отрыва значимыми являются следующие факторы ультразвуковой кавитации: стохастичность генерации кавитационных пузырьков в жидкой фазе расплавленного конца проволоки; дробление жидкой фазы за счет хаотических кумулятивных микровихрей, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков.

Выполнив анализ дифференциального уравнения, описывающего динамику развития кавитационной области, и определив стационарную концентрацию микропузырьков, получили выражение для объемной пористости η формируемого на конце проволоки расплава и далее выражение для определения количества очагов диспергирования капель жидкого металла

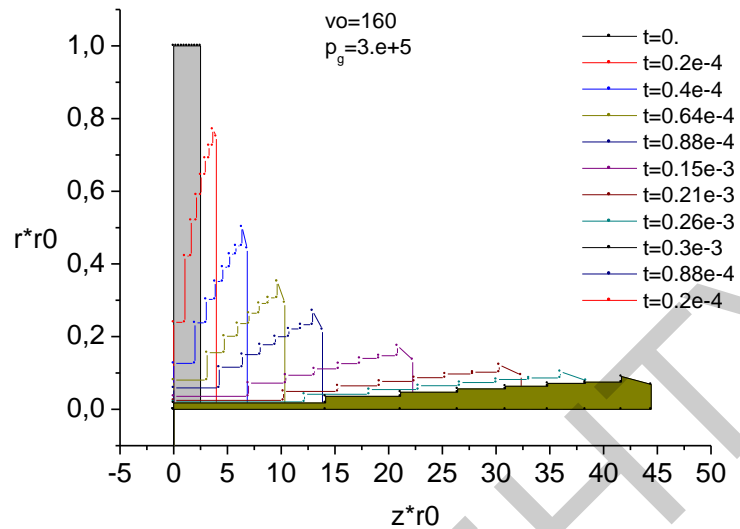
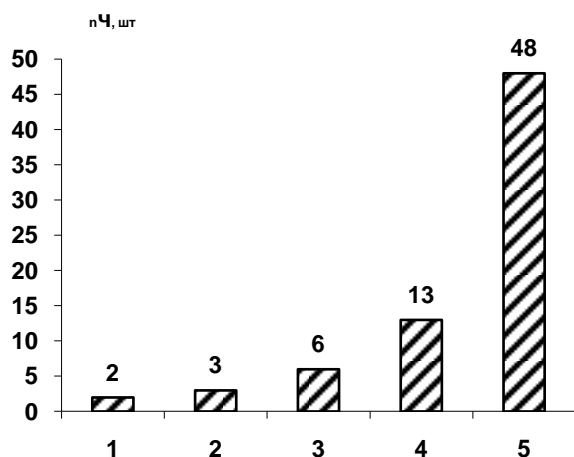


Рисунок 4 – Кинетика изменения геометрии жидкой фазы (удлинение расплава в шейке в процессе ее утончения)

$$n_{\text{захл}} = \frac{4 \pi (m-1) f^3 \rho_n}{3 M^2 \tau_0 \bar{v} \psi R} \quad (1)$$

где $n_{\text{захл}}$ - концентрация кавитационных пузырьков в жидкофазном металле на конце распыляемой проволоки; M - число осцилляции микропузырька до его «захлопывания»; m - число «осколков» кавитационного микропузырька, возникших после его анизотропного «захлопывания» и являющихся вновь образованными зародышами кавитации; \bar{v} - средняя скорость взаимного сближения кавитационных микропузырьков; $\psi \leq 1$ - вероятность бинарной коалесценции; R - резонансный радиус кавитационных микропузырьков; f - частота; β - эмпирический коэффициент; τ_0 - период ультразвуковых колебаний распыляемой проволоки с частотой f ; γ - отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме для парогазовой среды, содержащейся в кавитационном микропузырьке; ρ_n - плотность распыляемого материала проволоки; P_n - гидродинамическое давление в расплаве на конце распыляемой проволоки, которое при умеренных интенсивностях ультразвука совпадает с напорным давлением потока газа, отрывающего расплав.

По результатам расчетов $n_{\text{захл}}$ определяли минимальное количество частей $n_{\text{ч}}$, на которые дробится капля жидкого металла при отрыве от распыляемой проволоки: $n_{\text{ч}} = n_{\text{захл}} + 1$. Результаты расчетов (рисунок 5) свидетельствуют о том, что при изменении интенсивности ультразвука от $2 \cdot 10^4$ до 10^6 Вт/м² эффективность диспергирования капель $n_{\text{ч}}$ распыляемой проволоки существенно возрастает. Наложение ультразвуковых колебаний при $W = 2 \cdot 10^4$ Вт/м² позволяет



1 - $W = 2 \cdot 10^4$ Вт/м²; 2 - $3 \cdot 10^4$; 3 - $5 \cdot 10^4$;
4 - 10^5 ; 5 - 10^6 Вт/м²

Рисунок 5 – Диспергирование капли распыляемого металла проволоки в зависимости от интенсивности ультразвукового активирования

количества (n) необходимо генерировать колебания с частотой 27–42 кГц.

Повышение уровня звукового давления позволяет увеличить n_x , причем максимальные значения n_x достигаются при меньших частотах генерируемых колебаний. Для стали и бронзы характерно уменьшение эффекта, достигаемого ультразвуковым активированием с повышением частоты свыше 42 кГц. Пористость покрытий, напыленных без ультразвукового активирования, составила 11–13 %, а при использовании распылительной головки с газоструйным излучателем – 5–8%.

Результаты, полученные в ходе исследований влияния среднего размера частиц распыленных проволок на физико-механические свойства покрытий показали (рисунок б), что у бронзы и стали, как и предполагалось, наблюдается снижение адгезии с увеличением пористости. Однако для нихрома эта зависимость не соблюдается. Повышение среднего размера распыленных частиц нихрома с 15 до 90 мкм позволяет повысить прочность сопротивления отрыву с 23 до 45 МПа, при этом общая пористость увеличивается в 1,7–1,9 раза. Этот факт можно объяснить тем, что температура плавления нихрома (1980–2040 К) выше, чем стальной подложки (1680–1700 К), и это обуславливает возможность точечной микроприварки частиц нихрома на отдельных участках контактирующих металлов.

Поиск оптимальных режимов активированного газопламенного напыления осуществлялся на основе применения метода математического планирования эксперимента. При его реализации использовали некомпозиционный план второго порядка позволяющий получить модель процесса напыления в виде полинома второй степени. В исследовании в качестве варьируемых факторов были

диспергировать каплю распыляемого металла с образованием как минимум двух капель. При увеличении интенсивности ультразвука до 10^6 Вт/м² эффективность диспергирования капель распыляемой проволоки возрастает в 20–24 раза.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям активированного процесса газопламенного напыления и свойствам сформированных покрытий.

Установлено, что для получения как стальных, так и бронзовых частиц размером 5–20 мкм в количестве (n_x) более 80% от их общего

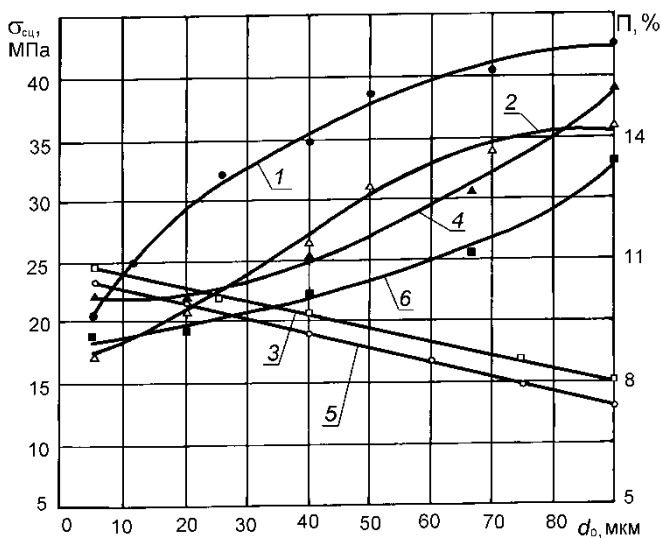


Рисунок 6 – Влияние среднего размера частиц распыленных проволок из нихрома (1, 2), стали 40X13 (3, 4), бронзы (5, 6) на прочность сцепления (1, 3, 5) и пористость (2, 4, 6) покрытий

$$n_x = -60,7811 + 1,0333 A + 1,1437 D + 52,3333 d + 0,55 A d - 0,0271 A^2 - 0,0037 D^2 - 20,8333 d^2 \quad (2)$$

Уравнение регрессии (2) позволяет осуществить обоснованный выбор режимов процесса распыления проволоки с целью обеспечения заданного количества частиц размером 5–20 мкм. На рисунках 7, 8 представлены графические зависимости количества n_x мелких частиц от исследуемых факторов.

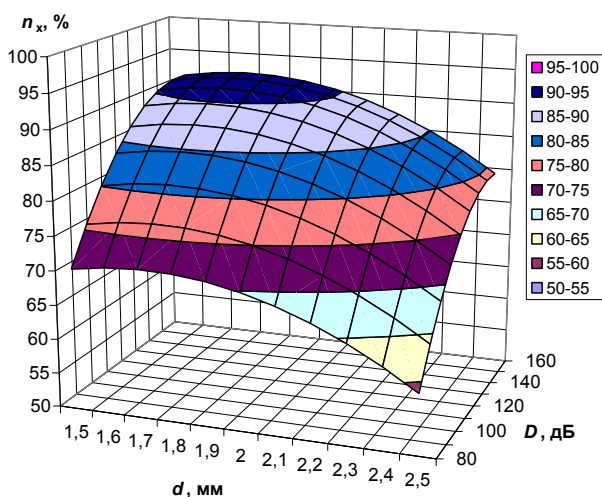
В результате проведенных исследований определено, что для обеспечения в потоке распыляемой проволоки частиц мелких фракций не менее 80 % от общего количества частиц, режимные параметры процесса напыления должны быть следующие: уровень звукового давления $D = 110–130$ дБ, диаметр проволоки $d = 1,8–2,1$ мм, амплитуда колебаний проволоки $A = 35–40$ мкм.

Для оценки влияния размеров распыляемых частиц на количество метастабильного аустенита в покрытиях при распылении сталей мартенситного класса (40X13), были проведены исследования с использованием установок электродуговой металлизации ЭМ-14, газопламенного проволочного напыления МГИ-4П и газопламенного проволочного напыления ТЕРКО-2 с ультразвуковым активированием процесса распыления. Анализ полученных результатов (таблица 1) показал, что для сталей мартенситного класса на количество остаточного аустенита в большей степени оказывает влияние размер распыленных частиц, чем температура нагрева и метод нагрева при распылении. Дальнейшие исследования показали, что для получения в покрытиях максимально возможного количества остаточного аустенита (40–49 об.%) необходимо их формировать частицами размером от 5 до 20 мкм.

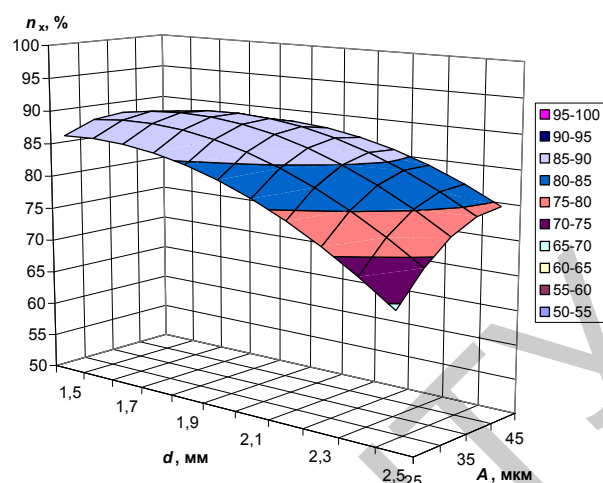
взяты амплитуда колебаний проволоки (A), уровень звукового давления (D), диаметр проволоки (d). В качестве параметра оптимизации принималось количество частиц размером 5–20 мкм в процентах к общему числу частиц n_x .

В соответствии с условиями опытов распыляли проволоку и фиксировали количество частиц n_x размером от 5 до 20 мкм.

По данным исследований получена модель, характеризующая зависимость n_x от исследуемых факторов:



A



б

Рисунок 7 – Зависимость количества n_x частиц размером 5 - 20 мкм от уровня звукового давления D и диаметра проволоки d ($A = 35$ мкм) (а), и от диаметра проволоки d и амплитуды A колебания проволоки ($D = 130$ дБ) (б)

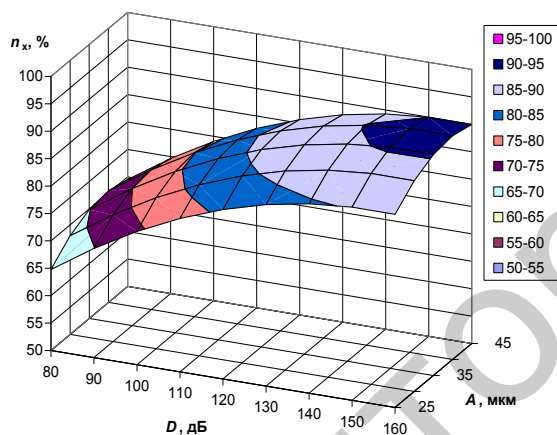


Рисунок 8 – Зависимость количества n_x частиц размером 5 - 20 мкм от уровня звукового давления D и амплитуды A колебания проволоки ($d = 2$ мм)

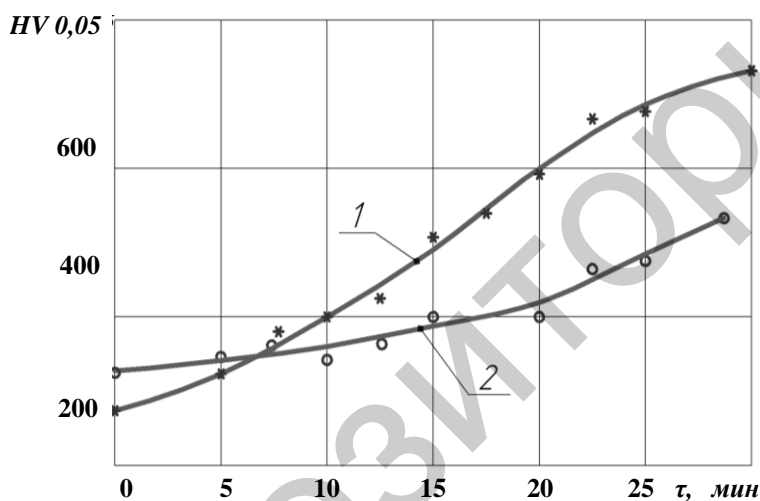
в процессе трения вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит ($HV = 200-300$) трансформируется в износостойкий и твердый мартенсит ($HV = 600-700$) за счет протекания деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Таблица 1 – Размер распыленных частиц и количество аустенита в покрытиях, полученных на различном оборудовании

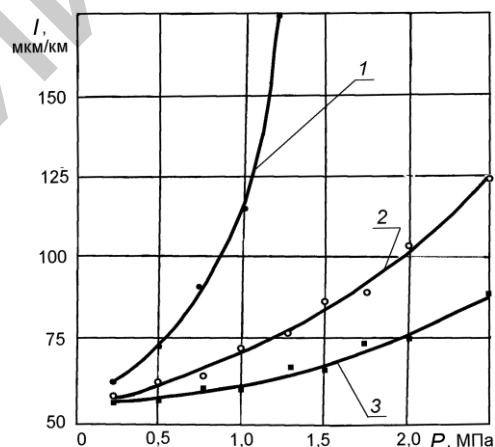
Метод напыления и используемое оборудование	Размер частиц, мкм	Количество остаточного аустенита, об. %
Электрометаллизация, ЭМ-14	55–80	12–16
Газопламенное напыление, МГИ -4П	60–90	20–24
Активированное газопламенное напыление, ТЕРКО-2	5–20	40–49

Частицы размером менее 5 мкм интенсивно окисляются с образованием FeO и Fe_2O_3 , поэтому количество аустенита резко снижается. Увеличение размера частиц более 20 мкм, вероятно, изменяет процессы теплопереноса и характер термической стабилизации аустенита. Необходимость получения максимально большого количества остаточного аустенита в покрытиях объясняется тем, что

Исследование дюрометрических характеристик покрытий из стали 40X13 при удельной нагрузке 3 МПа в режиме сухого трения со сталью 65Г показало (рисунок 9), что деформационное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение у покрытий, полученных при ультразвуковом активировании, протекает более интенсивней, и достигаемые значения твердости выше в 1,5 раза, чем у покрытий, полученных традиционным ГПН. Для повышения антифрикционных свойств напыляемых покрытий было предложено наносить твердую смазку, например, графит на проволоку методом деформационного плакирования (патент РБ №10447). С целью увеличения количества графита на проволоке предложено на поверхности проволоки предварительно выполнять периодические углубления в виде насечек глубиной 0,3–0,4 D (где D – диаметр проволоки). Расчеты показали, что выполняя насечки, например, методом накатки по винтовой линии, при расстоянии между насечками $l = (0,7–0,9) h$, где h глубина насечки, теоретически можно получить струю металла с наполнителем в количестве до 25 об.%.
 Интенсивность изнашивания при сухом трении при введении 4 об.% графита снизилась в 3–4 раза (рисунок 10).



1 – активированное напыление
 2 – напыление без активирования
Рисунок 9 – Кинетика изменения твердости покрытий из стали 40X13 при сухом трении



1 – без наполнителя; 2 – покрытие с 2,5 об.% графита; 3 – покрытие с 4 об.% графита

Рисунок 10 – Интенсивность изнашивания покрытий 40X13, содержащих графит

Для испытаний на коррозионную стойкость были нанесены покрытия распылением алюминиевой проволоки марки ПрАД1. Анализ потенциодинамических анодных и катодных поляризационных кривых в соленой воде показывал, что торможение анодного процесса покрытия, нанесенного по традиционной технологии ГПН, значительно меньше, чем покрытия, нанесенного активированным ГПН. Торможение катодной поляризации алюминиевого покрытия, нанесенного активированным ГПН также значительно больше, чем полученного напылением без ультразвукового активирования. Для качественной оценки кор-

розионной стойкости снимались кривые анодной и катодной поляризации для покрытий, толщина которых обеспечивала барьерность (0,15– 0,25 мм для активированной ГПН и 0,5– 0,6 для традиционной ГПН). Наименьшая плотность коррозионного тока наблюдается у покрытий, нанесенных активированным ГПН.

Произведен расчет скорости коррозии в условиях испытаний. Для покрытий, нанесенных по традиционной технологии, коррозия составляет 1,95 мкм/год; для покрытий после активированного напыления коррозия составляет 0,93 мкм/год. Таким образом, алюминиевые покрытия, нанесенные с ультразвуковым активированием, имеют скорость коррозии в 2,1 раза меньшую, чем покрытия, нанесенные традиционным газопламенным напылением.

Пятая глава посвящена разработке технологических рекомендаций, технологического процесса и испытаниям деталей с покрытиями. В результате стендовых триботехнических испытаний в режиме ограниченной подачи смазки установлено, что интенсивность изнашивания покрытий, полученных активированным ГПН проволок из сплава БрКМЦ3-1 в 1,20–1,27 раза ниже, чем у покрытий, полученных традиционным ГПН и более, чем в 1,3 раза ниже, чем у литого сплава того же состава. Полученные результаты позволили рекомендовать процесс активированного газопламенного напыления проволокой БрКМЦ3-1 для нанесения антифрикционного покрытия на крупногабаритные поршни газомоторных компрессоров.

Разработан технологический процесс ТД №02271.00019 нанесения антифрикционного покрытия на крупногабаритные поршни газомоторных компрессоров 10 ГКН с использованием активированного газопламенного напыления, реализованный на установке, изготовленной по КД ДЯФ 3.026.08.03.00.000СБ.

Разработаны технологические рекомендации по формированию коррозионностойких покрытий газопламенным напылением с ультразвуковым активированием, предназначенные для нанесения защитных покрытий на технологические емкости (ванны) химической и электрохимической обработки, закладные детали строительно-монтажных конструкций, элементы трубопроводного транспорта, эксплуатирующегося в жестких атмосферных условиях и другие детали, подверженные коррозионному разрушению.

На РНУ «Белгазэнергоремонт» (аг. Михановичи) был организован специализированный участок восстановления изношенных и изготовления новых деталей с антифрикционными покрытиями. За время эксплуатации установки для активированного газопламенного напыления было восстановлено в общей сложности более 700 деталей. Экономическая эффективность от внедрения результатов научно-исследовательской работы в производство составила около 51 млн. рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате теоретического анализа процесса взаимодействия распыляющего газа с расплавленным участком проволоки в газопламенном факеле, основываясь на упруго-вязком механизме поведения расплава, проанализирована динамика формирования капли и разработана упрощенная методика расчета уменьшения диаметра частицы распыляемой проволоки. Выполнен теоретический анализ процесса отрыва капли расплавленного металла от распыляемой проволоки при наложении ультразвуковых колебаний. Установлено, что генерирование ультразвуковых колебаний в распыляющем газе интенсивностью от $2 \cdot 10^4$ до 10^6 Вт/м² позволяет уменьшить размер капель распыляемого металла в 2–20 раз. [5, 8, 10].

2. Экспериментальными исследованиями влияния параметров ультразвуковых колебаний, генерируемых в распыляющем потоке, на размер частиц распыленных проволок установлено, что для формирования покрытий частицами размером 5–20 мкм в количестве более 80% от их общего числа, необходимо обеспечить генерирование колебаний с частотой 27–42 кГц и уровнем звукового давления не менее 110 дБ. Повышение уровня звукового давления до 140 дБ позволяет увеличить количество частиц мелких фракций для сталей на 3%, для цветных сплавов на 7–10% [5, 11, 19].

3. Методом математического планирования эксперимента определены оптимальные условия получения частиц фракции 5–20 мкм при газопламенном напылении проволоки из стали 40X13 в зависимости от уровня звукового давления воздуха, подаваемого в сопло газопламенного распылителя, диаметра и амплитуды колебаний конца напыляемой проволоки. Определено, что для обеспечения в потоке распыляемой проволоки диаметром 1,8–2,1 мм количества частиц мелких фракций не менее 80 % от их общего числа, необходимо обеспечить уровень звукового давления 110–130 дБ, при этом амплитуда колебаний проволоки составляет от 35 до 40 мкм [12].

4. В результате экспериментальных исследований фазового состава покрытий, полученных активированным распылением проволок из хромсодержащих сталей мартенситного класса показано, что с уменьшением размера частиц от 40–60 мкм до 5–20 мкм количество остаточного аустенита возрастает от 20–25 об.% до 40–49 об.%. Это обусловило повышение твердости покрытий в 1,5 раза и износостойкости в 1,65–1,75 раза за счет деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в процессе трения [1, 2, 9, 13, 14, 16, 20, 21].

5. Экспериментальными исследованиями свойств покрытий, полученных активированным распылением проволок из цветных металлов и сплавов установлено, что при уменьшении среднего размера распыленных частиц

с 30–60 мкм до 5–20 мкм наблюдается уменьшение пористости покрытий с 15 до 9% и повышение прочности сцепления с основой без подслоя с 14 до 26 МПа. Показано, что использование ультразвукового активирования при нанесении покрытий обеспечивает повышение их коррозионной стойкости в 2,0–2,1 раза, и износостойкости при трении без смазки в 1,20–1,35 раза. В режиме ограниченной подачи смазки преимущества покрытий, полученных при ультразвуковом активировании, начинают сказываться при удельной нагрузке свыше 3 МПа. С целью повышения антифрикционных свойств напыленных покрытий предложено наносить на распыляемую проволоку твердую смазку. Показано, что интенсивность изнашивания при сухом трении покрытий, напыленных проволокой, содержащей на поверхности 4 об.% графита, снизилась от 3 до 4 раз [3, 4, 7, 15].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработан технологический процесс ТД №02271.00019 нанесения антифрикционного покрытия на крупногабаритные поршни газомоторных компрессоров 10 ГКН активированным газопламенным распылением проволоки из сплава БрКМЦЗ-1. Стендовыми испытаниями установлено, что интенсивность изнашивания покрытий, полученных по разработанной технологии в 1,2–1,27 раза ниже, чем у покрытий, полученных традиционным газопламенным напылением и более, чем в 1,3 раза ниже, чем у литого сплава того же состава. Технология нанесения антифрикционного покрытия активированным газопламенным напылением и установка для ее реализации внедрены на РНУ «Белгазэнергоремонт» с экономическим эффектом около 51 млн. рублей.

2. Предложены и защищены патентами установки для активированного ультразвуковыми колебаниями процесса газопламенного проволочного напыления покрытий различного функционального назначения (коррозионностойких, износостойких, антифрикционных). Разработан и запатентован способ нанесения на распыляемую проволоку твердой смазки методом деформационного плакирования. Разработан и запатентован способ получения износостойкого металлического покрытия из сталей мартенситного класса на деталях трибосопряжений [6, 13, 17, 18, 19, 20, 21].

Разработанные методы и средства могут быть использованы для повышения работоспособности задвижек запорной арматуры, направляющих прецизионных станков, подшипников скольжения и втулок поворотных устройств, вкладышей моторно-осевых подшипников индивидуальных приводов колес тягового подвижного состава, а также защиты от коррозии технологических емкостей химической и электрохимической обработки, закладных деталей строительно-монтажных конструкций, элементов трубопроводного транспорта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Влияние состава распыляющей среды на структуру и свойства газотермических проволочных покрытий / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, П.Г. Сухоцкий, Д.М. Калиновский // Весці нац. акад. нав. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – №4. – С. 18–23.

2. Структура и свойства покрытий из стали 40Х13, полученных с использованием различных методов газотермического напыления / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, Д.М. Калиновский, П.Г. Сухоцкий, Ж.Г. Ковалевская // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, №1. – С. 29–36.

3. Пути повышения триботехнических свойств стальных газопламенных покрытий / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, П.Г. Сухоцкий, В.М. Константинов // Трение и износ. – 2011. – Т. 32, №6. – С. 527 – 537.

4. Ways of Improving the Tribological Properties of Steel Gas-Flame Coatings / P.A. Vityaz, M.A. Belotserkovskii, V.A. Kukareko, P.G. Sukhotskii, V.M. Konstantinov // Journal of Friction and Wear. – 2011. – Vol. 32, No. 6. – pp. 395–403.

5. Витязь, П.А. Механизм диспергирования проволоки в процессе активированного газопламенного напыления / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, П.Г. Сухоцкий // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – №1. – С. 64–70.

Статьи в сборниках научных трудов

6. Белоцерковский, М.А. Усовершенствование оборудования для активированного газопламенного напыления износостойких и полимерных покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Федаравичус, П.Г. Сухоцкий // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КДТУ, 2001. – Вып. 30. – С. 122–127.

7. Шелег, В.К. Непрерывно-последовательные технологии формирования газотермических покрытий из самофлюсующихся сплавов и композиций на их основе / В.К. Шелег, А.Ф.Присевок, П.Г.Сухоцкий // Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БГНПО ПМ, 2008. – № 10. – С. 74–81.

Материалы конференций

8. Белоцерковский, М.А. Формирование покрытий газопламенным проволочным напылением с ультразвуковым активированием / М.А. Белоцерковский, П.Г. Сухоцкий // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: Материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 25-26 окт. 2001 г. – Могилев: МГТУ, 2001. – С. 84–85.

9. Белоцерковский, М.А. Особенности структуры газотермических покрытий из проволочных материалов / М.А. Белоцерковский, П.Г. Сухоцкий // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: Материалы 5-ой международной научно-технической конференции, Минск, 18-19 сент. 2002 г. – Минск: Тонпик, 2002. – С. 203–204.

10. Шелег, В.К. Математическое моделирование оценки пористости газотермических защитных покрытий / В.К. Шелег, П.Г. Сухоцкий, А.Ф. Присевок // Современные методы и технологии создания обработки материалов: материалы III Международной науч.-техн. конф., Минск, 15-17 окт. 2008 г. Кн. 2. Высокоэнергетические технологии получения и упрочнения материалов и деталей машин. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2008. – С. 48–52.

11. Шелег, В.К. Формирование стальных износостойких покрытий газопламенным напылением с ультразвуковой активацией // В.К. Шелег, П.Г. Сухоцкий, М.А. Белоцерковский // Инновационные технологии в машиностроении: Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 35-летию машиностроительного факультета Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 19-20 окт. 2011 г. – Новополоцк, ПГУ, 2011. – С. 224–226.

12. Шелег, В.К. Экспериментальная оценка амплитуды колебаний проволоки при газопламенном напылении с ультразвуковой активацией // В.К. Шелег, П.Г. Сухоцкий, М.А. Леванцевич / Инновационные технологии в машиностроении: Материалы международной научно-технической конференции, посвящ. 35-летию машиностроительного факультета Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 19-20 окт. 2011 г. – Новополоцк, ПГУ, 2011. – С. 226–229.

Тезисы докладов

13. Белоцерковский, М.А. Формирование композиционных покрытий газопламенным проволочным напылением с ультразвуковым активированием / М.А. Белоцерковский, П.Г. Сухоцкий // Материалы и технологии – 2000: Тезисы докладов 4-ой республиканской науч.-техн. конф., Гомель, 12-13 сент. 2000 г. – Гомель: ИММС НАНБ, 2000. – С. 32–33.

14. Белоцерковский, М.А. Структура и свойства покрытий, полученных активированным распылением проволок / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, П.Г. Сухоцкий // Современные проблемы машиноведения: Тезисы докладов международной науч.-техн. конф., Гомель, 4-6 июля 2002 г. – Гомель: ГГТУ имени П.О. Сухого, 2002. – С. 32.

15. Белоцерковский, М.А. Создание вибродемпфирующих элементов на основе металлополимерных газопламенных покрытий / М.А. Белоцерковский, П.Г. Сухоцкий, А.В. Федаравичус // Современные проблемы машиноведения: Тезисы докладов международной науч.-техн. конф., Гомель, 4-6 июля 2002 г. – Гомель: ГГТУ имени П.О. Сухого, 2002. – С. 33.

16. Шелег, В.К. Повышение качества газопламенных покрытий акустической активацией процесса напыления / В.К. Шелег, М.А. Белоцерковский, П.Г. Сухоцкий // Технология – оборудование-инструмент-качество. Тезисы докладов международной науч.-техн. конф. в рамках международной специализированной выставки «Машиностроение – 2014», Минск, 9-10 апреля 2014 г. – Минск: БНТУ, 2014. – С.119–123.

Патенты

17. Устройство для газопламенного напыления проволочных материалов: пат. 349 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, И.Л. Пунтус, П.Г. Сухоцкий; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № и 20000194; заявл. 12.12.00; опубл. 30.09.01 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2001. – № 3. – С. 162.

18. Термораспылитель проволочный: пат. 798 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / М.А. Белоцерковский, И.Л. Пунтус, П.Г. Сухоцкий; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № и 20020136; заявл. 07.05.02; опубл. 30.03.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 1. – С. 203.

19. Способ газопламенного напыления покрытий из проволочных материалов: пат. 5768 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, Ю.В. Полупан, П.Г. Сухоцкий; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – № а 20000511; заявл. 02.06.00; опубл. 30.12.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 4. – С. 122.

20. Способ получения износостойкого покрытия: пат. 10447 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 4/04 / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, П.Г. Сухоцкий; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20050618; заявл. 22.06.05; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2. – С. 67.

Заявки на патенты

21. Способ износостойкого металлического покрытия на деталях трибосопряжений / М.А. Белоцерковский, П.Г. Сухоцкий, А.И. Камко, В.А. Кукареко; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20110524; заявл. 2011.04.22.

РЭЗІЮМЭ

Сухоцкі Павел Генадзевіч

ТЭХНАЛОГІЯ ГАЗАПАЛЫМЯНАГА НАПЫЛЕННЯ АХОЎНЫХ ПАКРЫЦЦЯЎ ДРАЦЯНЫМІ МАТЭРЫЯЛАМІ З УЛЬТРАГУКАВЫМ АКТЫВАВАННЕМ

Ключавыя словы: пакрыццё, газапалымянае напыленне, двухфазныя струмені, драцяныя матэрыялы, распыленне дроту, ультрагукавыя хістанні, ультрагукавое актываванне, мадыфікаванне пакрыцця, абсталяванне, тэхналогіі, тэхнічныя сродкі напылення.

Мэта працы – распрацоўка тэхналогіі і абсталявання для фарміравання высакашчылных пакрыццяў газапалымяным напыленнем драцяных матэрыялаў з ультрагукавым актываваннем.

Аб’екты даследвання: пакрыцці, фармаваныя газапалымяным напыленнем драцяных матэрыялаў з ультрагукавым актываваннем.

Метады даследавання: рэнтгенаструктурны, металаграфічны, спектральны аналіз, метады матэматычнага мадэлявання, метады статыстычнай апрацоўкі дадзеных. Стандартнымі метадамі праводзіліся даследаванні трыбатэхнічных уласцівасцяў атрыманых пакрыццяў.

Атрыманыя вынікі. Распрацавана матэматычная мадэль ультрагукавога актывавання працэсу дыспергавання дроту пры газапалымяным напыленні і на яе аснове прапанаваны спосаб ГПН пакрыццяў з драцяных матэрыялаў з павялічанымі фізіка-механічнымі уласцівасцямі. Прапанавана канструкцыя газапалымянага распыляльніка з газаструменным генератарам ультрагукавых хістанняў, які дае магчымасць генерыраваць у распыляючым паветраным струмені хістанні з частатой да 50 кГц і ўзроўнем гукавага ціску ад 110 да 140 дБ. Вызначаны аптымальныя ўмовы ультрагукавога актывавання з атрыманнем распыленых часцінак вялічынёй 5–20 мкм колькасцю не менш 80%. Упершыню ўстаноўлена залежнасць інтэнсіўнасці праходжання дэфармацыйнага $\gamma \rightarrow \alpha$ ператварэння ў пакрыццях з сталей мартэнсітнага класу ад памеру часцінак, якія іх фарміруюць.

У выніку эксперыментальных даследаванняў ўплыву ультрагукавога актывавання на трываласць счаплення напыленых пакрыццяў, іх трыбатэхнічныя характарыстыкі і каразійную стойкасць ажыццёўлены абаснаваны выбар рэжымаў і матэрыялаў для распрацоўкі тэхналагічнага працэсу фармавання антыфрыкцыйных а таксама тэхналагічных рэкамендацый па фармаванню каразійна стойкіх пакрыццяў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Распрацаваны тэхналагічны працэс газапалымянага напылення антыфрыкцыйных пакрыццяў драцянымі матэрыяламі з ультрагукавым актываваннем і тэхнічныя сродкі для яго рэалізацыі. Вынікі даследаванняў ўкаранёныя на РНУ “Белгазэнергарамонт” з эканамічным эфектам каля 51 млн. руб.

РЕЗЮМЕ

Сухоцкий Павел Геннадьевич

ТЕХНОЛОГИЯ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОВОЛОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ АКТИВИРОВАНИЕМ

Ключевые слова: покрытие, газопламенное напыление, проволочные материалы, распыление проволоки, ультразвуковые колебания, ультразвуковое активирование, оборудование, технологии, технические средства напыления.

Цель работы – разработка технологии и оборудования для формирования высокоплотных покрытий газопламенным напылением проволочных материалов с ультразвуковым активированием.

Объекты исследования: покрытия, формируемые газопламенным напылением проволок с ультразвуковым активированием.

Методы исследования: рентгеноструктурный, металлографический и спектральный анализ, метод математического моделирования, метод статистической обработки данных. Стандартными методами проводились исследования триботехнических свойств полученных покрытий.

Полученные результаты. Разработана математическая модель ультразвукового активирования процесса диспергирования проволок при газопламенном напылении и на ее основе предложен способ ГПН покрытий из проволочных материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Предложена конструкция газопламенного распылителя с газоструйным генератором ультразвуковых колебаний, позволяющим создавать в распыляющем воздушном потоке колебания с частотой до 50 кГц и уровнем звукового давления от 110 до 140 дБ. Определены оптимальные условия ультразвукового активирования с получением распыленных частиц фракции 5 – 20 мкм в количестве не менее 80%. Впервые установлена зависимость интенсивности протекания деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в покрытиях из сталей мартенситного класса от размера формирующих их частиц.

В результате экспериментальных исследований влияния ультразвукового активирования на прочность сцепления напыленных покрытий, их триботехнические характеристики и коррозионную стойкость осуществлен обоснованный выбор режимов и материалов для разработки технологического процесса нанесения антифрикционных а также технологических рекомендаций по нанесению коррозионностойких покрытий.

Рекомендации по использованию. Разработан технологический процесс газопламенного напыления антифрикционных покрытий проволочными материалами с ультразвуковым активированием и технические средства для его реализации. Результаты исследований внедрены на РНУ «Белгазэнергоремонт» с экономическим эффектом около 51 млн. рублей.

SUMMARY

Sukhotski Pavel Gennadjevich

TECHNOLOGY OF PROTECTIVE COATINGS FLAME SPRAYING BY WIRE MATERIALS WITH ULTRASONIC ACTIVATION

Keywords: coating, flame spraying, wire materials, wire spraying, ultrasonic vibrations, ultrasonic activation, equipment, technology, technical means of spraying.

The object-matter of research is to work out technology and equipment for covering high-density coatings by flame spraying of wire materials with ultrasonic activation.

The subject-matters of research are coatings, formed by flame spraying of wire materials with ultrasonic activation.

Methods of research: X-ray diffraction analysis, metallographic and spectrum analysis, mathematical modeling, statistical treatment. Tribological properties of received coatings were examined by standard methods.

The results obtained. The mathematical model of ultrasonic activation of wires dispersion process in case of flame spraying is developed and on its basis the method of flame spraying of coatings from wire materials with the improved physical and mechanical properties is offered. Construction of a wire flame spray unit with the gas-jet generator of the ultrasonic vibrations, allowing to create vibrations in a spraying air flow with a frequency up to 50 kHz and the sound pressure level from 110 to 140 dB is offered. Optimum conditions of ultrasonic activation with receiving the sprayed particles size 5 – 20 microns in number of at least 80% are defined. The dependence of the intensity of the flow of deformation $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation from martensitic steels coatings on the size of the particles forming them is first set.

As a result of the experimental research of ultrasonic activation influence on bonding strength of coatings, tribological characteristics and corrosion resistance, an informed choice of modes and materials for the development of anti-friction coating application technology and technological recommendations on application of corrosion-resistant coatings is made.

Application recommendations. Technological process of flame spraying of anti-friction coatings by wire materials with ultrasonic activation and technical means for its implementation have been developed. The results of work have been implemented at the RNU «Belgazenergomont» with the economic effect of about 51 mln. rubles.