

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.793

БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ Марат Артемович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
АКТИВИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОПЛАМЕННЫХ
ПОКРЫТИЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальности

05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Минск, 2012

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

Научный консультант

Витязь Петр Александрович, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель Аппарата НАН Беларуси

Официальные оппоненты:

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

Поболь Игорь Леонидович, доктор технических наук, доцент, директор НИЦ «Плазмотег» ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Ивашко Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация:

Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии НАН Беларуси

Защита состоится « 30 » марта 2012 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, Минск, пр-т Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » 2012 г.

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

Девойно О.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Среди интенсивно развивающихся ресурсосберегающих методов газотермического напыления покрытий различного функционального назначения технологии газопламенного напыления (ГПН) порошковых и проволочных материалов отличаются простотой, экономичностью и относительно низкой удельной стоимостью, причем их мировой годовой объем рынка в 2010 году составил более 600 млн. евро. Однако диапазон использования газопламенного напыления при традиционном варианте реализации, по сравнению с более энергоемкими плазменными технологиями, остается недостаточно широким, и в первую очередь вследствие невысоких значений адгезии (20 – 25 МПа). Возможная эксплуатация неоплавляемых газопламенных покрытий ограничивается легконагруженными трибосопряжениями, посадочными местами в корпусах и на валах, защитой от коррозии.

В последние годы практически во всех экономически развитых странах пошли по пути разработки дорогостоящих систем ГПН, использующих от 4 до 7 м³/ч горючих газов, до 30 м³/ч кислорода, что позволило в 4 – 8 раз повысить скорость полета частиц в газопламенном факеле, совершить качественный скачок в свойствах покрытий, увеличив в 2 – 3 раза прочность сцепления, значительно расширить диапазон наносимых материалов. Однако обеспечиваемый при этом эффект не адекватен тем затратам, за счет которых он достигается (более 50 у.е. на кг наносимого покрытия). Анализ показывает, что абсолютное большинство отечественных деталей и элементов конструкций экономически не целесообразно восстанавливать, упрочнять или защищать известными технологиями высокоскоростного ГПН. Определено, что для восстановления – упрочнения более половины быстроизнашивающихся деталей транспортных средств и различного технологического оборудования необходимо разрабатывать и использовать технологии, себестоимость которых, включая последующую обработку или модифицирование, составляет не более 6,5 у.е. на один кг наносимого материала без его стоимости.

Работа посвящена проблеме повышения служебных характеристик металлических, полимерных, композиционных покрытий, формируемых газопламенным методом из порошковых и проволочных материалов за счет использования рациональных методов активирования процессов напыления, последующего модифицирования напыленных слоев, выявления закономерностей формирования покрытий, их структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств, что в совокупности является научной базой для решения важной народнохозяйственной проблемы создания комплекса технологических процессов и технических средств, обеспечивающих при минимальных затратах получение металлических и полимерных покрытий с прочностными и

триботехническими свойствами, отвечающими условиям эксплуатации большинства узлов трения мобильных машин и технологического оборудования.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Научные исследования по теме диссертации проводились в соответствии с 14 заданиями республиканских научно-технических программ, государственных программ прикладных исследований, государственных комплексных программ научных исследований, заданиями республиканского фонда фундаментальных исследований, в том числе: заданием 1.10 ГНТП «Разработка технологии и средств снижения ресурсоемкости процессов за счет экономии первичных и использования вторичных ресурсов» («Ресурсосбережение»), утвержденной протоколом №6 от 26.12.96 г. заседанием комиссии по вопросам государственной научно-технической политики при Кабинете Министров РБ; заданием АТ05.05 (№ гос. рег. 19974537) ГНТП «Создание новых моделей конкурентоспособных автомобилей, тракторов, дизельных двигателей, выпускаемых ведущими предприятиями машиностроительного комплекса для нужд республики и экспорта» («Белавтотракторостроение»), утвержденной распоряжением Кабинета Министров РБ №1093 от 18.11.96 г.; заданием 2.03 (№ гос. рег. 1998776) ГНТП «Разработка методов и средств защиты поверхностей изделий и конструкций, обеспечивающих снижение потерь от коррозии и износа» («Защита поверхностей»), утвержденной приказом ГКНТ №88 от 15.09.97 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 ВЭ 48 (№ гос. рег. 20053836) ГППИ «Создание методов и технологий обработки материалов концентрированными потоками энергии» («Высокоэнергетические технологии»), утвержденной постановлением Президиума НАН Беларуси от 26 ноября 2003г. № 104; заданием Т05 БР-012 (№ гос. рег. 20053458) Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, утвержденным решением БНСФ от 09.06.2005 (протокол №4); заданием «Механика 3.16» (№ гос. рег.20067-83) ГКПНИ «Механика 2006 – 2010».

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка научных и технологических основ активированного формирования газопламенных покрытий для повышения их физико-механических и функциональных свойств до уровня, соответствующего эксплуатационным требованиям, предъявляемым к деталям большинства узлов трения мобильных машин и технологического оборудования, и создание технических средств для активированного газопламенного напыления.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- разработать научные основы методологии определения требуемой адгезии напыленных покрытий, учитывающие величину и характер действующих

на деталь нагрузок в процессе эксплуатации;

- выполнить теоретический анализ активирующего воздействия на газопламенный факел независимого источника спутного потока, на основании которого разработать методы, позволяющие изменять условия теплообмена между наносимым материалом и факелом термораспылителя, обеспечивающие формирование покрытий из смесей порошков металлов и керамики с прочностью сцепления более 40 МПа, порошков материалов с низкой теплопроводностью (2 – 5 Вт/м·град), порошков полимеров с температурой плавления от 360 до 670 К;

- разработать метод активирования процесса газопламенного напыления покрытий проволочными материалами акустическим воздействием на распыляющую струю, позволяющий достичь значений плотности покрытий более 90%;

- разработать методы повышения физико-механических характеристик покрытий, полученных ГПН широко используемых стальных проволок, основанные на управлении процессами структурообразования в наносимых покрытиях и на последующем модифицировании поверхностных слоев;

- определить динамические и тепловые характеристики факелов термораспылителей для формирования покрытий из порошков термопластичных полимеров с температурой плавления от 360 до 670 К и полимерных экструдатов диаметром 2 – 4 мм;

- установить взаимосвязи технологических параметров процессов активированного газопламенного напыления со структурными характеристиками и эксплуатационными свойствами покрытий, напыленных порошковыми и проволочными материалами;

- разработать новое оборудование и технологические процессы формирования однородных и слоистых покрытий различного назначения активированным газопламенным напылением порошковых и проволочных материалов и внедрить их в производство.

Объект исследования – процесс газопламенного формирования металлических, полимерных, композиционных, слоистых покрытий порошковыми и проволочными материалами. Предмет исследования – технологические параметры активирования процесса газопламенного напыления и их влияние на физико-механические свойства, структурообразование и служебные характеристики покрытий.

Положения, выносимые на защиту

1. Методология определения необходимых значений адгезии напыленных покрытий, учитывающая величину и характер действующих на деталь нагрузок в процессе эксплуатации, что впервые позволило расчетным путем получить численные значения прочности сцепления на отрыв покрытий, нано-

симых на валы со шкивами и кривошипами, коленчатые валы, шаровые опоры, тонкостенные сферические сочленения, цапфы подшипников скольжения.

2. Физическая и математическая модели процесса газопламенного напыления с источником спутного потока, отличающиеся представлением процесса в виде «трехслойной модели», описывающей движение двухфазной струи в искусственно созданном спутном потоке, истекающем в затопленное пространство, учитывающие их динамические, теплофизические параметры и угол взаимодействия с двухфазной струей, позволившие рассчитать характеристики спутных потоков, необходимые для разгона напыляемых частиц до скоростей 100 – 400 м/с, установить экономичные варианты управления процессом теплообмена в системе «факел – частица», предложить принципиально новый метод динамического активирования газопламенной двухфазной струи высокотемпературным спутным потоком, разработать новый класс термораспылителей для газопламенного напыления порошковых материалов, формируя покрытия с прочностью сцепления на отрыв до 50 МПа, пористостью 7 – 10%.

3. Результаты исследования влияния активирующего воздействия состава, характеристик газопламенного факела и акустических колебаний, генерируемых в распыляющем газе, на процесс формирования покрытий из проволочных материалов, позволившие развить представление о механизме эволюции структуры и фазового состава распыляемых проволочных материалов от исходного состояния до момента кристаллизации распыленных частиц на детали, установить явление аномально высокого содержания остаточного аустенита при напылении хромсодержащих сталей мартенситного класса, выбрать рациональный вариант реализации $\gamma - \alpha$ превращения с повышением твердости покрытий с 300 до 800 HV, обеспечить повышение прочности сцепления на отрыв до 40 – 45 МПа.

4. Результаты исследований влияния модифицирующего воздействия микроплазменной обработки, ионно-лучевого азотирования, карбонитрирования на физико-механические свойства газопламенных покрытий, в ходе которых установлен эффект существенной интенсификации механизма насыщения покрытий по сравнению с компактными материалами, обусловленный высоким уровнем дефектности и структурными особенностями, что позволило определить условия, обеспечивающие увеличение толщины оксидированных слоев на алюминиевых покрытиях с 150 до 400 мкм, повышение микротвердости поверхностных слоев на покрытиях из сталей ферритного класса до 5000 МПа и на покрытиях из сталей аустенитного класса – до 12000 МПа, увеличение прочности сцепления покрытий на отрыв с 40 до 58 МПа.

5. Результаты теоретического анализа зависимости кинетики газопламенного нагрева термопластичных полимеров от плотности теплового потока струи, позволившие использовать для нагрева и распыления полимерных шну-

ров одну газопламенную струю, предложить способ управления процессами теплообмена в системе «пламя – частицы полимерного порошка» применяя газодинамический эффект от воздействия внутреннего спутного потока, что дало возможность формировать покрытия с прочностью сцепления на отрыв до 11 МПа из порошков полимеров с температурой плавления от 360 до 670 К и впервые выбрать оптимальный диапазон режимов формирования покрытий из полимерных шнуров.

6. Результаты теоретического анализа теплонагруженности полимерной подложки при газопламенном напылении на нее металлического покрытия, в частности, зависимости минимальной толщины подложки от теплофизических характеристик напыляемого металла, что позволило определить режимы газопламенного напыления металлических слоев, исключая деструкцию полимера, разработать технологические процессы формирования слоистых металлополимерных покрытий, впервые сформировать покрытия с поверхностным слоем из корунда толщиной до 150 мкм на изделиях из фторопласта-4 и полиамида ПА 6.

Личный вклад соискателя

Результаты работ получены автором лично, а также в сотрудничестве с научными сотрудниками ОИМ НАН Б, ФТИ НАН Б, ИФП СО РАН. Основные исследования, описанные в диссертации, были выполнены лично автором и под руководством автора. Личный вклад автора заключается в выработке гипотезы исследования, постановке задач, их экспериментальном выполнении, анализе и обобщении полученных результатов, разработке физических моделей. Большинство опубликованных работ по теме диссертации написаны автором после обсуждения полученных результатов с соавторами работ.

Основными соавторами по опубликованным работам являются академик, д.т.н. профессор Витязь П.А. – научный консультант по диссертационной работе, д.ф.-м.н. Кукареко В.А., с которым выполнены совместные исследования структуры покрытий, соискатели и аспиранты Черепко А.Е., Долонговский В.А., Федаравичус А.В., Сухоцкий П.Г. и Чекулаев А.В., участие которых выразалось в подготовке и проведении экспериментов, обработке и обсуждении результатов исследований. Конструкции установок разработаны совместно с Полупаном Ю.В., Прядко А.С., Пунтусом И.Л. и др.

За цикл совместных работ «Физическая мезомеханика и новые представления о контактном разрушении градиентных материалов; разработка технологий поверхностной инженерии материалов и конструкций» автор в коллективе соавторов награжден российско-белорусской премией имени академика В.А. Коптюга за 2002 г.

Апробация результатов диссертации

Результаты выполненных работ докладывались в период с 1990 по 2011 годы более чем на 70 международных научно-технических конференциях,

симпозиумах и семинарах, в том числе на: МНТК «Применение процессов газотермического напыления и лазерной обработки материалов» (г. Н.Новгород, 1990), МНТК «Газотермическое напыление напыление в промышленности – 93» (г. С.-Петербург, 1993), МНТК «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин» (г. Новополоцк, 1993-2009), МНТК «Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии» (г. Гродно, 1994, 1996, 1998, 2006, 2007), МНТК «Новые материалы и технологии в трибологии. 2-я Американско-Восточноевропейская конференция» (г. Гомель, 1997), МНТК «Физика плазмы и плазменные технологии» (г. Минск, 1997), «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (г. Кировоград, 1997, 1999, 2001, 2009), Int. Conf. «Fundamental sciences in Belarusian conversion-related technologies» (Minsk, ЕНУ, 1997), МНТК «Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века» (г. Донецк - Севастополь, 1998, 1999), МНТК «Полимерные композиты-2000» (г. Гомель, 2000), МНТК «Пленки и покрытия» (г. С.-Петербург, 2001, 2003, 2007, 2009), МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Донецк - Севастополь, 2002, 2003, 2004, 2005), МНТК «MESO-2003» (Tomsk, ISPMS, 2003), «Первый белорусский космический конгресс» (г. Минск, 2003), МНТК «Новые технологии и материалы» (г. Томск, 2005), МНТК «Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб – 2005)» (г. Гомель, 2005), МНТК «II Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО-2007»» (г. Новосибирск, 2007), III Int. Conf. «Metrology in Production Engineering» (Augustow, Poland, 2007), V Int. Conf. «Korea – Eurasia Technology Cooperation» (Seoul, Korea, 2007), 21-st Int. Conf. of Surface Modification Technologies (Ensam – Paris, 2007), МНТК «НАНО-2008» (Минск, 2008), «ММТ-2008» (Ariel, Israel, 2008), 11 и 13 МНТК «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин» (С.-Петербург, 2009, 2011), IV Белорусский конгресс «Механика – 2009» (Минск, 2009), IV Межд. симпозиум по трибофатике (Минск, 2010), Межд. симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2011), 13-я МНТК «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин от нано- до макроуровня» (С.-Петербург, 2011), 26th ISTC – Korea Workshop «Advanced nuclear materials, materials evaluation and radiation biology» (Daejeon, Korea, 2011).

Опубликованность результатов диссертации

По результатам выполненных исследований опубликовано 131 научная работа, в том числе 5 монографий (одна без соавторов), 67 статей (3 депонированных) в научных, научно-технических журналах и периодических научно-технических сборниках, 53 статьи в сборниках научных трудов, материалах конференций и симпозиумов, 6 тезисов докладов. Новизна технических решений подтверждена 36 авторскими свидетельствами и патентами. Объем публи-

каций, соответствующих п.18 Положения составляет 819 страниц (51,2 а.л.), из них личный вклад соискателя – 613 страниц (38,3 а.л.).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, общей характеристики, 6 глав, заключения, списка использованных литературных источников (234 наименования) и приложения. Диссертация содержит 310 страниц, в том числе 140 рисунков и 30 таблиц. В приложении содержатся результаты расчета турбулентных характеристик струи; вывод уравнений для расчет величины адгезии покрытий, наносимых на шейки коленчатых валов ДВС, на сферические сопряжения, на трубы; основные положения теоретического анализа процесса нагрева полимерных порошков и шнуров; сводный акт результатов внедрения разработанных технологий и оборудования для активированного ГПН.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности рассматриваемой проблемы, связь работы с научными программами, цели и задачи исследования, выносимые на защиту положения, личный вклад соискателя. Отражены вопросы практической значимости, апробации и опубликованности результатов диссертационной работы. Представлены структура и объем диссертации.

Первая глава посвящена анализу литературных данных по фундаментальным и прикладным аспектам газотермического и, в частности, газопламенного напыления покрытий различного функционального назначения. Охарактеризованы физико-химические основы процессов ГПН порошковых и проволоочных материалов и влияния технологических параметров напыления на физико-механические свойства покрытий. Выполнен анализ отечественного и зарубежного оборудования, используемого в практике ГПН. Показана эффективность методов ГПН при восстановлении деталей машин и механизмов общемашиностроительного профиля. Отмечен большой вклад в разработку технологических процессов ГПН и материалов для формирования защитных, износостойких покрытий, которой внесли ученые Беларуси, России, Украины, Германии, США, Японии и других стран. Показано, что увеличение номенклатуры восстанавливаемых или упрочняемых деталей и повышающиеся требования к свойствам наносимых покрытий вызывают необходимость расширения области применения и возможностей ГПН, разработки новых способов и устройств, активирующих процесс напыления и повышающих качество покрытий. Прочность сцепления на отрыв покрытий из порошковых материалов без последующей термообработки, как правило, не превышает 25 МПа при относительно высокой пористости (12 – 20%). Отсутствуют надежные технические средства для ГПН покрытий из легкоплавких термопластичных полимерных материалов. Несмотря на очевидную экономичность процесса ГПН

проволочных материалов, до настоящего времени не были разработаны отечественные технические средства, отвечающие требованиям современного производства. Твердость покрытий из проволочных материалов составляет не более 4000 МПа, адгезия не превышает 30 МПа при пористости 10 – 15%.

Подчеркнуто, что в последние годы, важнейшей задачей в области исследования процессов и явлений, протекающих при напылении, явилось изыскание новых приемов (или их совокупности) активации, позволивших совершить качественный скачок в свойствах покрытий и диапазоне наносимых материалов. Однако, проведенный анализ показал, что обеспечиваемый применением активированного напыления эффект не адекватен тем затратам, за счет которых он достигнут. Уровень экономики и технического развития промышленного производства Беларуси и стран СНГ накладывает достаточно жесткие ограничения на возможности использования дорогостоящих материалов для покрытий, реализации разрабатываемых приемов активации процесса ГПН и последующего упрочнения. Целесообразность их использования должна прежде всего отвечать требованиям отечественных предприятий, а затраты на освоение соответствовать решаемым проблемам. Таким образом, возникает необходимость в разработке рациональных методов активирования и соответствующих технических средств, реализующих эти методы.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена теоретическим предпосылкам активирования процесса ГПН и разработке научных основ процесса активирования двухфазной струи (газопламенного факела с наносимым материалом) независимым источником спутного потока.

Предложена методология научно обоснованного выбора рационального метода и режимов восстановления, упрочнения и защиты детали, базирующегося на ее рассмотрении как элемента динамической системы, рассчитываемого на надежность. Использование положений прочностной надежности деталей с покрытиями позволяет не только оценить пределы использования каждого из методов газотермического напыления, но прежде всего аналитическим путем установить необходимый уровень прочности сцепления покрытий на деталях узлов трения широко распространенного технологического оборудования и транспортных машин, который должен быть обеспечен методами ГПН.

Условие прочностной надежности покрытия по критерию прочности его сцепления с деталью имеет вид: $k_3 \sigma_{\text{эКВ}} \leq [\sigma_{\text{сц}}]$, где $\sigma_{\text{сц}}$ – нормально приложенная удельная нагрузка, при которой происходит отрыв покрытия от основы (прочность сцепления на отрыв); k_3 – коэффициент запаса прочности.

Учитывается динамическая нагруженность, определяемая тяговыми, изгибающими или сжимающими усилиями и динамическими нагрузками, нося-

щими случайный характер. Любые напряжения, вызывающие деформацию всего изделия или отдельных участков, воздействуют на покрытие, адгезионные и когезионные характеристики которого и будут в конечном итоге определять его работоспособность. Зная максимальные напряжения, возникающие у поверхности детали, и имея данные о свойствах покрытия, можно расчетным путем оценить, какие методы необходимо использовать в данном случае. Возможна постановка и обратной задачи, решение которой определит области рационального использования каждого из методов.

Используя уравнения энергетической теории прочности, было определено, что в случае валов и осей, форма сечения которого представляет окружность диаметром d , $\sigma_{сц}$ находится из выражения:

$$\sigma_{сц} \geq \frac{32}{\pi d^3 \cdot k_3} \sqrt{M_u^2 + 0,75M_k^2}, \quad (1)$$

где M_u и M_k изгибающий и крутящий моменты, вызывающие наибольшие напряжения в расчетном сечении вала.

Определив для каждого из участков коленчатого вала опасное сечение и указав в нем наиболее напряженные точки, было найдено условие прочности для покрытия на шатунной шейке в наиболее опасном сечении (патент РБ №4840):

$$(\sigma_{эжв})_C = \frac{a+b+\frac{l}{2}}{0,4d^3} \left[(1-\nu)\sqrt{Z^2+T^2} + (1+\nu)\sqrt{Z^2+T^2+4\left(\frac{r_o}{a+b+\frac{l}{2}}\right)^2 T^2} \right], \quad (2)$$

где: d – диаметр шейки; a – половина длины коренной шейки; l – длина шатунной шейки; b – ширина щеки вала; $\nu = \sigma_{Тр} / \sigma_{Тсж}$, где $\sigma_{Тр}$ – предел текучести при растяжении, $\sigma_{Тсж}$ – предел текучести при сжатии; $T = (M_{дв})_{\max} / r_o$, где r_o – расстояние между осями шатунной и коренной шеек, $(M_{дв})_{\max}$ – максимальный крутящий момент; $Z = F_{п}(P_{r\max} - P_0)$, где $P_{r\max}$ – максимальное давление газов на поршень, $F_{п}$ – площадь поверхности торца поршня; P_0 – давление газов под поршнем.

Был выполнен расчет требуемых значений прочности сцепления покрытий, напыляемых на коленчатые валы ДВС различной мощности (рисунок 1). Выполнение расчета прочности сцепления покрытий на сферических опорах и шаровых сочленениях основывалось на вычисляемых величинах статических и квазистатических нагрузок, а учет динамических осуществляется введением поправочного коэффициента динамичности K_d . В основу расчетной схемы положена сферическая оболочка радиуса R толщиной δ , нагруженная равномерным нормальным давлением P_p . В связи с тем, что расчет на прочность сферической оболочки является весьма сложной задачей, был использован при-

ближенный метод В.Л. Бидермана, основанный на учете краевого эффекта. Получено выражение для расчета величины максимального напряжения изгиба $\sigma_{m_{max}}$ на краях усеченной сферической оболочки. Расчеты, выполненные для сферических сочленений перегрузочного рукава зерноуборочного комплекса КЗР-10 показали, что прочность сцепления антифрикционных полимерных покрытий должна быть 7,5 – 9,5 МПа.

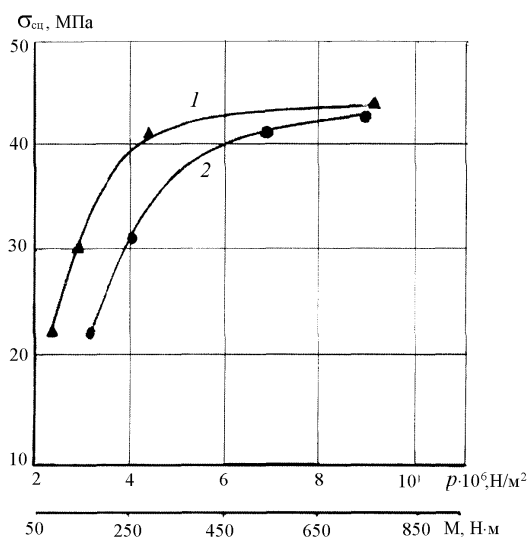


Рисунок 1 – Зависимость величины необходимой прочности сцепления напыленных на шейки валов покрытий от максимального крутящего момента двигателя (1) и максимальных значений давления газов в цилиндрах (2)

Наибольшее влияние величина адгезии оказывает на долговечность полимерных покрытий, в процессе эксплуатации которых возможны значительные температурные перепады. Температурные напряжения в переходной зоне «металл – полимерный слой» возникают вследствие различия величин коэффициентов термического расширения материалов трубы и полимера. Анализ напряженного состояния переходной зоны «труба – полимерное покрытие» позволил получить выражение для определения требуемой прочности сцепления полимерного слоя (патент РБ №10551):

$$\sigma_{сц} \geq \frac{T(2\delta_{п} + \nu D)(\alpha_{п} - \alpha_{т})}{D \left(F_{п} + F_{т} \frac{\delta_{п}}{\delta_{т}} \right)}, \quad (3)$$

где: D – диаметр трубы; $\delta_{т}$, $\delta_{п}$ – толщина стенки трубы и толщина покрытия соответственно;

$F_{п} = \frac{1-\mu_{п}}{E_{п}}$; $F_{т} = \frac{1-\mu_{т}}{E_{т}}$; $\mu_{п}$ – коэффициент Пуассона материала

покрытия, $E_{п}$ – модуль упругости материала покрытия, МПа; $\mu_{т}$ – коэффициент Пуассона материала трубы, $E_{т}$ – модуль упругости материала трубы, МПа; $\alpha_{п}$, $\alpha_{т}$ – коэффициенты термического расширения материалов покрытия и трубы соответственно.

Анализ результатов расчетов необходимых значений адгезии напыленных покрытий показал, что для значительного расширения области использования технологий ГПН при восстановлении деталей узлов трения скольжения

необходимо какими либо методами активировать процесс нанесения покрытий. При этом должны быть достигнуты следующие значения прочности сцепления на отрыв: на валах с кривошипами (при усилии на палец кривошипа 1000 – 1500 Н) – не менее 30 МПа; на шейках коленчатых валов средненагруженных ДВС – не менее 35 МПа, на шейках коленчатых валов тяжело нагруженных ДВС – не менее 45 МПа; на длинномерных деталях, покрываемых полимерами и эксплуатирующихся в атмосферных условиях – не менее 10 МПа.

Как показал проведенный анализ, использование при газотермическом напылении спутных потоков, истекающих в двухфазную струю, позволяет повысить динамические характеристики частиц. Количественная оценка влияния спутного потока на параметры двухфазной струи была получена еще в 70-х годах прошлого века с помощью интегральных методов и описана в работах Г.Н. Абрамовича с сотрудниками. Однако интегральные методы требуют для реализации большой объем экспериментальной информации. Развитие вычислительной техники дало возможность при математическом моделировании неравновесных двухфазных течений использовать систему дифференциальных уравнений в частных производных. Предположено, что метод компьютерного моделирования взаимодействия спутных потоков с двухфазными струями позволит рассчитать скорость частиц, приобретаемую в результате активации спутными потоками.

Для описания случая с независимым источником спутного потока была предложена «трехслойная» физическая модель (в отличие от «двухслойной» - когда спутный поток возникает при движении источника, генерирующего факел), описывающая движение двухфазной струи в искусственно созданном спутном потоке, который истекает в затопленное пространство (рисунок 2).

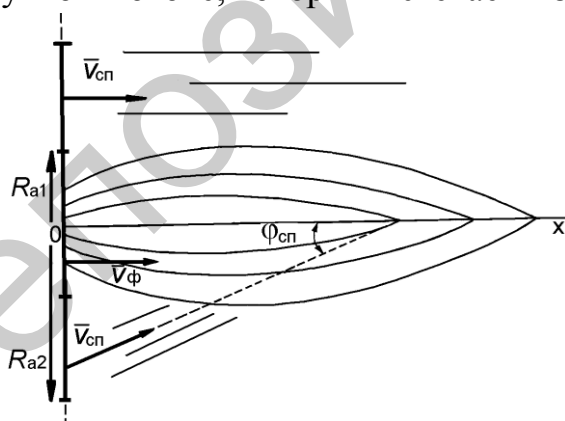


Рисунок 2 – Схема взаимодействия факела и спутного потока

Начальные условия согласно этой модели имеют вид:

$$0 \leq r_i \leq R_{a1} ; V_i = V_{\phi} ; R_{a1} < r_i < R_{a2} ; \\ V_i = V_{\text{сп}} ; R_{a2} < r_i < \infty ; V_i = 0$$

В математической модели, описывающей течение стационарной осесимметричной двухфазной изобарической струи, использована система дифференциальных уравнений и условие «двухжидкостной сплошной

среды», в котором реальное течение смеси частиц и газа заменяется взаимопроникающим течением двух сплошных сред – собственно газа и «газа частиц».

Поскольку исследуемые стационарные дозвуковые изобарические струи имеют вытянутую форму, то отношение поперечной компоненты скорости к продольной и отношение продольного градиента к поперечному меньше единицы, что позволяет вместо уравнений Навье-Стокса воспользоваться приближением пограничного слоя.

При определенных допущениях ламинарное течение стационарной осесимметричной двухфазной изобарической струи в приближении пограничного слоя в цилиндрической системе координат с продольной координатой x и поперечной r описывается системой дифференциальных уравнений (2) – (10):

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho ur) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho vr) = 0, \quad (2); \quad \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \sum_k \rho_k \left(u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial r} \right), \quad (3)$$

$$\rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r \mu}{Pr} \frac{\partial H}{\partial r} + r \mu (1 - Pr^{-1}) \frac{\partial}{\partial r} \frac{u^2 + v^2}{2} \right] - \sum_k \rho_k \left(u_k \frac{\partial H_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial H_k}{\partial r} \right), \quad (4);$$

$$\rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_i}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \mu}{Sm} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) + F_i(p, T, Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_g}), \quad (5);$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_k u_k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_k v_k r) = 0, \quad (6);$$

$$u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial r} = f_{kx}, \quad (7); \quad u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial r} = f_{kr}, \quad (8);$$

$$u_k \frac{\partial H_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial H_k}{\partial r} = q_k + u_k f_{kx} + v_k f_{kr}, \quad (9); \quad P = R \rho T \sum_i Y_i / W_i. \quad (10)$$

Уравнения (2 - 4) – это уравнения сохранения массы (уравнение неразрывности), импульса (уравнения движения в осевом направлении) и энергии для газовой составляющей струи, уравнения (6 - 9) – соответствующие уравнения сохранения для частиц конденсированной фазы с учетом членов взаимодействия с газом. В уравнениях (3, 4) взаимодействие газа с частицами проявляется в наличии членов, содержащих параметры частиц. Изменение мольных концентраций газовых компонент в процессе химических реакций описывается уравнением (5). В уравнениях для частиц (7 - 9) это взаимодействие записывается с помощью скорости обмена импульсом f_k и теплом q_i между газом и частицами k -ой группы. Уравнение (10) – уравнение состояния для смеси совершенных газов.

Поскольку в исследуемом процессе режим течения двухфазных потоков турбулентный, была использована стандартная $K - \epsilon$ модель турбулентности Лондера – Джонса, откорректированная с учетом присутствия инерционных частиц. В рамках этой модели турбулентность описывается двумя дифференциальными уравнениями для турбулентной кинетической энергии K и ее дис-

сипации ε . Было выполнено сопоставление результатов расчетов, проведенных по указанной методике, истекающих в затопленное пространство осесимметричных турбулентных дозвуковых изотермических газовых струй с экспериментальными данными, приведенными в литературе. Расчеты выполнялись с использованием программного обеспечения, применяемого в Институте молекулярной и атомной физики НАН Беларуси. Для всех сечений осесимметричной затопленной струи разница между расчетными данными и результатами экспериментов, описанными в литературе, составляла не более 15%.

Теоретический анализ процесса газопламенного напыления порошков с независимым источником спутного потока (учитывали его конечный радиальный размер и угол, под которым осуществляется взаимодействие с двухфазной струей) показал, что максимальный прирост скорости возможен при углах от 25° до 40° (рисунок 3). При равенстве объемных расходов газов в спутном потоке и основной двухфазной струе, для увеличения скорости частиц размером около 50 мкм в 1,5 раза необходимо, чтобы скорость спутного потока превышала скорость основной струи всего в 1,2 – 1,3 раза (рисунок 4).

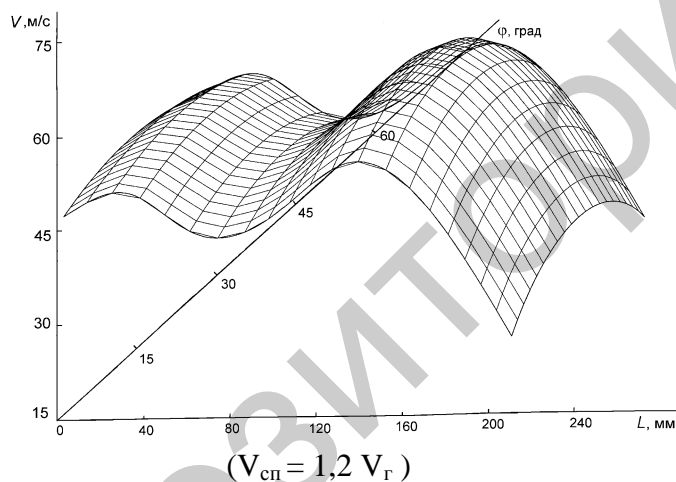
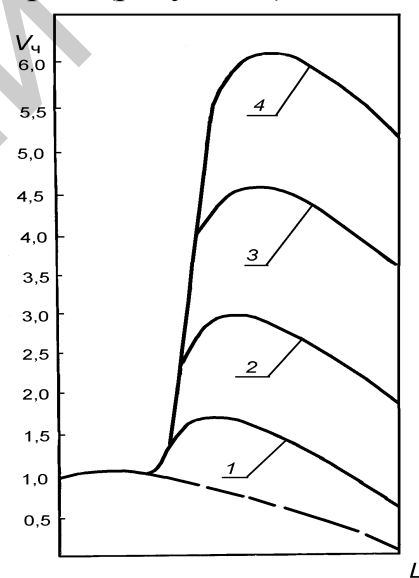


Рисунок 3 – Расчетное изменение скорости движения частиц по оси газопламенного факела при различных углах атаки спутного потока



1 – $V_{\text{сп}} = 1,2 V_{\text{Г}}$; 2 – $V_{\text{сп}} = 4,5 V_{\text{Г}}$;
3 – $V_{\text{сп}} = 7,3 V_{\text{Г}}$; 4 – $V_{\text{сп}} = 10 V_{\text{Г}}$;

Рисунок 4 – Изменение относительной скорости движения частиц в осевом сечении факела при различных скоростях спутного потока

Для повышения скорости частиц в 3 раза потребуется, чтобы скорость спутного потока превышала скорость основной струи уже в 4,5 раза. Для шестикратного увеличения скорости частиц потребуется, чтобы скорость спутного потока в 10 раз превосходила скорость основной струи. Таким образом, для того, чтобы достичь скорости частиц около 300 м/с, необходимо создать спутный поток, движущийся со скоростью 900 – 1000 м/с. Кроме того, чтобы

спутный поток не снижал температуру частиц при напылении, необходимо его нагреть до температуры не менее 1500 К. Анализ варианта размещения спутного потока внутри кольцевого факела пламени показал, что таким образом можно управлять процессом теплообмена между напыляемым порошком и пламенем, поскольку эффект эжектирования позволяет изменять диаметр факела: а) сужать факел при скорости истечения спутного потока больше скорости движения продуктов сгорания, формирующих факел; б) расширять факел при скорости истечения меньше скорости движения продуктов сгорания.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов активированного ГПН порошков металлов и композиций на их основе. Результаты теоретических исследований позволили разработать на базе ранее выпускаемых установок конструкции термораспылителей для активированного газопламенного напыления порошковых материалов – установки УУТР, ТЕРКО-1, ТЕРКО-П и термораспылители с источником высокотемпературного спутного потока. Качественное смешивание газов обеспечивает наиболее полное сгорание горючей смеси, улучшает процесс теплообмена между частицами и факелом, уменьшает вероятность обратного удара. Поэтому на первом этапе создания нового газопламенного оборудования было предложено активировать процесс подготовки горючей смеси.

В предложенной конструкции термораспылителя ТЕРКО-1 полость газосмесительного устройства разделена на камеры последовательно расположенными в осевом направлении пористыми перегородками, что позволило осуществлять рециркуляцию смеси и ее дополнительное перемешивание (патент РФ №2027527). Кроме того, при возникновении обратного удара пористая перегородка предотвращает возможность проникновения пламени в горелку. Для активации процесса подачи плохо текучих порошковых материалов был разработан электромеханический вибратор, который устанавливался непосредственно на бункере – питателе. В отличие от предыдущих моделей, термораспылитель снабжен устройством, позволяющим без переналадки изменять производительность напыления от 5 до 10 кг/ч (по хромоникелевым сплавам), многосекционным бункером, механизмом подачи порошка новой конструкции (а.с. СССР №1565534, патент СССР №1729609). В состав установки ТЕРКО-1 входит малогабаритный пульт управления подачей рабочих газов, снабженный быстросъемными газовыми разъемами типа «байонет» с встроенными в них устройствами регулировки расхода газов.

Наиболее простым методом повышения динамических параметров газопорошкового потока является активация газовыми струями, обжимающими факел пламени и ускоряющими полет частиц (а.с. СССР №1759559). Разработанный воздушный активатор выполнен таким образом, чтобы угол атаки струи воздуха по отношению к оси факела пламени мог изменяться от 0 до 70°. С увеличением угла атаки струй скорость полета частиц на дистанции

100...150 мм возрастает, достигая своего максимума при углах атаки $28^{\circ} - 33^{\circ}$, то есть на расстоянии около 100 мм от среза сопла термораспылительного пистолета. Дальнейшее изменение угла снижает скорость, и при углах более 55° струи оказывают тормозящее действие. Пористость покрытий также достигает минимума при углах около 30° . Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты теоретических исследований, представленных на рисунке 3.

Выполненная оценка температур порошка в пропан - кислородном пламени показала, что частицы материалов с низкой теплопроводностью (например, стеклоэмали) размером более 40 мкм не могут быть расплавлены в факеле известных термораспылителей. Одним из возможных путей решения проблемы газопламенного нанесения материалов с низкой теплопроводностью является использование дополнительных источников тепла, которые должны увеличить или мощность теплового потока термораспылителя или протяженность «активной» зоны факела. Используя эффект горения с отрывом было предложено образовывать вторичный факел на расстоянии 50 – 150 мм от сопла термораспылителя за счет высокой скорости подачи рабочей смеси. Разработано два варианта газопламенного напыления с использованием комбинированного факела: транспортировка порошка осуществляется первичным факелом, а вторичный факел формируют охватывающим первичный (патент СССР №1787171); вторичный факел зажигается внутри соосно ему расположенного первичного, а порошок транспортируют между факелами (патент РУ №37467А). Анализ результатов исследования температуры факела с помощью калориметрического зонда показал, что активная зона факела увеличилась на 100 – 150 мм, причем дистанция напыления материалов с низкой теплопроводностью составляет 300 – 350 мм. Система ГПН с удлиненным факелом позволяет формировать покрытия из порошков материалов с теплопроводностью (2 – 5) Вт/м·град, что невозможно достичь традиционными методами.

Для повышения скорости полета частиц до 300 м/с, согласно расчетам, необходимо сформировать спутный поток, который должен иметь температуру выше 2000 К и гиперзвуковую скорость движения. Определено, что температуру предварительного нагрева активирующего спутного потока целесообразно ограничивать величиной 2300...2500 К, а давление – 0,6...0,8 МПа, так как дальнейшее повышение этих параметров незначительно влияет на тепловые и динамические параметры частиц. В качестве источника высокоэнергетического спутного потока рассматривалась камера сгорания пропановоздушной смеси. Учитывая необходимые для формирования спутного потока объемы горючих смесей, а также данные по тепловой напряженности камер и коэффициентам выделения тепла, были выполнены расчеты, показавшие, что размеры камеры при традиционном варианте сжигания смеси значительно превосходят размеры термораспылителя, т.е. компоновка камеры и терморас-

пылителя в единую установку весьма затруднительна. Используя принцип микрофакельного сжигания газозвушной смеси в каналах керамического перфорированного элемента для получения выходного высокоскоростного потока, были предложены устройства, реализующие эффект микрофакельного горения в активаторах установок высокоскоростного напыления (патенты РБ №4365, 14885).

Экспериментальный образец термораспылителя с реактивным активатором был изготовлен на базе установки газопламенного напыления порошков (рисунок 5). Первичный факел образуется в результате горения рабочей смеси газопламенного распылителя, на сопловой части которого монтируется реактивный активатор. При помощи специально предусмотренного регулировочного крана, ограничивающего подачу воздуха на смесеобразование, можно создавать окислительное или восстановительное пламя в спутном высокоскоростном факеле. Измерения показали, что максимальная скорость, развиваемая частицами наиболее легкого порошкового материала – Al_2O_3 , составляет 400 – 440 м/с (рисунок 6) и достигается на дистанции 90 – 110 мм при соотношении объемов окислителя (воздуха) и пропана (26...28):1. Покрытия, напыленные порошком плакированного никелем карбида хрома имели пористость 6 – 7% и прочность сцепления 45...53 МПа.



Рисунок 5 – Термораспылитель с малогабаритным реактивным активатором

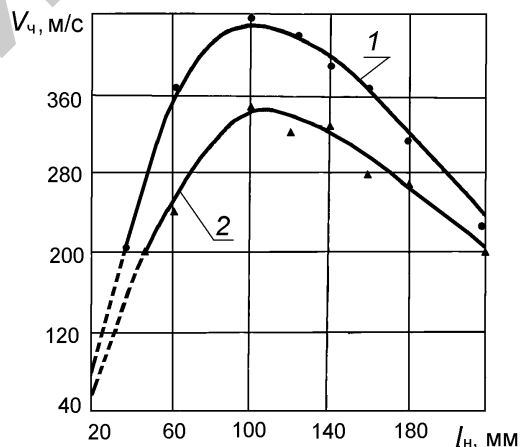


Рисунок 6 – Изменение скорости частиц порошков Al_2O_3 (1) и Cr_3C_2 (2) по длине факела

С целью оценки возможности повышения качества покрытий, напыленных порошками не оплаваемых в традиционных технологических процессах материалов, исследована возможность последующей термообработки. Установлено, что нагрев до 870 К с изотермической выдержкой около 3 ч приводит к увеличению твердости покрытий из порошков алюминиевой бронзы и ее смеси с алюминидом никеля в 1,25...1,40 раза. Прочность сцепления практически не изменялась.

Показано, что для оплавления покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов на основе никеля, железа и кобальта наиболее эффективным и перспективным является нагрев токами высокой частоты (индукционное оплавление).

ние). Был произведен анализ процесса тепловыделения при индукционном оплавлении и оценено влияние частоты поля индуктора. Установлено, что процесс оплавления на высоких частотах (30...70 кГц) более зависим от толщины покрытий, чем оплавление на средних частотах (6...30 кГц), и характеризуется значительным уменьшением интенсивности тепловыделения в приграничной области (в 1,8 раза) с увеличением толщины от 0,5 до 3 мм. При среднечастотном оплавлении уменьшение интенсивности выражено слабее (1,25 раза). Для покрытий толщиной 0,5 – 1,5 мм рекомендован для оплавления высокочастотный нагрев, для покрытий толщиной 1,6 – 3,0 мм – среднечастотный. В оплавляемом покрытии изменение коэффициента термического расширения (α_T) материала подложки от $12,1 \cdot 10^{-5}$ 1/К до $13,4 \cdot 10^{-5}$ 1/К приводит к снижению макронапряжений на 30% (с 260 до 180 МПа), а использование подложки из стали X18H10T ($\alpha_T=14,1 \cdot 10^{-5}$ 1/К) позволяет снизить значения $\sigma_{ост}$ почти в три раза. Влияние этого фактора снижается по мере уменьшения температуры термообработки, и при 970 К разница в значениях макронапряжений покрытий, напыленных на стали 45 и 40X, составляет только 20%. Существенное влияние на величину остаточных напряжений оказывает толщина наносимого слоя, с увеличением которой при почти равных условиях напряжения возрастают.

Четвертая глава посвящена исследованию процесса активированного газопламенного напыления защитных и антифрикционных покрытий порошками термопластичных полимеров. Основываясь на том, что газовое пламя с достаточной для практики точностью можно считать конвективным теплообменным источником теплоты, проведен теоретический анализ процесса нагрева полимерного порошка в факеле пламени пропано-воздушной смеси. В результате проведенного теоретического анализа получена следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}
 T(0,5R_{\max}, \tau_{\min}) &= \frac{q}{Fo \cdot \alpha} \left\{ Fo - \frac{1}{6} \left[0,75 + \frac{2}{Bi} \right] + A \frac{2 \sin(0,5\mu) \cdot \exp(-\mu^2 \cdot Fo)}{\mu^3} \right\} + T_0 \geq T_{nl} \\
 T(R_{\min}, \tau_{\max}) &= \frac{q}{Fo \cdot \alpha} \left\{ Fo - \frac{1}{6} \left[1 + \frac{2}{Bi} \right] + A \frac{\sin \mu \cdot \exp(-\mu^2 \cdot Fo)}{\mu^3} \right\} + T_0 \leq 1,5T_{nl}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

где: q – плотность теплового потока (количество теплоты, проходящее через поверхность частицы), Вт/м², $T(0,5R_{\max}, \tau_{\min})$ – температура внутри частицы максимального диаметра в процессе напыления с минимальной дистанции, К; $T(R_{\min}, \tau_{\max})$ – температура на поверхности частицы минимального диаметра в процессе напыления с максимальной дистанции, К; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К).

Решение системы (11) позволило вычислить не только оптимальную плотность теплового потока, но и диапазон, в котором должны находиться

теплофизические параметры факела пламени, предотвращающие термоокислительную деструкцию полимерной частицы. Оценка величины плотности теплового потока при газопламенном напылении порошков из термопластичных полимеров показала, для эффективного процесса формирования покрытий из полимеров с различными теплофизическими характеристиками необходим термораспылитель, обеспечивающий управление процессом теплообмена в системе «факел – частица полимера» плавной и точной регулировкой плотности теплового потока в пределах $(1 - 3) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Для обеспечения эффективного процесса нанесения покрытий из порошков, получаемых криогенным измельчением полимерных гранул, вторичных полимеров и отходов производства синтетических волокон, был разработан термораспылитель ТЕРКО-П (патенты РБ № 223, 1652, 7926, патент РТ №ТJ №89), удовлетворяющий поставленным условиям. В конструкции термораспылителя использован эффект эжектирования (газодинамической активации), возникающий при изменении соотношения скоростей выхода компонентов горючей смеси (V_r) и воздуха в спутном потоке, движущемся в зазоре между мундштуком и сопловым наконечником ($V_{сп}$) (рисунок 7). Поток воздуха является газодинамическим активатором, с помощью которого изменяется форма факела и появляется возможность регулировать условия теплообмена между факелом и порошком. Использование этого эффекта позволило наносить покрытия порошками термопластов с температурой плавления $360 - 650 \text{ К}$ при производительности до $2,9 \text{ кг/ч}$.

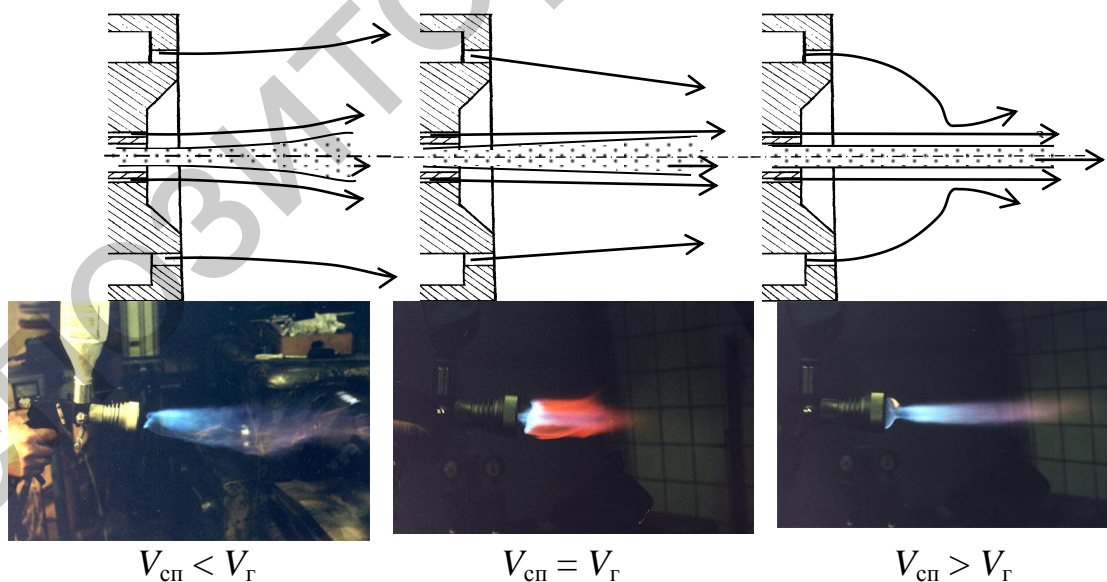


Рисунок 7- Формы факела в зависимости от степени газодинамической активации

Методом инфракрасной спектроскопии установлено, что при формировании покрытий с помощью разработанного оборудования порошками из отходов производства полиэтилентерефталата ($T_{пл.} = 370 - 390 \text{ К}$), окислительная деструкция поверхности незначительна.

Поскольку одним из основных факторов, определяющих работоспособность полимерных покрытий, является величина их адгезии к подложке, основное внимание было уделено определению режимов подготовки поверхности подложки и последующего напыления порошков, обеспечивающих максимальную прочность сцепления покрытий на отрыв.

Установлено, что струйно-абразивная обработка поверхности с удельной энергией потока $70 - 150 \text{ кДж/с} \cdot \text{м}^2$ и размером частиц $0,8 - 1,5 \text{ мм}$ обеспечивает наибольшие значения адгезии газопламенных покрытий из термопластичных полимеров по сравнению с другими методами подготовки. При этом наибольшая адгезия достигается напылением порошков с размерами частиц $150 - 300 \text{ мкм}$, причем максимальная прочность сцепления покрытий с основой наблюдается при соблюдении следующего соотношения между минимальным и максимальным диаметром частиц в шихте: $d_{\text{max}}/d_{\text{min}} \approx (1,8 - 2,0)$. Показано, что введение неорганических наполнителей в состав напыляемой шихты позволяет увеличить адгезию полимерных покрытий к стали на $15 - 20\%$. Установлено, что величина критического содержания наполнителя в ситаллополимерных покрытиях, при превышении которой наблюдается уменьшение адгезионной прочности, составляет 15% .

Для повышения прочности сцепления полимерных покрытий с поверхностью деталей, испытывающих при эксплуатации знакопеременные нагрузки в пределах упругих деформаций, в том числе в узлах сухого трения скольжения предложено использовать эффект повышения адгезии полимеров к металлам при возникновении у полимеров кислородосодержащих групп (патент РБ №8528). Определено, что напыление предварительного слоя, обеспечивающего адгезию покрытия, необходимо осуществлять порошком с размером частиц $40 - 60 \text{ мкм}$ в окислительном пламени (при соотношении воздуха и пропана в смеси от $24:1$ до $32:1$), что позволяет получить значения $\sigma_{\text{сц}} = 10,0 - 10,5 \text{ МПа}$. Напыление основного покрытия необходимо осуществлять порошком с размером частиц $100 \dots 300 \text{ мкм}$ в нормальном пламени (при соотношении воздуха и пропана в смеси $20:1 - 24:1$), а оплавление покрытия производить при соотношении воздуха и пропана в смеси $16:1 - 20:1$. Исследования, проведенные с образцами покрытий из ПА 6 – ПЭНД показали, что минимальная интенсивность изнашивания при сухом трении (удельная нагрузка $0,5 \text{ МПа}$, скорость $0,2 \text{ м/с}$) обеспечивается при напылении основного покрытия «нормальным» пламенем порошком с размером частиц $100 - 250 \text{ мкм}$, и оплавлении покрытия восстановительным пламенем.

Одной из наиболее сложных технологических задач является нанесение многослойных покрытий систем «металл – полимер- металл», «полимер – металл – полимер» или «полимер – металл – керамика», которые позволяют значительно повысить износостойкость контактирующих поверхностей и создать

барьер на пути распространения колебаний во всем диапазоне звуковых частот.

Теоретический анализ процесса взаимодействия нагретой металлической частицы с поверхностью полимера позволил получить выражение (12) для определения минимальной толщины полимерного покрытия, на которое можно методами газотермического напыления наносить последующие металлические слои:

$$\delta_n \geq N_k \sqrt{a_n t \cdot \ln \left[K_1 \frac{D^3 \rho_1}{6 c_n \rho_n} (c_1 T_m + \lambda_1) \right]}, \quad (12)$$

где δ_n - необходимая толщина слоя, м; N_k - коэффициент, равный 4,2 – 4,5; t - время, прошедшее с момента контакта капли с температурой T распыленного металла с полимерным слоем до распространения теплоты вглубь него, с; D - диаметр капли распыленного металла, м; ρ_1 , c_1 , λ_1 - удельная масса ($\text{кг}/\text{м}^3$), удельная теплоемкость ($\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$) и удельная теплота плавления ($\text{Дж}/\text{кг}$) металла соответственно; a_n , c_n , ρ_n - температуропроводность ($\text{м}^2/\text{с}$), удельная теплоемкость ($\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$) и удельная масса ($\text{кг}/\text{м}^3$) полимера соответственно; K_1 - коэффициент, равный $1,15 \cdot 10^{11} (\text{м}^3 \cdot \text{град})^{-1}$ (патент РБ №12667).

Оценка упруго-диссипативных свойств полимерных и слоистых металлополимерных газопламенных покрытий осуществлялась по ускорению измерительного стола в результате удара эталонного металлического шарика по испытываемому образцу с демпфирующим покрытием. Испытания показали, что при толщине полимерного покрытия 1,5 мм снижение уровня передаваемых ускорений достигает 3-х кратного значения по сравнению с образцом без покрытия. Последующий слой из алюминия толщиной 0,65 мм на полимерном покрытии позволяет снизить уровень ускорений еще на 25%.

В пятой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса активированного ГПН покрытий проволочными материалами. На основании анализа конструкций и эксплуатационных характеристик оборудования для ГПН проволок и шнуров, а также с учетом специфики условий отечественных предприятий, была разработана установка для напыления проволочных материалов ТЕРКО-2 (рисунок 8). Установка оснащена газосмесительным устройством оригинальной конструкции, предусмотрено изменение объема воздушной камеры без замены воздушной головки.

Было предложено активировать процесс напыления покрытий формированием в распыляющем воздушном потоке акустических колебаний, которые передаются распыляемой проволоке (патент РБ №5768). Для этого в распылительной головке выполнен газоструйный излучатель Гартмана, генерирующий в распыляющей струе высокочастотные колебания (≈ 30 кГц) с уровнем звукового давления 120 – 135 дБ (патенты РБ 349, 778).



Рисунок 8 – Термораспылитель ТЕРКО-2

Разработана оригинальная методика, позволяющая исследовать процесс акустического воздействия распыляющего потока на размер распыляемых частиц. Установлена зависимость количества частиц мелких фракций от частоты генерируемых колебаний и уровня звукового давления.

Экспериментально исследовались тепловые характеристики факела установки ТЕРКО-2, работающей на режимах, обеспечивающих устойчивое горение при максимальной скорости полета продуктов сгорания. Показано, что максимальные значения поверхностной плотности теплового потока и температуры при использовании пропан-кислородного пламени достигаются на рас-

стоянии 10...14 мм и составляют соответственно 10^7 Вт/м² и 2970 К.

Разработана методика расчета скорости подачи проволоки при газопламенном напылении, в основу которой положены результаты исследования тепловых характеристик факела (патент РБ №4731). Получено выражение для определения производительности ГПН проволочных материалов и скорости подачи проволоки $V_{пр}$ в термораспылитель:

$$V_{пр} = \frac{4 \int_0^{l_1+l_2} \alpha(x) dx}{\rho_{пр} C_{пр} d_{пр} \ln \frac{T_n - T_0}{T_n - T_m} + \frac{\rho_{пр} d_{пр} \lambda_{пр}}{T_n - T_m}}, \quad (13)$$

где $d_{пр}$ – диаметр проволоки, м; α – коэффициент теплопередачи, Дж/с·м²·град; $\rho_{пр}$, $\lambda_{пр}$, $C_{пр}$ соответственно, удельная масса (кг/м³), удельная теплота плавления, (Дж/кг) и удельная теплоемкость (Дж/кг·град) материала проволоки. Величину $\int_0^{l_1+l_2} \alpha(x) dx$ определили графическим интегрированием функции $\alpha = \alpha(x)$, построенной по экспериментальным данным. Для термораспылителя ТЕРКО-2 эта величина составляет ≈ 53 кДж·мм/с·м²·град.

Выполнена оценка влияния дистанции напыления, размера распыленных частиц (рисунок 9) и свойств материала на пористость и адгезию покрытий. Определено, что у покрытий из сталей, бронз, алюминия и его сплавов наблюдается снижение прочности сцепления на отрыв с 22 – 30 МПа до 15– 18 МПа с увеличением средних размеров распыленных частиц с 30 до 100 мкм. При распылении нихрома и молибдена повышение среднего размера распыленных частиц с 15 до 100 мкм позволяет повысить прочность сцепления с 23 – 27

до 40 – 46 МПа, что свидетельствует о нецелесообразности использования акустической активации при напылении данных материалов.

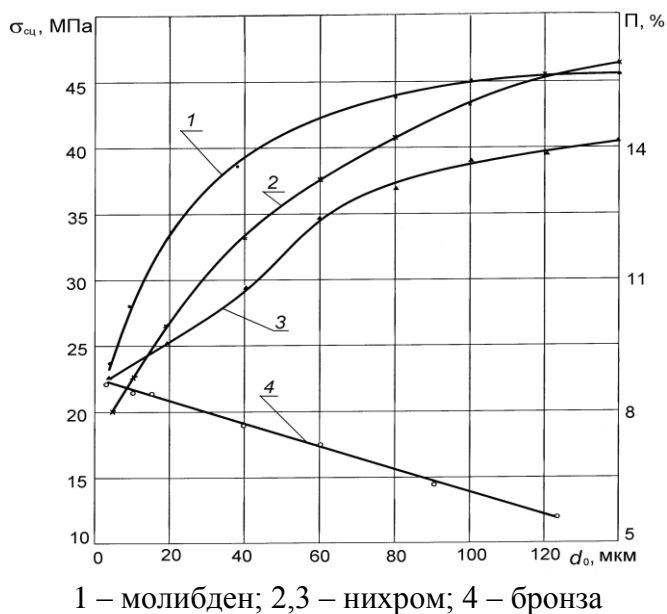


Рисунок 9 – Влияние среднего размера частиц распыленных проволок на прочность сцепления (1,2,4) и пористость (3) покрытий

Исследования характеристик сопротивления усталостному разрушению показали, что покрытия, нанесенные газопламенным распылением проволок вызывают незначительное снижение предела выносливости (10...13 %) по сравнению с покрытиями, полученными вибродуговой наплавкой, снижающими предел выносливости на 35...40 %.

В ходе триботехнических испытаний без смазки установлено (рисунок 10), что у напыленных покрытий стадии установившегося износа периодически сменяются относительно кратковременными стадиями ускоренного изнашивания.

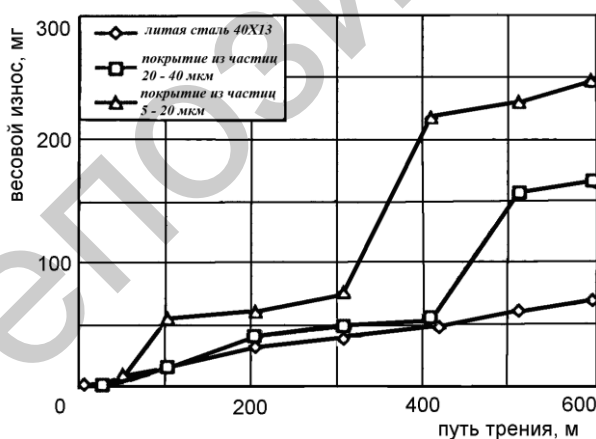


Рисунок 10 – Зависимость весового износа от пути трения напыленных покрытий из стали 40X13 (трение без смазки, давление 1,5 МПа, контртело – закал. сталь 60)

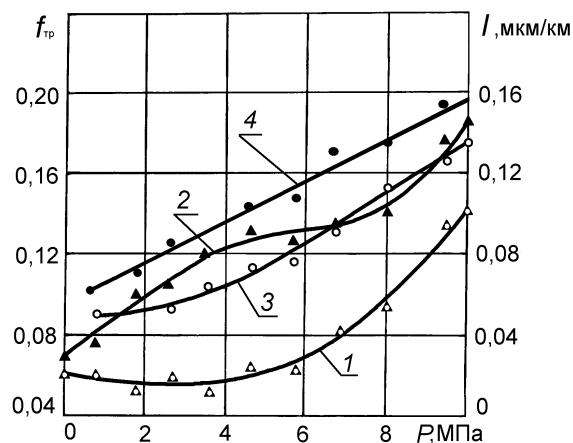


Рисунок 11 – Влияние удельной нагрузки на коэффициент трения (1, 2) и интенсивность изнашивания (3, 4) покрытия (1, 3) и литого сплава (2, 4) из бронзы БрАМЦ10-2

Обнаруженная цикличность весового износа напыленных покрытий, очевидно связана с деградацией их поверхностного слоя при трении, описываемой в рамках представлений физической мезомеханики твердых тел. Поскольку разрушение покрытия облегчено на границе между напыленными частицами, то в слоях с дисперсной структурой (напыленных частицами размером 5 – 20 мкм), отличающихся высокой плотностью граничных поверхностей, интенсивность отслаивания крупных мезофрагментов на стадии ускоренного изнашивания может быть выше, чем в покрытиях с грубой структурой (напыленных частицами размером 20 – 40 мкм).

При трении с жидкой смазкой установлено (рисунок 11), что как интенсивность изнашивания, так и коэффициент трения у образцов с покрытиями были ниже, чем у литого сплава того же состава, причем область нагрузок, в которых происходит нормальное механохимическое изнашивание, у покрытий на 30% больше. Следует отметить также, что при прекращении смазки в первый момент времени покрытия изнашиваются меньше (очевидно, за счет выделения масла из пор), однако в дальнейшем износ монолитного металла значительно меньше.

Использование консистентных смазок, содержащих дисперсные металлические частицы, снижает среднюю температуру поверхностных слоев на 15...20 град. и уменьшает коэффициент трения на 20...25%. С помощью электронномикроскопических исследований зафиксировано выделение смазки из пор покрытий при повышении температуры в зоне трения. Для повышения износо- и задиростойкости газопламенных покрытий, полученных распылением проволочных материалов, разработан способ введения в состав слоя твердосмазочных наполнителей (патент РБ №10447).

Исследован фазовый состав и микротвердость покрытий, полученных распылением проволок из сталей ферритного, аустенитного и мартенситного классов. Установлен эффект образования аномально большого количества остаточного аустенита (до 50 об.%) в покрытиях из сталей мартенситного класса. Исследована возможность распада остаточного аустенита за счет поверхностного деформирования. Установлена связь между методом нагрева проволоки перед распылением, температурой начала мартенситного превращения материала проволоки ТМ и количеством метастабильного аустенита, образующегося в сформированном покрытии (патент РБ №11663).

Исследован процесс повышения физико-механических свойств покрытий, полученных распылением проволок из алюминия и его сплавов путем микродугового оксидирования (патент РФ №2234382). Установлено влияние пористости напыленного покрытия и содержания кислорода на толщину оксидированного слоя (рисунок 12). Установлено, что для формирования на алюминиевых покрытиях оксидированных слоев толщиной 350 – 400 мкм и микротвердостью 12 – 15 ГПа необходимо при напылении обеспечить пористость

покрытий в пределах 8 – 12% при содержании кислорода не более 0,5 – 0,7 об.%.

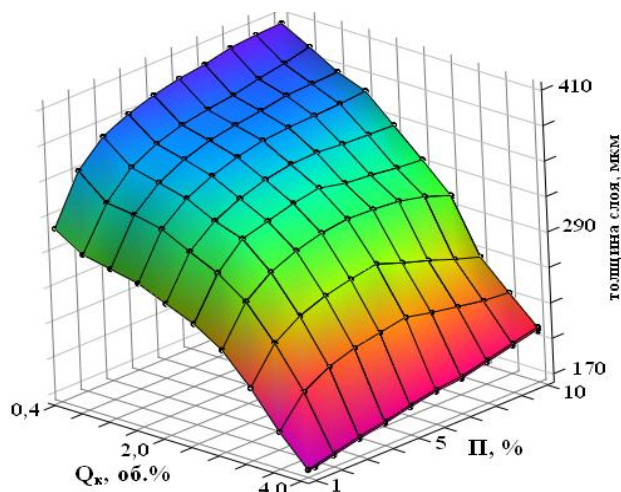


Рисунок 12 – Зависимость толщины слоя Al_2O_3 от пористости и количества кислорода в покрытиях

шим ионно-лучевым азотированием позволяет обеспечить формирование покрытий с поверхностным слоем твердостью от 6500 до 15000 МПа и толщиной от 5 до 40 мкм (патент РБ №9465). Установлено, что для повышения эффективности процесса модифицирования стальных покрытий ионно-лучевым азотированием необходимо использовать покрытия пористостью не более 8 – 11%, предварительно импрегнированные насыщенным водным раствором хлористого аммония (патент РБ №11776), что позволяет обеспечить формирование поверхностных слоев с микротвердостью 6,5 – 15,0 ГПа и толщиной 5 – 40 мкм. Износостойкость покрытий из сталей 40X13 и X18H10T после ионно-лучевого азотирования повышается в 8 раз. Количество окислов в покрытиях не изменяется после ионно-лучевой обработки и благоприятно сказывается на работоспособности покрытий в условиях сухого трения на воздухе.

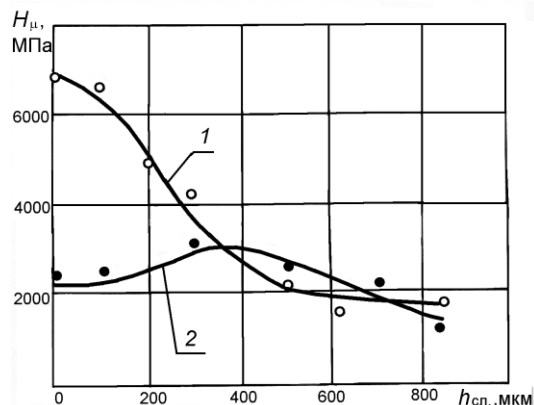
Определено, что в результате химико-термической обработки карбонитрованием стальных покрытий пористостью от 5 до 14% их прочность сцепления увеличивается в 1,5 – 1,7 раза, при этом на покрытиях из сталей мартенситного класса образуются модифицированные поверхностные слои толщиной 100 – 120 мкм и микротвердостью 7,5 – 7,7 ГПа, что обеспечивает повышение износостойкости более, чем в 2,5 раза. Насыщение углеродом и азотом покрытий из низколегированных сталей ферритного класса приводит к образованию диффузионного слоя толщиной до 200 мкм с микротвердостью 6,5 – 7,0 ГПа (рисунок 13), при этом износостойкость повышается в 15 – 20 раз.

Выполнена аналитическая оценка процесса газопламенного распыления полимерных шнуров (экструдатов), при этом использована модель, рассматривающая диспергирование, как поочередное распыление тонких поверхностных слоев. Сформулировано основное требование к модели, заключающееся в том,

Триботехническими испытаниями установлено, что износостойкость оксидированного слоя в два и более раз выше, чем износостойкость высокопрочного чугуна марки ВЧ50-7, закаленного до твердости HRC 50...55.

Показано, что метод активированного газопламенного распыления стальных проволок с последую-

что плавление необходимо осуществлять с непрерывным удалением образующихся слоев расплава с поверхности шнура.



1 – покрытие после карбонитрирования;
2 – исходное состояние покрытия

Рисунок 13 – Распределение микротвердости по глубине модифицированных покрытий из стали Св-08Г2С

То есть струя газа в зоне плавления должна обладать энергией, способной не только расплавлять полимер, но и формировать касательные напряжения, превышающие внутренние силы (вязкость) расплава полимера.



Рисунок 14 – Установка ТЕРКО-ПШ для нанесения покрытий распылением полимерных шнуров (экструдатов)

Было предложено построить схему распыления реализующей нагрев и распыление шнура одной струей газа. Показано, что для исключения процесса деструкции распыляемого полимерного шнура необходимо, чтобы плотность теплового потока струи составляла $(1,0 - 1,5) \cdot 10^4$ Вт/м², а ее скорость была не менее 450 м/с. Разработан способ газопламенного распыления полимерных шнуров (патенты РБ №10711, 12620) и устройство для его реализации (патенты РБ №2996, 7025), использующее камеру микрофакельного сжигания пропано-воздушной смеси (рисунок 14).

Впервые в практике ГПН получены покрытия распылением полимерных шнуров – экструдатов. Экспериментальные исследования позволили установить следующие наиболее рациональные параметры напыления: расход пропана 0,4 – 0,6 м³/ч; давление газов в камере сгорания 0,25 МПа; диаметр распыляемых экструдатов из термопластов – 3мм; скорость подачи экструдатов 0,019 – 0,021 м/с; толщина наносимых покрытий 300 – 400 мкм.

Шестая глава опытно-промышленному апробированию выполненных исследований, разработок и их внедрению в производство. Выполненные исследования позволили разработать технологические процессы и оборудование

для активированного газопламенного напыления износостойких, коррозионно-стойких, антифрикционных покрытий из порошковых и проволочных материалов на быстроизнашивающиеся элементы конструкций и детали транспортных машин, технологического оборудования, сельскохозяйственной техники с повышением срока их службы в 1,4...8 раз.

Разработан и внедрен технологический процесс формирования износостойких покрытий, работающих в условиях абразивного изнашивания (ДЯФ/ТД №02271.00003). Для напыления используется термораспылитель с камерой микрофакельного горения пропано-воздушной смеси (КД ДЯФ 3.028.40). Расход смеси 37,5 м³/ч при давлении 0,4 МПа (соотношение воздуха и пропана 27:1). Используются смеси порошков, позволяющие заменить дорогостоящие самофлюсующиеся композиции типа ПС-12НВК-01. Износостойкость, оцененная по методу Хрущева – Бабичева, превосходит износостойкость покрытий из сплава ПС-12НВК-01 в среднем в 1,25 раза. Себестоимость процесса по сравнению с традиционной технологией ГПН порошков увеличилась на 25 – 30%, а достигаемые свойства покрытий сопоставимы с получаемыми только высокоэнергетическими методами стоимостью более чем в 10 раз выше.

Разработаны и внедрены технологические процессы газопламенного напыления коррозионностойких покрытий из порошков материалов с теплопроводностью менее 10 Вт/м·К (ДЯФ/ТД №02271.00006), а также полимерных покрытий на основе порошков легкоплавких ($T_{пл} = 360...390$ К) термопластичных полимеров (ДЯФ/ТД №02271.00009), при этом прочность сопротивления отрыву покрытий повышена в 1,5...1,7 раза. Разработаны технические средства для напыления антифрикционных полимерных покрытий, повышающих долговечность узлов сухого трения на 40 – 65% (КД ДЯФ 3.026.08) Созданное оборудование для активированного газопламенного напыления проволочных материалов (КД ДЯФ 3.021.01; К01.060) позволило разработать и внедрить технологические процессы восстановления направляющих плоскостей, пальцев, полумуфт, валов с изношенными участками в местах посадки под подшипники и вследствие трения в уплотнениях, подшипников скольжения шкивов, элементов запорной арматуры, посадочных мест в корпусных деталях (ДЯФ/ТД № 02271.00014). При этом достигнуто снижение пористости покрытий до 5 – 7%, увеличение прочности сопротивления покрытий отрыву до 46 МПа.

Используя эффект возникновения в покрытиях аномально большого количества метастабильного аустенита (более 40 об.%) разработан и внедрен технологический процесс восстановления шеек коленчатых валов ДВС активированным газопламенным напылением проволок из стали 40Х13 (ДЯФ/ТД № 02271.00010). Показано, что ресурс восстановленных газопламенным проволочным напылением коленчатых валов двигателей легковых автомобилей до

ремонта составляет, в среднем, 132 тыс. км. Установлено, что себестоимость разработанной технологии в 9...14 раз ниже, чем методов, использующих нанесение порошковых материалов. При этом восстановленные методами порошкового напыления и наплавки шейки валов после приработки изнашивают вкладыши больше, чем восстановленные активированным напылением проволок.

Предложено использовать методы модифицирования газопламенных покрытий в технологиях восстановления – упрочнения деталей узлов трения скольжения, эксплуатирующиеся при повышенных температурах в присутствии агрессивных сред и абразива при скоростях скольжения до 1,5 м/с и удельных нагрузках до 20 МПа.

Оборудование и технологии активированного газопламенного напыления используются на многих предприятиях РБ и РФ различных министерств и ведомств для восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей, для защиты от коррозии элементов конструкций. Организовано 45 участков и постов активированного газопламенного напыления, на которых эксплуатируются 23 установки для нанесения покрытий металлическими и композиционными порошками, 17 установок для активированного ГПН проволочных материалов, 4 установки для напыления полимерных порошков, 1 установка для напыления полимерных шнуров. Суммарный годовой экономический эффект составил около 370 тыс. долларов США.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основании систематизации и анализа возможных путей совершенствования технологии газопламенного напыления порошковых и проволочных материалов обоснован подход к выбору технологических приемов активирования, базирующийся на соответствии добавляемых материальных затрат стоимости упрочняемой или восстанавливаемой детали и достигаемым целям. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность существенной интенсификации динамических параметров двухфазной струи (увеличение скоростей газов до 1500 м/с, частиц – до 400 м/с) и процессов теплообмена в системе «факел – частицы» за счет рациональных вариантов активирования спутными потоками, выявлены закономерности протекания процессов структурообразования в покрытиях как в ходе их формирования при напылении порошковых материалов и распылении проволок, так и при последующем модифицировании методами микродугового оксидирования, ионно-лучевого азотирования и химико-термической обработки, что в совокупности позволило решить важную прикладную проблему повышения эксплуатационных характеристик газопламенных покрытий (адгезии, износостойкости) и

значительно расширить области их использования [1 – 5, 17, 21, 29, 38, 42, 46, 48, 50, 108].

2. Разработаны научные основы методологии определения необходимой величины адгезии напыленных покрытий, базирующиеся на рассмотрении детали с покрытием, как рассчитываемого на надежность элемента динамической системы, заключающиеся в учете динамической нагруженности, определяемой тяговыми, изгибающими или сжимающими усилиями и динамическими нагрузками, носящими случайный характер. На основании выполненных теоретических исследований конкретизированы требования к газопламенным покрытиям триботехнического назначения, наносимым на валы со шкивами и кривошипами, коленчатые валы, шаровые опоры, тонкостенные сферические сочленения, цапфы подшипников скольжения. Показано, что для значительного расширения области использования технологий ГПН необходимо обеспечить методами активирования достижение значений прочности сцепления на отрыв покрытий на валах с кривошипами – не менее 30 МПа, на шейках коленчатых валов средненагруженных ДВС – не менее 35 МПа, на шейках коленчатых валов тяжелонагруженных ДВС – не менее 45 МПа, на длинномерных деталях, покрываемых полимерами и эксплуатирующихся в атмосферных условиях – не менее 10 МПа [9, 38, 41, 44, 47, 68, 75, 106, 126, 144, 156].

3. В результате теоретического анализа активирования процесса газопламенного напыления порошковых материалов независимым источником спутного потока, включающего физическую, математическую модели и численные решения, установлена связь между скоростью движения частиц в осевом сечении газопламенного факела и скоростью спутного потока, и показано, что эффективное активирование процесса напыления порошковых материалов достигается:

- взаимодействием спутного потока с факелом под углом в пределах от 25° до 40° ;

- использованием спутного дополнительного факела, горящего на дистанции 150 – 160 мм, для напыления покрытий порошками материалов с теплопроводностью 2 – 5 Вт/м·град;

- применением спутного потока с температурой 2300 – 2500 К и скоростью 1200 - 1400 м/с, получаемого в камерах микрофакельного горения, для напыления смесей порошков металлов и керамики формируя покрытия пористостью 5 – 7% и прочностью сцепления 40 – 50 МПа. [3, 6 – 8, 12, 13, 16, 23, 25, 29, 37, 46, 49, 51, 61, 62, 66, 69, 72, 73, 78, 84 – 87, 99, 122, 123, 127, 128, 134, 135, 139, 140, 167].

4. Теоретическая оценка процессов теплообмена в газопламенном факеле, необходимом для эффективного напыления порошков термопластичных полимеров с температурой плавления 360 – 550 К, позволила определить величину плотности теплового потока факела в пределах $(1 – 3) \cdot 10^6$ Вт/м², которую

следует учитывать при разработке конструкции полимерных термораспылителей. Установлено, что управление процессами теплообмена в системе «факел – частицы полимера» возможно за счет применения газодинамического эффекта, вызывающего изменение формы и диаметра факела под воздействием внутреннего спутного потока. Выполнена аналитическая оценка процесса газопламенного напыления полимерными шнурами, позволившая установить, что для исключения деструкции полимера необходимо осуществлять расплавление и диспергирование шнура одной струей, имеющей плотность теплового потока $(1,0 - 1,5) \cdot 10^4$ Вт/м² и скорость 450 – 500 м/с. В результате теоретического анализа процесса взаимодействия нагретой до плавления металлической частицы с поверхностью полимера при формировании слоистых покрытий из полимеров и металлов, определены минимальные толщины полимерной подложки для покрытий из цветных металлов (0,4 – 0,8 мм) и сталей (более 1,2 мм). Показано, что комбинирование технологии напыления слоистых покрытий с методом микроплазменной обработки позволяет формировать композиты системы «полимер – металл – оксидокерамика» [3, 16, 23, 25, 37, 39, 43, 46, 49, 51, 53, 63, 65, 66, 69, 77, 79, 80, 88 – 90, 92, 93, 100, 104, 107, 110 – 112, 129, 137, 142, 151, 152, 157, 158, 162, 165, 166].

5. В результате исследования активирующего воздействия акустических колебаний, генерируемых в спутном распыляющем потоке, на процесс газопламенного напыления проволочными материалами установлено, что снижение пористости покрытий из сталей, сплавов на основе алюминия, меди и цинка до 5 – 7% и повышение их адгезии к стальным деталям в 1,4 – 2,0 раза достигается при генерировании колебаний с частотой 24 – 28 кГц, и обеспечивается формированием распыленных частиц размером 5...15 мкм в количестве 85...90%. Показано, что при распылении проволок из металлов и сплавов с температурой плавления большей, чем у сталей (нихром, молибден), акустическое активирование снижает в 1,5 – 1,8 раза прочность сцепления покрытий со сталью, что обусловлено снижением теплосодержания распыленных частиц с уменьшением их размера и, соответственно, сокращением площади областей микросварки. Используя данные о тепловых характеристиках факела (плотности теплового потока), предложена методика аналитического определения скорости подачи проволоки (производительности напыления), независимая от конструктивных особенностей термораспылителя [1 – 3, 10, 17, 30, 34, 36, 42, 70, 74, 83, 89, 98, 115, 138, 146].

6. Экспериментально установлено явление аномально высокого содержания остаточного аустенита (до 50 об.%) в покрытиях, полученных активированным распылением проволок из хромсодержащих сталей мартенситного класса, что обусловлено повышенной концентрацией в покрытиях легирующих элементов (хрома и углерода) за счет полного растворения карбидов хрома при расплавлении проволоки, а также возможностью изотермической вы-

держки при формировании и охлаждении поочередно напыляемых слоев в интервале температур 500 – 670 К. Установлено влияние метода нагрева проволоки перед распылением и температуры начала мартенситного превращения материала проволоки на количество метастабильного аустенита, образующегося в сформированном покрытии. Показана возможность распада остаточного аустенита за счет поверхностного деформирования в процессе трения, сопровождающаяся повышением твердости от 300 до 800 HV. В ходе триботехнических испытаний установлен циклический характер изнашивания напыленных покрытий, обусловленный деградацией поверхностного слоя покрытий при трении, описываемой в рамках представлений физической мезомеханики твердых тел [1 – 3, 11, 20 – 22, 24, 27, 35, 36, 48, 58, 59, 81, 103, 105, 115, 143, 154, 159].

7. В результате экспериментальных исследований влияния модифицирующего воздействия микроплазменной обработки, ионно-лучевого азотирования, карбонитрирования на физико-механические свойства газопламенных покрытий установлен эффект интенсификации механизма насыщения покрытий по сравнению с компактными материалами (ускорение процессов в 1,16 – 1,35 раз), обусловленный высоким уровнем дефектности и структурными особенностями покрытий. Установлено, что для формирования на алюминиевых покрытиях оксидированных слоев толщиной 350 – 400 мкм и микротвердостью 12 – 15 ГПа необходимо при напылении обеспечить пористость покрытий в пределах 8 – 12% при содержании кислорода не более 0,5 – 0,7 об.%. Показано, что для повышения эффективности процесса модифицирования стальных покрытий ионно-лучевым азотированием необходимо использовать покрытия пористостью не более 8 – 11 %, предварительно импрегнированные насыщенным водным раствором хлористого аммония, что позволяет получить поверхностные слои толщиной 5 – 40 мкм с микротвердостью 6,5 – 15,0 ГПа. При этом износостойкость газопламенных покрытий из сталей мартенситного и аустенитного классов после ионно-лучевого азотирования повышается в 7 – 9 раз. Установлено влияние химико-термической обработки карбонитрированием на прочность сцепления стальных покрытий и показано, что увеличение прочности сцепления в 1,5 – 1,7 раза достигается обработкой покрытий с пористостью в пределах от 5 до 14%, при этом образуются модифицированные поверхностные слои толщиной 100 – 200 мкм и микротвердостью 6,5 – 7,7 ГПа, что обеспечивает повышение износостойкости в 12 – 20 раз [1, 4, 5, 28, 31, 33, 40, 45, 52, 55, 56, 67, 82, 94 – 96, 102, 113, 114, 116, 119, 121, 130, 147, 154, 160, 161, 164, 167].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработано оборудование для активированного газопламенного

напыления металлических, полимерных, композиционных, слоистых покрытий из порошковых и проволочных материалов – установки УПТР-1-90, УУТР, ТЕРКО-1, ТЕРКО-2, ТЕРКО-П, ТЕРКО-ПУ, оснащенные термораспылителями для высокоскоростного напыления порошков (КД ДЯФ 3.028.40), для нанесения покрытий из порошков материалов с теплопроводностью 2 – 5 Вт/м·град (КД ДЯФ 3.022.10), для нанесения покрытий порошками термопластичных полимеров с диапазоном температур плавления от 360 до 570 К (КД ДЯФ 3.026.08), для нанесения покрытий распылением полимерных шнуров ТЕРКО-ПШ, с акустическим активатором процесса распыления проволок (КД ДЯФ 3.021.01 и КД К01.060). На предприятиях Беларуси, России, Украины, Вьетнама организовано 45 постов и участков активированного газопламенного напыления. Оборудование для активированного газопламенного напыления неоднократно экспонировалось на международных выставках, в том числе в Ханое, Каире, Будапеште, Сеуле, Томске и получено 5 дипломов [54, 60, 62, 65, 73, 83, 85, 91, 122, 123, 132, 133, 136, 141, 148-150, 163].

2. Разработано и внедрено с суммарным годовым экономическим эффектом около 370 тыс. долларов США 12 технологических процессов восстановления – упрочнения и защиты быстроизнашивающихся деталей технологического оборудования, транспортных средств и элементов конструкций, в том числе:

- технологические процессы (ТД №02271.00002, ТД №02271.00013) газопламенного напыления антифрикционных покрытий порошками и проволоками из сплавов на основе меди, никеля, алюминия, железа, обеспечивающие высокую прочность сцепления (37 – 50 МПа) и повышенную в 1,3 – 2,0 раза износостойкость по сравнению с литыми материалами при изготовлении и восстановлении направляющих выдвигных устройств перископов, задвижек запорной арматуры, направляющих прецизионных станков, подшипников скольжения и втулок поворотных устройств, вкладышей моторно-осевых подшипников индивидуальных приводов колес тягового подвижного состава, грандбукс погружных насосов в Брестском и Волковыском локомотивных депо, Минском опытно-экспериментальном литейно-механическом заводе, Минском авиаремонтном предприятии, Могилевском ОАО «Химволокно», предприятиях судоремонта РФ в Кронштадте, Калининграде, Мурманске и др.;

- технологические процессы газопламенного напыления проволочных материалов (ТД №02271.00014 и №02271.00015), обеспечивающие пористость наносимых покрытий 5 – 7%, прочность сцепления на отрыв до 44 – 49 МПа, что позволило повысить срок службы деталей в 1,6 – 8 раз при восстановлении пальцев, полумуфт, валов масляных насосов, вентиляторов, водяных насосов, электродвигателей с изношенными участками вследствие трения в сальнико-

вых уплотнениях и в местах посадки подшипников на организованных участках и постах восстановительного ремонта в локомотивных депо г. Барановичей, г. Жлобина, г. Гомеля, г. Орши, г. Могилева, ЦПБО нефтепровода «Дружба», ОАО «Нафтан» и др.;

- технологический процесс (ТД №02271.00010) восстановления шеек приводных валов прессов и коленчатых валов ДВС, использующий эффект образования аномально большого количества метастабильного аустенита при напылении покрытий из сталей мартенситного класса, что позволило увеличить в 1,6 раза срок службы приводных валов торфобрикетных прессов на торфопредприятии «Красное знамя» и повысить пробег, в среднем, на 132 тыс. км. коленчатых валов, восстанавливаемых на ГП «Криница» (Минская обл.) и др.;

- технологический процесс (ТД №02271.00003) формирования из смесей порошков металлов, карбидов и оксидов износостойких покрытий, работающих в условиях абразивного изнашивания, использующий термораспылитель с источником высокоскоростного спутного потока, обеспечивающий себестоимость процесса в 10 – 13 раз ниже, чем зарубежное оборудование высокоскоростного напыления, что позволило применить процесс при изготовлении специального абразивного инструмента для ОАО «Беларусьрезинотехника»;

- технологический процесс (ДЯФ/ТД №02271.00009) газопламенного нанесения порошками полимеров отечественного производства антифрикционных покрытий для узлов сухого трения, позволивший повысить в 1,4 – 1,6 раза долговечность сферических сочленений модульных сельскохозяйственных комплексов, выпускаемых ПО «Гомсельмаш»;

- технологический процесс (ТД 02271.00018) нанесения защитных покрытий из порошков термопластов с прочностью сцепления на отрыв 10,2 – 11,3 МПа на рабочую поверхность стальных емкостей для аккумуляторных батарей и электрохимической обработки, на закладные детали строительно-монтажных конструкций, элементы трубопроводного транспорта, внедренный на РУП «МЗАЛ им. П.М. Машерова», локомотивном депо г. Лида, Дзержинском экспериментально-механическом заводе [3, 14 – 19, 26, 30, 32, 57, 64, 71, 76, 83, 97, 98, 117, 124, 151].

3. Определены направления перспективного использования результатов исследований, включающие разработку технологических процессов формирования газопламенных покрытий из полимерных шнуров с наноразмерными наполнителями [4, 5, 101, 109, 118, 121, 131]; разработку процесса газопламенного напыления композиционными проволоками, содержащих порошковый хромсодержащий наполнитель, для замены технологии гальванического хромирования; разработку технологических процессов газопламенного напыления самоупрочняющихся в процессе эксплуатации в узлах трения покрытий путем

управляемого использования деформационных фазово-структурных превращений и метастабильных состояний [58, 120, 153].

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монографии

1. Витязь, П.А. Упрочнение газотермических покрытий / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский. – Мн.: Бестпринт. – 2004 г. – 192 с.
2. Ярошевич, В.К. Коленчатые валы автомобильных двигателей / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский, Е.Л. Савич. – Мн.: БНТУ. – 2004. – 176 с.
3. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Мн.: Технопринт. – 2004. – 200 с.
4. Vityaz, P.A. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In in Lubricants with Nano-Sized Diamonds / P.A. Vityaz, V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovsky. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2010. - 120 p.
5. Zhornik, V.I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovsky // Advances in Mechanics Research. Volume 1 / Editors: Jeremy M. Campbell. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. – P. 1–78.

Статьи в научных журналах

6. Подготовка поверхностей деталей под газотермические покрытия методом иглофрезерования / Н.Н. Дорожкин, А.Л. Абугов, М.А. Белоцерковский, В.Т. Сахнович // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1990. – №1. – С.44–46.
7. Белоцерковский, М.А. Повышение качества газопламенных покрытий из порошковых материалов / М.А. Белоцерковский, В.Т. Сахнович // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1991. – № 2. – С. 33–36.
8. Белоцерковский, М.А. Активация процесса газопламенного напыления воздушными струями / М.А. Белоцерковский, В.Т. Сахнович В.Т. // Сварочное производство. – 1992. – №3. – С.7–8.
9. Белоцерковский, М.А. Расчетная оценка возможностей термораспылительных методов восстановления деталей / М. А. Белоцерковский // Материалы. Технологии. Инструменты. – 1997. – № 3. – С. 22–25.
10. Белоцерковский, М.А. Разработка экономичного и высокоэффективного оборудования для газопламенного напыления / М.А. Белоцерковский // Наука производству. – 1999. – №6 (19). – С. 14–16.
11. Белоцерковский, М.А. Триботехнические характеристики газопламенных покрытий / М.А. Белоцерковский // Трение и износ. – 2000, т.21, №5. – С. 534–539.
12. Белоцерковский, М.А. Исследование процесса индукционного оплавления напыленных покрытий / М.А. Белоцерковский // Деп. в ВИНТИ

19.04.2000, №1069-B2000. Весці НАН Б сер. фіз.-тэхн. навук, 2000. – №4. С.141.

13. Белоцерковский М.А. Определение необходимой температуры частиц при формировании покрытий высокоскоростным напылением / М.А. Белоцерковский // Деп. в ВИНТИ 26.07.2000, №2071-B2000. Весці НАН Б сер. фіз.-тэхн. навук, 2000. – №4. – С.142.

14. Ярошевич, В.К., Триботехнические характеристики покрытий, используемых для восстановления шеек коленчатых валов / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский, Дж. Ахмад // Весці НАН Б. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2001. – №3. – С.34–36.

15. Ярошевич, В.К. Повышение долговечности коленчатых валов двигателей / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский, Е.Л. Савич // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – №2 (12). – С. 9–14.

16. Белоцерковский, М.А. Новое оборудование для газопламенного напыления полимерных покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Федаравичус // Сварщик. – 2001. – №5. – С. 14–15.

17. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное распыление проволочных материалов / М.А. Белоцерковский // Весці НАН Б. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – №1. – С.11–15.

18. Ярошевич, В.К. Восстановление шеек коленчатых валов ДВС активированным газопламенным напылением / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – №8. – С.12–17.

19. Исследование усталости коленчатых валов, восстановленных нанесением покрытий / В. К. Ярошевич, Н. С. Янкевич, М. А. Белоцерковский, Е. Л. Савич // Вестник Белорус. госуд. политехн. академии. – 2002. – № 1. – С. 47–49.

20. Влияние структуры и свойств покрытия и основы на поведение композиции «сталь 40X13 – малоуглеродистая сталь» в условиях деформации сжатием / П.А. Витязь, В.А. Клименов, С.В. Панин, О.Н. Нехорошков, М.А. Белоцерковский, Ж.Г. Ковалевская, В.А. Кукареко // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 37–49.

21. Белоцерковский, М.А. Технологии и оборудование для газопламенного напыления покрытий из проволочных материалов / М.А. Белоцерковский // Физическая мезомеханика. – 2002 г. – Т.5, №1. – С. 97–98.

22. Структура и свойства покрытий из стали 40X13, 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.

23. Белоцерковский, М.А. Использование эффекта газодинамической активации факела при разработке конструкции полимерного термораспылителя / М. А. Белоцерковский, И.Л. Пунтус, А.В. Федаравичус. – Деп. в ВИНТИ 05.02.2002, № 228-B2002 // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 3. – С. 121.

24. Влияние состава распыляющей среды на структуру и свойства газотермических проволочных покрытий / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко,

- П.Г. Сухоцкий, Д.М. Калиновский // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 4. – С. 18–23.
25. Белоцерковский, М. А. Разработка технических средств для газопламенного напыления полимерных покрытий / М. А. Белоцерковский, А. В. Федаравичус // Машиностроитель. – 2002. – № 12. – С. 13–15.
26. Невзорова, А. Б. Комплексное восстановление деталей подшипниковых узлов / А. Б. Невзорова, М. А. Белоцерковский, В. В. Невзоров // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2003. – № 4. – С.32–35.
27. Басинюк, В. Л. Разработка технологии и применение многослойных комбинированных покрытий на основе оксидокерамики / В.Л. Басинюк, М.А. Белоцерковский // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 2. – С. 203–209.
28. Структура и износостойкость карбонитрированных газотермических покрытий из проволочных сталей / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский, В. А. Кукареко, А. Ш. Хаитов // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 5. – С. 517–522.
29. Белоцерковский, М.А. Рациональное активирование процессов газопламенного напыления / М. А. Белоцерковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – 2003. – № 4. – С. 105–109.
30. Белоцерковский, М.А. Восстановление деталей методом активированного газопламенного напыления / М.А. Белоцерковский // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 2. – С. 38–41.
31. Повышение качества газотермических покрытий из проволочных материалов методами химико-термической обработки / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 6. – С. 666–672.
32. Разработка технологии и оборудования для нанесения полимерного покрытия на поверхность шарнирных сферических сочленений зерноуборочных комплексов / В.А. Шуринов, А.В. Голопятин, М.А. Белоцерковский, М.А. Леванцевич // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 72–76.
33. Белоцерковский, М.А. Получение износостойких покрытий активированным газотермическим напылением с последующим модифицированием / М.А. Белоцерковский, Р.О. Азизов, В.А. Кукареко // Вопросы материаловедения. – 2004. – №2 (38). – С. 77–87.
34. Белоцерковский, М. А. Расчетно-экспериментальная оценка производительности процессов активированного газопламенного напыления покрытий / М.А. Белоцерковский // Вестник БГТУ, 2004. – № 4(28). – С. 19–23.
35. Исследование особенностей развития деформации на мезоуровне и разрушения композиций с напыленными покрытиями при трехточечном изгибе / С.В. Панин, М.А. Белоцерковский, М.П. Сейфуллина, Ю.И. Почивалов, Б.Б. Овечкин // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 2. – С. 91–104.
36. Белоцерковский, М.А. Оборудование для активированного газопламенного напыления защитных износостойких покрытий / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 45–48.
37. Белоцерковский, М. А. Исследование возможности нанесения композиционных полимерных покрытий термораспылением экструдатов / М.

- А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Вестник Полоцкого государственного университета. Прикладные науки. – 2005. – № 6. – С. 79–83.
38. Витязь, П.А. / Методология выбора технологии нанесения покрытий при восстановлении, упрочнении и защите деталей / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, А.М. Гоман // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. – № 4. – С. 5–12.
39. Влияние напыленных полимерных покрытий на затухание колебаний / М.А. Леванцевич, М.А. Белоцерковский, В.М. Рудько, В.А. Леванцевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: Прикладные науки. Промышленность. – 2005. – № 12. – С. 77–79.
40. Kompozytowe powloki natryskiwane cieplnie modyfikowane metoda azotowania jarzeniowego / A. Patejuk, M. Bielocerkowski, A. Bielyj, V. Kukareko // Aparatura Badawcza i Dydaktyczna. – 2006. – Т. XI, № 3. – S. 207–222.
41. Белоцерковский, М. А. Аналитическая оценка необходимой величины адгезии полимерных покрытий, нанесенных на трубы / М.А. Белоцерковский, А.М. Гоман // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2006. – № 4. – С. 81–86.
42. Белоцерковский, М. А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12. – С. 17–23.
43. Упругодиссипативные характеристики газопламенных покрытий / В.М. Рудько, В. К. Шелег, М.А. Белоцерковский, М.А. Леванцевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – № 12. – С. 71–76.
44. Белоцерковский, М.А. Прочностная надежность и триботехнические свойства газотермических покрытий, используемых в узлах трения / М.А. Белоцерковский // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т.10, №2. – С.103–108.
45. Patejuk, A. Wlasciwosci stopu tytanu Ti-6Al-3Mo-2Cr ksztaltowane struktura geometryczna i stamen warstwy powierzchniowej / A. Patejuk, A. Biely, M. Bielocerkowski // Przegląd Mechaniczny. – 2007. – № 9. – S. 129–131.
46. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное напыление покрытий порошками полимеров / М. А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 6. – С. 19–23.
47. Белоцерковский, М.А. Учет эксплуатационных нагрузок при выборе метода упрочнения-восстановления быстроизнашивающихся деталей / М. А. Белоцерковский, А. М. Гоман // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 1(2). – С. 74–77.
48. Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №10. – С. 39–44.
49. Анализ теплофизических процессов при газопламенном формировании полимерных покрытий / П.А. Витязь, В.И. Жорник, М.А. Белоцерковский, Р.О. Азизов, М.Х. Саидов // Вестник ПГУ, Сер. С: Фундаментальные науки. – 2008. – № 3. – С. 73–80.

50. Белоцерковский, М.А. Технологии формирования слоистых покрытий из разнородных материалов / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – №3. – С.49–53.

51. Белоцерковский, М.А. Технологические параметры газопламенного напыления покрытий термопластичными полимерами / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев, В.А. Кукареко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2009. – №3. – С. 69–74.

52. Byeli, A. Microstructure and wear resistant of thermal sprayed steel coatings ion beam implanted with nitrogen / A. Byeli, M. Belotserkovsky, V. Kukareko // Wear. – 2009. – N 267. – P. 1757–1761.

53. Белоцерковский, М.А. Нанесение покрытий высокоскоростным газопламенным распылением полимерных шнуров / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – №8. – С. 16–22.

54. Белоцерковский, М.А. Газопламенное напыление антифрикционных полимерных покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев // Промышленная окраска. – 2009. – №6. – С. 34–40.

55. Steel Thermal Sprayed Coatings: Superficial Hardening by Nitrogen Ion Implantation / M. Belotserkovsky, A. Yelistratov, A. Byeli, V. Kukareko // Welding Journal. – 2009. – Vol. 88, № 12. – P. 243–248.

56. Белоцерковский, М.А. Трибологическое модифицирование металлических покрытий в процессе приработки и эксплуатации в узлах трения / М.А. Белоцерковский, В.И. Жорник, В.А. Кукареко, А.И. Камко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №5. – С. 34–38.

57. Белоцерковский, М.А. Повышение долговечности узлов трения скольжения сельскохозяйственных машин газопламенным напылением полимерных покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев, А.И. Камко // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – №12. – С. 2–7.

58. 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. 489–499.

59. Ways of Improving the Tribological Properties of Steel GasFlame 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. – P. 395–403.

Статьи в научных сборниках

60. Белоцерковский, М.А. Разработка процессов термоструйного нанесения упрочняющих покрытий / М.А. Белоцерковский // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: сб. наук. пр. КІСМ. – Кіровоград, 1997. Вип. 26. – С. 181–185.

61. Белоцерковский, М. А. Восстановление деталей машин активированным газопламенным напылением / М. А. Белоцерковский, А. Е. Черепко // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. – Кіровоград: КДТУ, 1999. Вип. 28. – С. 278–281.

62. Белоцерковский, М.А. Газопламенное напыление материалов с низкой теплопроводностью комбинированным факелом / М.А. Белоцерковский, В.Н. Лопата // Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БГНПК ПМ, 2001. – № 4. – С. 88–91.

63. Белоцерковский, М. А. Повышение адгезии защитных покрытий из вторичных полимеров / М. А. Белоцерковский, А. В. Федаравичус // Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БГНПК ПМ, 2001. – № 4. – С. 94–97.

64. Ярошевич, В.К. Сопротивление усталости восстановленных коленчатых валов / В.К. Ярошевич, Н.С. Янкевич, М.А. Белоцерковский // Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БГНПК ПМ, 2001. - №4. – С.97–99.

65. 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.

66. Белоцерковский, М.А. Теоретический анализ процесса формирования металлополимерных систем активированным напылением / М.А. Белоцерковский, А.В. Федаравичус // Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БГНПК ПМ, 2002. – № 5. – С. 84–86.

67. Структура и фазовый состав модифицированных азотом газотермических покрытий из стали 40X13 / А. В. Белый, Э. Г. Биленко, М. А. Белоцерковский, В. А. Кукареко // Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БГНПК ПМ, 2002. – № 5. – С.93–95.

68. Белоцерковский, М.А. Расчет величины прочности сцепления антифрикционных покрытий с поверхностью шарнирных сферических сочленений / М. А. Белоцерковский, А. В. Голопятин, А. М. Гоман // Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БГНПК ПМ, 2004. – № 6. – С. 62–64.

69. Белоцерковский, М.А. Исследование процесса нанесения защитных покрытий, получаемых газотермическим распылением полимерных экстрактов / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БГНПК ПМ, 2005. – № 7. – С. 77–80.

70. Белоцерковский, М.А. Ультразвуковая активация процесса газопламенного распыления проволок / М.А. Белоцерковский, А.И. Шевцов / Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БГНПО ПМ, 2008. – № 10. – С. 69–73.

71. Белоцерковский, М.А. Использование технологии газопламенного напыления покрытий модифицированным полиамидом при изготовлении корпусных опор почвообрабатывающих агрегатов / М.А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КДТУ, 2009. – Вип. 39. – С. 111–114.

72. Витязь, П.А. Теоретические предпосылки активирования процесса газопламенного напыления спутными потоками / П. А. Витязь, М. А. Белоцер-

ковский // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. – Минск: Беларус. навука, 2010. – Вып. 33. – С. 232–241.

Статьи в других научных изданиях

73. Белоцерковский, М.А. Совершенствование оборудования и технологии газопламенного напыления / М.А. Белоцерковский // Применение процессов газотермического напыления и лазерной обработки материалов: сб. научн. тр. ВНТО им. А.Н. Крылова – Н. Новгород, 1990. Вып. 4. – С. 11–12.

74. Белоцерковский, М.А. Оценка тепловых параметров и производительности проволочного термораспылителя / М.А. Белоцерковский, В.А. Долонговский // Физика и технология тонкопленочных материалов: сб. научн. тр. БелГУТ. – Гомель, 1996. Вып.3 – С. 82–89.

75. Долонговский, В. А. Расчет на прочность шеек коленчатых валов, восстановленных газотермическим напылением / В. А. Долонговский, М. А. Белоцерковский, А. М. Гоман // Физика и технология тонкопленочных материалов: сб. науч. тр. БелГУТ. – Гомель, 1996. – Вып. 3. – С. 104–116.

76. Belotserkovsky, M. Fundamental sciences in Belarusian conversion-related technologies / M. Belotserkovsky // Conversion of R&D Personnel in Belarus. – Minsk, ENU. – 1997. – P.15–19.

77. Басинюк, В.Л. Новые композиционные материалы и покрытия для трущихся сопряжений вибромашин / В.Л. Басинюк, М.А. Белоцерковский, Г.В. Макаревич // Обработка дисперсных материалов и сред: сб. научн. тр. – Одесса: НПО «Вотум», 2000. Вып. 10. – С. 43–46.

78. Белоцерковский, М.А. Оценка необходимого уровня термической активации частиц при высокоскоростном напылении / М. А. Белоцерковский // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: темат. сб. / Акад. наук Беларуси, Новоп. гос. ун-т. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – С. 167–168.

79. Белоцерковский, М.А. Нанесение полимерных композиционных покрытий и керамических покрытий на полимеры с использованием газопламенного напыления / М. А. Белоцерковский, А. В. Федаравичус // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: сб. науч. тр.: в 2 т. – Донецк, 1999. – Т. 2. – С.77–79.

80. Белоцерковский, М.А. Разработка рекомендаций по газопламенному напылению покрытий из вторичных полимеров / М. А. Белоцерковский, А. В. Федаравичус // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. трудов / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. –Мн.: Технопринт, ПГУ. – 2001 г. – С.255–258.

81. Белоцерковский, М.А. Повышение качества газопламенных покрытий методами рационального активирования / М. А. Белоцерковский // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. науч. тр. – Донецк, 2002. – С.47–52.

82. Белоцерковский, М.А. Активация газопламенных покрытий термообработкой и модифицированием / М. А. Белоцерковский, В. А. Кукареко //

Машиностроение и техносфера XXI века: сб. науч. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – С. 67–71.

Материалы конференций

83. Белоцерковский, М.А. Активированное напыление покрытий комплексом «ТЕРКО» / М. А. Белоцерковский, В. Э. Барановский // Газотермическое напыление в промышленности-93: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., – С.-Петербург, 20-22 апр. 1993 г. – С.-Петербург, 1993. – С. 74–77.

84. Белоцерковский, М.А. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков / М. А. Белоцерковский, А. С. Прядко, А. Е. Черепко // Физика плазмы и плазменные технологии (ФППТ-2): материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15-19 сент. 1997 г.: в 4 т. / редкол.: В. С. Бураков (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 1997. – Т.4. – С. 670–673.

85. Белоцерковский, М.А. Новое оборудование для высокоскоростной газопламенной обработки / М.А. Белоцерковский, А.Е. Черепко // Прогрессивные технологии машиностроения и современность: материалы междунар. конф.. – Донецк – Севастополь, 9-12 сент.1997. – Донецк, 1997. – С.75–76.

86. Белоцерковский, М.А. Новые технологии активированного нанесения покрытий и абразивной обработки / М. А. Белоцерковский, А. Е. Черепко // Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике: тр. X науч.-техн. конф. проф.-преподав. состава, аспирантов и студентов, Брест, 10, 31 марта -1 апр. 1998 г.: в 2 т. / Брест. политех. ин-т., электромех. фак; ред.-изд. совет Н. В. Кудинов (пред.) [и др.]. – Брест, 1998. – Т. 1. – С. 23–26.

87. Белоцерковский, М.А. Варианты рационального активирования процесса газопламенного напыления / М. А. Белоцерковский // Пленки и покрытия-2001: материалы 6 Междунар. конф., С.-Петербург, 3-5 апр. 2001 г. – С.-Петербург: СПбГТУ, 2001. – С. 103–108.

88. Белоцерковский, М.А. Основные закономерности изменения тепловых параметров факела при напылении полимеров / М.А. Белоцерковский, А.В. Федаравичус // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25-26 окт. 2001 г. / Могилев. обл. исполн. ком; Нац. акад. наук Беларуси, Могилев. гос. техн. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев: МГТУ, 2001. – С. 86–87.

89. 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: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25-26 окт. 2001 г. – Могилев: МГТУ, 2001. – С. 84–85.

90. Белоцерковский, М.А. Технические средства для газопламенного напыления покрытий на основе полимеров / М. А. Белоцерковский, А. В. Федаравичус // Надежность машин и технических систем: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т., Минск, 16-17 окт. 2001 г.; под общей ред. О. В. Берестнева. – Минск: ИНДМАШ НАН Беларуси, 2001. – Т. 2. – С.118–119.

91. Белоцерковский, М.А. Новые технические средства для высокоскоростного газотермического напыления покрытий / М. А. Белоцерковский, А. С. Прядко, А. Е. Черепко // Надежность машин и технических систем: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16-17 окт. 2001 г.: в 2 ч. / под общ. ред. О. В. Берестнева. – Минск: ИНДМАШ НАН Беларуси, 2001. – Ч. 2. – С. 143–144.

92. Белоцерковский, М.А. Анализ теплонагруженности полимерной подложки при напылении металлических покрытий / М. А. Белоцерковский, А. В. Федаравичус // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: материалы докл. 5 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18-19 сент. 2002 г. – Мн.: Топник. – 2002. – С. 194–195.

93. Белоцерковский, М.А. Технологические особенности создания опор скольжения и виброизолирующих элементов на основе комбинированных металлополимерных систем / М. А. Белоцерковский, А. В. Федаравичус, В. Л. Басинюк // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления: сб. тр. Первой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11-13 дек. 2002 г.: в 7 т. / Белорусский нац. техн. ун-т; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: УП Технопринт, 2002. – Т. 2, вып. 1. – С. 233–237.

94. Surface engineering of gas flame coatings / P. A. Vitiaz, M. A. Belotserkovskii, A. V. Byel, V. A. Kukareko // Book of Abstracts of the Inter. Workshop “MESO-2003” and VII Inter. Conf. “CADAMAT- 2003”. – Tomsk: ISPMS, 2003. – P. 99–100.

95. Mesomechanical analysis of fracture of gas-thermal coatings at friction / Z. G. Kovalevskaya, V. A. Klimenov, O.N. Nekhoroshkov, M. A. Belotserkovskii // Book of Abstracts of the Inter. Workshop “MESO-2003” and VII Inter. Conf. “CADAMAT- 2003”. – Tomsk: ISPMS, 2003. – P. 108–109.

96. Белоцерковский, М.А. Модифицированные газотермические покрытия – перспективный материал для узлов трения космических аппаратов / М. А. Белоцерковский, В. А. Кукареко, А. В. Колубаев // Первый Белорусский космический конгресс: материалы конгресса, Минск, 28-30 окт. 2003 г. – Минск: ОИПИ НАН Б, 2003. – С. 58–61.

97. Ярошевич, В.К. Технологические аспекты напыления коленчатых валов автомобильных двигателей / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский // Математические модели физических процессов: сб. докладов 10-й междунар. науч.-техн. конф., Таганрог, 29-30 июня 2003 г. – Таганрог: ТГПИ, 2004. – С. 71–73.

98. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления покрытий различного назначения / М. А. Белоцерковский // Технологии XXI века: сб. статей по материалам 11 Междунар. науч.-метод. конф., Алушта, 8-11 сент. 2004 г. – Сумы: СНАУ, 2004. – С. 57–60.

99. Голопятин, А.В. Повышение ресурса многофункциональных сферических сочленений кормоуборочных комбайнов / А.В. Голопятин, М.А. Белоцерковский // Ресурсосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве: сб. статей МНТК в 2 т. / ИМСХ; под общ. Ред. В.Н. Дашкова. –

Минск, 19-21 октября 2004 г. – Мн.: РУНИП «ИМСХ НАН Беларуси». 2004. Т.1. – С. 116–120.

100. Белоцерковский, М.А. Анализ процесса нанесения покрытий газопламенным распылением полимерных проволок / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Севостополь, 9-13 сент. 2005 г.: в 2 т. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Т. 1. – С. 56–60.

101. Белоцерковский, М.А. Защита сварочных швов трубопроводов газопламенным напылением полимерных покрытий с наноразмерными наполнителями / М. А. Белоцерковский, В. И. Жорник // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. материалов V Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 7-9 июня 2006 г. / Полоцкий гос. ун-т. – Новополоцк: УО ПГУ, 2006. – С. 87–88.

102. Improvement on utilitarian properties of thermal sprayed coatings modified by method of plasma nitriding / A. Patejuk, M. Bielocerkowski, V. Kukareko, A. Bielyj // Energy and environmental aspects of tribology: 7th International Symposium “INSYCONT-06”, Cracow, Poland, 14th-16th sep., 2006. – Cracow, Poland, 2006. – P. 259–269.

103. Belotserkovsky, M. Development of effective complex spray coating technology and equipment / M. Belotserkovsky // Book of Reports of the Korea – Eurasia Technology Cooperation Workshop, Kiev, Ukraine, November, 7 th. – Kiev, 2006. – P. 117–131.

104. Белоцерковский, М.А. Оптимизация параметров факела для термораспыления полимерных экструдатов / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев // Энерго-и материалосберегающие экологически чистые технологии: сб. материалов VI Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 1-2 нояб. 2005 г.: в 2 ч. / редкол. А.И. Свириденко [и др.]. Гродненский гос. ун-т. – Гродно: ГрГУ, 2006. – Ч. 2. – С. 209–214.

105. Белоцерковский, М.А. Управление процессами структурообразования в стальных покрытиях при активированном напылении / М. А. Белоцерковский // Порошковая металлургия в автотракторном машиностроении. Сварка и резка материалов. Материалы, технологии и оборудование для нанесения функциональных, защитных покрытий: сб. докладов междунар. науч.-техн. симпоз. и конф., Минск, 28-30 марта 2007 г. / Ин-т порошковой металлургии. – Минск: ИПМ, 2007. – С. 155–165.

106. Белоцерковский, М.А. Оценка надежности деталей с газотермическими покрытиями и безопасности их эксплуатации / М.А. Белоцерковский // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы IV МНПК / Под общ. ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2007. – С. 50–51.

107. Белоцерковский, М.А. Газопламенные полимерные покрытия / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев, Ю. С. Коробов // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 9 Междунар. науч.-техн. конф., С.-Петербург, 10-13 апр. 2007 г. – С.-Петербург, 2007. – С. 26–33.

108. Belotserkovsky, M. Development of up-to-date coating and hardening technologies in Belarus // Book of Reports of the Korea – Eurasia Technology Co-

operation Workshop, Korea, November, 15 th . – Ingchon: KITECH, 2007. – P. 262–281.

109. Газопламенное формирование покрытий из полимерных материалов, модифицированных наноразмерными наполнителями / П. А. Витязь, А. В. Чекулаев, М. А. Белоцерковский, В. И. Жорник, С. В. Панин // Наноструктурные материалы (НАНО-2008): материалы Первой междунар. науч. конф., Минск, 22-25 апр. 2008 г. / редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. наука, 2008. – С. 306–307.

110. Korobov, Yu. Modeling of Flame Spraying of Polymer Wire with Nanofillers / Yu. Korobov, M. Belotzerovski, A. Chekulaev // Mathematical modeling and computer simulation of material technologies / Int. Conf. MMT-2008, Israel, sept. 08-12, 2008. – Israel, 2008. – P. 2-65–2-71.

111. Белоцерковский, М.А. Вопросы процесса газопламенного распыления полимерных экструдатов / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Сварка и родственные технологии: материалы докл. 8 Междунар. симпозиума, Минск, 26 марта 2008г. / Ред. кол. А.Ф. Ильющенко и др – Мн.: ГНПО ПМ, 2008. – С. 104–108.

112. Структурные превращения в поверхностных слоях газотермических покрытий при трении в среде смазочного материала, модифицированного алмазно-графитовой шихтой // М. А. Белоцерковский, В. И. Жорник, В. А. Кукареко, И. Ю. Тарасевич // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29-30 апр. 2009г.: в 3 т. / под общ. ред. П. А. Витязя, С. А. Астапчика. – Новополоцк: УО ПГУ, 2009. – Т.2. – С. 25–29.

113. Белоцерковский, М.А. Повышение износостойкости газотермических покрытий трибомодифицированием / М. А. Белоцерковский, В. А. Кукареко, А. И. Камко // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29-30 апр. 2009 г.: в 3 т. / под общ. ред. П. А. Витязя, С. А. Астапчика. – Новополоцк: УО ПГУ, 2009. – Т.2. – С. 29–33.

114. Чой, К.Й. Повышение свойств покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации. Оборудование и технологии / К. Й. Чой, М. А. Белоцерковский, А. С. Прядко // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 11 Междунар. науч.-практ. конф., С.-Петербург, 14-17 апр. 2009 г.: в 2 ч. / под общ. ред. Н. А. Соснина. – С.-Петербург: Изд-во политехн. ун-та, 2009. – Ч.1 – С. 189–195.

115. Белоцерковский, М.А. Формирование износостойких покрытий распылением стальных проволок / М. А. Белоцерковский, В. Ч. Осучукву // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. материалов IV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19-21 окт. 2009 г.: в 3 кн. / Физико-техн. ин-т НАН Беларуси; редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2009. – Кн. 2: Технология и оборудование для упрочнения и восстановления свойств поверхности материала. – С. 193–198.

116. Белоцерковский, М.А. Упрочнение химико-термической обработкой покрытий, полученных высокоскоростным распылением стальных проволок / М.А. Белоцерковский, В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Инженерия поверхности, Новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. Межд. Симпозиума, Минск, 25-27 марта 2009 г./ Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси; редкол.: П.А.Витязь [и др]. – Минск, 2009. – С. 178–184.

117. Белоцерковский, М.А. Возможности повышения работоспособности сельскохозяйственных машин управлением поверхностными свойствами деталей в процессе эксплуатации / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, А.И. Камко // Механика-2009: сб. науч. тр. IV Белорусского конгресса по теор. и прикл. механике «Механика – 2009» ОИМ НАН Беларуси, Минск, 22-24 дек. 2009г./ ОИМ НАН Беларуси; редкол.: М.С.Высоцкий [и др.]. – Минск, 2009 – с. 290–294.

118. Белоцерковский, М.А. Повышение производительности нанесения полимерных покрытий, получаемых высокоскоростным распылением проволок / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27-28 мая 2010 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 94–95.

119. Белоцерковский, М.А. Повышение свойств газотермических покрытий в процессе приработки и эксплуатации / М. А. Белоцерковский, А. И. Камко // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27-28 мая 2010 г. / Белорусский нац. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталева, Ф. И. Пантелеенко, В. Ю. Блюменштейн. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 129–130.

120. Белоцерковский, М.А. Упрочнение газотермических покрытий в процессе трения / М. А. Белоцерковский, В. А. Кукареко, А. И. Камко // Трибофатика: тр. VI Междунар. симп. по трибофатике МСТФ 2010., Минск, 25 окт.-1 нояб. 2010 г.: в 2 ч. / редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2010. – Ч. 1. – С. 517–520.

121. Белоцерковский, М.А. Разработка технологий формирования антифрикционных покрытий на элементах опор скольжения сельскохозяйственной техники / М. А. Белоцерковский, А. И. Камко, А. В. Чекулаев // Инновации в машиностроении: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26-29 окт. 2010 г. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М. С.Высоцкий [и др.]. – Минск, 2010. – С. 296–299.

122. Витязь, П.А. Газопламенное напыление с активированием высокоскоростным спутным потоком / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, А.Е. Черепко // Перспективные материалы и технологии: Сборник статей международного симпозиума / УО ВГТУ. – Витебск, 2011. – С. 3–5.

123. Разработка оборудования для высокоскоростного газопламенного напыления порошков / М.А. Белоцерковский, А.Е. Черепко, А.С. Прядко, Ю.С. Коробов // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: Материалы 13-й Международной научно-практической

конференции, - 12-15 апреля 2011 г. С.-Петербург: В 2 ч. СПб: Изд. Политехн. Университета, 2011. – Ч. 1. – С. 49–51.

124. Belotserkovsky, M. Technology for producing layered thermo sprayed coatings for protection against radiation / M. Belotserkovsky // Advanced nuclear materials, materials evaluation and radiation biology: Proceedings of 26th ISTC – Korea Workshop, - 20-21 sept. 2011. Daejeon, KAERI, 2011. – P. 44–47.

125. Рациональный подход к восстановлению деталей оборудования газотермическим напылением / Ю.С. Коробов, С.В. Невежин, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: Материалы 13-й Международной научно-практической конференции. В 2 ч. СПб: Изд. Политехн. Университета, 2011. – Ч. 1. – С. 164–171.

Тезисы докладов

126. Белоцерковский, М.А. Пределы работоспособности газопламенных покрытий в узлах трения машин / М.А. Белоцерковский // Новые материалы и технологии в трибологии «НМТТ-97»: Тезисы докладов Второй американо-восточно-европейской конференции, - 1-5 сентября 1997г. Гомель: ИММС НАН Б, Инфотрибо, 1997. – С. 124.

127. Белоцерковский, М.А. Высокоскоростное газопламенное нанесение износостойких покрытий / М.А. Белоцерковский, А.Е. Черепко // Надежность и безопасность технических систем: Тезисы докладов международной научно-технической конференции, - 28-29 октября 1997 г. Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1997. – С.130–131.

128. Белоцерковский, М.А. Нанесение композиционных покрытий активированным термораспылением / М.А. Белоцерковский, А.Е. Черепко // Новые материалы и технологии «Номатех-98»: Тезисы III Республиканской научно-технической конференции., - 21-22 мая 1998 г. Минск: Изд. ИММС НАН Б. Материалы, технологии, инструменты, 1998. – т.3. – №2. – С.77.

129. Белоцерковский, М.А. Разработка технологических процессов активированного напыления коррозионностойких композиционных покрытий на основе вторичных полимеров / М.А. Белоцерковский, А.В. Федаравичус // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: Тезисы докладов 5-й международной научно-технической конференции; под ред. А.И. Свириденка, А.А. Михалевича. - 25-26 июня 2002 г. Гродно: ГрГУ, 2002. – С.49.

130. Structure transformations and properties of nitrogen ion beam implanted thermal sprayed steel coatings / A.V. Byeli, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovskii, A.A. Kolesnikova // Surface Modification Technologies: Abstracts of 21 International Conference, - 24-26 September 2007, Ensam - Paris, 2007. – P. 67.

131. Формирование высокопрочных и износостойких полимерных материалов и покрытий с наноструктурными наполнителями / В.Е. Панин, С.В. Панин, М.А. Белоцерковский, И.В. Степанова, Е.О. Коваль // НАНО-2007: Тезисы докладов II Всероссийской конференции по наноматериалам, - 20-21 мая 2007 г., Новосибирск: Изд. ИХТМ СО РАН, 2007. – С.74

Авторские свидетельства и патенты

132. Устройство для подачи порошка в термораспылительную горелку: а.с. СССР №1565534, МПК В 05 В 7/20 / Н.Н. Дорожкин, Ю.В. Полупан, М.А. Белоцерковский, И.Л. Пунтус, В.Т. Сахнович; заявитель ИНДМАШ АН БССР. – № 4682464/05; заявл. 14.06.88; опуб. 12.07.90 // Изобретения: официальный бюл. / Ком. СССР по изобретениям и товарным знакам. – 1990. – № 19. – С. 44.

133. Устройство для подачи порошка в термораспылительную горелку: а.с. СССР 1729609, МПК В 05 В 7/20 / Н. Н. Дорожкин, И. Л. Пунтус, Ю. В. Полупан, М. А. Белоцерковский, В. Т. Сахнович, В. А. Чагаев; заявитель ИНДМАШ АН БССР. – № 4731663/05; заявл. 22.08.89; опуб. 30.04.92 // Изобретения: официальный бюл. / Ком. СССР по патентам и товарным знакам. – 1992. – № 16. – С. 47.

134. Способ получения износостойкого композиционного покрытия: пат. СССР 1759559, МПК В 05 В 7/20 / М. И. Черновол, М. А. Белоцерковский, Л. А. Лопата, Т. П. Гегейшвили; заявитель Кировоградский ин-т сельхозмашиностроения; заявл. 08.01.91; опуб. 17.08.92 // Изобретения: официальный бюл. / Ком. СССР по патентам и товарным знакам. – 1992. – № 33. – С.46.

135. Способ газопламенного напыления порошковых материалов: пат. СССР 1787171, МПК В 05 В 7/20 / В. А. Чагаев, М. А. Белоцерковский, В. Т. Сахнович, Ю. В. Полупан, И. Л. Пунтус; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – заявл. 08.01.91; опубл. 04.01.93 // Изобретения: официальный бюл. / Комитет РФ по патентам и товарным знакам. – 1993. – № 1. – С.214.

136. Горелка для газопламенного напыления покрытий: пат. 2027527 РФ, МПК В 05 В 7/20 / В. А. Чагаев, М. А. Белоцерковский, В. Т. Сахнович, А. К. Шипай, Ю. В. Полупан, И. Л. Пунтус; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № 4900263/05; заявлено 08.01.91; опубл. 21.01.95 // Афіцыйны бюл. / Бел. дзярж. пат. камітэт. – 1995. – № 3. – С. 116.

137. Горелка для газопламенного напыления легкоплавких порошковых материалов: пат. 223 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / М. А. Белоцерковский, И. Л. Пунтус, А. В. Федаравичус; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № и 200000086; заявл. 02.06.00; опубл. 30.12.00 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2000. – № 3. – С. 91.

138. 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.

139. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты): пат. 4365 Респ. Беларусь, МПК7 В 05 В 7/20 / М. А. Белоцерковский, А. С. Прядко, А. Е. Черепко; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № а 19990698; заявл. 12.07.99; опубл. 30.03.02 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002. – № 1. – С. 94.

140. Способ газопламенного напыления порошковыми материалами, преимущественно с низкой теплопроводностью: пат. Украины 37467, МПК В

05 В 7/20 / В. Н. Кропивный, В. Н. Лопата, М. А. Белоцерковский; заявитель Кировоградский технич. ун-т; заявл. 14.01.99; опуб. 15.05.01 // Офіц. бюл. він. України – 2001. – № 4 – С. 27.

141. Устройство для газопламенного напыления порошковых полимерных материалов: пат. 477 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / М. А. Белоцерковский, И. Л. Пунтус, А. В. Федаравичус; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № и 20010173; заявл. 11.07.01; опубл. 30.03.02 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002. – № 1. – С. 191.

142. Композиционная опора скольжения и способ ее изготовления: пат. 2198327 Россия, МПК F 16 С 33/00 / О. В. Берестнев, В. Л. Басинюк, М. В. Кирейцев, М. А. Белоцерковский, А. В. Федаравичус; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № и 2000111045/28; заявл. 03.05.00; опубл. 10.02.03 // Бюллетень / Фед. ин-т промышл. собственности. – 2003. – № 4. – С. 452.

143. Способ газопламенного напыления покрытий из проволочных материалов: пат. 4731 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / М. А. Белоцерковский, А. М. Белоцерковский, Ю. В. Полупан; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № 970710; заявл. 19.12.97; опубл. 30.09.02 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002. – № 3. – С. 111.

144. Способ восстановления шеек коленчатых валов ДВС: пат. 4840 Респ. Беларусь, МПК7 В 23 Р 6/00 / М. А. Белоцерковский, А. М. Гоман, Ю. В. Полупан, В. А. Пик; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № 970711; заявл. 19.12.97; опубл. 30.12.02 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002. – № 4. – С. 106.

145. 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.

146. 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.

147. Способ формирования износостойкого покрытия: пат. 2234382 Россия, МПК В 05 D 5/08 / П. А. Витязь, М. А. Белоцерковский, В. Л. Басинюк, Е. И. Мардосевич; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № 2002128900; заявл. 28.10.02; опубл. 20.08.04 // Бюллетень / Фед. институт промышл. собственности. – 2004. – № 23. – С. 341.

148. Устройство для газопламенного напыления полимерных порошков: пат. 1652 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / М. А. Белоцерковский, А. В. Голопятин; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – № и 20040115; заявл. 16.03.04; опубл. 30.12.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 4. – С. 231.

149. Горелка для газопламенного напыления легкоплавких порошковых материалов: пат. 7926 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / М. А. Белоцерковский, И. Л. Пунтус, А. В. Федаравичус; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси.

– № а 20030534; заявл. 02.06.00; опубл. 30.04.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 2. – С. 56.

150. Способ нанесения покрытия порошком термопластичного полимера: пат. 8528 Респ. Беларусь, МПК В 05 D 1/08 / М. А. Белоцерковский, А. В. Голопятин, М. А. Леванцевич, А. М. Гоман; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – № а 20040210; заявл. 16.03.04; опубл. 30.10.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 5. – С. 52.

151. Устройство для газопламенного напыления проволочных материалов: пат. 2996 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев, А. С. Прядко, В. М. Изоитко; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – № 20060093; заявл. 17.02.06; опубл. 30.08.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 4. – С. 157.

152. Способ получения демпфирующего покрытия: пат. 9379 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/00 / М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич, В. М. Рудько; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20050213; заявл. 09.03.05; опубл. 30.06.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 69.

153. Способ получения износостойкого покрытия: пат. 9422 Респ. Беларусь, МПК В05В 7/16 / М.А. Белоцерковский М.А. В.И. Жорник, А.И. Полуян, В.А. Кукареко; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20050026; заявл. 11.01.2005; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 6. – С. 103.

154. Способ получения износостойкого покрытия: пат. 9465 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 4/18 / П. А. Витязь, М. А. Белоцерковский, А. В. Белый, В. А. Кукареко; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № 20030256; заявл. 21.03.03; опубл. 30.06.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 102.

155. 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.

156. Способ нанесения полимерного покрытия на металлическую трубу: пат. 10551 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/16 / М. А. Белоцерковский, А. М. Гоман; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20060350; заявл. 17.04.06; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2. – С. 42.

157. Способ газопламенного напыления покрытий: пат. 10711 Респ. Беларусь, МПК В 05 D 1/08 / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20050857; заявл. 31.08.05; опубл. 30.06.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 75.

158. Устройство для газопламенного напыления полимерных порошков: пат. ТЈ 89 Респ. Таджикистан, МПК С 23 С 4/18 / Р. О. Азизов, М. Х. Саидов, М. А. Белоцерковский, З. Ш. Вохидова, А. Н. Мирзоев; заявитель

ТГТУ. – № 0700118; заявл. 18.07.07; опубл. 28.02.08 // Офиц. бюл. / Нац. пат.-инф. цэнтр. – 2007. – № 4. – С. 18.

159. Способ получения износостойкого металлического покрытия на деталях трибосопряжений: пат. 11663 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 4/12 / М. А. Белоцерковский, В. А. Кукареко, А. С. Прядко; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20060803; заявл. 28.07.06; опубл. 28.02.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1. – С. 98.

160. Способ получения износостойкого стального покрытия: пат. 11776 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 4/06 / М. А. Белоцерковский, А. Патеюк, А. В. Бельный, В. А. Кукареко; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20070688; заявл. 06.06.07; опубл. 30.04.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 142.

161. Способ изготовления детали узла трения скольжения: пат. 11869 Респ. Беларусь, МПК F 16 С 33/04 / М. А. Белоцерковский, В. И. Жорник, А. И. Камко, М. А. Леванцевич; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20070758; заявл. 19.06.07; опубл. 30.04.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 106.

162. Способ газопламенного напыления полимерного покрытия: пат. 12620 Респ. Беларусь, МПК В 05 D 1/08 / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20080287; заявл. 13.03.08; опубл. 30.10.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 6. – С. 143.

163. Способ изготовления композиционной опоры скольжения: пат. 12667 Респ. Беларусь, МПК F 16 С 33/04 / М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич, В. М. Рудько, В. К. Шелег; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20081408; заявл. 10.11.08; опубл. 30.12.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 107.

164. Способ изготовления детали узла трения скольжения: пат. 12982 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 28/00 / М. А. Белоцерковский, В. И. Жорник, В. А. Кукареко, А. И. Камко, А. С. Прядко, М. М. Заболоцкий; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20081384; заявл. 03.11.08; опубл. 30.04.10 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 2. – С. 111.

165. Устройство для газопламенного напыления проволочных материалов: пат. 7025 Респ. Беларусь, МПК В05В 7/00 / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № и 20100575; заявл. 16.11.08; опубл. Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 1. – С. 115.

166. Способ газопламенного напыления полимерных покрытий: положительное решение от 18.06.2010 по заявке № а 20090411 В05D 1/08 / М.А. Белоцерковский, В.А. Чекулаев; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20090411; заявл. 21.04.2009; опубл. Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1.

167. Устройство для высокоскоростного газотермического напыления порошков: пат. №14885 Респ. Беларусь, МПК В05В 7/16 / М.А. Белоцерков-

ский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а20091057; заявл. 14.07.09; опубл. Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С.88.

РЕЗЮМЕ

Белоцерковский Марат Артемович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКТИВИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Ключевые слова: покрытие, газопламенное напыление, двухфазные струи, порошковые материалы, распыление проволок, модифицирование покрытий, оборудование, технологии напыления.

Цель работы - разработка научных основ повышения физико-механических и функциональных свойств газопламенных покрытий до уровня, соответствующего эксплуатационным требованиям, за счет активирования процессов напыления порошковых и проволочных материалов, последующего модифицирования и создание технических средств для активированного газопламенного напыления.

На основании разработанной методологии определения необходимой и достаточной величины прочностных характеристик напыленных покрытий, учитывающей величину и характер действующих на деталь нагрузок в процессе эксплуатации, предложен подход к выбору технологических приемов активирования, базирующийся на соответствии добавляемых материальных затрат стоимости упрочняемой или восстанавливаемой детали. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность существенной интенсификации динамических параметров двухфазной струи и процессов теплообмена в системе «факел – частицы» за счет активирования спутными потоками, что позволило разработать оборудование и процессы нанесения покрытий с требуемыми свойствами напылением порошками материалов с теплопроводностью (2 – 5) Вт/м·град., смесями порошков металлов и керамики, порошков термопластичных полимеров с температурой плавления от 360 К до 550 К, полимерными шнурами, металлическими проволоками. Выявлены закономерности протекания процессов структурообразования в покрытиях как в ходе их формирования, так и при последующем модифицировании методами микродугового оксидирования, ионно-лучевого азотирования и химико-термической обработки. Установлено явление аномально высокого содержания в покрытиях из проволок хромсодержащих сталей мартенситного класса остаточного аустенита (до 50 об.%), и исследована возможность его распада в

процессе трения, сопровождающаяся повышением твердости покрытий более чем вдвое (с 300 до 800 HV).

Разработанные технические средства активированного газопламенного напыления позволили повысить срок службы деталей узлов трения скольжения в 1,6 – 8 раз. Суммарный приведенный в актах годовой экономический эффект составляет около 370 тыс. долларов США.

РЭЗЮМЭ

Белацаркоўскі Марат Арцёмавіч

ТЭАРЭТЫЧНЫЯ І ТЭХНАЛАГІЧНЫЯ АСНОВЫ АКТЫВАВАНАГА ФАРМІРАВАННЯ ГАЗАПАЛЫМЯНЫХ ПАКРЫЦЦЯЎ

Ключавыя словы: пакрыццё, газапалымянае напыленне, двухфазныя бруі, парашковыя матэрыялы, распыленне дратоў, мадыфікаванне пакрыцця, абсталяванне, тэхналогіі напылення.

Мэта працы - распрацоўка навуковых асноў павышэння фізіка-механічных і функцыянальных уласцівасцяў газапалымяных пакрыццяў да ўзроўню, які адпавядае эксплуатацыйным патрабаванням, за кошт актывавання працэсаў напылення парашковых і драцяных матэрыялаў, наступнага мадыфікавання і стварэння тэхнічных сродкаў для актываванага газа-палымянага напылення.

На падставе распрацаванай метадалогіі вызначэння неабходнай і дастатковай велічыні трывальных характарыстык напыленым пакрыццяў, якая ўлічвае велічыню і характар дзеючых на дэталі нагрузак у працэсе эксплуатацыі, прапанаваны падыход да выбару тэхналагічных прыёмаў актывавання, які базуецца на адпаведнасці дадаваных матэрыяльных выдаткаў кошту ўмацоўваемай або аднаўляемай дэталі. Тэарэтычна абгрунтавана і эксперыментальна пацверджана магчымасць істотнай інтэнсіфікацыі дынамічных параметраў двухфазнай бруі і працэсаў цеплаабмену ў сістэме «факел - часціцы» за кошт актывавання спутнымі патокамі, што дазволіла распрацаваць абсталяванне і працэсы нанясення пакрыццяў з патрабуемымі ўласцівасцямі напыленнем парашкамі матэрыялаў з цеплаправоднасцю (2 – 5) Вт/м·град., сумесямі парашкоў металаў і керамікі, парашкоў тэрмапластычных палімераў з тэмпературай плаўлення ад 360 К да 550 К, палімернымі шнурамі, металічнымі дротамі. Выяўлены заканамернасці працякання працэсаў структураўтварэння ў пакрыццях як у ходзе іх фарміравання, так і пры наступным мадыфікаванні метадамі мікрадугавага аксідыравання, іённа-прамянёвага азаціравання і хіміка-тэрмічнай апрацоўцы. Устаноўлена з'ява анамальна высокага ўтрымання ў пакрыццях з дратоў хромзмяшчальных сталяў марэнсітнага класа рэшткавага аустэніта (да 50 аб.%), і даследавана магчымасць яго распаду ў працэсе

трэння, якая суправаджаецца павышэннем цвёрдасці пакрыццяў больш чым удвая (з 300 да 800 HV).

Распрацаваныя тэхнічныя сродкі актываванага газапалымянага напылення дазволілі павысіць тэрмін службы дэталей вузлоў трэння слізгання ў 1,6 - 8 разоў. Сумарны прыведзены ў актах гадавы эканамічны эфект складае каля 370 тыс. долараў ЗША.

SUMMARY

Belotserkovsky Marat Artemovich

THEOREYICAL AND TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF FORMATION OF ACTIVATED FLAME SPRAYED COATINGS

Keywords: coating, metal spraying, two-phase jet, powder materials, spraying of wires, modification of coatings, equipment, technologies spraying.

Aim of the work – development scientific grounds for improvement of physical-mechanical and functional of the gas-flame coatings to a level, which corresponds to operational requirements at the expense of the activating a processes of spraying powder and wire materials, subsequent modification and creation of facilities for activated gas-flame spraying.

Based on developed methodology for determining necessary and sufficient values of the strength properties of sprayed coatings, which takes into account the magnitude and nature of loads acting on the part of the operation, an approach to selection of activating techniques. It is founded on accordance of adding material costs of hardened or renovated parts. It was substantiated theoretically and confirmed experimentally the possibility to intensify significantly of dynamic parameters for two-phase jet and heat exchange in the system “torch - particles” at the expense of activating by concurrent flows, that allowed to develop the equipment and processes of coating with needed features by spraying: powders with thermal conductivity (2 - 5) Wt / m·K, mixtures of metal powders and ceramic powders, thermo-plastic polymer with a melting point of 360 K to 550 K, polymer-governmental cords, metal wires. It was revealed the mechanism of structure formation in coatings, both during their formation, and the subsequent modification by methods of micro-arc oxidation, ion-beam nitriding and thermochemical processing. A phenomenon of abnormally high content in the coatings of chromium-bearing pro-portage steels of martensitic class of residual austenite (up to 50% vol.) was determined. The possibility of its collapse in the process of friction, which gives rise accompanied by a hard coating more than doubled (from 300 to 800 HV) was investigated.

Developed technical means for activated flame spraying has been improving life time of friction sliding components at 1.6 - 8 times. The saving rate shown in the acts is about 370 thousand U.S. dollars.