

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.793.6: 621.785.5 (043.3)

ШТЕМПЕЛЬ ОЛЕГ ПЕТРОВИЧ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДИФФУЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
В ПОДВИЖНЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ

05.02.01 - Материаловедение (машиностроение)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новополоцк, 2003

Работа выполнена в Учреждении образования “Полоцкий государственный университет”

- Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор *Пантелеенко Ф. И.*
(Учреждение образования “Полоцкий
государственный университет”,
проректор по научной работе);
- Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор *Ловишенко Ф. Г.*
(Учреждение образования “Могилевский
государственный технический
университет“, первый проректор);
- кандидат технических наук,
старший научный сотрудник *Девойно О. Г.*
(Учреждение образования “Белорусский
национальный технический университет”,
ведущий научный сотрудник отраслевой
научно-исследовательской лаборатории
плазменной металлизации).
- Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение
“Институт порошковой металлургии“
НАН Беларуси.

Защита состоится «27» июня 2003 года в 14⁰⁰ часов на заседании Совета К 02.19.03 при Учреждении образования «Полоцкий государственный университет».

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина 29, тел. 8(0214)551047.

Факс (+375214) 550679

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Полоцкий государственный университет».

Автореферат разослан “26” мая 2003 года.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций К 02.19.03

кандидат технических наук, доцент

_____ *В.М. Константинов*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В современных экономических условиях для ремонтных служб промышленных предприятий необходимы недорогие технологии получения сплавов для нанесения различных покрытий на восстанавливаемые и изготавливаемые детали. Существующие технологии диффузионного легирования металлических порошков (ДЛМП) позволяют получать широкую номенклатуру сплавов для нанесения защитных покрытий с высоким комплексом эксплуатационных свойств. Однако широкое промышленное применение технологий ДЛМП сдерживается присущими им недостатками, связанными в основном с малой скоростью диффузионных процессов.

ДЛМП является одним из перспективных методов получения известных композиционных сплавов и синтеза новых. Следует отметить, что при глубокой изученности процессов термодиффузионной обработки (ТДО) макрообъектов (деталей) процессы диффузионного легирования (ДЛ) микрообъектов (металлических порошков) изучены недостаточно. Очевидно, что процессы ДЛ порошков, для которых толщина диффузионного слоя на частице порошка соизмерима с ее размерами, существенно отличаются от ТДО деталей, размеры которых значительно превышают толщину диффузионных слоев.

В связи с этим, исследование особенностей, интенсификация и разработка нового эффективного процесса диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий является весьма актуальной задачей.

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Исследования выполнялись в соответствии с Межвузовской программой фундаментальных исследований «Металлургия» (ГБ 51-21 «Разработать теорию и технологию ресурсосберегающего поверхностного легирования деталей дробетных установок литейного производства», 2002 г., № ГР 20012609), и в рамках гранта для молодых ученых при финансовой поддержке Белорусского ФФИ (договор МФ 95-48 «Разработка порошка на железной основе для износостойких покрытий повышенной коррозионно-, тепло- и жаростойкости», 1995 г.), в рамках заданий Министерства образования РБ (ГБ 21-98 «Разработка научных и технологических основ получения бористых графитизируемых покрытий из металлоотходов», 1999 г., № ГР 19981721, ГБ 32-99 «Разработать ресурсосберегающую технологию упрочнения наплавкой рабочих органов почвообрабатывающих орудий», 2000 г., № ГР 19991933, ГБ 03-95 «Разработка теоретических и технологических основ ресурсосберегающего процесса создания износ- и коррозионностойких покрытий нанокристаллического строения», 1996 г., № ГР 1996653, ГБ 25-20 «Разработка эффективной технологии диффузионного легирования металлических порошков», 2000 г., № ГР 20001056), Государственной научно-технической программой «Сварка» (договор № 1222/0333 (ГБ 72-21, № ГР 20012802) «Исследовать, разработать и внедрить комплекс оборудования и технологию плазменной наплавки сложнопрофильных поверхностей быстроиз-

нашиваемых деталей штамповой оснастки на ОАО «Минский подшипниковый завод»).

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка научных и технологических основ интенсификации процесса получения наплавочных сплавов диффузионным легированием металлических порошков за счет его реализации в подвижных порошковых смесях (ППС).

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

1. На основании анализа существующих способов интенсификации термодиффузионной обработки макрообъектов, предложить эффективные способы ускорения ДЛ микрообъектов (металлических порошков).

2. Изучить влияние предварительной и циклической деформации при отжиге на протекание диффузионных процессов.

3. Изучить влияние предварительного окисления микрообъектов на процесс их ДЛ флюсующе-упрочняющими элементами.

4. Изучить механизм ДЛ микрообъектов в ППС.

5. Изучить влияние технологических параметров ДЛМП в ППС на их фазовый состав, структуру и эксплуатационные свойства.

6. Разработать технологические основы ДЛ флюсующе-упрочняющими элементами металлических порошков. Разработать конструкции установок различной производительности для реализации технологии ДЛМП. Апробировать полученные результаты в промышленности.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются процессы ДЛ флюсующе-упрочняющими элементами металлических порошков. Предметом исследования является взаимосвязь режимов ДЛ, со структурой составом и свойствами получаемых наплавочных материалов и покрытий из них.

Гипотеза. В работе сделано научное предположение об интенсификации процесса ДЛ микрообъектов в ППС вследствие ускорения тепломассопереноса и диффузионного массопереноса в материале частиц порошковой смеси. Ускорение тепломассопереноса обусловлено перемешиванием частиц ППС в процессе обработки, а ускорение диффузионных процессов происходит вследствие многократного пластического деформирования поверхностных слоев частиц ППС в процессе обработки.

Результаты экспериментальных исследований и внедрения в производство подтвердили правильность гипотезы. Это позволило разработать способ получения и устройства для получения наплавочных материалов для покрытий с широким диапазоном эксплуатационных свойств.

Методология и методы проведенного исследования. Для проведения экспериментальных исследований использованы как известная методология (определение текучести, пикнометрической и насыпной плотности, макро- и микротвердости, металлографические исследования, спектральные, рентгеноструктурные и химические исследования состава), так и разработанные автором методики изучения интенсификации ДЛ микрообъектов химическим воздейст-

вием, влияния циклического пластического деформирования на диффузионные процессы, механизма ДЛ микрообъектов в ППС смесях.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Научная новизна заключается в следующем;

- установлено, что при ДЛ металлических микрообъектов (порошков) в подвижных порошковых смесях происходит многократное пластическое деформирование поверхностных слоев материала частиц смеси, диффузия атомов легирующих элементов (ЛЭ) в материале обрабатываемых микрообъектов не является лимитирующей стадией процесса, скорость процесса ДЛМП в ППС определяется взаимным влиянием элементарных процессов друг на друга;

- многократное пластическое деформирование поверхностных слоев, как частиц насыщающей смеси, так и насыщаемых микрообъектов приводит к значительной интенсификации следующих элементарных процессов: образования атомов легирующего элемента в реакционном объеме (диффузионное испарение), диффузии адсорбированных атомов ЛЭ в глубь частицы;

- установлено, что степень интенсификации процесса ДЛ микрообъектов в подвижных смесях снижается с увеличением времени и температуры обработки, а зависимости количества введенного легирующего элемента от температурно-временных параметров обработки в отличие от классических близки к линейным;

- установлено, что при ДЛ металлических микрообъектов (порошков) в ППС по сравнению с неподвижными происходит более чем четырехкратное увеличение количества диффузионно-введенного элемента при преимущественном образовании фаз с меньшим градиентом его концентрации в диффузионном слое;

- установлено, что предварительное изменение химического состава поверхности частиц металлических порошков насыщением элементом, имеющим большее сродство к вводимому легирующему элементу, чем материал порошка приводит к интенсификации процесса ДЛ.

Практическая значимость полученных результатов. Практическая значимость диссертации состоит в разработке способа получения сплавов для нанесения защитных покрытий ДЛМП (патент РБ № 970119, заявка № 950212). При этом оптимизированы режимы ДЛМП в ППС, позволяющие получать материалы для получения покрытий с широким диапазоном свойств на основе одного металлического порошка (серийно выпускаемого или получаемого из металлической стружки). Разработаны конструкции установок различной производительности для получения ДЛ порошков методом ДЛ (заявка № а20000218). Разработаны технологические процессы получения диффузионно-легируемых сплавов для нанесения защитных покрытий при упрочнении наплавкой плужных лемехов и восстановлении деталей штамповой оснастки. Результаты исследования в виде лекционного материала, дипломных проектов внедрены в учебный процесс обучения студентов специальности Т.03.02 “Технология и оборудование высокоэффективных процессов обработки материалов” по курсам «Технология и

оборудование восстановления деталей машин и приборов», «Физика металлов и сплавов».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Механизм интенсификации ДЛМП, состоящий в ускорении процессов диффузионного и тепломассопереноса при насыщении в ППС, позволяющий снизить продолжительность и температуру ДЛ, применять как регенерируемые, так и расходоуемые насыщающие смеси, использовать в качестве исходных порошки из парамагнитных материалов, а так же чугунные, стальные и бронзовые стружечные металлотходы, снизить энергоёмкость и трудоёмкость и в итоге обеспечить требуемые технико-экономические свойства покрытий.

2. Разработанные технологии и устройства для получения диффузионно-легированных сплавов для нанесения покрытий с различными эксплуатационными свойствами на основе одного исходного металлического порошка, позволяющие управлять свойствами получаемых диффузионно-легированных сплавов при постоянных температуре и времени обработки, использовать расходоуемые и регенерируемые насыщаемые смеси.

3. Закономерности влияния циклического пластического деформирования в процессе диффузионного отжига материала на скорость диффузионных процессов. Протекание процессов деформирования, рекристаллизации и образования мелкозернистой структуры приводит к ускорению диффузионного массопереноса, как в глубь образца, так и во внешнюю среду.

4. Закономерности влияния предварительного изменения химического состава поверхностных слоев частиц обрабатываемого порошка на процесс ДЛ микрообъектов. Предварительное окисление стальных микрообъектов позволяет интенсифицировать процесс диффузионного легирования элементами, имеющими большее сродство к кислороду вследствие протекания хемосорбционных процессов и увеличения удельной площади поверхности оксидной пленки.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационной работы получены автором лично или в соавторстве. Автором лично разработаны и проведены: - методика и исследования по изучению особенностей ДЛ микрообъектов в ППС с использованием специальных образцов с сегментарным вырезом; - методика и исследования влияния циклической пластической деформации на диффузионные процессы; - исследования механизма и разработка оборудования ДЛМП в ППС. Работы по разработке технологии получения ДЛ сплавов для восстановления деталей штамповой оснастки выполнены соискателем совместно с В.А. Войтеховичем. Работы по разработке технологии получения ДЛ сплавов для упрочнения плужных лемехов выполнены соискателем совместно с С.Н. Жабуренком.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на 7-ми международных НТК: «Износостойкость машин», г. Брянск (1996 г.); «Технические вузы - Республике», г. Минск (1997 г.); «Современные направления развития производственных технологий и робототехника», г. Могилев (1999 г.); «Упрочнение, восстановление и ремонт на рубе-

же веков», г. Новополоцк. (2001 г.); «Сварка и родственные технологии в современном мире», г. Санкт-Петербург. (2002 г.); "Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия", г. Минск. (2002 г.); «Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин», г. Новополоцк. (2003 г.), а так же на республиканских НТК: «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин», г. Новополоцк, (1993 г.); «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин», г. Новополоцк, (1995 г.); XXII-ых «Гагаринских чтениях», г. Москва, (1996 г.); «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин», г. Новополоцк (1997 г.); «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин», г. Новополоцк (1999 г.)

Опубликованность результатов. Основные результаты исследований содержатся в 27 опубликованных научных трудах. Из них 2 статьи в научных журналах, 5 статей в сборниках трудов, 2 патента РБ, 2 заявки на изобретение, 16 публикаций в материалах и тезисах научно - технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения с выводами, списка использованных источников, приложений. Полный объем диссертации включает 142 страницы машинописного текста, 48 рисунков, 18 таблиц, 172 библиографических источников, приложения на 24 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований в области интенсификации процессов ДЛ микрообъектов (металлических порошков).

Первая глава содержит аналитический обзор применяемых для нанесения защитных покрытий металлических порошков, методов их получения диффузионным легированием и способов интенсификации процессов ДЛ металлических порошков.

Отмечено широкое использование для нанесения защитных покрытий металлических порошков из сплавов на никелевой основе легированных Cr, Si, B, C, Mo и Cu. Защитные покрытия из таких материалов обладают высокими эксплуатационными свойствами. Металлические порошки различных марок таких сплавов выпускаемые в США, Германии, Швеции, Японии, России, и других странах имеют сходный химический состав и высокий уровень технологических свойств, низкую температуру плавления и обладают самофлюсуемостью. Однако в условиях современного производства экономические соображения ограничивают применение дорогостоящих импортных материалов.

Получение сплавов для нанесения защитных покрытий методами ДЛМП на железной основе, которые в 2-5 раз дешевле никелевых является в настоящее время одним из наиболее перспективных, так как обладает рядом дополнительных возможностей: введения в больших количествах таких элементов как бор,

азот, локального (частичного, поверхностного) и объемного легирования, получения большой гаммы сплавов с различными эксплуатационными и технологическими свойствами на базе одного исходного, использования в качестве исходных как серийно выпускаемых металлических порошков, так и стружечных металлоотходов.

Получаемые диффузионным легированием порошки по строению частиц можно разделить на три типа: частично легированные, поверхностно легированные и объемно легированные порошки.

В работах И.Д. Радомысельского, С.Г. Напара-Волгиной, Ф.Г. Ловшенко, А.Ф. Ильюшенко, В.С. Ивашко, Ф.И. Пантелеенко и др. можно выделить следующие направления в области ДЛ металлических порошков: диффузионное легирование из точечных источников, механическое легирование, диффузионное легирование в неспекаемой порошковой смеси, совместное восстановление оксидов с использованием элементов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Однако широкое промышленное применение названных технологий для получения сплавов для защитных покрытий сдерживается их низкой производительностью и высокой энергоемкостью вследствие малой скорости диффузионных процессов.

Показано, что интенсификация диффузионного легирования металлических порошков – малоизученная область современного материаловедения. Основная масса работ посвящена интенсификации термодиффузионной обработки (ТДО) деталей. Однако, на процесс ДЛ как и на все физические процессы, оказывает большое влияние масштабный фактор. Поэтому существует необходимость в разделении объектов диффузионного легирования на макро- и микрообъекты. *Макрообъекты ТДО* – детали, толщина диффузионного слоя на поверхности которых значительно (на несколько порядков) меньше размеров самих деталей. *Микрообъекты ДЛ* – полидисперсная система, размеры частиц которой соизмеримы с толщинами диффузионных слоев.

Кроме масштабного фактора различия процессов ТДО макрообъектов и ДЛ микрообъектов обусловлены целями этих процессов. Целью ТДО макрообъектов является получение на поверхности детали равномерного диффузионного слоя определенной толщины с необходимыми свойствами без значительного изменения геометрической формы, размеров объекта обработки и геометрических параметров его поверхностей. Целью ДЛ микрообъектов является введение определенного количества легирующего элемента равномерно распределенного по частицам при условии неспекаемости частиц. Основным параметром процесс ДЛ микрообъектов является скорость ДЛ, измеряемая в %/ч (количество диффузионно-введенного ЛЭ в единицу времени в процентах массы)

Для процессов ТДО макрообъектов и ДЛ микрообъектов характерно много общего, так как процессы являются многостадийными (состоящими из 5-ти элементарных стадий). В зависимости от соотношений скоростей элементарных стадий скорость процесса ДЛ в целом может определяться скоростью одной лимитирующей (скорость которой значительно меньше остальных) стадии или

взаимным влиянием элементарных стадий друг на друга, если их скорости сопоставимы. Для большинства известных процессов ТДО и ДЛ лимитирующей стадией являются диффузионные процессы.

Для выбора интенсифицирующих воздействий был проведен анализ известных для ТДО деталей интенсифицирующих воздействий с позиции оценки их влияния на известные элементарные стадии процесса ДЛ с учетом особенностей ДЛ микрообъектов. В результате было установлено, что для интенсификации ДЛ микрообъектов наиболее целесообразно применить следующие воздействия: изменение скорости движения частиц рабочей смеси при обработке, предварительное изменение химического состава поверхностных слоев насыщаемых частиц, подбор активатора и типа насыщающей среды. Отмечено, что наиболее перспективными способами интенсификации процессов ДЛ является использование кипящих и псевдокипящих слоев. Это подтверждается работами А.С. Заварова, А. П. Баскакова, Л.Г. Ворошнина, В.Н. Михайлина, И.М. Спиридоновой, И.Н. Кидина, В.И. Андриюшечкина, А.П. Эпика, Л.А. Сосновского и др.

В результате проведенного анализа сформулированы цель и задачи работы. **Во второй главе** описаны использованные в работе материалы, стандартные, известные и разработанные методики исследований.

В качестве исходных материалов при ДЛ использовали металлические порошки на железной основе ПР-сталь45, ПР-Х18Н9, на медной основе ПГ БрАЖ9-4, а так же стружечные отходы чугунов СЧ20, ИЧХ28Н2.

Свойства ДЛ порошков исследовали по стандартным методикам. Гранулометрический состав и размер частиц определяли по ГОСТ 18318; металлографические исследования порошков и покрытий проводили на шлифах, изготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ 9.302 (МИМ-7, Unimet Union 7321); микродюрометрический анализ осуществляли по ГОСТ 9450 (Micromet-II, ПМТ-3). Широко использовали так же рентгеноструктурный (ДРОН-3УМ), и микро-рентгеноспектральный (САМЕСА MS-46) анализы.

Для выполнения лабораторных исследований ДЛМП была спроектирована и изготовлена лабораторная установка. Лабораторная установка проектировалась для проведения исследований по изучению механизма и оптимизации технологических режимов ДЛ металлических порошков, ее технические характеристики имеют широкий диапазон регулирования.

На основании предварительного проведенного анализа и серии экспериментов на симплекс плане была выделена наиболее важная область ДЛ и составлена матрица эксперимента.

Для исследования влияния предварительного легирования на процесс ДЛ микрообъектов была разработана методика, по которой оценку количества введенного в микрообъект легирующего элемента определяли по изменению массы. В качестве образцов использовали: а) стальную проволоку диаметром 1,2 мм и длиной 100 мм, 120 мм, б) порошок стали 45 с размером сферических частиц 63-160 мкм. Для изучения особенностей ДЛ микрообъектов так же была разработана методика, по которой специальные стальные (сталь10), сферические образцы

с сегментарным вырезом подвергались ДЛ в ППС таким образом, чтобы внутренние поверхности вырезов в процессе обработки не испытывали контактов с другими поверхностями. Затем по известным методикам изучали и сравнивали строение и свойства диффузионных слоев на сферических поверхностях и поверхностях выреза.

Для изучения влияния циклической пластической деформации на скорость диффузионных процессов использовали установку высокотемпературной металлографии ИМАШ АЛА-ТОО на которой предварительно силицированные образцы подвергали диффузионному отжигу в вакууме по двум режимам: а) при 900 °С, в течение 30 минут с наложением статической нагрузки, 35 МПа, б) при 900 °С, в течение 30 минут с наложением циклической нагрузки, вызывающей в материале образца напряжения растяжения от 0 до +35 МПа, 30 циклов нагружения. Затем по известным методикам изучали и сравнивали строение и свойства диффузионных слоев.

Полученные результаты подвергались математической обработке по общепринятым методикам.

Третья глава посвящена исследованиям воздействий, интенсифицирующих процесс ДЛ микрообъектов.

При ДЛ металлических порошков роль активатора усиливается вследствие того, что в этом случае к активаторам предъявляются дополнительные требования необходимости обеспечить разрыхляющее воздействие (предотвращение спекания смеси), минимальное ухудшение свойств обрабатываемых порошков («разъедание» поверхности частиц в процессе обработки и коррозия при последующем хранении). Результаты исследований влияния различных типов активаторов на процесс ДЛМП свидетельствуют о целесообразности применения комбинированных активаторов представляющих собой сочетание галогеносодержащего активатора и углеводорода. По результатам выполненных исследований получен патент РБ № 950777.

Большинство элементарных стадий процесса ДЛ протекает на поверхности или в поверхностном слое обрабатываемых объектов. Поэтому химический состав поверхностного слоя обрабатываемых микрообъектов в значительной степени влияет на процесс ДЛ. В силу ряда факторов: отсутствии необходимости в специальном оборудовании, оснастке и материалах, простоте реализации, регулирования и контроля в качестве интенсифицирующего химического воздействия было выбрано окисление обрабатываемых объектов. В некоторых работах школы Ю.М. Лахтина и др. по цементации, азотированию отмечено, что наличие на стальной поверхности оксидной пленки позволяет ускорить процессы диффузионного насыщения углеродом, азотом. Результаты, полученные при изучении влияния предварительного окисливания образцов из стальной проволоки на ДЛ углеродом, марганцем, хромом, медью, алюминием свидетельствуют, что интенсификация процесса ДЛ происходит при легировании углеродом, бором, алюминием, марганцем. При легировании медью и хромом положительного эффекта от предварительного окисления не обнаружено. Таким образом, уста-

новлено, что предварительным окислением можно интенсифицировать процесс ДЛ элементами, имеющими большее сродство к кислороду, чем металл основы. Результаты изучения влияния предварительного окисливания стальных порошков на их ДЛ бором подтвердили полученные результаты. Оптимальный режим окисления стальных микрообъектов (500 °С, 25-35 мин.) позволяет ускорить процесс ДЛ на 10...15%.

Исследование особенностей ДЛ специальных сферических, стальных образцов с сегментарным вырезом в подвижной порошковой смеси позволило выявить ряд особенностей:

- более чем трехкратное ускорение диффузионных процессов в ППС по сравнению с неподвижной;

- большое влияние на процесс ДЛ многократных контактов частиц при обработке, обусловленное различиями в строении и свойствах диффузионных слоев на сферической поверхности специальных образцов, многократно контактирующей с другими в процессе обработки и на поверхности сегментарного выреза контактов не испытывающей (разность в толщине диффузионного слоя составляет более 20%).

Ускорение процессов ТДО деталей в подвижных смесях за счет интенсификации тепломассопереноса и сорбционных процессов вследствие перемешивания частиц смеси – известный факт. Влияние на процесс ДЛ многократных контактов поверхностей частиц обусловлено также происходящими при этом процессами пластического деформирования и рекристаллизации в поверхностных слоях материала. Однако, наличие влияния на процесс ДЛ пластической деформации в подвижных порошковых смесях потребовало дополнительного подтверждения и изучения.

Для определения параметров деформирования был проведен оценочный расчет давлений в зоне контакта частиц рабочей смеси при диффузионном легировании металлических порошков. Результаты расчета свидетельствуют о следующем:

- в местах контакта частиц в нижних слоях смеси действуют давления, средние значения которых в несколько раз превосходят предел текучести сплавов при температурах ДЛ;

- действующие давления зависят от размера частиц и при переходе к макрообъектам уменьшаются.

Для подтверждения результатов расчета было проведено экспериментальное определение размера зерен аустенита методом цементитной сетки и параметров тонкой структуры материала частиц при обработке стального порошка в неподвижной и подвижной порошковых смесях. Более чем четырехкратное уменьшение размеров зерен аустенита (рис. 1), увеличение плотности дислокаций на 40..60% и уменьшение областей когерентного рассеивания в поверхностном слое материала частиц обработанных в ППС свидетельствует о протекании процессов рекристаллизации, и, следовательно, о наличии пластической деформации (табл. 1).

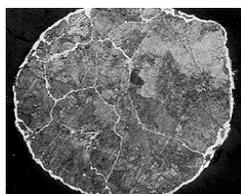
Мнения исследователей о влиянии пластической деформации на процесс диффузионного легирования различными элементами противоречивы, поэтому были проведены экспериментальные исследования влияния циклической пластической деформации на диффузионные процессы, результаты которых (рис. 2) свидетельствуют о том, что при циклическом приложении нагрузки в паузах протекают рекристаллизационные процессы (разупрочнение), а при постоянном приложении нагрузки рекристаллизационные процессы не протекают. Этот факт подтверждается наличием повышенной на 30% пластической деформации образцов, подвергнутых циклическому нагружению, а также уменьшением размера зерна материала образцов более чем в три раза.

Таблица 1.

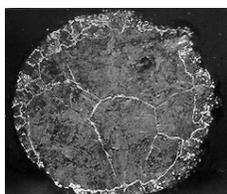
Параметры тонкой структуры цементованного порошка стали 45 после отжига в неподвижной и подвижной смесях.

Вид обработки	Размер ОКР		Параметр решетки а, Å	Распределение деформаций в кристалле			
	Кэф-т корреляции	Дэфф, Å		Кэф-т корреляции	Среднее ОСМД×10 ⁻⁴	Плотность дислокаций ρ, 1см ⁻² ×10 ⁸	Интегральная ширина линий ФФУ, β, °
Отжиг в неподвижной порошковой смеси	0,999	375±96	2,8667	0,998	3,09	6,19036	0,2297
Отжиг ППС	1,000	356±49	2,8661	0,999	3,91	9,9217	0,2756

ОСМД - относительная средняя микродеформация



а) x 400



б) x 400

Рис. 1. Микроструктура частиц стального порошка обработанного:

- в неподвижной смеси;
- в подвижной смеси

Поверхностные слои материала микрообъектов в процессе обработки в ППС находятся в одном из трех состояний: деформирования, рекристаллизации, равновесном периодически переходя из одного в другое. Все три состояния характеризуются повышенной диффузионной подвижностью атомов, известно, что скорость диффузионных процессов в порядке ее возрастания можно расположить следующим образом: по поверхности материала, по границам зерен, полигонов, дислокационным трубкам, в теле зерен. Кроме этого, ускорение диффузионных процессов происходит при увеличении плотности вакансий и протекании структурных превращений. При деформировании увеличивается количество линейных (дислокаций) и точечных (вакансий и междоузельных атомов) дефектов и повышается их подвижность. При рекристаллизации происходит перестройка кристаллической решетки (процесс подобный фазовому превращению) и миграция границ образующихся и растущих зерен. Равновесное состояние

после рекристаллизации характеризуется мелкозернистой структурой с большой протяженностью границ зерен.

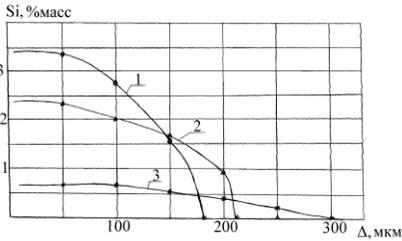


Рис. 2. Распределение кремния в поверхностных слоях образцов, подвергнутых диффузионному отжигу в вакууме $1,333 \cdot 10^{-2}$ МПа (900°C 0,5 часа):

1 – в исходном образце; 2 – в образце после отжига с наложенной постоянной нагрузкой ($\sigma=30\text{МПа}$, $\varepsilon=7\%$); 3 – в образце после отжига с наложением циклической нагрузки (σ – от 0 МПа до – 30 МПа 30 циклов нагружения, $\varepsilon=33\%$)

Таблица 2.

Результаты полуколичественного рентгеноструктурного анализа ДЛ-порошка стали 45

Фаза	Концентрация ЛЭ по массе, %	
	ДЛ в неподвижной смеси	ДЛ в подвижной смеси
1	2	3
Силицирование		
$\text{Fe}_{0,42}\text{Si}_{0,67}$	—	0,2
(Fe,C)	2,2	—
Fe_2C	—	0,1
Fe_3C	1,3	—
Fe_3Si	15,2	66,7
FeC	0,4	0,2
FeSi_2	7,4	1,9
$\alpha\text{-Fe}$	73,0	30,0
$\alpha\text{-SiC}$	0,7	0,9

1	2	3
Борирование (объемные)		
Fe_xB	1,8	0,6
Fe_2O_3	27,0	19,6
Fe_3O_4	7,4	14,0
Fe_2B	12,6	31,3
FeB	22,8	9,9
Fe_3C , (Fe_3BC)	19,1	20,7
Марганцирование		
$\gamma\text{-Fe}$	83,3	88,7
Fe_3C	—	7,3
FeC	0,6	—
Mn	0,9	2,1
$\alpha\text{-Fe}$	15,3	1,9

Анализ количества кремния в диффузионных слоях образцов отожженных с приложением постоянной или циклической нагрузки (рис. 2) позволил установить, что при отжиге с одновременным циклическим деформированием происходит интенсификация диффузионного испарения атомов ЛЭ в 17 раз (3,5% при постоянной нагрузке, 60,5% при циклическом нагружении) из диффузионного слоя во внешнюю среду. Таким образом, происходит ускорение диффузионного массопереноса при ДЛ микрообъектов в ППС, как вглубь образца, так и во внешнюю среду. Факт ускорения процесса испарения легирующего элемента с поверхности циклически деформируемого образца свидетельствует о том, что при диффузионном легировании металлических порошков в подвижных насыщающих средах многократная пластическая деформация поверхностных слоев частиц насыщающей среды приводит к значительной интенсификации первой элементарной стадии процесса диффузионного легирования (образование "активных" атомов ЛЭ).

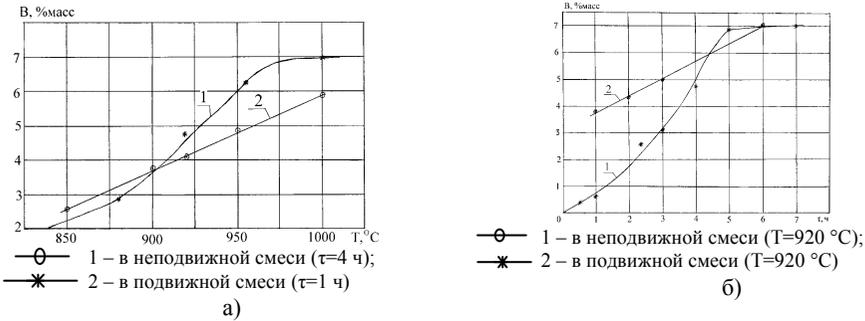


Рис. 3. Влияние температуры (а) и времени (б) ДЛМП на содержание в нем бора

Это приобретает большое значение в связи с тем, что сравнительный анализ термокинетических кривых борирования стального порошка в неподвижной и ППС свидетельствует о том, что диффузионные процессы перестают быть лимитирующей стадией при диффузионном легировании металлических порошков в подвижных смесях. Об этом свидетельствует линейный характер термокинетических кривых и образование фаз содержащих меньшее количество ЛЭ при общем его увеличении в порошке при ДЛМП в ППС (рис. 3, табл. 2).

Известно, что скорость большинства известных процессов ДЛ определяется скоростью диффузии атомов ЛЭ в материале обрабатываемого объекта (лимитирующей элементарной стадии). Однако установлено, что при ДЛМП в ППС скорость процесса определяется взаимным влиянием всех элементарных стадий друг на друга и на весь процесс в целом. Следовательно, возможность ДЛМП в ППС при более низких температурах позволяет не только снизить энергозатраты, но и дополнительно ускорить процесс ДЛ за счет увеличения числа адсорбированных атомов. Повысить сорбционную способность поверхности обрабатываемых частиц позволяет также увеличение количества дефектов кристаллического строения на ней (места выхода на поверхность дислокаций и границ зерен и полигонов).

Четвертая глава посвящена разработке технологии и оборудования получения ДЛ в ППС сплавов для защитных покрытий.

Для практической реализации подвижной насыщающей смеси был использован псевдокипящий слой, полученный вращением цилиндрического контейнера вокруг горизонтальной оси в рабочем пространстве печи. Выбор оптимального интервала частот вращения контейнера в печи осуществлялся согласно разработанной математической модели поведения частиц порошковой смеси в нем. Критерием оптимальности служило максимальное перемешивание частиц смеси в контейнере для обеспечения неспекаемости смеси и равномерности процесса насыщения.

При изучении интенсификации ДЛМП в ППС было установлено, что регулирование процесса традиционно используемыми для этого временем и температурой не целесообразно. Управлять процессом ДЛ в этом случае необходимо

изменением степени заполнения контейнера и соотношением компонентов порошковой смеси. Для оптимизации этих параметров по толщине диффузионного слоя, технологическим и эксплуатационным свойствам, получаемых диффузионно-легированных сплавов, был реализован симплекс-план эксперимента. После обработки экспериментальных данных получены регрессионные модели (1, 2, 3, 4, 5), адекватно устанавливающие связь толщины диффузионного слоя, текучести, пикнометрической и насыпной плотности получаемых порошков и твердости наплавленного слоя с составом порошковой смеси и степенью заполнения контейнера.

$$\delta = 12,97 + 35,639x_1 - 28,633x_2 + 21,628x_3 + 46,588x_1x_2 + 37,611x_1x_3 + 27,913x_2x_3 \quad (1)$$

$$K_T = 2,346 + 0,375x_1 + 0,483x_2 + 0,395x_3 + 0,233x_1x_2 + 0,933x_1x_3 + 0,053x_2x_3 \quad (2)$$

$$C_{\text{пик}} = 7,47 - 0,664x_1 + 0,525x_2 - 0,385x_3 - 0,367x_1x_2 - 1,014x_1x_3 + 0,168x_2x_3 \quad (3)$$

$$C_H = 3,470 - 0,453x_1 + 0,345x_2 - 0,237x_3 + 0,667x_1x_2 - 1,266x_1x_3 + 1,341x_2x_3 \quad (4)$$

$$HV = 793,032 + 704,128x_1 - 423,297x_2 + 112,166x_3 + 111,264x_1x_2 + 1249,743x_1x_3 - 1750,41x_2x_3 \quad (5)$$

где X_1 - объемная доля B_4C в контейнере; X_2 - объемная доля исходного металлического порошка в контейнере; X_3 - пустота.

Анализ полученных результатов свидетельствует, что уменьшение степени заполнения контейнера порошковой смесью, повышает равномерность и стабильность ДЛ, а увеличение объемной доли обрабатываемого порошка в смеси снижает толщину и равномерность диффузионных слоев, но повышает производительность. Оптимальные параметры процесса ДЛМП в ППС следующие: степень заполнения контейнера порошковой смесью 60...75 %, объемная доля обрабатываемого порошка 50...70 % объема смеси.

Изучение различных насыщающих порошковых сред для ДЛМП в ППС позволило установить возможность и эффективность применения расходуемых насыщающих сред.

Сущность технологии ДЛМП в расходуемых ППС заключается в том, что необходимое количество ЛЭ в насыщающей порошковой смеси определяют в зависимости от степени усвоения по формуле

$$M_{\text{н.л.э.}} = \frac{M_{\text{о.п.}} \cdot K_{\text{н.л.э.}}}{K_y}, \quad (6)$$

где $M_{\text{н.л.э.}}$ - количество необходимого легирующего элемента, кг

$M_{\text{о.п.}}$ - количество обрабатываемого порошка, кг

$K_{\text{н.л.э.}}$ - количество легирующего элемента в обработанном порошке, необходимое для придания требуемого комплекса свойств

K_y - коэффициент степени усвоения, определяемый предварительным экспериментом, при этом

$$K_y = \frac{K_{\text{О.П.}}}{K_{\text{Н.С.}}}, \quad (7)$$

где $K_{\text{О.п.}}$ - содержание легирующего элемента в металлическом порошке после экспериментальной обработки, (% масс.);

$K_{н.с.}$ – содержание легирующего элемента в рабочем объеме контейнера до экспериментальной обработки, (% масс.).

В результате выполненных исследований определены коэффициенты степени усвоения В, Мп, и Si, при ДЛ стальных и чугунных порошков. Эффективность применения расходуемых насыщающих сред обусловлено отсутствием необходимости в трудоемкой операции разделения компонентов порошковой смеси после обработки, увеличением производительности, возможностью заранее (до начала процесса диффузионного легирования) прогнозировать количество диффузионно-введенного легирующего элемента.

Регенерируемые насыщающие среды являются многоразовыми, так как за счет регенерации могут быть использованы до 5-10 раз, кроме того, они могут быть получены из легкодоступных и дешевых компонентов (оксидов ЛЭ) алюмотермическим способом.

Общими технологическими особенностями ДЛМП в регенерируемой и расходуемой ППС являются:

- осуществление регулирования процессом ДЛ варьированием степени заполнения контейнера и соотношения компонентов порошковой смеси;
- значительное уменьшение влияния количества диффузионно-введенных ЛЭ на технологические свойства получаемых порошков;
- нахождение оптимальных температур и времени обработки в интервалах 0,55...0,75 $T_{пл}$ (материала основы) и 1,0...2,0 часа соответственно.

На основе результатов исследований разработаны конструкции установок различной производительности по получению ДЛ сплавов для защитных покрытий.

В пятой главе освещается область применения защитных покрытий из ДЛ сплавов. Выполнен расчет экономической эффективности применения ДЛМП в ППС для получения сплавов для защитных покрытий.

Получение ДЛ-сплавов из стружечных отходов СЧ 20, ИЧХ28Н2, 12Х18Н9 и порошка ПР-Х18Н9 по разработанному технологическим процессам ДЛ Мп, В; и Si позволяют получать покрытия по свойствам не уступающие покрытиям из серийно выпускаемых материалов (рис. 4). Применение ДЛ-сплавов для восстановления быстроизнашиваемых деталей штамповой оснастки в условиях ОАО «МПЗ» позволяет снизить потребность в них более чем в два раза (табл. 3). На ОАО "МПЗ" создан участок по восстановлению с упрочнением быстроизнашиваемых деталей штамповой оснастки, для которого спроектирована, изготовлена установка ДЛМП в ППС рис. 5.

Технико-экономические показатели
восстановления ДЛ сплавами деталей штамповой оснастки на ОАО "МПЗ"

№ пп	Наплавляемые детали штамповой оснастки линии Л-30 для изготовления колец подшипников	Ручная дуговая наплавка электродом ЭН-60М		Плазменная наплавка ДЛ-порошками	
		Требуемое кол-во деталей штамповой оснастки на годовую программу выпуска, шт.	Принятая стойкость до замены, шт. обработанных заготовок	Требуемое кол-во деталей штамповой оснастки на годовую программу выпуска, шт.	Принятая стойкость до замены, шт. обработанных заготовок
1	Нож неподвижный: 1334-4005/1; 1334-4005/1-01; 1334-4005/1-02; 1334-4005/1-03	168,3	6000	21,0	48000
2	Нож подвижный: 1334-4005/2; 1334-4005/2-01; 1334-4005/2-02; 1334-4005/2-03	168,3	6000	24,6	41000
3	Держатель: 1334-4005/4; 1334-4005/4-01; 1334-4005/4-02; 1334-4005/4-03	33,6	3000	16,8	60000
4	Пуансон прошивной Ø37	336,6	3000	84,2	12000
5	Пуансон прошивной Ø50	336,6	3000	101,0	10000

Наплавка покрытий сплавами, полученными ДЛ в расходных ППС, плужных лемехов, как показали полевые испытания, позволила повысить их срок службы, эксплуатационные характеристики, качество обработки почвы, снизить расход горюче-смазочных материалов. Применение для упрочнения наплавочных сплавов полученных по разработанной технологии ДЛМП в ППС из чугуновых стружечных отходов позволило значительно (на 25%) снизить стоимость их упрочнения (табл 4).

Технико-экономические показатели использования ДЛ сплавов
для наплавки плужного лемеха П-702

Наименование показателя	Ед. изм.	Материал рабочей части лезвия		
		«Сор-майт»ПГ-С1	ИЧХ28Н2, ДЛ в неподвижной смеси	ИЧХ28Н2, ДЛ в подвижной смеси
Стоимость 1 кг порошка	тыс. руб.	9-10	7,4	1,8
в том числе:				
Стоимость сырья	руб.	–	208	208
Стоимость диффузионного легирования	руб.	–	7200	1600
Затраты на упрочнение наплавкой 1 лемеха	руб.	2000	1500	1500
Стоимость упрочненного лемеха	руб.	9600	8840	8280
Выработка лемеха на супесчаных почвах	га	22-24	23-25	23-25
Пахотный фонд Витебской области	га	240 000		
Годовая потребность Витебской области в плужных лемехах	шт.	10000-11000	9600-10450	9600-10450
Годовой экономический эффект от применения упрочненных лемехов	тыс. руб.	26000-36000	39000-47000	45500-52500

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обнаружен, изучен и практически реализован в оборудовании и технологии эффект ускорения диффузионного легирования металлических порошков в ППС, обусловленный наряду с известными факторами интенсификации тепло-массопереноса и сорбционного взаимодействия наличием ускорения диффузионных процессов в легируемом порошке и насыщающей смеси за счет многократной пластической деформации и рекристаллизации поверхностных слоев порошковых частиц. В результате скорость диффузионного легирования металлического порошка бором возрастает в 8-10 раз, а кремнием и марганцем в 4-5 раз [1, 2, 3, 5, 6, 8, 11].

2. Изучено влияние постоянной и циклической пластической деформации на протекание диффузионных процессов на специальных модельных образцах и металлических порошках. Установлена интенсификация диффузионных процессов для случая циклической пластической деформации по сравнению с постоянной. Она обусловлена взаимодействием атомов легирующих элементов с дефектами кристаллической структуры (вакансий, дислокаций, границ блоков и зерен), плотность которых резко возрастает, а так же циклическими высокотемпературными структурными превращениями по рекристаллизационному механизму. Установлено, что расчетные контактные давления в поверхностных слоях порошка в подвижной смеси при температурах обработки превосходят предел текучести сплава. При этом размер зерна в поверхностной деформируемой зоне

порошка уменьшается в 4-6 раз, а плотность дислокаций возрастает на 40-60 % [2, 6, 8].

3. Установлено, что предварительное окисление стального порошка до толщины оксидной пленки 4-6 мкм при температуре 500..600°C в течение 25..35 минут позволяет ускорить процесс диффузионного легирования бором на 10-15% за счет протекания хемосорбционных процессов на поверхности порошковых частиц и увеличения удельной площади этой поверхности. Увеличение толщины оксидной пленки более 6 мкм ведет к формированию барьерного слоя, снижающего скорость диффузионного легирования [7].

4. Разработана и оптимизирована технология получения диффузионно-легированных материалов для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях, получаемых вращением цилиндрического герметизируемого контейнера в рабочем пространстве печи. Причем для получения псевдокипящего слоя степень заполнения контейнера рабочей смесью должна быть не более 60%. Температура не должна превышать 0,55-0,75 $T_{пл}$ материала обрабатываемого порошка, время обработки 1,5-2,5 часа. Повышение температуры и времени легирования нецелесообразно, т.к. уменьшается интенсифицирующий эффект, при температурах выше $T_{РЕК}$ влияние деформационных и рекристаллизационных процессов на диффузионный массоперенос снижается [1, 3, 25].

5. На основе проведенных исследований разработан ряд установок и технологий диффузионного легирования металлических порошков в расходоуемых насыщающих смесях. Созданные установки имеют производительность от 0,3 до 10 кг порошка в час и предназначены для различных условий производства. Для различных расходоуемых насыщающих смесей определен коэффициент степени усвоения легирующего элемента, составляющий для различных легирующих элементов 0,4-0,6, что позволяет предварительно рассчитывать количество диффузионно-вводимого элемента. [9, 14, 24].

6. Выполненный комплекс исследований позволил разработать технологии получения диффузионно-легированных порошков и покрытий из них. Разработана технология получения порошков из чугуной стружки и наплавленных слоев из них на плужных лемехах, позволяющие снизить затраты на упрочнение лемеха на 25% по сравнению с применением ПР-С1. Расчетный, ожидаемый годовой экономический эффект для сельхозпредприятий Витебской области составляет 45-52 млн. рублей. На ОАО «Минский подшипниковый завод» создан участок по выпуску диффузионно-легированных стальных порошков для упрочнения штамповой оснастки. В результате потребность в деталях штамповой оснастки снизилась по сравнению с заводским процессом в 1,9...7,5 раза для различного инструмента [3, 10, 14, 21].

Соискатель выражает глубокую признательность к. т. н. В.М. Константинову за постоянные консультации, помощь и поддержку при выполнении исследований и всей диссертационной работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в научных журналах

1. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Штемпель О.П. Синтез наплавочных порошков диффузионным легированием// Ремонт, восстановление, модернизация. –2002.–№5.– с.15-18.

2. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Штемпель О.П. Диффузионное легирование металлических порошков для защитных покрытий// Вестник ПГУ. Серия Б – 2002. – Т1. №2.– с. 49-56.

Статьи в сборниках трудов

3. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Штемпель О.П. Ресурсо-энергосберегающая технология получения наплавочных диффузионно-легированных порошковых сплавов. Сварка и родственные технологии: Республиканский межведомственный сб. науч. тр.–2001.–№4.–с. 57-60.

4. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Штемпель О.П. Пути повышения коррозионной стойкости плазменных слоев из самофлюсующихся сплавов на железной основе//Машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 18.– Мн.: УП "Технопринт", 2002.– с.226-232.

5. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Штемпель О.П. Изучение диффузионного легирования наплавочных порошков в подвижных смесях.// Защитные покрытия, сварка и контроль: Сб. докл. 33-о межгосударственного семинара, Минск, 25 апреля 2002г.– с. 19-21.

6. Константинов В.М., Штемпель О.П. Изучение особенностей диффузионного легирования металлических порошков в подвижных порошковых смесях. Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. научн. тр.–УП "Технопринт", 2001.– с. 88-93.

7. Штемпель О.П., Соколова Н.В. Исследование интенсификации диффузионного легирования микрообъектов. Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. научн. тр.–УП "Технопринт", 2001.– с. 155-158.

Материалы конференций

8. Константинов В.М., Штемпель О.П. Диффузионное легирование металлических порошков для защитных покрытий в подвижных смесях.// Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: Мат. докл. 5-й МНТК, Минск "Тонпик", 18-19 сентября 2002г.– с. 196-198.

9. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Лисовский А.Л., Штемпель О.П., Дудкин Б.В., Войтехович В.В. Гибкий производственный модуль для восстановления различных быстроизнашиваемых деталей плазменной наплавкой. Сварка и родственные технологии в современном мире: Мат. МНТК, 29-30 мая 2002г.– Том 2.– СПбГТУ г. Санкт-Петербург.– 2002.– с.56.

10. Константинов В.М., Штемпель О.П., Жабуренок С.Н. Разработка диффузионно-легированных порошков из стружки для упрочнения рабочих органов

почвообрабатывающих инструментов. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сборник.– Новополоцк, 1999.– с. 32-34.

11. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Штемпель О.П. Особенности получения диффузионно-легированных порошков в динамических смесях. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сборник.– Новополоцк, 1999.– с. 48-51.

12. Константинов В.М., Штемпель О.П. Восстановление электродов для контактной сварки дисперсионно-упрочненными материалами. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сборник.– Выпуск №3.– Новополоцк, 1997.– с. 60-61.

13. Штемпель О.П. Получение диффузионно-легированных порошков в динамических смесях. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сборник.– Выпуск №3.– Новополоцк, 1997.– с. 26-27.

14. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Лисовский А.Л., Штемпель О.П. Войтехович В.В., Соболев С.А. Комплекс оборудования для восстановления и упрочнения быстроизнашиваемых деталей диффузионно-легированными порошками// Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сборник.– Минск.– УП "Технопринт".– 2003.–с. 172-174.

Тезисы докладов на НТК

15. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Иванов В.П., Сороговец В.И., Штемпель О.П. Изучение триботехнических характеристик пары трения толкатель - восстановленный наплавкой распределительный вал// Износостойкость машин: Тез. докл. 2-й МНТК.–1996.–с. 7.

16. Штемпель О.П., Сороговец В.И. К вопросу о химико-термической обработке порошковых материалов на железной основе// 22-ие Гагаринские чтения: Тез. докл. 2-6 апреля 1996г./ М., 1996.–ч.3.–с. 132-133.

17. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Сороговец В.И., Штемпель О.П. Исследование закономерностей получения и нанесения диффузионно-легированных самофлюсующих порошков// Современные направления развития производственных технологий и робототехника: Материалы МНТК, Могилев, 22-23 апреля 1999г.–с. 362.

18. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Снарский А.С., Штемпель О.П. Наплавленные боросодержащие инструментальные покрытия. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Тез. докл. респ. н.-т. конф.– Новополоцк, 1993.– с. 13.

19. Штемпель О.П. Изучение динамических смесей для борирования наплавочных порошков// 2-я республиканская научно-техническая конференция "Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин": Тематический сборник.– Выпуск №2.– Новополоцк, 1995.– с. 126.

20. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Снарский А.С., Сороговец В.И., Штемпель О.П. Применение шламовых отходов сталей в качестве сырья для производства композиционных пластин инструментального назначения. // 2-я республиканская научно-техническая конференция "Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин": Тематический сборник.– Выпуск №2.– Новополоцк, 1995.– с. 90.

21. Константинов В.М., Штемпель О.П., Жабуренок С.Н. Разработка экономно-легированного наплавочного материала для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий.// Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно- хозяйственной деятельности, разработку экономических и экологически чистых технологий прогрессивных методов обучения: Материалы МНТК.–ч.5.–Минск.–2000.–с.128.

22. Пантелеенко Ф.И., Штемпель О.П., Жабуренок С.Н. Технология получения наплавочного порошка из чугунной стружки.// Материалы международной 53-й НТК профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА.– Минск.–1999.–ч.2.– с. 126.

23. Штемпель О.П. Разработка эффективной технологии получения диффузионно-легированных порошков.// Материалы международной 53-й НТК профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА.– Минск.– 1999.–ч.2.– с. 147.

Патенты, заявки на изобретение

24. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Сороговец В.И., Штемпель О.П. Устройство для химико-термической обработки порошков. Заявка на получение патента Республики Беларусь № а20000218 от 9.03.2000г. МПК В22F1/100. Афіцыйны бюлетэнь/ Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.–2001.–№3.–с. 20.

25. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Штемпель О.П. Способ нанесения диффузионных покрытий на металлические порошки, преимущественно для наплавки. Заявка на получение патента РБ №970119 от 3.11.1997г. Патент №3207 от 24.09.1999г./ Дзярж. пат. камітэт.

26. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Штемпель О.П. Состав для борирования металлических порошков преимущественно на железной основе. Заявка на получение патента РБ № 950777 от 14.07.1995г. Патент №4255 от 3.09.2001г./ Дзярж. пат. камітэт.

27. Константинов В.М., Штемпель О.П., Жабуренок С.Н., Авмочкин Б.Г., Лисовский Д.А. Приспособление для трибологических испытаний. Заявка на получение патента РБ № u20010293 от 12.10.2001г. Патент №605 от 2.04.2002г. / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.