

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.791.92 : 621.81

МИРАНОВИЧ
Алексей Валерьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ В ПОСТОЯННОМ
МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2015

Работа выполнена в Белорусском государственном аграрном техническом университете

Научный
руководитель

Акулович Леонид Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология металлов» Белорусского государственного аграрного технического университета

Официальные
оппоненты:

Пантелеенко Федор Иванович, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, первый проректор Белорусского национального технического университета;

Лебедев Владимир Яковлевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией физики поверхностных явлений государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая
организация

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «26» июня 2015 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, ул. Б. Хмельницкого, 9, корп. 6, ауд. 419 б, тел. ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « 26 » мая 2015 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.03,
доктор технических наук, профессор



Девойно О.Г.

© Миранович А.В., 2015

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Потеря работоспособности агрегатов и узлов автотракторной и сельскохозяйственной техники обусловлена, в большинстве случаев, процессами изнашивания сопряженных поверхностей деталей. Около 80 % выбраковываемых деталей имеют износ цилиндрических поверхностей не более 0,6 мм на диаметр. Изношенные поверхности большинства таких деталей могут быть восстановлены в условиях ремонтных предприятий применением современных технологий, к числу которых относятся способы упрочнения и восстановления, основанные на использовании концентрированных потоков энергии.

Одним из наиболее производительных способов является электромагнитная наплавка (ЭМН) композиционными ферромагнитными порошками (ФМП), которая обладает такими достоинствами, как отсутствие специальной предварительной подготовки поверхности детали, незначительная зона термического влияния и высокая прочность сцепления покрытия с основным материалом детали. Это обусловило целесообразность применения ЭМН для упрочнения и восстановления пустотелых и нежестких деталей, а также отдельных рабочих поверхностей крупногабаритных деталей. Вместе с тем, такие недостатки, как разнотолщинность и невысокая сплошность покрытий не позволяют использовать ЭМН для упрочнения и восстановления поверхностей деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники, износ которых превышает 0,1 мм на диаметр.

Предшествующие исследования по устранению указанных недостатков были направлены на разработку технологических схем и создание устройств, обеспечивающих стабилизацию процесса нанесения покрытий посредством управляющих воздействий на электромагнитные и (или) конструктивные параметры устройств электромагнитной наплавки. Например, разработаны способы стабилизации процесса ЭМН за счет синхронизации воздействий импульсами электрического тока и магнитного поля в условиях фазового сдвига, а также автоматизации управления электрическим сопротивлением рабочего зазора, которые позволили улучшить качество покрытий. Однако практическая реализация этих технических решений существенно ограничена из-за усложнения конструкций электромагнитных систем устройств ЭМН, а также вследствие увеличения энергопотребления и снижения уровня электробезопасности.

В связи с этим разработка технологии упрочнения и восстановления деталей машин электромагнитной наплавкой в постоянном магнитном поле, реализуемой с помощью малогабаритных мобильных устройств на универсальном металлообрабатывающем оборудовании, является актуальной научной и практической задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь, утвержденным указом Президента Республики Беларусь от 22 июля 2010 г. № 378 (пункт 11 «Машиностроение», критические технологии – придание специальных свойств материалам и покрытиям).

Диссертационные исследования проведены в рамках:

– договора № 2/02.08.855 от 03.03.2002 г. между БГАТУ и Департаментом образования, науки и кадров Минсельхозпрода Республики Беларусь на проведение НИР «Повышение эффективности восстановления деталей машин сельскохозяйственного производства созданием гибкого производственного модуля на постоянных магнитах» (2002–2003 гг., № ГР 20022061);

– ГНТП «Новые материалы и технологии - 2010» (подпрограмма «Защита поверхностей», задание 1.57 «Разработать и внедрить технологический процесс нанесения защитных покрытий из композиционных ферропорошков с использованием электрических разрядов и энергии постоянных магнитов на детали сельскохозяйственной техники» (2006–2011 гг., № ГР 20065383);

– ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», задание 5.1.16 «Развитие основ процессов комбинированного воздействия концентрированными потоками энергии, создание технологий обработки и модифицирования машиностроительных материалов» (2012–2013 гг., № ГР 20123109).

Цель и задачи исследования

Целью исследований является разработка технологии упрочнения и восстановления деталей машин электромагнитной наплавкой в постоянном магнитном поле, обеспечивающей повышение физико-механических свойств и износостойкости обрабатываемых поверхностей.

Для достижения указанной цели были определены следующие задачи:

- теоретически и экспериментально обосновать механизм формирования цепочек-микроэлектродов из частиц композиционного ферромагнитного порошка под воздействием внешнего магнитного поля (переменного, постоянного) в рабочем зазоре устройства электромагнитной наплавки;
- на основе теоретических исследований разработать методику определения конструктивных параметров магнитной системы, позволяющую устанавливать зависимости величин магнитной индукции в рабочем зазоре устройства электромагнитной наплавки от размеров постоянного магнита;
- на основе экспериментальных исследований разработать математико-статистические модели, устанавливающие зависимости производительности процесса наплавки и износостойкости формируемых покрытий от технологических параметров электромагнитной наплавки в постоянном магнитном поле;

- установить взаимосвязь показателей качества (сплошность, пористость, разнотолщинность) формируемых покрытий с технологическими параметрами электромагнитной наплавки, исследовать износостойкость и физико-механические свойства (микроструктура, микротвердость) покрытий, полученных электромагнитной наплавкой в постоянном магнитном поле;
- на основе результатов исследований разработать и внедрить в производство технологию упрочнения и восстановления деталей машин электромагнитной наплавкой в постоянном магнитном поле.

Научная новизна

Научно обоснован механизм формирования цепочек-микроэлектродов из частиц композиционного ферромагнитного порошка под воздействием внешнего магнитного поля в рабочем зазоре устройства электромагнитной наплавки. Показана зависимость стабильности формирования и устойчивости цепочек-микроэлектродов, развития электрических разрядов в процессе наплавки от сил прижима частиц ферромагнитного порошка к обрабатываемой поверхности, наибольшую стабильность которых обеспечивает постоянное магнитное поле.

Предложена методика определения конструктивных параметров магнитной системы на основе постоянного магнита в устройстве электромагнитной наплавки, учитывающая параметры рабочей зоны устройства и технологическую схему наплавки, что позволило определить требуемую величину магнитной индукции в рабочем зазоре, стабилизирующую процесс нанесения покрытий.

Разработаны математико-статистические модели, отражающие результаты экспериментальных исследований и устанавливающие зависимости производительности процесса и износостойкости формируемых покрытий от технологических параметров электромагнитной наплавки в постоянном магнитном поле. Определены оптимальные технологические режимы процесса электромагнитной наплавки.

Экспериментально показано, что использование постоянного магнитного поля в процессе электромагнитной наплавки позволяет получать равномерное распределение расплава материала ферромагнитных порошков на основе железа по обрабатываемой поверхности и однородность наплавленных слоев по толщине покрытий, что значительно повышает физико-механические свойства и износостойкость формируемых покрытий. На основе математико-статистического моделирования установлены зависимости интенсивности изнашивания покрытий при трении качения с проскальзыванием, определены рациональные области работы исследуемых трибосопрежений.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований суперпозиций импульсов электрических разрядов и внешнего магнитного поля в рабочем зазоре устройства электромагнитной наплавки, устанавливающие взаимосвязь сил прижима цепочек-микроэлектродов к обрабатываемой поверхности с

характеристиками внешнего магнитного поля (амплитудная, фазовая составляющие магнитной индукции), что позволило установить механизм формирования цепочек-микроэлектродов из частиц ферромагнитного порошка под воздействием внешнего магнитного поля и обосновать целесообразность использования постоянного магнитного поля в процессе наплавки применением магнитотвердых материалов.

2. Результаты численного расчета и экспериментальных исследований конструктивных параметров магнитной системы на основе постоянного магнита в устройстве электромагнитной наплавки, позволившие установить рациональную конструкцию магнитной системы в зависимости от параметров рабочей зоны устройства и технологической схемы наплавки, определить оптимальные размеры постоянного магнита, обеспечивающего требуемую величину магнитной индукции в рабочем зазоре.

3. Математико-статистические модели зависимости производительности процесса и износостойкости покрытий от технологических параметров электромагнитной наплавки в постоянном магнитном поле, позволившие определить оптимальные значения технологических режимов, обеспечивающих стабильность процесса наплавки.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров электромагнитной наплавки в постоянном магнитном поле на показатели качества формируемых покрытий из ферромагнитных порошков на основе железа, позволившие установить диапазоны значений технологических параметров наплавки, которые обеспечивают максимальную сплошность и минимальные объемную пористость и разнотолщинность нанесенных покрытий.

5. Математико-статистические модели, устанавливающие зависимости интенсивности изнашивания покрытий, полученных электромагнитной наплавкой в постоянном магнитном поле, при трении качения с проскальзыванием от нагрузки, температуры смазочного материала, относительной скорости качения и концентрации абразивных частиц в смазочном материале, позволившие определить рациональные области работы исследуемых трибосопряжений. Результаты экспериментальных исследований износостойкости покрытий, позволившие обоснованно рекомендовать материалы покрытий для работы в условиях трения скольжения и трения качения с проскальзыванием.

Личный вклад соискателя ученой степени

Лично соискателем разработаны научное и экспериментальное обоснование характера магнитного поля в рабочем зазоре устройства электромагнитной наплавки, методики исследований и расчета магнитных систем, математико-статистические модели, устанавливающие зависимости производительности процесса наплавки и износостойкости формируемых покрытий от технологических режимов электромагнитной наплавки в постоянном магнитном поле, математико-статистические модели, устанавливающие зависимости интенсивности изнашивания покрытий при трении качения с проскальзыванием от параметров, характеризующих условия работы исследуемых трибосопря-

жений. Проработка направления и методик исследований, обсуждение их результатов и формулирование выводов проводились совместно с научным руководителем доктором техн. наук, профессором Л.М. Акуловичем. В разработке конструкции магнитной системы для экспериментальной установки и ее апробации принимал участие доктор техн. наук, профессор [Кожуро Л.М.] Программа расчета конструктивных параметров магнитных систем устройства электромагнитной наплавки на персональном компьютере составлена Немизанским Ю.В. Соавторы публикаций оказывали помощь в проведении экспериментальных исследований по изданным работам.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты работы были доложены и обсуждены на следующих международных и республиканских научно-технических конференциях: «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (Минск, 2001, 2009, 2013), «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Ялта, 2004), «Современные методы проектирования машин» (Минск, 2004), «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» (Новополоцк, 2007), «Энергосберегающие технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве» (Минск, 2008), «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях» (Киев, 2009), «Проблеми технічного сервісу сільськогосподарської техніки» (Харьков, 2009), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2012), «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии» (Гродно, 2013), «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2014), «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Минск, 2014), «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК» (Минск, 2014).

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе 4 статьи общим объемом 2,79 авторских листа в рецензируемых научных журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь; 5 статей в сборниках научных трудов; 6 статей в сборниках материалов конференций; 2 тезиса доклада; получено 3 патента Республики Беларусь на изобретение и 1 патент Республики Беларусь на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 222 страницы. Она содержит 136 страниц основного текста, 64 рисунка на 30 страницах, 23 таблицы на 12 страницах, 10 приложений, библиографический список из 173 источников, включая 21 публикацию автора.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении обоснована актуальность и новизна диссертации, перспективность поставленных в работе научно-исследовательских задач.

В общей характеристике работы представлены связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами, цель и задачи исследования, научная новизна, положения, выносимые на защиту, личный вклад соискателя ученой степени, апробация диссертации, опубликование результатов диссертации, структура и объем диссертации.

В первой главе рассмотрены достоинства и недостатки применяемых в ремонтном производстве технологий упрочнения и восстановления рабочих поверхностей деталей, использующих энергии электрического и магнитного полей. На основании анализа опубликованных работ, посвященных исследованию процесса ЭМН композиционными ферромагнитными порошками, выявлено, что наибольшее влияние на производительность наплавки и качество формируемых покрытий оказывают параметры электрического и магнитного полей. Установлено, что существующие сложности по обеспечению сплошности и снижению разнотолщинности покрытий связаны с реализацией способов управления переменными электрическим и внешним магнитным полями, для которых требуется дополнительное дорогостоящее оборудование, усложняющее конструкцию электромагнитных систем и снижающее их уровень электробезопасности. Поэтому анализ исследований, посвященных повышению эффективности процесса ЭМН, позволил предположить, что формирование качественных покрытий возможно изменением конструктивных параметров электромагнитных систем устройств ЭМН с учетом степени влияния электрического и внешнего магнитного полей на частицы ФМП в рабочей зоне.

По результатам анализа сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена установлению механизма формирования цепочек-микроэлектродов из частиц ферромагнитного порошка под воздействием внешнего магнитного поля в рабочей зоне устройства ЭМН.

Обоснована целесообразность использования инверторного сварочного источника с регулируемыми параметрами электрических импульсов вместо сварочных выпрямителей. Исследовано влияние разнотипных источников технологического тока (ИТТ) на стабильность процесса ЭМН, его производительность, сплошность и разнотолщинность покрытий.

Стабильность процесса наплавки порошка Fe-2%V (ГОСТ 9849 - 86) на установке модели ЭУ-5 с ИТТ моделей Invertec V270 T и ВД-306 определялась осциллографическими исследованиями технологического тока с помощью осциллографа С1-77, самопишущего прибора Н-307/1 и частотомера ЧЗ-54, математико-статистической обработкой экспериментальных значений параметров средствами стандартного пакета Excel Microsoft Office.

Толщина и сплошность покрытий оценивалась на шлифах поперечного среза при помощи светового микроскопа Mef-3 (фирма «Reichert-Jung»). Разнотолщинность покрытий определялась по разности максимальной и мини-

мальной местных толщин покрытий образца. Сплошность рассчитывалась как отношение длины участков с покрытием к общей протяженности исследуемого участка выраженное в процентах. Производительность электромагнитной наплавки определялась по приращению массы наплавляемого материала в единицу времени.

В результате выполненных исследований установлено, что инверторный сварочный источник модели Invertec V270 T в сравнении со сварочным выпрямителем модели ВД-306 позволяет уменьшить на 5,7–14,8% отклонения силы разрядного тока от среднего значения (значение коэффициента вариации силы тока k_{vI} на 8,6 % меньше для инверторного ИТТ). Производительность ЭМН и средняя сплошность покрытий повышаются на 2,5 %, а средняя разнотолщинность покрытий уменьшается на 9,0 % (значения коэффициентов вариации производительности k_{vI} , сплошности k_{vG} и разнотолщинности k_{vP} покрытий соответственно на 13,9, 25,1 и 17,0 % меньше для инверторного ИТТ). Поэтому в дальнейших исследованиях инверторный сварочный источник модели Invertec V270 T был принят в качестве базового ИТТ.

Для описания механизма формирования цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре устройств ЭМН в соответствии с теорией электромагнетизма использовались основные зависимости для магнитных сил, действующих на частицы ФМП, с учетом переменных составляющих внешнего магнитного поля. В результате получена формула для определения величины силы прижима $f_{ц}$ цепочки-микроэлектрода (рисунок 1, а) к обрабатываемой поверхности:

$$f_{ц} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^2}{\mu(L_i + \Delta_i)} b_i K B_{vi}^2, \quad (1)$$

где $B_{vi} = B_{mi} \cos \omega t$ – индукция внешнего переменного магнитного поля на границе i -й частицы порошка в рабочем зазоре, Тл;

B_{mi} – амплитуда индукции магнитного поля на границе i -й частицы порошка в рабочем зазоре, Тл;

ω – круговая частота магнитного поля, рад/с;

t – время, с;

n – количество частиц ФМП в цепочке-микроэлектроде;

L_i – расстояние от границы i -й частицы до оси поверхности, м;

Δ_b, b_i – размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего i -ю частицу ФМП, м;

μ – магнитная проницаемость материала порошка, Гн/м;

K – магнитная восприимчивость материала порошка.

Показано, что гармонический характер изменения величины магнитной индукции B_{vi} определяет периодическое воздействие силы прижима $f_{ц}$ на цепочки-микроэлектроды в рабочем зазоре устройств ЭМН.

В результате решения задачи по оценке влияния неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре на стабильность формирования и устойчивое положение цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП

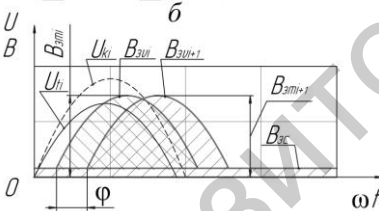
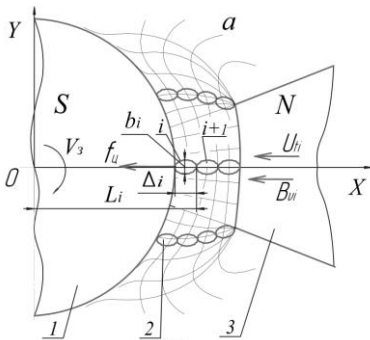
получена формула, учитывающая амплитудную и временную составляющие (рисунок 1, б) индукции с достаточной точностью

$$\frac{B_{3vi+1} - B_{3vi}}{B_{3vi}} = \frac{B_{3mi+1} - B_{3mi}}{B_{3mi}} + \frac{\varphi}{\text{tg}\omega t}, \quad (2)$$

где B_{3vi} , B_{3vi+1} – индукция внешнего магнитного поля в точках (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) цепочек-микроэлектродов, Тл;

B_{3mi} , B_{3mi+1} – амплитуда индукции внешнего магнитного поля в точках (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) цепочек-микроэлектродов, Тл;

φ – сдвиг по фазе между векторами индукций B_{3vi} и B_{3vi+1} , рад.



1 – заготовка; 2 – частица порошка; 3 – полюсный наконечник

Рисунок 1. – Схема действия силы прижима f_u на цепочку-микроэлектрод в рабочем зазоре устройства ЭМН (а), временная диаграмма напряжений источников питания электромагнита (U_{ki}) и технологического тока (U_{ii}), индукций в рабочем зазоре (б)

Выполненная численная оценка неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре показала достаточное согласие с экспериментальными данными. Определено, что наибольшее влияние на силу прижима цепочки-микроэлектрода к обрабатываемой поверхности оказывают амплитудная (до 9 %) и фазовая (до 25 %) составляющие магнитной индукции.

Экспериментальное подтверждение влияния неоднородности переменного внешнего магнитного поля на механизм формирования цепочек-микроэлектродов и прохождения по ним электрических разрядов получено с помощью съемки камерой модели СКС-1М в рабочем зазоре установки ЭМН модели ЭУ-5, осциллографических исследований синхронности следования импульсов напряжений источника питания электромагнита (U_{ki}) и ИТТ модели Invertec V270 T (U_{ii}), измерения величины магнитной индукции с помощью тесламетра Т-10/1 со специальными датчиками Холла. Анализ полученных результатов показал, что на частотах следования импульсов напряжения 12,5 и 50 Гц при индукции магнитного поля в рабочем зазоре 0,35–0,9 Тл не обеспечивается устойчивое

положение цепочек-микроэлектродов, что дестабилизирует формирование и развитие электрических разрядов. Установлено, что частота повторяемости

участков импульсной нестабильности процесса ЭМН в 2,2–2,85 раза меньше для ИТТ и электромагнита, питаемого напряжением частотой 12,5 Гц.

На основании теоретических и экспериментальных исследований предложено синхронизацию воздействий электрическими разрядами и внешним магнитным полем в рабочем зазоре устройства ЭМН обеспечить посредством использования постоянного магнита вместо электромагнита.

Для определения значений величин индукции постоянного магнитного поля в рабочем зазоре и плотности разрядного тока, обеспечивающих наибольшую сплошность G формируемых покрытий из порошка Fe-2%V в процессе ЭМН, проводились эксперименты с применением ротatableльного униформ-планирования.

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрицам планирования, выполнялась средствами стандартного пакета Excel Microsoft Office, а расчеты оптимальных параметров осуществлялись посредством математического пакета MathCAD.

В результате выполненных исследований получена математико-статистическая модель, устанавливающая зависимость сплошности покрытий G от магнитной индукции $X_1(B_{zc})$ в рабочем зазоре и плотности тока $X_2(i)$:

$$Y = G = 90,99 + 6,286 \cdot X_1 + 4,245 \cdot X_2 - 2,417 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,366 \cdot X_1^2 - 0,573 \cdot X_2^2. \quad (3)$$

На основании выполненных расчетов определено, что максимальная сплошность покрытий ($G = 95,1\%$) обеспечивается при величине магнитной индукции в рабочем зазоре $B_{zc} = 0,7$ Тл и плотности разрядного тока $i = 1,95$ А/мм². Установлено, что большую стабильность процесса ЭМН (значения коэффициентов вариации плотности тока $k_{vi} = 26,1\%$ и сплошности покрытий $k_{vG} = 11,4\%$) обеспечивают магнитотвердые материалы при величине рабочего зазора 2,0 мм, высоте рабочего торца полюсного наконечника 5,7 мм и угле охвата 12°.

Разработана методика определения конструктивных параметров магнитной системы устройства ЭМН, учитывающая параметры рабочей зоны устройства (форму, размер и материал заготовки детали, магнитопровода, арматуры, полюсных наконечников), технологическую схему наплавки (одно- или многополюсные схемы обработки). В соответствии с методикой выполнялись: численный расчет с применением компьютерной программы, разработанной на основе языка программирования «Visual Basic 6.0», позволяющей установить рациональную конструкцию магнитной системы; экспериментальные исследования для получения математико-статистической модели, устанавливающей зависимости магнитной индукции в рабочем зазоре B_{zc} от длины L_m и ширины R_m постоянного магнита ($B_{zc} = f(L_m)$ при $R_m = \text{const}$ и $B_{zc} = f(R_m)$ при $L_m = \text{const}$); определение оптимальных параметров конструкции магнитной системы.

Выполненные расчеты показали, что для обработки цилиндрических поверхностей заготовок деталей диаметром (d_s) 30–80 мм и длиной (L_s) 120–250 мм рациональной конструкцией является разомкнутая магнитная система

на основе постоянного магнита Е-образной формы из сплава ЮНДК24Т ГОСТ 17809-72 с расположением одноименных полюсов под углом 180° (рисунок 2).

В результате выполненных экспериментов по матрице центрального композиционного ротатбельного равномер-плана второго порядка получена зависимость параметра оптимизации B_{zc} от факторов и $X_1(L_M)$ и $X_2(R_M)$ в виде математико-статистической модели

$$Y = B_{zc} = -5,980 + 0,615 \cdot X_1 + 1,202 \cdot X_2 - 0,051 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,018 \cdot X_1^2 - 0,0145 \cdot X_2^2. (4)$$

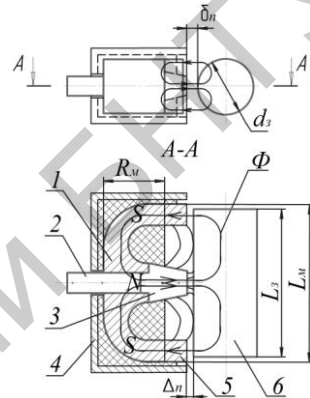
Учитывая технические ограничения ($95 \text{ мм} < X_1 < 125 \text{ мм}$; $30 \text{ мм} < X_2 < 40 \text{ мм}$; $Y = B_{zc} = 0,7 \text{ Тл}$) определены оптимальные значения геометрических размеров постоянного магнита: $L_M = 125 \text{ мм}$, $R_M = 36 \text{ мм}$.

Проверка адекватности полученных результатов расчета показала что, расхождение расчетных значений с данными экспериментальных исследований составляет 5–8 %.

Для реализации технологии упрочнения и восстановления деталей разработана и изготовлена установка модели УНП 1 для электромагнитной наплавки на базе станка токарной группы. В результате проведенных экспериментов на установке выявлено, что в процессе ЭМН колебание температуры нагрева постоянных магнитов в пределах $30\text{--}80^\circ\text{C}$ вызывает изменение магнитной индукции в рабочем зазоре ΔB_{zc} в диапазоне $0,05\text{--}0,10 \text{ Тл}$, а среднее значение температурного коэффициента составляет $\alpha_B = 0,018\% / 1^\circ\text{C}$, что является приемлемым для обеспечения стабильности процесса ЭМН.

Третья глава посвящена установлению зависимости производительности процесса наплавки и износостойкости формируемых покрытий от технологических параметров ЭМН в постоянном магнитном поле, оптимизации технологических режимов по критериям производительности и износостойкости.

На основании теоретических и экспериментальных исследований установлены ранжированные технологические параметры ЭМН. В качестве выходных параметров приняты производительность процесса Q и относительная износостойкость покрытия ϵ . Независимыми переменными являлись следующие факторы: плотность разрядного тока i , А/мм^2 ; величина рабочего зазора δ , мм; скорость подачи S , мм/об; окружная скорость заготовки V , м/с; расход ФМП q , г/с·мм², а постоянными – магнитная индукция в рабочем зазоре $B_{zc} = 0,7 \text{ Тл}$; размер зерен ФМП $\Delta = 240\text{--}320 \text{ мкм}$; расход рабочей жидкости



- 1 – постоянный магнит;
- 2 – сердечник;
- 3 – полюсный наконечник;
- 4 – экранирующий корпус;
- 5 – плоский наконечник;
- 6 – заготовка

Рисунок 2. – Схема конструкции магнитной системы устройства ЭМН

$q = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ дм}^3 / (\text{с} \cdot \text{мм}^2)$. В качестве рабочей жидкости использовался 5%-й раствор эмульсола Э2 в воде. Все опыты рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Для ЭМН использовались легированные порошки на основе железа Fe-Ti и Fe-2%V (ГОСТ 9849-86), высокоуглеродистый порошковый сплав ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75). Материал образцов – сталь 45 ГОСТ 1050-88.

Нанесение покрытий на поверхности цилиндрических образцов выполнялось на установке модели УНП 1. Износостойкость покрытий исследовалась в условиях трения скольжения со смазочным материалом на машине трения модели 2070 СМТ-1 по стандартной методике по схеме «диск - колодка».

В результате выполненных экспериментов с применением центрального композиционного ротатбельного равномер-плана получены математико-статистические модели, устанавливающие зависимости параметров оптимизации от технологических факторов ЭМН. Установлено, что по степени влияния на производительность процесса Q технологические режимы ЭМН можно выстроить в ряд $Y_1 = Q: V \rightarrow S \rightarrow i \rightarrow q \rightarrow \delta$, а по относительной износостойкости ε – в ряд $Y_2 = \varepsilon: S \rightarrow i \rightarrow V \rightarrow q \rightarrow \delta$. Анализ зависимостей показал, что условия оптимальности для наиболее значимых факторов V , S и i ($0,05 < V < 0,06$ м/с, $0,18 < S < 0,28$ мм/об и $1,7 < i < 1,9$ А/мм²) позволяют обеспечить стабильность процесса наплавки с производительностью в пределах 212,5–225 мг/мин и относительной износостойкостью покрытий в пределах 1,9–2,3.

Оптимальные режимы ЭМН

Материал ФМП	Оптимальные значения факторов				
	i , А/мм ²	δ , мм	S , мм/об	V , м/с	q , г/(с·мм ²)
Fe-Ti	1,73	2,21	0,276	0,053	$2,86 \cdot 10^{-3}$
Fe-2%V	1,87	1,55	0,185	0,057	$2,95 \cdot 10^{-3}$
ФБХ 6-2	1,91	1,50	0,220	0,055	$2,86 \cdot 10^{-3}$

Определены оптимальные режимы процесса наплавки ферромагнитных порошков (таблица) с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона методом спирального покоординатного спуска.

Четвертая глава посвящена исследованию физико-механических свойств и износостойкости поверхностей с покрытиями.

Исследования проводились на цилиндрических образцах из стали 45 с покрытиями из порошков Fe-Ti, Fe-2%V и ФБХ-6-2, полученными ЭМН на установке модели УНП 1 на оптимальных режимах (таблица). Механическая обработка образцов с покрытиями производилась шлифованием на станке модели ЗБ12 кругами карбида кремния зеленого зернистостью 16–25.

Исследования макро- и микроструктуры выполнялись с использованием светового микроскопа Mef-3 (фирма «Reichert-Jung») и растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP (фирма «Carl Zeiss»). Рентгенофазовый анализ осуществлялся с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3 при величине нагрузки на индентор 0,49 Н. Объемная пористость покрытий определялась методом гидростатиче-

ского взвешивания.

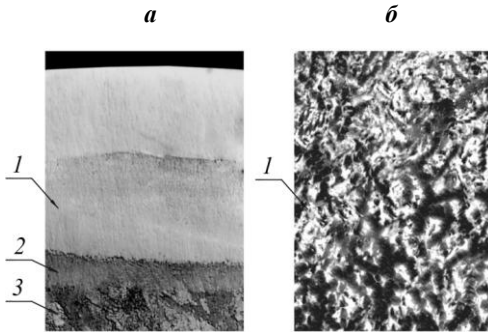
Триботехнические испытания образцов с покрытиями проводились в условиях изнашивания со смазочным материалом и смазочным материалом с частицами абразива при трении скольжения и трении качения с 10 %-м проскальзыванием на машине трения модели 2070 СМТ-1 в соответствии с ГОСТ 30480-97 и ГОСТ 23.224-86 по схемам «диск-колодка» (контртело из чугуна ХТВ ГОСТ 3185-74, смазочный материал – масло индустриальное И-Г-А-32 ГОСТ 14479.4-87) и «диск-диск» (контртело из стали ШХ15 ГОСТ 801-78 закаленное до твердости 60–62 HRC, смазочный материал – трансмиссионное масло ТМ-3-18 (ТАП-15В) ГОСТ 23652-79). Эталон – образец из стали 45 закаленный до твердости 52–54 HRC. Износ образцов с покрытиями и эталона определялся на оптическом длинномере ИЗВ-1.

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что наибольшее влияние на показатели качества формируемых покрытий оказывает плотность разрядного тока, при оптимальных значениях (в пределах 1,73–1,91 А/мм²) которого в процессе электромагнитной наплавки обеспечивается равномерное распределение по поверхности образцов расплава материала ферромагнитного порошка и однородность наплавленных слоев по толщине покрытий. Выявлено, что средние значения сплошности, объемной пористости и разнотолщинности покрытий, полученных ЭМН в постоянном магнитном поле на оптимальных режимах, находятся в пределах 91,2–98,7 %, 3,0–7,0 % и 22–48 мкм соответственно. Показано, что использование постоянных магнитов вместо электрических при ЭМН, позволяет снизить объемную пористость и разнотолщинность покрытий на 40,0–41,6 % и 33,3–59,3 % соответственно, несущественно увеличить сплошность покрытий на 2,0–3,4 %, обеспечить большую стабильность исследуемых параметров (значения коэффициентов вариации объемной пористости $k_{vПл}$, разнотолщинности $k_{vРт}$ и сплошности $k_{vГ}$ покрытий меньше соответственно на 25,3, 28,9 и 18,1 %).

В результате выполненных исследований макро- и микроструктуры покрытия из порошка ФБХ-6-2 (рисунок 3, а) установлено, что в наплавленных слоях отсутствуют дефекты в виде раковин и посторонних включений. Покрытие имеют микроструктуру мелкодисперсного строения (рисунок 3, б). Рентгенофазовым анализом установлено, что структура покрытия представляет собой конгломерат твердых и пластичных фаз, когерентно связанных между собой, и состоит из основы – твердого раствора хрома в α -железе, а также остаточного аустенита, карбидов (Fe_2C , Cr_7C_3), боридов (FeB , CrB_2 , Cr_5B_3) и ферроборида ($Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$).

В результате рентгеноструктурного анализа и расчета параметров тонкой структуры установлено, что покрытие имеет тонкодисперсное строение с размером кристаллитов в пределах 17,30–30,20 Нм; плотность дислокаций (хаотических), в объемах кристаллов в пределах $(11,6213–12,6396) \cdot 10^8$, 1/см²; относительную среднеквадратическую микродеформацию в пределах $(22,72–36,83) \cdot 10^{-4}$.

В результате исследований микротвердости установлено, что незначи-



1 – покрытие; 2 – зона термического влияния; 3 – основа

a – оптическая металлография, поперечный шлиф ($\times 200$); *б* – растровая электронная микроскопия участка 1 покрытия ($\times 5000$)

Рисунок 3. – Фотографии микроструктуры покрытия из порошка ФБХ-6-2

хрома, ферроборида, боридов на основе железа.

В результате выполненных экспериментов с применением ортогонального планирования получены математико-статистические модели, устанавливающие зависимости интенсивности изнашивания покрытий из порошков Fe-2%V и ФБХ-6-2 в условиях изнашивания при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом и смазочным материалом с частицами абразива от параметров, характеризующих условия работы деталей трансмиссий автотракторной техники (нагрузка на образец P , температура масла t_m , концентрация абразивных частиц в масле K_a , относительная скорость качения V_k). Установлено, что по степени влияния на интенсивность изнашивания покрытий параметры можно расположить в ряд при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом: $Y_1 = I: P \rightarrow t_m \rightarrow V_k$ и в ряд – при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива:

тельные колебания и плавное изменение значений микротвердости по толщине (рисунок 4) в пределах 4,5–6,2 ГПа для покрытий из порошков Fe-2%V и Fe-Ti, в пределах 7,5–8,7 ГПа для покрытия из ФМП ФБХ-6-2 обусловлены однородностью наплавленных слоев. Установлено, что покрытие из порошка ФБХ-6-2 имеет максимальную микротвердость (8,7 ГПа), что обусловлено присутствием в структуре слоев закалочного мартенсита и комплексных боридов

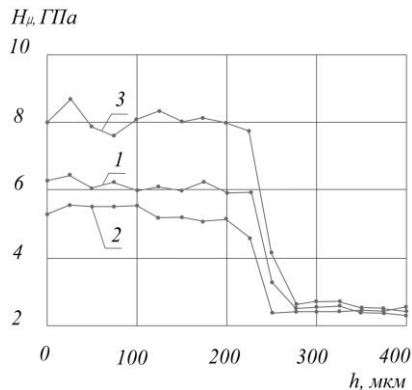


Рисунок 4. – Распределение микротвердости по толщине покрытий, полученных наплавкой порошков Fe-2%V (1), Fe-Ti (2), ФБХ-6-2 (3)

$Y_2 = I: K_q \rightarrow P \rightarrow t_m \rightarrow V_k$. Относительная скорость трения качения V_k не оказывает существенного влияния на интенсивность изнашивания поверхностей образцов. Установлено, что интенсивность изнашивания покрытий из порошка Fe-2%V в 1,5–2,1 раза ниже, чем для покрытий из порошка ФБХ-6-2, из-за большего содержания метастабильного аустенита, обеспечивающего пластичность основы наплавленного слоя. С применением графоаналитического метода двумерных сечений для принятых условий изнашивания определена рациональная область работы исследуемых трибосопряжений при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом: $P = 0,5–1,0$ кН и $t_m = 25–45$ °С; при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива: $P = 0,5–0,8$ кН, $t_m = 25–40$ °С, $K_q = 0,05$ г/см³.

В результате экспериментальных исследований износостойкости покрытий, полученных электромагнитной наплавкой в постоянном магнитном поле порошков на основе железа, установлено, что по сравнению со сталью 45 закаленной до твердости 52–54 HRC наибольшей износостойкостью при трении качения с проскальзыванием обладают покрытия из порошка Fe-2%V (выше в 1,7–2,2 раза), при трении скольжения – покрытия из порошка ФБХ-6-2 (выше в 1,7–1,9 раза). Это позволило рекомендовать для пар трения, работающих при трении качения с проскальзыванием использовать покрытия из порошка Fe-2%V, а при трении скольжения – покрытия из порошка ФБХ-6-2.

Пятая глава посвящена производственной апробации и внедрению в производство технологии упрочнения и восстановления деталей машин электромагнитной наплавкой в постоянном магнитном поле и мобильного устройства для ее реализации. Технологический процесс (ТД 02100.00001Р) и установка модели УНП 1 внедрены в производство ОАО «Завод “Минскагропромаш”» для упрочнения и восстановления рабочих поверхностей деталей коробки перемены передач тракторов К-700А и К-701. Разработанная технология по сравнению с наплавкой в среде углекислого газа повышает износостойкость упрочненных поверхностей деталей в 1,65–1,90 раза и позволяет снизить себестоимость нанесения износостойких покрытий на 10 %, а энергоемкость процесса ЭМН в постоянном магнитном поле – на 12 % по сравнению с электромагнитами.

Годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии упрочнения и восстановления деталей машин в ОАО «Завод “Минскагропромаш”» составил 55,0 млн рублей по состоянию на 12.12.2013 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований суперпозиций импульсов электрических разрядов и магнитного поля в рабочем зазоре устройств электромагнитной наплавки установлена взаимосвязь сил прижима цепочек-микроэлектродов к обрабатываемой поверхности с характеристиками внешних магнитных полей. Установлено, что наибольшее влияние на силу прижима цепочки-микроэлектрода оказывают амплитудная (до 9 %) и

фазовая (до 25 %) составляющие магнитной индукции. Обоснована необходимость стабилизации переменных сил прижима цепочек-микроэлектродов к обрабатываемой поверхности путем применения магнитотвердых материалов, обеспечивающих стабильность формирования и устойчивое положение цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре. Экспериментально установлено, что наибольшую стабильность процесса электромагнитной наплавки обеспечивают постоянные магниты с величиной индукции равной 0,7 Тл в рабочем зазоре 2,0 мм при высоте полюсного наконечника 5,7 мм и угле охвата 12° [1, 2, 5, 13, 15, 16].

2. В результате численных расчетов и экспериментальных исследований в соответствии с разработанной методикой определения конструктивных параметров магнитной системы устройства электромагнитной наплавки в зависимости от параметров рабочей зоны устройства и технологической схемы наплавки установлена рациональная конструкция магнитной системы на основе постоянного магнита Е-образной формы из сплава ЮНДК24Т, получены математико-статистические зависимости магнитной индукции в рабочем зазоре B_{zc} от длины L_m и ширины R_m магнита и определены его оптимальные конструктивные размеры: $L_m = 125$ мм, $R_m = 36$ мм [1, 2, 6, 9, 11, 18, 19].

3. В результате экспериментальных исследований зависимости производительности процесса и износостойкости покрытий от технологических параметров электромагнитной наплавки в постоянном магнитном поле установлено, что по степени влияния на производительность Q процесса технологические режимы наплавки можно расположить в ряд $Y_1 = Q: V \rightarrow S \rightarrow i \rightarrow q \rightarrow \delta$, а на относительную износостойкость ε формируемых покрытий – в ряд $Y_2 = \varepsilon: S \rightarrow i \rightarrow V \rightarrow q \rightarrow \delta$. Определены оптимальные технологические режимы наплавки (плотность разрядного тока $i = 1,73\text{--}1,91$ А/мм²; величина рабочего зазора $\delta = 1,50\text{--}2,21$ мм; величина продольной подачи $S = 0,185\text{--}0,276$ мм/об; окружная скорость заготовки $V = 0,053\text{--}0,057$ м/с; расход ферромагнитного порошка $q = 2,86 \cdot 10^{-3}\text{--}2,95 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²), обеспечивающие стабильность процесса наплавки с производительностью в пределах 212,5–225 мг/мин и относительной износостойкостью покрытий в пределах 1,9–2,3 [12].

4. В результате изучения влияния технологических параметров электромагнитной наплавки в постоянном магнитном поле на показатели качества покрытий установлено, что наибольшее влияние оказывает плотность разрядного тока, при оптимальных значениях (в пределах $1,73\text{--}1,91$ А/мм²) которого в процессе наплавки обеспечивается равномерное распределение по обрабатываемой поверхности расплава материала ферромагнитных порошков на основе железа и однородность наплавленных слоев по толщине покрытий. Выявлено, что средние значения сплошности, объемной пористости и разнотолщинности покрытий, полученных наплавкой в постоянном магнитном поле на оптимальных режимах, находятся в пределах 91,2–98,7 %, 3,0–7,0 % и 22–48 мкм соответственно. Показано, что использование постоянных магнитов вместо электрических при электромагнитной наплавке позволяет снизить объемную пори-

стость и разнотолщинность покрытий соответственно на 40,0–41,6 % и 33,3–59,3 % без существенного увеличения (на 2,0–3,4 %) сплошности [3, 4, 8, 14, 16, 17].

5. В результате выполненных экспериментальных исследований зависимости интенсивности изнашивания покрытий при трении качения с проскальзыванием от параметров, характеризующих условия работы трибосопрежений (деталей трансмиссий автотракторной техники), установлено, что по степени влияния нагрузки (P), температуры масла (t_m), относительной скорости качения (V_q) и концентрации абразивных частиц в масле (K_q) на интенсивность изнашивания покрытий их можно расположить в ряд при трении качения с проскальзыванием от смазочным материалом: $Y_1 = I: P \rightarrow t_m \rightarrow V_q$ и в ряд – при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива: $Y_2 = I: K_q \rightarrow P \rightarrow t_m \rightarrow V_q$. Относительная скорость трения качения V_q не оказывает существенного влияния на интенсивность изнашивания поверхностей образцов. Определена рациональная область работы исследуемых трибосопрежений при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом: $P = 0,5–1,0$ кН и $t_m = 25–45$ °С; при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива: $P = 0,5–0,8$ кН, $t_m = 25–40$ °С, $K_q = 0,05$ г/см³. На основании экспериментальных исследований износостойкости покрытий установлено, что по сравнению со сталью 45 закаленной до твердости 52–54 HRC наибольшей износостойкостью при трении качения с проскальзыванием обладают покрытия из порошка Fe-2%V (выше в 1,7–2,2 раза), при трении скольжения – покрытия из порошка ФБХ-6-2 (выше в 1,7–1,9 раза). Это позволило рекомендовать для пар трения, работающих при трении качения с проскальзыванием, использовать покрытия из порошка Fe-2%V, а при трении скольжения – покрытия из порошка ФБХ-6-2 [3, 4, 7].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. На основании результатов исследований разработаны и внедрены в производство ОАО «Завод “Минскагропромаш”» технология (ТД 02100.00001Р) и установка (КД УНП1-01.00.000) для упрочнения и восстановления цилиндрических поверхностей деталей, работающих при больших нагрузках. Разработанная технология по сравнению с наплавкой в среде углекислого газа повышает износостойкость упрочненных поверхностей деталей в 1,65–1,90 раза и позволяет снизить себестоимость нанесения износостойких покрытий на 10 % [4, 9, 10, 19–21].

2. Годовой экономический эффект от внедрения в ОАО «Завод “Минскагропромаш”» составил 55,0 млн рублей по состоянию на 12.12.2013 г.

Результаты работы также внедрены в БГАТУ на факультете «Технический сервис в АПК» в учебный процесс при подготовке студентов по специальности 1-74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве».

3. Результаты исследований могут быть использованы на ремонтных предприятиях Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь и Министерства промышленности Республики Беларусь.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Мрочек, Ж.А. Использование постоянных магнитов в устройствах электромагнитной наплавки / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, А.В. Миранович // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 75–84.
2. Акулович, Л.М. Повышение качества покрытий при электромагнитной наплавке в постоянном магнитном поле / Л.М. Акулович, А.В. Миранович // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 58–65.
3. Акулович, Л.М. Исследование влияния стабилизированных параметров электромагнитной наплавки на износостойкость покрытий / Л.М. Акулович, А.В. Миранович // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол. : С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 17–29.
4. Акулович, Л.М. Повышение износостойкости поверхностей валов короб перемены передач упрочнением и обработкой в электромагнитном поле / Л.М. Акулович, А.В. Миранович, О.Н. Ворошуха // Научное обозрение. – 2015. – № 4. – С. 151–163.

Статьи в сборниках научных трудов

5. Акулович, Л.М. Оптимизация геометрических параметров полюсных наконечников в устройствах электромагнитной наплавки / Л.М. Акулович, А.В. Миранович, В.В. Трizza // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. / УП «Технопринт». – Минск, 2001. – Вып. 17. – С. 153–156.
6. Миранович, А.В. Проектирование конструкции магнитной системы на постоянных магнитах устройств для обработки плоских поверхностей / А.В. Миранович // Современные методы проектирования машин : респ. межвед. сб. науч. тр. : в 7 т. / УП «Технопринт». – Минск, 2004. – Вып. 2. – Т. 5. Технология изготовления машин. – С. 127–132.
7. Кожуро, Л.М. Исследование триботехнических свойств покрытий, полученных наплавкой в электрическом и магнитном полях / Л.М. Кожуро, А.В. Миранович, А.Г. Зеленцов // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. : в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т. – Новополоцк, 2007. – Т. 1. – С. 107–111.
8. Акулович, Л.М. Исследование свойств покрытий, полученных наплавкой с использованием энергии постоянных магнитов / Л.М. Акулович, А.В. Миранович // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2009. – Вып. 24. – Т. 1. – С. 54–58.
9. Акулович, Л.М. Технологические методы упрочнения и восстановления деталей автотракторной техники в электромагнитном поле / Л.М. Акулович,

А.В. Миранович, М.И. Новиков, Д.В. Счастный // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка : сб. науч. тр. / Харьківський нац. техн. ун-т с.-г. – Харьков, 2009. – Вып. 79. Вдосконалення технологій та обладнання виробництва продукції тваринництва. – С. 44–51.

Материалы конференций

10. Миранович, А.В. Упрочнение и восстановление посадочных мест вторичного вала коробки передач автомобилей семейства КамАЗ электромагнитной наплавкой / А.В. Миранович // Инженерия поверхности и реновация изделий : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Ялта, 25–27 мая 2004 г. / АТМ України. – Ялта.- Киев, 2004. – С. 146–149.

11. Кожуро, Л.М. Восстановление и упрочнение посадочных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин на установке электромагнитной наплавки с оптимальной конструкцией магнитной системы / Л.М. Кожуро, А.В. Миранович, Ю.В. Немизанский // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса сельскохозяйственной техники : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 7–8 июня 2006 г. : в 3 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол. И.Н. Шило [и др.]. – Минск, 2006. – Ч. 3. – С. 72–81.

12. Акулович, Л.М. Оптимизация наплавки износостойких покрытий в электромагнитном поле при восстановлении валов электродвигателей погружных водяных насосов / Л.М. Акулович, В.А. Лойко, А.В. Миранович, А.С. Козорез // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы 9-й ежегодной Междунар. промышл. конф., Киев, 9–13 февраля 2009 г. : в 2 ч. / Украинский информационный Центр «Наука. Техника. Технология». – Киев, 2009. – Ч. 2. – С. 356–360.

13. Акулович, Л.М. Об устойчивости электромагнитной наплавки / Л.М. Акулович, А.В. Миранович, А.В. Линник // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2012 г. / Белорусско-российский ун-т. – Могилев, 2012. – С. 98–100.

14. Акулович, Л.М. Повышение качества покрытий, полученных электромагнитной наплавкой / Л.М. Акулович, А.В. Миранович, А.М. Ефимов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2012 г. / Белорусско-российский ун-т. – Могилев, 2012. – С. 100–101.

15. Акулович, Л.М. Влияние параметров технологического тока при электромагнитной наплавке на качество покрытий / Л.М. Акулович, А.В. Миранович // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 5–6 июня 2014 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; под общей ред. И.Н. Шило, Н.А. Лабушева. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 301–307.

Тезисы докладов

16. Акулович, Л.М. Влияние технологических факторов на качество защитных покрытий при электромагнитной наплавке / Л.М. Акулович, А.В. Миранович, О.Н. Ворошуха // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 15–16 октября, 2013 г. / Беларуская навука ; редкол. : А.И. Свириденко [и др.]. – Минск, 2014. – С. 177–181.

17. Акулович, Л.М. К вопросу о стабилизации процесса электромагнитной наплавки / Л.М. Акулович, А.В. Миранович // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 апреля 2013 г. / БНТУ, МИНСКЭКСПО ; редкол. : В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 4–6.

Патенты на полезную модель

18. Устройство для нанесения металлических покрытий : описание пол. мод. к пат. 1378 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 26/00 / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, Л.М. Кожуро, А.В. Миранович; заявитель гос. науч. учр. «Институт порошковой металлургии». – № u 20030410 ; заявл. 22.09.03 ; опубл. 30.06.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 2 (41). – С. 279.

Патенты на изобретение

19. Устройство для нанесения ферромагнитных покрытий : пат. 6547 Респ. Беларусь, МКИ В 23 Н 9/00, С 23 С 26/00 / А.П. Ракомсин, М.И. Сидоренко, Л.М. Кожуро, Л.Е. Сергеев, А.В. Миранович, В.В. Трizza ; заявитель гос. науч. учр. «Институт порошковой металлургии». – № а 20020130; заявл. 19.02.02 ; опубл. 30.09.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 3 (42). – С. 122–123.

20. Способ нанесения металлических покрытий из ферромагнитного порошка и устройство для его осуществления : пат. 8233 Респ. Беларусь, МКИ В 23 К 9/04, В 23 Р 6/00, С 23 С 26/00 / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, Л.М. Кожуро, А.В. Миранович, В.В. Трizza ; заявитель гос. науч. учр. «Институт порошковой металлургии». – № а 20030783 ; заявл. 01.08.03 ; опубл. 30.06.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 3 (50). – С. 68.

21. Способ нанесения металлических покрытий и устройство для его осуществления : пат. 10307 Респ. Беларусь, МКИ С 23 С 26/00 / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек, С.С. Макаревич, А.В. Миранович ; заявитель гос. науч. учр. «Институт порошковой металлургии». – № а 20050655 ; заявл. 30.06.05 ; опубл. 28.02.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 1 (60). – С. 76–77.

Мірановіч Аляксей Валер’евіч

ТЭХНАЛОГІЯ ўМАЦАВАННЯ І АДНАЎЛЕННЯ ДЭТАЛЯЎ МАШЫН ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЙ НАПЛАЎКАЙ У ПАСТАЯННЫМ МАГНІТНЫМ ПОЛІ

Ключавыя словы: умацаванне, аднаўленне, электрамагнітная наплаўка, пастаяннае магнітнае поле, магнітная сістэма, крыніца тэхналагічнага току, пастаянныя магніты, электрамагніты, кампазіцыйныя ферамагнітныя парашкі, зносастойкія пакрыцці, уласцівасці пакрыццяў.

Мэта даследаванняў – распрацоўка тэхналогіі ўмацавання і аднаўлення дэталей машын электрамагнітнай наплаўкай у пастаянным магнітным полі, якая забяспечвае павышэнне фізіка-механічных уласцівасцей і зносастойкасці апрацоўваемых паверхняў.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: фундаментальныя палажэнні тэорыі электрамагнітнага поля; метады матэматычнай статыстыкі і планавання эксперыментаў; метады эксперыментальнага даследавання характарыстык магнітнага поля; стандартныя метадыкі і сучаснае абсталяванне для аналізу структуры, фазавага і колькаснага складу пакрыццяў, выпрабаванняў матэрыялаў на трэнне і знос.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: усталяваны механізм уплыву зменных і пастаянных знешніх магнітных палёў на фарміраванне ў рабочай зоне ланцужкоў-мікраэлектродаў з часціц парашка. Распрацавана метадыка разліку канструктыўных параметраў магнітных сістэм і ўстаноўлены залежнасці велічынь магнітнай індукцыі ў рабочай зоне ад памераў пастаянных магнітаў; распрацаваны матэматыка-статыстычныя мадэлі, якія ўстанаўліваюць залежнасці прадукцыйнасці працэсу наплаўкі і зносастойкасці фарміруемых пакрыццяў ад тэхналагічных рэжымаў электрамагнітнай наплаўкі ў пастаянным магнітным полі; даследаваны фізіка-механічныя ўласцівасці і зносастойкасць апрацаваных паверхняў дэталей машын пасля электрамагнітнай наплаўкі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі працы ўкаранены ў вытворчасць ААТ «Завод “Мінскаграпрамаш”». Гадавы эканамічны эффект ад укаранення ў ААТ «Завод “Мінскаграпрамаш”» склаў 55,0 млн рублёў па стане на 12.12.2013 г.

Вынікі даследаванняў могуць быць выкарыстаны для ўмацавання і аднаўлення цыліндрычных паверхняў дэталей, працоўных органаў глебаапрацоўчых машын і дэталей металургічнага абсталявання.

Галіна прымянення: на рамонтных прадпрыемствах Міністэрства сельскай гаспадаркі і харчавання Рэспублікі Беларусь і Міністэрства прамысловасці Рэспублікі Беларусь.

РЕЗЮМЕ

Миранович Алексей Валерьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ В ПОСТОЯННОМ
МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Ключевые слова: упрочнение, восстановление, электромагнитная наплавка, постоянное магнитное поле, магнитная система, источник технологического тока, постоянные магниты, электромагниты, композиционные ферромагнитные порошки, износостойкие покрытия, свойства покрытий.

Цель исследований – разработка технологии упрочнения и восстановления деталей машин электромагнитной наплавкой в постоянном магнитном поле, обеспечивающей повышение физико-механических свойств и износостойкости обрабатываемых поверхностей.

Методы исследования и использованная аппаратура: фундаментальные положения теории электромагнитного поля; методы математической статистики и планирования экспериментов; методы экспериментального исследования характеристик магнитного поля; стандартные методики и современное оборудование для анализа структуры, фазового и количественного состава покрытий, испытаний материалов на трение и износ.

Полученные результаты и их новизна: установлен механизм влияния переменных и постоянных внешних магнитных полей на формирование в рабочей зоне цепочек-микроэлектродов из частиц порошка. Разработана методика расчета конструктивных параметров магнитных систем и установлены зависимости величин магнитной индукции в рабочей зоне от размеров постоянных магнитов; разработаны математико-статистические модели, устанавливающие зависимости производительности процесса наплавки и износостойкости формируемых покрытий от технологических режимов электромагнитной наплавки в постоянном магнитном поле; исследованы физико-механические свойства и износостойкость обработанных поверхностей деталей машин после электромагнитной наплавки.

Рекомендации по использованию: результаты работы внедрены в производство ОАО «Завод “Минскагропромаш”». Годовой экономический эффект от внедрения в ОАО «Завод “Минскагропромаш”» составил 55,0 млн рублей по состоянию на 12.12.2013 г.

Результаты исследований могут быть использованы для упрочнения и восстановления цилиндрических поверхностей деталей, рабочих органов почвообрабатывающих машин и деталей металлургического оборудования.

Область применения: на ремонтных предприятиях Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь и Министерства промышленности Республики Беларусь.

SUMMARY

Miranovich Alexey V.

TECHNOLOGY OF HARDENING AND RESTORATION OF DETAILS OF MACHINES BY ELECTROMAGNETIC WELDING IN CONSTANT MAGNETIC FIELD

Keywords: hardening, restoration, electromagnetic welding, constant magnetic field, magnetic system, technological current source, constant magnets, electromagnets, composite ferromagnetic powders, wear-resistant coating, properties of coatings.

Purpose of research: development of the technology of hardening and restoration of details of machines by electromagnetic welding in constant magnetic field which provides the increasing of physical-mechanical properties and performance requirements of treated surfaces.

Methods of research and equipment: fundamental propositions of the electromagnetic field theory; methods of mathematical statistics and experimental design; methods of pilot research of magnetic field characteristics; standard methods and modern equipment for analysis of the structural, phase and quantitative composition of coatings, friction and wear tests.

Obtained results and their novelty: It is determined the mechanism of influence of external variable and constant magnetic fields on the formation of microelectrode chains from powder particles in the working area. Procedure of calculating of design parameters of magnetic systems is worked out and the dependence of magnetic induction in working area on the size of the constant magnets is determined; mathematical-statistical model which determines dependence of efficiency of welding process and wear resistance of the formed coating on technological modes of electromagnetic welding in constant magnetic field is developed; physical-mechanical properties and wear resistance of treated surfaces of the details of machines after electromagnetic welding are researched.

Recommendations for usage: the results of the work introduced in «Minskagroprommash». The annual economic effect from the introduction at «Minskagroprommash» was 55.0 million rubles on 12.12.2013.

The research results can be used for hardening and renewal of cylindrical surfaces of the details, operative parts of tillage machines and details of metallurgical equipment.

Field of application: repair enterprises of the Ministry of Agriculture and Food and the Ministry of Industry of the Republic of Belarus.

Научное издание

МИРАНОВИЧ
Алексей Валерьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ В ПОСТОЯННОМ
МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Подписано в печать 21.05.2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.

Усл.печ.л. 1,34. Уч.-изд.л. 1,04. Тираж 70. Заказ 398.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский государственный национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.