

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.791.92:621.81

**ЛЮЦКО Василий Александрович**

**ТЕХНОЛОГИЯ И УСТАНОВКИ  
МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ  
ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Новополоцк 2004

Работа выполнена в Учреждении образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О.Сухого»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
ПАНТЕЛЕЕНКО Ф.И.  
(Учреждение образования «Полоцкий  
государственный университет»,  
проректор по научной работе)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
ШИЛЯЕВ А.С.  
(Учреждение образования  
«Белорусский аграрный технический  
университет», профессор кафедры  
физики)

кандидат технических наук, доцент  
ЛЫСОВ А.А.  
(Учреждение образования «Полоцкий  
государственный университет», декан  
машиностроительного факультета)

Оппонирующая организация:

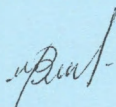
Унитарное предприятие  
«Конструкторско-технологический  
институт средств механизации и  
автоматизации», г. Минск

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
Совета по защите диссертаций К 02.19.03 при Учреждении образования  
«Полоцкий государственный университет». Отзывы на автореферат  
направлять по адресу: Блохина, 29, Новополоцк, 211440, тел. ученого  
секретаря 8(0214)551047, факс (+375214)550679

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
Совета по защите диссертаций К 02.19.03  
кандидат технических наук, доцент



В.М. Константинов

©Люцко В.А., 2004

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Разработка и промышленное освоение новых технологий, обеспечивающих высокое качество продукции, повышение производительности труда и эффективности общественного производства – одна из важнейших задач современного машиностроения.

В решении данной задачи большое внимание отводится проблеме повышения надежности и долговечности деталей машин, которые во многом определяются состоянием их рабочего поверхностного слоя. Известно, что большинство деталей машин выходят из строя не из-за поломок, а в результате износа тонкого рабочего слоя. Поэтому физико-механические свойства поверхностного слоя должны быть дифференцированы относительно объемно-прочностных свойств детали. В связи с этим актуальным является как совершенствование известных методов упрочняюще-восстанавливающих технологий, так и разработка новых, позволяющих получать поверхностные слои с заданными физико-механическими свойствами.

К числу прогрессивных и сравнительно недавно предложенных методов упрочняюще-восстанавливающей технологии относится магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ). Данный метод имеет ряд достоинств: отсутствие специальной предварительной подготовки обрабатываемой поверхности, простота оборудования, высокая производительность, надежная адгезионная связь нанесенного слоя с основным материалом детали, незначительная зона термического влияния на деталь, что способствовало его развитию и промышленному применению. Проведенные исследования не охватывают всех возможностей метода применительно к упрочнению и восстановлению различных классов деталей машин. Метод наиболее полно разработан и исследован только для деталей тел вращения. В то же время остается много неизученных вопросов в области МЭУ плоских поверхностей (ПП) деталей машин, поэтому в данном направлении требуется проведение целого ряда комплексных исследований.

Существенно сдерживается промышленное внедрение метода и отсутствием устройств, обеспечивающих стабильное протекание процесса нанесения покрытий. Известные технические решения в этом направлении лишь частично уменьшают те или иные технологические параметры процесса МЭУ, но кардинально проблему не решают.

С этих точек зрения метод МЭУ представляет широкое поле исследований по дальнейшему изучению физических закономерностей процесса, по совершенствованию технологии и оборудования, обеспечивающих надежное получение требуемых эксплуатационных характеристик наносимых покрытий, и по расширению номенклатуры упрочняемых и восстанавливаемых деталей. Это и обусловило актуальность данной работы и необходимость ее выполнения.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Работа выполнялась в соответствии с госбюджетной научно-исследовательской темой «Разработка и исследование процессов формирования и обработки металлических покрытий и материалов путем пластического деформирования при воздействии электрических и магнитных полей», № гос. регистрации 01860063719, в рамках Государственной научно-технической программы «Материал-24» (утверждена Постановлением АН БССР № 39 от 3.04.1985 г.), а также в соответствии с договором – ХД № 192 с ПО «Гомсельмаш» «Разработка и внедрение магнитно-электрической установки для упрочнения бруса противорежущего КИС 0103 5026 (1987), № гос. регистрации 01870096428, и договором – ХД № 163 с ГПО «Гидроавтоматика» г. Гомель «Исследование, разработка и внедрение технологического процесса электроферромагнитного упрочнения деталей аксиально-поршневых насосов» (1988), № гос. регистрации 01850016749.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы – разработка технологических основ и установок МЭУ плоских поверхностей деталей машин, обеспечивающих высокое качество покрытий и производительность обработки за счет стабилизации электромагнитных параметров процесса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основании анализа существующих способов МЭУ предложить эффективные технологии и конструкции установок для нанесения износостойких покрытий на ПП деталей машин.
2. Установить функциональную взаимосвязь между электромагнитными, кинематическими и механическими параметрами процесса стабилизации МЭУ.
3. Изучить электрофизические явления, протекающие в процессе формирования магнитно-электрических покрытий.
4. Исследовать влияние стабилизации процесса (СП) МЭУ, химических составов ферромагнитных порошков (ФМП) и материала основы на структуру и физико-механические свойства покрытий.
5. Исследовать влияние основных технологических факторов МЭУ на производительность процесса и сплошность наносимых покрытий на ПП деталей машин.
6. Разработать технологию МЭУ плоских поверхностей режущих элементов рабочих органов кормоуборочной техники, исследовать эксплуатационные свойства упрочненных поверхностей, разработать рекомендации по промышленному применению МЭУ и осуществить реализацию результатов исследований в конкретных производственных условиях.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является процесс МЭУ плоских поверхностей деталей машин. Предмет исследований – закономерности осуществления СП МЭУ и влияние технологических факторов на формирование износостойких покрытий.

**Гипотеза.** В работе сделано научное предположение, что автоматическое регулирование параметров процесса, например, величины рабочего зазора (РЗ), обеспечивающих стабилизацию величины электрического сопротивления, силы технологического тока или температурного режима в рабочей зоне и, следовательно, качественных характеристик покрытий, позволяет создать эффективную технологию и установки МЭУ различных поверхностей деталей машин с использованием экономичных средств и материалов. Результаты теоретических и экспериментальных исследований и внедрения в производство разработок подтвердили правильность гипотезы.

**Методология и методы проведенного исследования.** При выполнении диссертационной работы использован комплексный подход, включающий анализ проблемы, проведение теоретических исследований, разработку математической модели процесса МЭУ, лабораторные исследования и эксплуатационные испытания. Для проведения экспериментальных исследований применялись как известные методики (металлографический анализ, дюрметрия, исследование триботехнических характеристик нанесенных покрытий), так и предложенные автором методики осциллографирования процесса МЭУ со стабилизацией, исследования износостойкости покрытий в условиях ударно-абразивного изнашивания и проведения эксплуатационных испытаний на кормоизмельчителе «Волгарь-5» и в полевых условиях.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** состоит в следующем:

- впервые установлено, что СП оказывает существенное влияние на физико-механические свойства наносимых покрытий и является важным фактором в совершенствовании технологии МЭУ и конструкций установок;
- впервые установлено, что регулирование величины рабочего зазора является наиболее надежным параметром СП МЭУ, обеспечивающим эффективную работу установок и получение качественных покрытий, имеющих на 25...35 % меньшую пористость и на 20...30 % более высокую износостойкость;
- получены математические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между электромагнитными ( $J$ ,  $U$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $\rho$ ) и конструктивными ( $\delta$ ,  $S$ ,  $w$ ,  $m$ ,  $c$ ) параметрами установок, позволяющие обоснованно выбирать оптимальные характеристики процесса, и установок для МЭУ ПП при их проектировании;
- установлено влияние основных технологических факторов МЭУ на производительность процесса и качество наносимых покрытий на ПП деталей машин;
- получена эмпирическая зависимость, описывающая динамику изнашивания режущих кромок рабочих органов измельчающих аппаратов кормоборочной техники, упрочненных магнитно-электрическим методом.

### **Практическая и экономическая значимость результатов:**

1. Разработана технология МЭУ со СП для ПП режущих кромок противорежущих элементов измельчающих аппаратов кормоуборочных комбайнов, обеспечивающая повышение их износостойкости в 2,5...3,5 раза и снижение трудоемкости изготовления в 2 раза по сравнению с серийно выпускаемыми.

2. Разработаны оригинальные конструкции универсальной (А.с. 1238916) и автоматизированной (А.с. 1627352) установок для МЭУ деталей машин.

3. Разработаны практические рекомендации по выбору ФМП и материала противорежущего элемента в зависимости от типа производства и условий работы конкретных машиностроительных или ремонтных предприятий республики.

4. Результаты исследований внедрены на предприятиях г. Гомеля:

– в цехе мостов Гомельского завода самоходных комбайнов ПО «Гомсельмаш» создан участок по МЭУ режущих кромок противорежущих брусьев измельчающих аппаратов кормоуборочных комбайнов КСК-100А и КПКУ-75. Экономический эффект от внедрения технологии МЭУ в течение первых 5-ти лет эксплуатации составил 245276 руб. ежегодно (в ценах 1990 г.). Участок по МЭУ режущих кромок противорежущих брусьев функционирует и в настоящее время;

– в цехе ремонта комбайна КСК-100 Гомельского мотороремонтного завода внедрена установка для упрочнения и восстановления режущих кромок противорежущих брусьев МЭУ. Экономический эффект от внедрения технологии МЭУ в течение первых 5-ти лет эксплуатации составил 29204 руб. ежегодно (в ценах 1990 г.).

Результаты исследований в виде лекционного материала, лабораторных работ внедрены в учебный процесс обучения студентов специальности Т.03.01.01 «Технология машиностроения» по специальному курсу «Технология и оборудование магнитно-электрических способов обработки» в Гомельском государственном техническом университете им. П.О. Сухого.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Закономерности влияния величины РЗ на параметры СП МЭУ.
2. Влияние основных технологических факторов МЭУ на производительность процесса и качество наносимых покрытий на ПП деталей машин.
3. Закономерности влияния СП МЭУ и химических составов материалов на структуру и физико-механические свойства магнитно-электрических покрытий.
4. Разработанные технология и устройства для МЭУ со СП на ПП режущих элементов измельчающих аппаратов кормоуборочных комбайнов.
5. Результаты экспериментальных исследований закономерностей динамики изнашивания режущих кромок рабочих органов измельчающих аппаратов кормоуборочных комбайнов.



**Личный вклад соискателя.** Основные результаты диссертационной работы получены автором лично или в соавторстве. Автором предложены основные принципы осуществления СП МЭУ путем автоматического регулирования одного из технологических параметров (количества ФМП подаваемого в рабочий зазор (РЗ), температурного режима в РЗ, величины РЗ, скорости перемещения обрабатываемой детали). Постановка экспериментов, их проведение, анализ полученных результатов, выполнение расчетов также проводилась автором лично. Научный руководитель профессор Ф.И. Пантелеенко осуществлял общее руководство, ставил задачи, принимал участие в обсуждении результатов. В обсуждении результатов теоретических исследований также принимали участие профессор Г.С. Шулев и доцент В.В. Соленков. Разработка и изготовление блоков стабилизации экспериментальных установок, проведение осциллографирования процесса МЭУ осуществлялись совместно с инженером В.Ф. Соболевым. Полевые испытания работоспособности противорежущих брусьев, режущие кромки которых упрочнялись различными технологическими методами, проводились совместно с ГСКБ ПО «Гомсельмаш» под руководством зам. начальника ГСКБ канд. техн. наук П.Е. Голушко. В совместно опубликованных работах автор предлагал и обосновывал направления решения научных проблем, анализировал полученные результаты и формулировал основные выводы.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: всесоюзной научно-технической конференции «Технологическое обеспечение ресурса и надежности машин», г. Воронеж (1980 г.); республиканской научно-практической конференции «Пути повышения технологического уровня и надежности кормоуборочной техники», г. Гомель (1986 г.); межреспубликанских научно-технических конференциях «Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин», г. Волгоград (1989, 1991 гг.); Четвертом научно-техническом семинаре с международным участием по неконвенциональным технологиям в машиностроении, г. Ботевград, Болгария (1989 г.); «Научной сессии-89» Наука, обучение, производство», посвященной 35-й годовщине ВТУ «Ангел Кончев», г. Русе, Болгария (1989 г.); республиканской научно-технической конференции «Высокоэффективное оборудование и технологические процессы упрочнения режущих инструментов и деталей машин», г. Могилев (1990 г.); XXI научно-технической конференции в рамках проблемы «Наука и мир», г. Брест (1994 г.); II республиканской научно-технической конференции «Современные материалы и технологии», г. Новополоцк (1995 г.); республиканской научно-технической конференции, посвященной 30-летию Брестского политехнического института, г. Брест (1996 г.); 52-й международной научно-технической конференции профессоров, научных сотрудников и студентов БГПА, г. Минск (1997 г.); международных

научно-технических конференциях «Современные проблемы машиноведения», г. Гомель (1998, 2000, 2002 гг.); международной научно-технической конференции «Современные направления развития производственных технологий и робототехники», г. Могилев (1999 г.); международной научно-технической конференции «Материалы, технология и оборудования для упрочнения и восстановления деталей машин», г. Новополоцк (2003 г.).

**Опубликованность результатов.** Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 36 печатных работах общим объемом 114 страниц. Из них – 5 статей в научных журналах, 3 статьи в сборниках научных трудов, 3 статьи в сборниках материалов конференций, 8 авторских свидетельств на изобретения СССР, 2 патента РБ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 218 страниц, в том числе 65 иллюстраций на 64 страницах, 6 таблиц на 4 страницах, 4 приложения на 46 страницах. Список использованных источников на 14 страницах включает в себя 185 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований в области МЭУ ПП и создания установок для нанесения износостойких покрытий.

**Первая глава** содержит аналитический обзор современного состояния исследований, разработок и применения МЭУ в отраслях промышленности.

МЭУ относится к числу перспективных технологических методов создания поверхностного слоя деталей с требуемыми физико-химическими свойствами. Он практически не требует специальной подготовки поверхности перед упрочнением. Созданный поверхностный слой имеет высокую прочность сцепления с основным материалом детали, обладает высокой твердостью и износостойкостью. Применение ФМП определенного химического состава в ряде случаев позволяет значительно повысить такие эксплуатационные характеристики деталей машин, как окалиностойкость, жаростойкость, коррозионно-усталостная прочность. Основные исследования по данному методу проведены Е.Г. Коноваловым, Г.С. Шулевым, Б.П. Чемисовым, И.Ф. Марченко, Ю.П. Александровым, Л.М. Акуловичем, В.И. Абрамовым, Б.П. Борисовым, И.Т. Сычевым, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфецем.

Наиболее полно исследован и разработан процесс МЭУ только для деталей класса валов. Для МЭУ других поверхностей, в том числе и ПП деталей машин, разработан ряд экспериментальных установок. Однако они не нашли применения в промышленности, так как из-за нестабильного протекания процесса не обеспечивают надежного получения покрытий с требуемыми



физико-механическими свойствами. Основным условием осуществления стабильного протекания процесса МЭУ является дозированная подача ФМП в РЗ, согласованная с мощностью подводимой энергии. Однако ни одно из применяющихся в установках дозирующих устройств (ДУ) не обеспечивает в полной мере выполнения данного условия. Известные усовершенствования системы дозирования, а также осуществление процесса МЭУ в защитной среде улучшают лишь частично некоторые технологические показатели, но проблему в целом кардинально не решают.

Разработана классификация возможных принципиальных схем МЭУ ПП деталей машин, в основу которой положена векторная интерпретация магнитно-электрических способов обработки, предложенная Г.С. Шулевым. Анализ принципиальных схем МЭУ ПП показал, что наиболее перспективной является схема, реализующая второй класс (векторы магнитного поля  $\vec{B}$  и технологического тока  $\vec{I}$  взаимно параллельны и перпендикулярны вектору механического перемещения  $\vec{V}$ ) с нанесением покрытий периферией инструмента электрода (ИЭ), которая и предложена в качестве основы для разработки и проведения исследований в данной работе.

Анализ влияния основных технологических факторов МЭУ на свойства покрытий показал, что ранее проведенные исследования процесса МЭУ деталей тел вращения не позволяют однозначно представить и не в полной мере объясняют основные электрофизические явления, происходящие при формировании покрытий на ПП деталей машин.

В заключение на основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны общий подход выполнения цели исследования, оборудование, материалы и методики проведения экспериментов, используемые при решении поставленных задач.

В основу общей методики исследования был положен комплексный подход, включающий анализ проблемы, проведение теоретических исследований по разработке физической и математической моделей, лабораторные исследования и эксплуатационные испытания.

В разработанных устройствах для МЭУ ПП деталей машин автором предложены основные принципы построения систем СП путем автоматического регулирования одного из следующих параметров: количества ФМП, подаваемого в РЗ (А.с. 1301601; А.с. 1743743); температурного режима в РЗ (А.с. 1094729); величины РЗ (А.с. 1238916; А.с. 1627352; заявка а19991006); скорости перемещения обрабатываемой детали (А.с. 1718457).

Установлено, что наиболее простым в реализации и надежным в работе является способ СП МЭУ путем автоматического регулирования величины РЗ, который поясняется рис. 1.

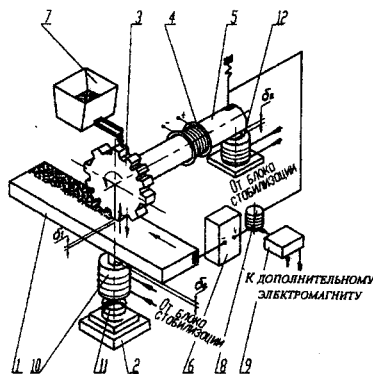


Рис. 1. Схема стабилизации процесса магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей:

1 - деталь; 2 - электроизоляционная прокладка; 3 - инструмент-электрод; 4 - катушка; 5 - оправка; 6 - источник технологического тока; 7 - дозирующее устройство; 8 - датчик; 9 - блок стабилизации; 10, 12 - дополнительный электромагнит; 11 - пружина

блоком стабилизации 9. Последний вырабатывает соответствующие управляющие сигналы, передаваемые на дополнительный электромагнит, установленный с зазором  $\delta_2$  либо под деталью 1, либо под оправкой 5. В первом случае дополнительный электромагнит 10, сердечник которого 11 подпружинен и механически связан с деталью 1, вызывает линейные перемещения в вертикальной плоскости самой детали (А.с. 1627352). Во втором - дополнительный электромагнит с жестко установленным сердечником вызывает угловые (А.с. 1238916) или линейные перемещения в вертикальной плоскости (заявка а19991006) оправки совместно с ИЭ. В обоих случаях происходит регулирование величины РЗ в соответствии с изменением электрического сопротивления в нем, и тем самым обеспечивается СП МЭУ.

Лабораторные исследования проводились на установках двух типов: I - с регулированием РЗ путем линейного перемещения детали; II - с регулированием РЗ путем углового перемещения оправки с ИЭ.

В качестве материалов образцов в исследованиях применялись стали, достаточно широко используемые в машиностроении: 20, 45, У10А, 38ХС, 40Х, 65Г. Для МЭУ предложены ФМП как из известных ферросплавов, свой-

Обрабатываемая деталь 1, электроизолированная прокладкой 2, устанавливается с РЗ  $\delta_1$  относительно ИЭ 3, закрепленного совместно с электромагнитной катушкой 4 на оправке 5, кинематически связанной с приводом. Детали и инструменту-электроду (ИЭ) сообщаются необходимые технологические движения, а в РЗ подаются напряжения от источника технологического тока (ИТ) 6 и ФМП из ДУ 7. В результате электрических разрядов, происходящих в РЗ, порошок расплавляется и наносится на обрабатываемую поверхность. При изменении электрического сопротивления в РЗ (из-за неравномерной подачи ФМП, непостоянства магнитных, электрических, механических характеристик элементов установок и процесса МЭУ) адекватно изменяется величина силы технологического тока в индукционном датчике тока 8 и, соответственно, величина магнитной индукции магнитного поля, наводимого в нем, воспринимаемая

ства покрытий из которых или недостаточно изучены (ФБ-6, ФБ-10, ФБ-17, ФХБ-1), или ранее вообще не изучались – серый чугун СЧ20, так и новые, специально разработанные – бористый чугун БЧ-1.

Свойства нанесенных покрытий исследовали, в основном используя стандартные методики. Металлографический анализ проводился на микроскопе МИМ-8М, а измерения микротвердости (по ГОСТ 9450-76) – на приборе ПМТ-3. Исследования износостойкости покрытий при трении скольжения со смазкой, содержащей абразив, и без него проводили на машине трения СМТ-1 по схеме «диск – колодка», а износостойкость в условиях абразивного изнашивания – на машине трения типа АР (Германия) трением о закрепленный абразив. Исследования ударно-абразивного изнашивания проводили на лабораторной установке собственной конструкции (Патент РБ 1066), выполненной как приспособление к токарному станку. При осуществлении электрических разрядов в РЗ проводилось осциллографирование процесса МЭУ по специально разработанной схеме.

Третья глава посвящена теоретическому обоснованию физической сущности СП МЭУ и изучению электрофизических явлений, протекающих при формировании покрытий на ПП деталей машин. Электромеханическое преобразование энергии при СП МЭУ рассмотрено на примере установки второго типа, электромагнитная схема которой представлена на рис. 2.

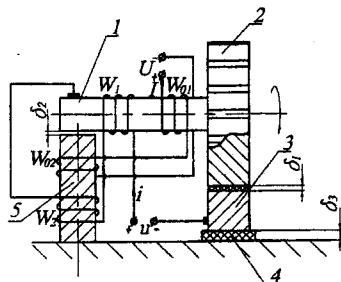


Рис. 2. Электромагнитная схема установки второго типа:

- 1 – оправка; 2 – ИЭ; 3 – деталь;
- 4 – электроизоляционная прокладка;
- 5 – дополнительный электромагнит;
- $W_{01}$  и  $W_1$  – основная и дополнительная обмотки основного электромагнита;
- $W_{02}$  и  $W_2$  – основная и дополнительная обмотки дополнительного электромагнита

Проблема стабилизации в предложенном способе и устройствах для МЭУ ПП в первую очередь связана со спецификой РЗ как объекта регулирования. С одной стороны, электрическое (омическое) сопротивление зазора  $R\delta(t)$  зависит от величины этого зазора  $\delta_1$ , а следовательно, и количества ФМП в нем. С другой стороны, состояние РЗ определяется не только объемом ФМП в зазоре, но и неравномерностью его подачи из ДУ, интенсивностью расплава ФМП при протекании по нему технологического тока, появлением в зазоре продуктов расплава, возникновением коротких замыканий. Все перечисленные факторы зависят от времени и также влияют на величину сопротивления  $R\delta(t)$ , а это сопротивление,

в свою очередь, – на величину технологического тока, согласно закону Ома. Величина РЗ определяется также электромагнитными силами  $F_1$  и  $F_2$ ,

возникающими в воздушных зазорах  $\delta_1$  и  $\delta_2$  за счет протекания токов по обмоткам  $W_{01}$ ,  $W_1$  основного и  $W_{02}$ ,  $W_2$  дополнительного электромагнитов и определяемыми по законам электромагнетизма и классической механики.

В общем случае, математические зависимости, описывающие электромеханическое преобразование энергии в рассматриваемых устройствах (рис. 1 и 2), имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} R_s(t) &= \rho \cdot \frac{\delta_1 + \Delta}{S_1}; \\ u &= [R + R_s(t)]i(t) + L \frac{di(t)}{dt}; \\ \left[ \frac{I_0(w_{01} + w_{02}) + i(w_1 + w_2)}{1 + \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{\delta_2 + \Delta}{\delta_1 + \Delta} + \frac{\delta_3}{\delta_1 + \Delta}} \right]^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot S_1}{2(\delta_1 + \Delta)^2} + \left[ \frac{I_0(w_{01} + w_{02}) + i(w_1 + w_2)}{1 + \frac{S_2}{S_1} \cdot \left( \frac{\delta_1 + \Delta + \delta_3}{\delta_2 + \Delta} \right)} \right]^2 & \times \\ \times \frac{\mu_0 \cdot S_2}{2 \cdot (\delta_2 + \Delta)^2} = m \frac{d^2 \Delta}{dt^2} + mg - c \cdot \delta_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление ФМП, Ом·м;  $\Delta$  – приращение величины РЗ при изменении технологического тока относительно  $i_{\text{отт}}$ , причем  $\Delta > 0$ , если  $i > i_{\text{отт}}$ , и наоборот, м;  $u$  – напряжение ИТ, В;  $R$  и  $L$  – активное сопротивление и сопротивление индуктивности обмоток катушек, Ом;  $w_{01}$ ,  $w_{02}$ ,  $w_1$ ,  $w_2$  – число витков в основных и дополнительных обмотках электромагнитов;  $m$  – масса подвижной части устройства, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $S_1$  – поперечное сечение цепочки из ФМП на пути магнитного потока в РЗ  $\delta_1$ , мм<sup>2</sup>;  $S_2$  – поперечное сечение воздушного зазора  $\delta_2$ , мм<sup>2</sup>;  $c$  – жесткость пружины дополнительного электромагнита, Н/мм;  $t$  – время, с.

Решение данных уравнений позволяет найти связь между величинами технологического тока, электрического сопротивления РЗ и конструктивными параметрами устройств, дающую возможность обоснованно выбрать эти параметры, что особенно важно при проектировании и разработке новых устройств подобных типов.

В процессе формирования магнитно-электрических покрытий протекает целый ряд взаимосвязанных электрофизических явлений (формирование мостика из цепочек ФМП, расплавление контактирующих частиц цепочек с образованием жидкой перемычки, разрыв перемычки с образованием дугового разряда, перенос расплава на обрабатываемую поверхность, физико-химические преобразования в поверхностном слое).

Анализ процессов, протекающих за время одного цикла обработки, показывает, что толщина и качество наносимых покрытий находятся в сложной зависимости от следующих факторов: силы технологического тока; магнитной индукции в зоне обработки; исходной величины РЗ; размера частиц ФМП и скорости его подачи в РЗ; скорости перемещения обрабатываемой поверхности; частоты вращения ИЭ; химического состава и электромагнитных свойств ФМП и обрабатываемой детали; газовой среды в зоне обработки; исходной шероховатости обрабатываемой поверхности; времени обработки.

В четвертой главе содержатся результаты исследований влияния стабилизации процесса МЭУ на структуру и физико-механические свойства покрытий и дана оценка работоспособности их при различных видах изнашивания.

Металлографическими исследованиями установлено, что в структуре упрочненного слоя выделяется три зоны: верхняя (белая), внешне бесструктурная, не травящаяся обычными реактивами; переходная (темная); нижняя (структурно измененная). Основными структурными составляющими верхней зоны являются аустенит, мартенсит, комплексные бориды на основе FeB и Fe<sub>2</sub>B, карбиды и силициды В и Cr. Структурные составляющие переходной зоны образуются при встречной диффузии Al, Cr, Si, В от поверхности и С от стальной подложки. Структурно измененная зона представляет собой ферритно-цементитную смесь типа сорбита, троостита, перлита. Микротвердость верхней зоны не изменяется по глубине и находится в пределах (1200...2080)·10 МПа в зависимости от сочетания материалов ФМП и подложки. Толщина слоя верхней зоны составляет 0,15...0,3 мм. Толщина переходной зоны достигает 0,2 мм, в этой зоне наблюдается снижение микротвердости от верхней границы к нижней.

Стабилизация процесса МЭУ оказывает существенное влияние на качество наносимых покрытий. При упрочнении без СП в верхней зоне покрытия (рис. 3) четко видно большое количество микропор и раковин, что значительно снижает сплошность покрытия и ухудшает его физико-механические свойства. Для этих покрытий характерен большой разброс микротвердости относительно средних значений по всей глубине упрочненного слоя, а в белой зоне наблюдается даже снижение ее на 500...1000 МПа.

Результаты триботехнических испытаний показали, что МЭУ эффективно для повышения износостойкости покрытий в условиях абразивного изнашивания (рис. 4), а также при трении скольжения со смазкой, содержащей абразив, и без него (износостойкость возрастает в 3...5 раз). В условиях ударно-абразивного изнашивания электромагнитные покрытия обладают удовлетворительной работоспособностью только при ограниченных значениях удельной энергии удара (18...24 Дж/см<sup>2</sup>). Причем износостойкость покрытий существенно зависит как от материала ФМП, так и от СП МЭУ. В условиях трения скольжения со смазкой, содержащей абразив, износостойкость покрытий в за-

висимости от марки ФМП в порядке уменьшения располагается в следующей последовательности: БЧ-1 → ФХБ-1 → ФБ-17 → ФБ-10 → ФБ-6 → СЧ 20.

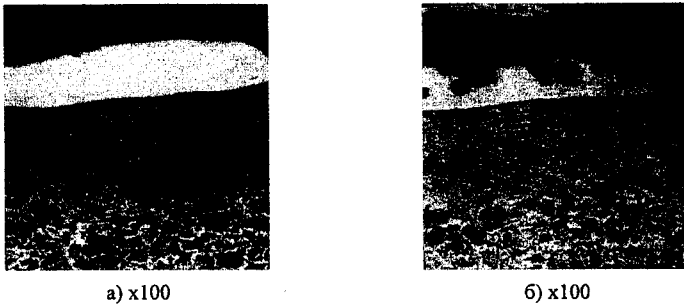


Рис. 3. Микроструктура покрытий из порошков БЧ-1 на сталь 45:  
а – со стабилизацией процесса МЭУ; б – без стабилизации процесса МЭУ

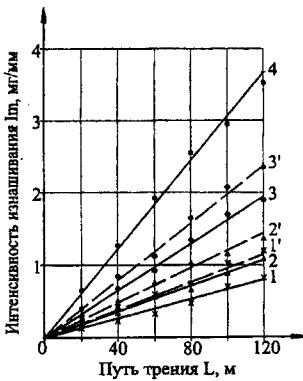


Рис. 4. Интенсивность абразивного изнашивания покрытий в зависимости от пути трения (МЭУ ФБ-17):  
1 – сталь 40Х; 2 – сталь 45;  
3 – сталь 20; 4 – сталь 65Г (HRCз 48...54);  
1' – 3' – без стабилизации МЭУ;  
1 – 3 – со стабилизацией МЭУ

МЭУ со стабилизацией процесса повышает износостойкость покрытий на 20...30 % по сравнению с МЭУ без СП. Причем СП МЭУ обеспечивает получение на подложках с меньшей твердостью более износостойких покрытий, чем на подложках с большей твердостью, но нанесенных без СП (кривые 2 и 1', рис. 4). Аналогичные закономерности характерны для всех исследованных видов изнашивания, что свидетельствует о том, что СП является важным фактором в совершенствовании технологии МЭУ.

Пятая глава посвящена оптимизации технологии МЭУ. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлены условия проведения опытов, выбраны наиболее важные критерии оптимизации МЭУ, получены математические модели процесса, по которым выявлены степень влияния технологических факторов на

параметры оптимизации и определены оптимальные режимы упрочнения. В качестве параметров оптимизации были приняты увеличение массы образцов  $\Delta m$  и сплошность покрытия, оцениваемая коэффициентом сплошности  $K_{сп}$ .

Независимыми переменными были основные технологические факторы МЭУ: сила технологического тока  $I$  ( $x_1$ ); магнитная индукция в рабочей зоне  $B$  ( $x_2$ ); величина исходного РЗ  $\delta$  ( $x_3$ ); частота вращения электрода  $n$  ( $x_4$ ); расход ФМП  $q$  ( $x_5$ ); продольная подача детали  $S$  ( $x_6$ ).

Математические модели процесса МЭУ для ФМП марок ФБ-17, БЧ-1, СЧ20, полученные с применением центрального композиционного ротационного равномерного плана, описываются уравнениями регрессии (2–7):

$$\Delta m_{\text{ФБ-17}} = 195,26 + 6,21x_1 + 2,65x_2 + 4,13x_3 + 1,96x_4 + 2,87x_5 - 1,64x_6 + 1,73x_1 \cdot x_2 - 1,16x_1 \cdot x_3 + 0,48x_1 \cdot x_5 - 1,12x_1 \cdot x_6 + 2,34x_2 \cdot x_3 - 0,78x_2 \cdot x_4 + 2,74x_2 \cdot x_5 + 0,14x_3 \cdot x_4 + 1,78x_3 \cdot x_5 + 0,28x_4 \cdot x_6 - 1,93x_1^2 - 0,98x_2^2 - 1,42x_3^2 - 0,71x_4^2 - 2,12x_5^2 + 0,15x_6^2; \quad (2)$$

$$\Delta m_{\text{БЧ-1}} = 191,13 + 5,71x_1 + 2,28x_2 + 4,87x_3 + 1,69x_4 + 2,17x_5 - 2,83x_6 + 1,67x_1 \cdot x_2 - 1,54x_1 \cdot x_3 + 0,65x_1 \cdot x_5 - 1,34x_1 \cdot x_6 + 3,09x_2 \cdot x_3 - 0,64x_2 \cdot x_4 + 3,09x_2 \cdot x_5 + 2,06x_2 \cdot x_6 + 1,93x_3 \cdot x_5 + 1,24x_3 \cdot x_6 - 0,72x_4 \cdot x_5 - 0,19x_5 \cdot x_6 - 2,24x_1^2 - 1,49x_2^2 - 1,89x_3^2 - 0,58x_4^2 - 2,59x_5^2 + 0,54x_6^2; \quad (3)$$

$$\Delta m_{\text{СЧ20}} = 172,31 + 5,87x_1 - 1,75x_2 + 3,82x_3 + 1,59x_4 + 2,24x_5 - 1,87x_6 + 1,43x_1 \cdot x_2 - 1,27x_1 \cdot x_3 + 0,21x_1 \cdot x_4 + 0,53x_1 \cdot x_5 - 1,08x_1 \cdot x_6 + 2,43x_2 \cdot x_3 - 0,69x_2 \cdot x_4 + 2,53x_2 \cdot x_5 + 1,23x_3 \cdot x_5 + 1,14x_3 \cdot x_6 - 0,83x_4 \cdot x_5 + 0,31x_4 \cdot x_6 - 0,21x_5 \cdot x_6 - 2,48x_1^2 - 2,12x_2^2 - 1,21x_3^2 - 0,53x_4^2 - 1,07x_5^2 + 0,24x_6^2; \quad (4)$$

$$K_{\text{сп.ФБ-17}} = 83,23 + 3,46x_1 + 2,41x_2 - 3,93x_3 - 1,81x_4 + 2,12x_5 - 1,36x_6 + 1,12x_1 \cdot x_2 + 1,23x_1 \cdot x_3 + 0,23x_1 \cdot x_4 + 0,58x_1 \cdot x_5 - 1,23x_1 \cdot x_6 + 1,41x_2 \cdot x_3 + 0,96x_2 \cdot x_4 + 1,63x_2 \cdot x_5 + 0,12x_2 \cdot x_6 + 0,28x_3 \cdot x_4 + 0,79x_3 \cdot x_5 - 0,69x_3 \cdot x_6 - 0,43x_4 \cdot x_5 - 0,21x_5 \cdot x_6 - 1,83x_1^2 - 1,16x_2^2 + 0,87x_3^2 + 0,33x_4^2 - 1,12x_5^2 + 0,24x_6^2; \quad (5)$$

$$K_{\text{сп.БЧ-1}} = 86,74 + 3,27x_1 + 3,32x_2 - 4,23x_3 - 1,94x_4 + 2,48x_5 - 1,58x_6 + 0,84x_1 \cdot x_2 - 0,96x_1 \cdot x_3 + 0,53x_1 \cdot x_5 - 1,12x_1 \cdot x_6 + 1,43x_2 \cdot x_3 + 0,83x_2 \cdot x_4 + 1,48x_2 \cdot x_5 + 1,58x_2 \cdot x_6 - 0,32x_3 \cdot x_4 + 0,51x_3 \cdot x_5 - 1,22x_3 \cdot x_6 - 0,51x_4 \cdot x_5 - 0,38x_4 \cdot x_6 - 2,11x_1^2 - 1,66x_2^2 + 0,94x_3^2 + 0,41x_4^2 - 1,37x_5^2 + 0,38x_6^2; \quad (7)$$

$$K_{\text{сп.СЧ-20}} = 67,43 + 1,57x_1 - 2,36x_2 - 3,75x_3 - 1,98x_4 + 1,96x_5 - 1,48x_6 + 0,72x_1 \cdot x_2 - 1,03x_1 \cdot x_3 + 0,38x_1 \cdot x_5 - 1,23x_1 \cdot x_6 + 1,83x_2 \cdot x_3 - 0,78x_2 \cdot x_4 + 1,98x_2 \cdot x_5 + 0,23x_2 \cdot x_4 + 0,92x_3 \cdot x_5 + 0,36x_3 \cdot x_6 - 0,52x_4 \cdot x_5 + 0,42x_4 \cdot x_6 - 2,14x_1^2 - 1,96x_2^2 + 0,63x_3^2 + 0,37x_4^2 - 0,87x_5^2 + 0,32x_6^2. \quad (8)$$

Оптимальные режимы процесса для этих порошков определены с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона методом спирального координатного спуска (таблица).

Оптимальные режимы МЭУ для исследуемых порошков

Порошок	Оптимальные значения факторов					
	I, А	B, Тл	$\delta$ , мм	n, мин <sup>-1</sup>	q, г/с·мм <sup>2</sup>	S, мм/мин
ФБ-17	104	0,39	1,02	105	$7,3 \cdot 10^{-3}$	320
БЧ-1	97	0,42	1,08	100	$8,5 \cdot 10^{-3}$	315
СЧ 20	92	0,24	0,94	85	$7,8 \cdot 10^{-3}$	295



В шестой главе приведены результаты эксплуатационных исследований и внедрения разработанных технологий и установок для МЭУ ПП деталей машин на предприятиях Республики Беларусь.

На основании анализа условий работы ПП деталей рабочих органов сельскохозяйственных, дорожных и строительных машин в качестве объекта исследования был выбран противорежущий брус измельчающего аппарата кормоуборочных комбайнов. С целью исследования динамики изнашивания режущих кромок брусьев проводились эксплуатационные испытания на кормоизмельчителе «Волгарь-5». В качестве критерия работоспособности бруса был принят радиус скругления его режущей кромки  $R_k$ , определяющийся по оттискам на свинцовых пластинках. Обработка экспериментальных данных на ЭВМ позволила получить эмпирическую зависимость, описывающую динамику изнашивания режущих кромок бруса в виде:

$$R_k = K_m \cdot N^n, \quad (9)$$

где  $R_k$  – радиус скругления режущей кромки бруса, мм;  $K_m$  – коэффициент, зависящий от материалов бруса и ФМП;  $N$  – количество измельченной зеленой массы,  $\text{кг} \cdot 10^3$ ;  $n$  – показатель степени, определяемый экспериментально ( $n \approx 2/3$ ).

Оценка износостойкости брусьев с МЭУ режущих кромок производилась с помощью коэффициента наработки:

$$K_n = \frac{N_{\max i}}{N_{\text{эм}}}, \quad (10)$$

где  $N_{\max i}$  – максимальная наработка режущей кромки  $i$ -того бруса до предельно допустимого значения ( $R_k^{\text{п}}$ ) радиуса скругления режущей кромки,  $\text{кг} \cdot 10^3$ ;  $N_{\text{эм}}$  – наработка одной режущей кромки эталонного (серийно выпускаемого) бруса,  $\text{кг} \cdot 10^3$ .

Анализ изнашивания режущих кромок с МЭУ в зависимости от количества измельченной массы (рис. 5) показывает, что наибольшую износостойкость имеют брусья, изготовленные из стали 65Г (кривая 4), у которых  $K_n = 4,04$ . У брусьев из стали 45 (кривая 3)  $K_n = 3,33$ , что выше, чем у брусьев из стали 65Г, упрочненных без СП (кривая 2) и имеющих  $K_n = 2,83$ . Это еще раз подтверждает эффективность стабилизации процесса МЭУ. Следует отметить также, что брусья из стали 20 по износостойкости (кривая 1,  $K_n = 1,58$ ) также превосходят серийно выпускаемые. Это дает основание, учитывая невысокую стоимость стали 20, рекомендовать использовать ее в качестве материала основы бруса с последующим МЭУ режущих кромок на ремонтных предприятиях сельскохозяйственного машиностроения.

Материал ФМП также оказывает существенное влияние на долговечность брусьев. В порядке уменьшения износостойкость режущих кромок

брусев из стали 45 с МЭУ со СП, в зависимости от марки ФМП, располагаются в следующей последовательности:

БЧ-1 ( $K_n = 4,25$ ) → ФХБ-1 ( $K_n = 3,46$ ) → ФБ-17 ( $K_n = 3,33$ ) → СЧ20 ( $K_n = 0,83$ ). (10)

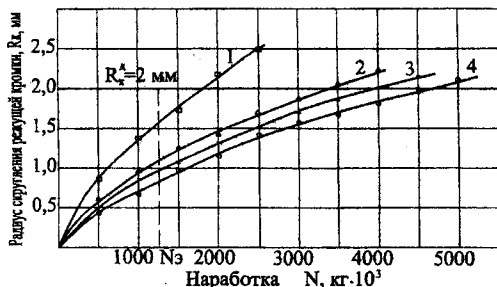


Рис. 5. Динамика изнашивания режущих кромок брусев в зависимости от количества измельченной зеленой массы и материала бруса (материал ФМП — ферробор ФБ-17): 1 — сталь 20; 2 — сталь 65Г (МЭУ без СП); 3 — сталь 45; 4 — сталь 65Г;  $N_0$  — максимальная наработка эталонного бруса

из серого чугуна можно рекомендовать для упрочнения и восстановления режущих элементов рабочих органов сельскохозяйственной техники в условиях ремонтных баз сельскохозяйственных предприятий.

С целью определения оптимального варианта технологического процесса упрочнения режущих кромок брусев, обеспечивающих гарантийный срок службы комбайна (2 сезона), совместно с СКБ ПО «Гомсельмаш» проводились полевые испытания. Одновременно испытывались брусья, упрочненные следующими методами: индукционной наплавкой ТВЧ (РостНИИТМ, г. Ростов), электроконтактным припеканием и газопламенным напылением (ИНДМАШ, г. Минск), МЭУ (метод предложен автором). Полевые испытания показали, что из всех предложенных методов повышения долговечности брусев наиболее эффективным является МЭУ, у которого коэффициент наработки составил  $K_n = 3,9$ , тогда как у остальных он находится в пределах  $K_n = 1,82 \dots 2,8$ .

Практическим результатом проведенных исследований явилось внедрение технологии МЭУ в производство на промышленных предприятиях г. Гомеля:

- в цехе мостов Гомельского завода самоходных комбайнов ПО «Гомсельмаш» создан участок по МЭУ режущих кромок противорежущих брусев комбайнов КСК-100А и КПКУ-75, состоящий из двух установок (рис. 6). Экономический эффект от внедрения технологии МЭУ в течение первых 5-ти лет эксплуатации составил 245276 руб. ежегодно (в ценах 1990 г.). Участок по МЭУ режущих кромок противорежущих брусев функционирует и в настоящее время;

Все исследованные ФМП, за исключением СЧ 20, обеспечивают значительное повышение износостойкости режущих кромок. Брусья с покрытиями из порошков СЧ 20 ( $K_n = 0,83$ ) по износостойкости незначительно уступают серийным. Но, учитывая доступность, дешевизну (их можно изготавливать из чугуновой стружки) и простоту реализации процесса МЭУ, порошки

— в цехе ремонта комбайна КСК-100 Гомельского мотороремонтного завода внедрена установка для упрочнения и восстановления режущих кромок противорежущих брусьев МЭУ. Экономический эффект от внедрения технологии МЭУ в течение первых 5-ти лет эксплуатации составил 29204 руб. ежегодно (в ценах 1990 г.).



Рис. 6. Промышленная установка для МЭУ режущих кромок противорежущих брусьев (а), входящая в состав участка (б) в цехе мостов ПО «Гомсельмаш»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа предложенной классификации принципиальных схем разработан способ и созданы установки МЭУ ПП, отличительной особенностью которых является обеспечение СП за счет автоматического регулирования величины РЗ в соответствии с изменением электрического сопротивления в рабочей зоне [1, 5, 27 – 35].

2. Получены математические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между электромагнитными ( $J$ ,  $U$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $\rho$ ) и конструктивными ( $\delta$ ,  $S$ ,  $w$ ,  $m$ ,  $c$ ) параметрами устройств. Уравнения позволяют обоснованно выбирать оптимальные параметры процессов и установок для МЭУ ПП, а также являются основой разработки и проектирования эффективных процессов и устройств МЭУ других поверхностей деталей машин [10, 18, 22, 23, 24].

3. Рассмотрены электрофизические явления, протекающие в процессе формирования магнитно-электрических покрытий: формирование мостика из цепочек ФМП, расплавление контактирующих частиц цепочек с образованием жидкой перемычки, разрыв перемычки с образованием дугового разряда, перенос расплава на обрабатываемую поверхность, физико-химические преобразования в поверхностном слое [2, 3, 5, 9, 11].

4. Установлено, что СП МЭУ оказывает существенное влияние на качество наносимых покрытий: сплошность возрастает на 25...35 % за счет уменьшения количества микропор и раковин в белой зоне, а микротвердость повышается на 500...1000 МПа. Выявлено влияние химического состава материалов на триботехнические характеристики и даны рекомендации по выбору материалов для конкретных условий эксплуатации. Установлено, что МЭУ повышает износостойкость покрытий в условиях трения скольжения со смазкой, содержащей абразив, и без него и при абразивном изнашивании в 2...5 раз по сравнению с упрочнением традиционными методами термической обработки, а в условиях ударно-абразивного изнашивания электромагнитные покрытия обладают удовлетворительной работоспособностью только при ограниченных значениях удельной энергии удара ( $18...24 \text{ Дж/см}^2$ ). МЭУ со СП повышает износостойкость покрытий на 20...30 % и обеспечивает получение на подложках с меньшей твердостью более износостойких покрытий, чем на подложках с большей твердостью, но нанесенных по традиционной схеме МЭУ без СП, что свидетельствует о том, что СП является важным фактором в совершенствовании технологии МЭУ [4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 17, 19, 36].

5. Получены математические модели МЭУ ПП ферропорошками ФБ-17, БЧ-1, СЧ 20, позволяющие, используя обобщенную функцию желательности Харрингтона, определить методом спирального координатного спуска оптимальные режимы упрочнения:  $I = 92...104 \text{ А}$ ;  $B = 0,24...0,39 \text{ Тл}$ ;  $\delta = 0,94...1,02 \text{ мм}$ ;  $n = 85...105 \text{ мин}^{-1}$ ;  $q = (7,3...8,5) \cdot 10^{-3} \text{ г/с}\cdot\text{мм}^2$ ;  $S = 235...320 \text{ мм/мин}$  [4, 9, 11, 20].

6. Разработаны технологии МЭУ и восстановления ПП режущих кромок рабочих органов измельчающих аппаратов кормоуборочной техники и рекомендации по экономичному применению средств и материалов в конкретных производственных условиях. Практическими результатами исследований явилось внедрение технологии и установок МЭУ ПП в производство на промышленных предприятиях г. Гомеля с экономическим эффектом более 250000 рублей ежегодно (в ценах 1990 г.) [1, 7, 13, 15, 16, 21, 26, 29, 32].

Автор выражает благодарность канд. техн. наук, профессору Г.С. Шулеву за научно-методическую помощь в процессе выполнения данной работы и при обсуждении полученных результатов.



## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### Статьи в научных журналах

1. Шулев Г.С., Люцко В.А., Ковтун А.Д. Магнитно-электрическое упрочнение деталей сельхозмашин // Тракторы и сельхозмашины. – 1987. – № 7 – С. 40 – 42.
2. Шулев Г.С., Сысоев П.В., Дмитриченко Э.И., Люцко В.А. Повышение износостойкости деталей машин комплексным магнитно-электрическим способом // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, № 5. – С. 938 – 943.
3. Кульгейко М.П., Люцко В.А., Мельников Д.В., Соболев В.Ф. Механизм формирования поверхностного слоя при магнитно-электрическом упрочнении // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2000. – № 1. – С. 19 – 25.
4. Кульгейко М.П., Люцко В.А., Мельников Д.В., Соболев В.Ф. Влияние технологических факторов на показатели процесса магнитно-электрического упрочнения // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 48 – 52.
5. Пантелеенко Ф.И., Люцко В.А., Соболев В.Ф., Коршунов А.И. Ротационное магнитно-электрическое упрочнение и восстановление цилиндрических поверхностей деталей машин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2003. – № 4. – С. 13 – 16.

### Статьи в сборниках трудов

6. Шамшур А.С., Люцко В.А. Исследование влияния легированных масел на повышение износостойкости деталей машин // Машиностроение и приборостроение: Сб. науч. тр. Вып. 9. – Минск: Вышэйш. шк., 1977. – С. 34 – 37.
7. Шулев Г.С., Люцко В.А. Повышение износостойкости противорежущего бруса комбайна КСК-100 полиимпульсной электроферромагнитной обработкой // Машиностроение: Сб. науч. тр. Вып. 10. – Минск: Вышэйш. шк., 1985. – С. 133 – 135.
8. Кульгейко М.П., Люцко В.А., Мельников Д.В., Соболев В.Ф. Эффективность стабилизации энергетического воздействия при магнитно-электрическом упрочнении // Машиностроение: Сб. науч. тр. Вып. 18 / Под ред. М.П. Филонова. – Минск: УП «Технопроект», 2002. – С. 394 – 398.

### Статьи в сборниках материалов конференций

9. Шулев Г.С., Коршунов А.И., Люцко В.А., Соболев В.Ф. Упрочнение поверхностей деталей машин при магнитно-электрической обработке // Четвертый науч.-техн. семинар с междунар. участием по неконвенционным техн. в машиностр. – Ботевград, Болгария, 1989. – С. 124 – 131.
10. Шулев Г.С., Солонков В.В., Грачев С.А., Люцко В.А. Пути повышения качества покрытий деталей машин при магнитно-электрическом упроч-

нении // Четвертый науч.-техн. семинар с междунар. участием по неконвенционным технол. в машиностр. – Ботевград, Болгария, 1989. – С. 132 – 135.

11. Шулев Г.С., Коршунов А.И., Люцко В.А., Соболев В.Ф. Повышение износостойкости конструкционных материалов методами магнитно-электрической обработки // «Научная сессия – 89» Наука, обучение, производство», посв. 35-й годовщине ВТУ «Ангел Кончев». – Русе, Болгария, 1989. – С. 121 – 129.

### Материалы конференций

12. Акулич А.П., Кульгейко М.П., Красюк С.И., Люцко В.А. Исследование триботехнических характеристик ферромагнитных покрытий // Материалы науч.-техн. конф., посв. 30-летию ин-та. – Брест: Брестский политех. ин-т, 1996. – С. 90.

13. Коршунов А.И., Люцко В.А., Соболев В.Ф., Шулев Г.С. Повышение износостойкости плоских поверхностей прессвязальных машин // Материалы науч.-техн. конф., посв. 30-летию ин-та. – Брест: Брестский политех. ин-т, 1996. – С. 110.

14. Люцко В.А. Свойства покрытий, сформированных в процессе магнитно-электрического упрочнения // Материалы науч.-техн. конф., посв. 30-летию ин-та. – Брестский: Брестский политех. ин-т, 1996. – С. 130 – 114.

15. Люцко В.А., Соболев В.Ф., Коршунов А.И. Применение метода магнитно-электрического упрочнения для восстановления деталей прессвязальных машин металлокордового производства // Материалы междунар. 52-й науч.-техн. конф. политех. академ. – Минск, 1997. – С. 17.

16. Кульгейко М.П., Люцко В.А., Демиденко Е.Н., Соболев В.Ф. Повышение долговечности деталей кормоуборочной техники методами магнитно-электрической обработки // Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Гомель: Гомельский политех. ин-т, 1998. – С. 103 – 104.

17. Люцко В.А., Красюк С.И., Соболев В.Ф. Повышение эффективности магнитно-электрического упрочнения // Современные направления развития производственных технологий и робототехники: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Могилевский машиностр. ин-т, 1999. – С. 135.

18. Кульгейко М.П., Мельников Д.В., Люцко В.А., Соболев В.Ф. Система стабилизация технологического тока при магнитно-электрическом упрочнении // Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Гомель: Гомельский гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого, 2000. – Ч. II. – С. 77 – 79.

19. Пантелеенко Ф.И., Люцко В.А., Слуцкий С.С. Исследование комплексного изнашивания поверхностей, упрочненных магнитно-электрическим способом // Материалы, технология и оборудование для уп-

рочнения и восстановления деталей машин: Тематич. сб. / Под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Минск: УП «Технопринт»; Новополоцк: Полотский гос. ун-т, 2003. – С. 245.

### **Тезисы докладов на конференциях**

20. Люцко В.А., Шулев Г.С. Повышение ресурса деталей машин импульсной обработкой // Технологическое обеспечение ресурса и надежности машин: Тез. докл. всесоюз. науч.-техн. конф., Воронеж, 1 – 3 октября 1980. – М., 1980. – С. 211 – 213.

21. Шулев Г.С., Люцко В.А. Упрочнение деталей кормоуборочных комбайнов в электромагнитном поле // Пути повышения технологического уровня и надежности кормоуборочной техники: Тез. докл. науч.-практ. конф. – Гомель, 1986. – С. 33 – 34.

22. Шулев Г.С., Люцко В.А., Соболев В.Ф. Стабилизация процесса магнитно-электрического упрочнения // Высокоэффективное оборудование и технические процессы упрочнения режущих инструментов и деталей машин: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф. – Могилев: Могилевский машиностр. ин-т, 1990. – С. 108 – 109.

23. Люцко В.А. Магнитно-электрическое упрочнение и восстановление деталей машин // Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин: Тез. докл. межреспуб. науч.-техн. конф. – Волгоград, 1991. – С. 112 – 113.

24. Шулев Г.С., Аникин В.Ф., Демиденко Е.Н., Люцко В.А. Повышение эффективности магнитно-электрической обработки // Тез. докл. XXI науч.-техн. конф. в рамках проблемы «Наука и мир». – Брест: Брестский политех. ин-т, 1994. – С. 7 – 8.

25. Люцко В.А. Магнитно-электрическое упрочнение быстроизнашивающихся деталей машин // Тез. докл. XXI науч.-техн. конф. в рамках проблемы «Наука и мир». – Брест: Брестский политех. ин-т, 1994. – С. 16 – 17.

26. Люцко В.А. Исследование динамики износа режущих элементов кормоуборочной техники, упрочненных магнитно-электрическим способом // Современные проблемы машиноведения: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Гомель: Гомельский гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого, 2002. – С. 40.

### **Авторские свидетельства, заявки на изобретения**

27. А.с. 1094729 СССР, МКИ<sup>2</sup>В23Р1/18. Устройство для электроэрозийного нанесения покрытий / Г.С. Шулев, Э.И. Дмитриченко, В.А. Люцко (СССР). – № 3538192/25-27; Заявлено 10.01.83; Оpubл. 30.05.84, Бюл. № 20 // Открытия. Изобретения. – 1984. – № 20. – С. 34.



28. А.с. 1133766 СССР, МКИ<sup>2</sup>В22F7/04, С23С17/00. Устройство для нанесения ферромагнитных покрытий / Г.С. Шулев, В.А. Люцко, В.Ф. Соболев (СССР). – № 3670175/22-02; Заявлено 07.12.83.

29. А.с. 1238916 СССР, МКИ<sup>4</sup>В23Н9/00//В23Н7/18. Устройство для нанесения покрытий из ферромагнитных порошков / Г.С. Шулев, В.А. Люцко, А.Д. Ковтун, В.А. Совпель, П.Е. Голушко (СССР). – № 3816474/25-08; Заявлено 26.09.84; Оpubл. 23.06.86, Бюл. № 3 // Открытия. Изобретения. – 1986. – № 23. – С. 38.

30. А.с. 1301601 СССР, МКМ<sup>4</sup>В23Н9/00. Устройство для упрочнения поверхностей деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле / Г.С. Шулев, В.А. Люцко, О.И. Палий (СССР). – № 3943643/31-08; Заявлено 08.08.85; Оpubл. 07.04.87, Бюл. № 3 // Открытия. Изобретения. – 1987. – № 13. – С. 54.

31. А.с. 1352783 СССР, МКИ<sup>4</sup>В23К11/06. Устройство для нанесения покрытий из электропроводных порошков / Г.С. Шулев, В.Ф. Буйневич, В.А. Люцко (СССР). – № 4038433/31-27; Заявлено 17.03.86.

32. А.с. 1627352 СССР, МКИ<sup>3</sup>В23Н9/00. Устройство для нанесения покрытий из ферромагнитных порошков / Г.С. Шулев, В.И. Адаменко, А.М. Ищенко, М.С. Куприянов, В.А. Люцко, А.С. Нестеров, О.И. Палий, В.Ф. Соболев, В.В. Соленков (СССР). – № 4494010/08; Заявлено 17.10.88; Оpubл. 15.02.91, Бюл. № 6 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 6. – С. 39.

33. А.с. 1718457 СССР МКИ<sup>3</sup>В3Н9/00. Устройство для упрочнения поверхностей токопроводящих деталей ферромагнитным порошком / Г.С. Шулев, В.А. Люцко, В.А. Хенсон (СССР). – № 4760376/27; Заявлено 20.11.89.

34. А.с. 1743743 СССР МКИ<sup>3</sup>В23Н9/00. Устройство для упрочнения поверхностей деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле / Г.С. Шулев, В.А. Люцко, О.И. Палий, В.Ф. Соболев (СССР). – № 4780937//08; Заявлено 11.01.90; Оpubл. 30.06.92, Бюл. № 24 // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 24. – С. 55.

35. Заявка МКИ В 23/1. Устройство для магнитно-электрического напыления покрытий / М.П. Кульгейко, В.А. Люцко, Д.В. Мельников, В.Ф. Соболев (ВУ) – а 19991006; Заявлено 11.11.1999; Оpubл. 30.03.2001, Бюл. № 1 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. камітэт Рэсп. Беларусь. – 2001. – № 1. – С. 23.

36. Заявка МП.67G01 № 3/96. Устройство испытания материалов на ударно-абразивную износостойкость / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Люцко, М.П. Кульгейко, А.И. Коршунов, В.Ф. Соболев, С.И. Красюк (ВУ) – U 20030040; Заявлено 06.02.03. Положит. решение на патент № 1066 от 18.04.2003.

## РЭЗЮМЕ

ЛЮЦКО Васіль Аляксандравіч

ТЭХНАЛОГІЯ І ЎСТАНОЎКІ МАГНІТНА-ЭЛЕКТРЫЧНАГА  
ЎМАЦАВАННЯ ПЛОСКІХ ПАВЕРХНЯЎ ДЭТАЛЯЎ МАШЫН

**Ключавыя словы:** магнітна-электрычнае ўмацаванне, стабілізацыя, магнітнае поле, электрычны ток, ферамагнітны парашок, рабочы зazor, пакрыццё, плоскія паверхні, зносаўстойлівасць.

Аб'ектам даследавання з'яўляецца працэс магнітна-электрычнага ўмацавання плоскіх паверхняў дэталей машын. Прадмет даследавання – заканамернасці стабілізацыі працэса МЭУ і ўплыў тэхналагічных фактараў на фарміраванне зносаўстойлівых пакрыццяў.

Мэта работы – распрацоўка тэхналагічных асноў і ўстановак МЭУ плоскіх паверхняў дэталей машын, якія забяспечваюць высокія якасці пакрыццяў і прадукцыйнасць апрацоўкі за кошт стабілізацыі электрамагнітных параметраў працэсу.

Прапанаваны спосаб і ўстаноўкі МЭУ плоскіх паверхняў, якія забяспечваюць стабілізацыю працэса нанясення пакрыццяў шляхам аўтаматычнага рэгулявання велічыні рабочага зазору ў адпаведнасці са змяненнем электрычнага супраціўлення ў рабочай зоне. Атрыманы матэматычныя залежнасці, якія ўстанаўліваюць узаемасувязь паміж электрамагнітнымі і канструкцыйнымі параметрамі ўстановак, даюць магчымасць абгрунтавана выбраць гэтыя параметры. Разгледжаны электрафізічныя з'явы і распрацаваны матэматычныя мадэлі працэса нанясення пакрыццяў на плоскія паверхні дэталей машын, якія дазваляюць аптымізаваць тэхналогію МЭУ. Паказана, што стабілізацыя працэса з'яўляецца важным фактарам ва ўдасканаленні тэхналогіі МЭУ, якая забяспечвае павышэнне зносаўстойлівасці наношваемых пакрыццяў на 20...30 % і якая дазваляе прымяняць больш эканамічныя сродкі і матэрыялы ў параўнанні з традыцыйнымі спосабамі МЭУ.

Атрыманы эмпірычныя залежнасці, якія апісваюць дынаміку зношвання рэжучых кромак рабочых органаў здрабняльных апаратаў кормаўборачнай тэхнікі. Распрацавана і ўкаранена ў вытворчасць тэхналогія магнітна-электрычнага ўмацавання рэжучых кромак процірэжучых элементаў здрабняльных апаратаў кормаўборачных камбайнаў, якая забяспечвае павышэнне іх зносаўстойлівасці ў 2,5...3,5 разы і зніжэнне працаёмкасці вырабу ў 2 разы ў параўнанні з сёрыяна выпускаемымі.

Вобласць прымянення распрацовак – умацаванне і аднаўленне плоскіх паверхняў дэталей машын у розных галінах машынабудаўнічай і рамонтнай вытворчасці.

## РЕЗЮМЕ

ЛЮЦКО Василий Александрович

ТЕХНОЛОГИЯ И УСТАНОВКИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
УПРОЧНЕНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Ключевые слова:** магнитно-электрическое упрочнение, стабилизация, магнитное поле, электрический ток, ферромагнитный порошок, рабочий зазор, покрытие, плоские поверхности, износостойкость.

Объектом исследования является процесс магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин. Предмет исследования – закономерности стабилизации процесса МЭУ и влияния технологических факторов на формирование износостойких покрытий.

Цель работы – разработка технологических основ и установок МЭУ плоских поверхностей деталей машин, обеспечивающих высокие качества покрытий и производительность обработки за счет стабилизации электромагнитных параметров процесса.

Предложен способ и установки МЭУ плоских поверхностей, обеспечивающих стабилизацию процесса нанесения покрытий путем автоматического регулирования величины рабочего зазора в соответствии с изменением электрического сопротивления в рабочей зоне. Получены математические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между электромагнитными и конструктивными параметрами установок и дающие возможность обоснованно выбрать эти параметры. Рассмотрены электрофизические явления и разработаны математические модели процесса нанесения покрытий на плоские поверхности деталей машин, позволяющие оптимизировать технологию МЭУ. Показано, что стабилизация процесса является важным фактором в совершенствовании технологии МЭУ, обеспечивающая повышение износостойкости наносимых покрытий на 20...30 % и позволяющая применять более экономичные средства и материалы по сравнению с традиционными способами МЭУ.

Получены эмпирические зависимости, описывающие динамику изнашивания режущих кромок рабочих органов измельчающих аппаратов кормоуборочной техники. Разработана и внедрена в производство технология магнитно-электрического упрочнения режущих кромок противорежущих элементов измельчающих аппаратов кормоуборочных комбайнов, обеспечивающая повышение их износостойкости в 2,5...3,5 раза и снижение трудоемкости изготовления в 2 раза по сравнению с серийно выпускаемыми.

Область применения разработок – упрочнение и восстановление плоских поверхностей деталей машин в различных отраслях машиностроительного и ремонтного производства.

## SUMMARY

LYUTSKO Vasili

### KNOW - HOW AND INSTALLATION FOR MAGNETO - ELECTRIC STRENGTHENING OF MACHINE PARTS PLANE SURFACES

**Key words:** magneto - electric strengthening stabilization, magnetic field, electric current, running clearance, coating, plane surfaces wear resistance.

The object of the research is the magneto-electric strengthening (MES) process of machine parts plane surfaces. The subject of the research is the regularity of stabilization the magneto-electric strengthening process and the influence of technological factory on wear resistant coatings forming.

The purpose of the paper is working out technological basis and MES installations for machine parts plane surfaces providing a high quality coating and efficiency of treatment due to stabilization of electro-magnetic parameters of the process a new method and machine parts plane surfaces MES installations providing stabilization of surface coatings by automatic regulation of a running of electric voltage in the working area are given in the work.

Mathematical dependences establishing the interrelations between electro-magnetic and structural parameters of the installation and allowing choose optimal parameters have been received. Electro-physical phenomena have been examined mathematical models of the process for machine parts plane surfaces crating which allow to optimize the MES technology have been worked out. It is shown that stabilization of the process providing the increase of coating wear resistance by 20...30 % and providing more cost effective material saving methods in comparison with conventional MES methods.

Empirical dependences showing the dynamics of grinding units attacking edges' wear have been received.

The MES technology of attacking edges of silo-harvesters' anticutting elements increasing their wear resistance up to 2,5...3,5 times and decreasing labour input two times in comparison with repetitive manufacturing has been worked out and introduced into production.

The developments can be used for strengthening and repairing of machine parts plane surfaces in different branches of machine - building and maintenance industry.

**ЛЮЦКО Василий Александрович**

**ТЕХНОЛОГИЯ И УСТАНОВКИ  
МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ  
ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

---

Подписано в печать 22.12.03.	Формат 60×84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .
Усл. печ. л. 1,39.	Уч.-изд. л. 1,38.
Тираж 100 экз.	Заказ 9

---

**Отпечатано на ризографе ПГУ  
211440 г. Новополюцк, ул. Блохина, 29**