

На правах рукописи

КИСЕЛЬ ЮРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Специальность: 05.20.03 – технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Саратов 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Брянская государственная сельскохозяйственная академия»

Научный консультант: **Гурьянов Геннадий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Брянская государственная сельскохозяйственная академия»

Официальные оппоненты: **Юдин Владимир Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Надежность и ремонт машин имени И.С. Левитского», ФГБОУ ВПО «Российский государственный аграрный заочный университет»;

Серебровский Владимир Исаевич, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе ФГБОУ ВПО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени профессора И.И. Иванова»

Лебедев Анатолий Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технический сервис, стандартизация и метрология» ФГБОУ ВПО «Ставропольский государственный аграрный университет»

Ведущая организация: Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка» Россельхозакадемии

Защита диссертации состоится «__» _____ в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ».

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, ученому секретарю диссертационного совета Чекмареву В.В. e-mail: chekmarev.v@yandex.ru

Автореферат разослан и «__» _____ 201 г. и размещен на сайте ВАК www.vak.ed.gov.ru.

**Ученый секретарь
диссертационного совета**

В.В. Чекмарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная техника испытывает острую потребность в материалах, способных длительно нести высокие механические и тепловые нагрузки, успешно противостоять изнашиванию, воздействию агрессивных сред, знакопеременных и контактных нагрузок. Особенно остро эта проблема стоит для деталей, испытывающих высокие контактные знакопеременные нагрузки (например, крестовины, шкворни и др.) и детали почвообрабатывающей техники. Преждевременный выход из строя этих деталей снижает ресурс сельскохозяйственных машин и оборудования в среднем на 30...60%.

Применение композиционных электрохимических покрытий (КЭП) для повышения долговечности восстановленных и новых деталей сельскохозяйственной техники является актуальным и представляет большой практический интерес. Обобщение литературных данных позволяет сделать вывод, что получение композиционных покрытий является важным направлением развития современной гальваностегии, которое отвечает возрастающим требованиям современной техники к надежности конструкционных материалов. Вопросы теории, исследование свойств КЭП, практика их получения и применения нашли отражение в многочисленных статьях и монографиях. Все исследователи отмечают в качестве одного из главных достоинств КЭП значительное (в десятки раз) повышение износостойкости и прочности восстановленных деталей. Вместе с тем недостаток основных теоретических положений по технологии получения КЭП сдерживает их применение в производстве.

Свойства КЭП зависят не только от физико-химических свойств составляющих, но и от прочности связи между ними. Максимальная прочность и износостойкость КЭП достигается, если на границе между матрицей и наполнителем происходит образование химической связи, что можно обеспечить термическим воздействием на поверхность детали, например, электронагревом токами высокой частоты (ТВЧ) и лазерным излучением (ЛИ). Однако это может привести к изменению структуры покрытий, растворению дисперсной фазы (ДФ) в матрице с образованием новых фаз, что изменит физико-механические свойства материала.

Изучение влияния электротермической обработки, на примере нагрева ТВЧ или ЛИ, на работоспособность при абразивном изнашивании и выбор оптимального сочетания структуры и состава КЭП позволит разработать технологический процесс восстановления деталей сельскохозяйственной техники модифицированными покрытиями.

Настоящая работа, в которой рассмотрена комбинированная технология восстановления деталей сельскохозяйственной техники износостойкими покрытиями, повышающая качество восстановленных деталей, призвана восполнить некоторые теоретические и прикладные аспекты решения важной народнохозяйственной проблемы экономии материально-энергетических

ресурсов. Работа выполнялась в соответствии с государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2008...2012 годы (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации № 446 от 14 июля 2007 г.), предусматривающей инновационное развитие отрасли, ускоренный переход к использованию новых высокопроизводительных и ресурсосберегающих технологий. Работа является частью комплексных исследований по НИР № 1.4.05 «Теоретическое и экспериментальное исследование сложных систем на основе железа с целью создания материалов с особыми свойствами».

Цель работы. Усовершенствовать технологию КЭП и разработать теоретические основы их электротермической обработки для восстановления деталей сельскохозяйственной техники.

В соответствии с целью были сформулированы **задачи работы:**

- определить направление развития технологии восстановления и повышения долговечности деталей сельскохозяйственной техники износостойкими КЭП на основе анализа достижений науки в области технической эксплуатации машин и оборудования;
- разработать теоретические основы электротермической обработки КЭП, обосновать возможность повышения их физико-механических свойств;
- изучить особенности влияния электротермической обработки КЭП на их структуру, основные физико-механические свойства и повышение работоспособности в условиях абразивного изнашивания; разработать методы прогнозирования и экспресс-мониторинга их некоторых физико-механических свойств;
- разработать технологические основы электротермической обработки КЭП, установить связь вида и параметров электротермической обработки КЭП с условиями эксплуатации и конструктивно-технологическими параметрами деталей;
- усовершенствовать существующие, разработать и внедрить новые технологические процессы восстановления и повышения долговечности быстроизнашиваемых деталей сельскохозяйственной техники модифицированными КЭП, выполнить их технико-экономическое обоснование.

Объект исследований. Процессы формирования и последующей электротермической обработки износостойких КЭП, осуществляемые различными способами.

Предмет исследований. Технологии восстановления и повышения долговечности деталей сельскохозяйственной техники КЭП, электролизеры и приспособления для нанесения и электротермической обработки покрытий, детали, образцы с КЭП, их структура и свойства.

Методология и методы исследований. Методологической основой является системный подход к изучению и описанию процессов нанесения КЭП, их электротермической обработки, поведения поверхностей деталей

при воздействии на них. Теоретические исследования проведены с использованием положений теорий упругости, трещинообразования и разрушения материалов, трения и износа, физики спекания материалов, порошковой металлургии, теплотехники, теории вероятности и математической статистики. Экспериментальные исследования выполняли на образцах, деталях, реальных технологических системах, как в лаборатории, так и в производстве.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных методов исследования, поверенных приборов и оборудования, стандартных методик определения структуры и свойств материалов, статистической обработкой результатов исследований, сопоставлением теоретических результатов с экспериментальными данными, проведением опытно-производственных испытаний технологии и эксплуатационных испытаний деталей с покрытиями.

Научная новизна работы:

- выполнен анализ процессов электротермической обработки КЭП с помощью ТВЧ или ЛИ. Установлены аналитические зависимости для выбора режимов термообработки с учетом гетерогенности и особенностей структуры электроосажденных композиционных покрытий;

- выявлены общие закономерности влияния температуры нагрева КЭП и режимов ЛИ и ТВЧ их обработки на изменение их структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств;

- установлена связь физико-механических свойств КЭП с их дилатацией как интегральным показателем совершенства субмикроструктуры покрытий;

- найдены зависимости между содержанием ДФ в покрытии, размерами частиц и износостойкостью КЭП на основе железа в условиях абразивного изнашивания;

- установлена связь установившейся шероховатости и износостойкости КЭП в условиях абразивного изнашивания. Предложена модель формирования шероховатости КЭП, учитывающая прочностные свойства и морфологию КЭП;

- разработаны и предложены методы оценки и экспресс-контроля свойств КЭП: объемного содержания ДФ в КЭП методом микротвердости; параметров субмикроструктуры матрицы КЭП по их дилатации; упругих характеристик композиционных материалов методом конечных элементов; оптимизации износостойкости композитов по их установившейся шероховатости.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- предложена технология восстановления и повышения долговечности быстроизнашиваемых деталей сельскохозяйственной техники КЭП с последующей электротермической обработкой ТВЧ или ЛИ;

- разработаны рекомендации по восстановлению деталей модифицированными КЭП. Предложена классификация деталей, подлежащих восстановлению КЭП с последующей обработкой ТВЧ или ЛИ;

– найдены оптимальные режимы электротермической обработки композиционных электрохимических покрытий железо-карбид бора с помощью ЛИ или ТВЧ;

– выполнена производственная проверка и оценка эффективности внедрения технологического процесса получения модифицированных КЭП. Проведены испытания деталей с модифицированными покрытиями в хозяйствах Брянской области. Технологический процесс получения модифицированных КЭП принят к внедрению на ряде предприятий Брянской области.

Апробация работы. Результаты исследований регулярно докладывались на постоянно действующем семинаре факультета энергетики и природопользования БГСХА; на Всесоюзной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (г.Воронеж в 1997г.); трех межвузовских научно-практических конференциях (г.Брянск в 1997г. и 1998г., г.Орел в 1998г.); III региональной научно-практической конференции-ярмарке «Новые идеи, технологии, инвестиции» (г. Брянск, 2001 г.); межвузовской научно-практической конференции «Проблемы природообустройства и экологической безопасности» (г. Брянск, 2002 и 2003 гг.); международных научно-технических конференциях: «Контактная жесткость. Износостойкость. Технологическое обеспечение» (г. Брянск, 2003 г.); «Научное обеспечение агропромышленного производства» (г. Курск, 2010 г.); «Проблемы энергетики, природопользования, экологии» (г. Брянск, 2008-2011 гг.); «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах» (г. Брянск, 2009 г.); «Проблемы энергосбережения, информации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК» (г.Брянск, 2012г.); «Энергетика предприятий АПК и сельских территорий» (г. Санкт-Петербург, 2010-2012 гг.); «Инженерия поверхности и реновация изделий» (г. Киев, 2011, 2012 гг.); «Стратегия качества в промышленности и образовании» (г. Варна, Болгария, 2012 г.). Международных симпозиумах: «Перспективы развития агрокультуры» (г. Кишинев, 2009, 2013 гг.); «Электрические методы обработки материалов» (г. Кишинев, 2010, 2013 гг.). Международном научно-техническом семинаре «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (г. Свалява, Карпаты, 2011- 2013 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 47 научных работах, в том числе 21 из списка ВАК, 2 монографии и 2 патента на изобретение. Общий объем публикаций – 25,75 печ. л., из которых 12,85 печ. л. принадлежат лично соискателю.

На защиту выносятся:

– теоретические и экспериментальные закономерности формирования структуры и свойств износостойких покрытий при электролизе. Обоснование субструктурного упрочнения металлов методом электроосаждения и повышения их износостойкости дисперсными включениями с последующей электротермической обработкой;

– теоретические и технологические основы модификации КЭП термической обработкой ТВЧ и ЛИ, применяемые при восстановлении и повышении износостойкости быстроизнашиваемых деталей сельскохозяйственной техники;

– экспериментальные закономерности влияния условий электротермической обработки КЭП на структуру, физико-механические свойства, износостойкость и другие свойства покрытий;

– новые методы определения объемного содержания ДФ в КЭП методом микротвердости, оптимизации износостойкости композитов по их установившейся шероховатости, параметров субмикроструктуры матрицы КЭП по их дилатации, расчета упругих характеристик композиционных материалов с дисперсными включениями методом конечных элементов;

– разработанные, апробированные и внедренные в производство технологические процессы модификации КЭП ТВЧ или ЛИ. Классификация деталей и рекомендации по их восстановлению КЭП с последующей модификацией ЛИ или ТВЧ. Технологические процессы апробированы и внедрены в производство со значительным экономическим эффектом.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, общих выводов, списка литературы из 250 наименований и 13 приложений, изложена на 249 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснованы ее актуальность, научная новизна, практическая ценность, направления повышения качества КЭП.

В первой главе «Состояние вопроса» приведен краткий анализ основных направлений повышения долговечности быстроизнашиваемых деталей и обоснована возможность применения для этого КЭП. Указаны преимущества и недостатки покрытий. Показана необходимость дальнейшего совершенствования их свойств.

Применение КЭП для повышения ресурса восстановленных и новых деталей сельскохозяйственной техники является актуальным и представляет большой практический интерес. Вопросы теории, исследование свойств КЭП, практика их получения и применения нашли отражение в статьях и монографиях советских ученых Л.И. Антропова, М.Л. Быковой, А.И. Борисенко, Б.А. Бочкарева, И.Н. Бородина, Г.В. Гурьянова, А.Ф. Иванова, С.С. Кругликова, Н.Т. Кудрявцева, Т.П. Конжиной, Ю.Ю. Матулиса, М.А. Мицкуса, В.И. Молчанова, Ю.Н. Петрова, Ю.М. Полукарова, Д.К. Раманаускене, Р.С. Сайфуллина, Г.В. Самсонова, И.М. Федорченко, Е.М. Юдиной, Ш.Х. Яр-Мухамедова, и др., а также в работах зарубежных исследователей Дж.М. Одкеркена, Т.У. Томашевски, Г. Брауна, Дж.К. Визерса, Ф.К. Сауттера, Н. Гуллиельми, В. Метцгра, Т. Флориана и многих других. Обобщение литера-

турных данных позволяет сделать вывод, что получение композиционных покрытий является важным направлением развития современной гальваностегии, которое отвечает возрастающим требованиям современной техники к надежности конструкционных материалов.

Исследователи, создающие износостойкие КЭП, руководствуются теориями, которые не учитывают физико-химические аспекты взаимодействия материалов матрицы и ДФ при формировании общей прочности и износостойкости материалов. Вместе с тем, максимальная прочность и износостойкость КЭП достигается, если на границе между матрицей и наполнителем происходит образование прочной связи, что можно обеспечить термическим воздействием на поверхность детали. Одним из таких способов является нагрев ТВЧ или ЛИ. Электротермическое воздействие приводит к изменению физико-механических свойств покрытий и их общей гетерогенной структуры (электромодификации). Растворение ДФ в матрице с образованием новых фаз может нарушить основной принцип упрочнения КЭП – правило Шарпи. Вместе с тем, в известных нам исследованиях данные вопросы электромодификации покрытий глубоко не рассматривали.

Изучение влияния электротехнологий модификации на примере нагрева ТВЧ и ЛИ на работоспособность КЭП при абразивном изнашивании, выбор оптимального сочетания структуры и состава покрытий позволит разработать технологический процесс электромодификации износостойких покрытий на деталях машин. Окончательным критерием выбора технологических параметров процесса могут быть только эксплуатационные испытания деталей с покрытиями.

Во второй главе «Постановка задачи и общая методика исследований» на основе анализа литературы выбрана методология проведения теоретических и экспериментальных исследований. В результате анализа содержания вопроса были сформулированы цель и задачи работы.

Целью теоретических исследований было установить связь структуры осадков с их дилатацией как интегральной характеристикой совершенства материала, выявить зависимость физико-механических свойств КЭП от свойств компонентов и связи между ними, установить условия формирования связей между ДФ и матрицей, а также влияние структурных и фазовых изменений КЭП при электротермической обработке на их свойства.

Целью экспериментальных исследований являлась проверка результатов теоретических исследований, определение влияния электронагрева на структурные изменения КЭП, изучение влияния параметров ТВЧ и ЛИ на электрофизические, механические и эксплуатационные свойства КЭП и деталей с покрытиями.

Получение достоверных экспериментальных данных обеспечивалось применением апробированных и стандартных методик исследований, поверенных контрольно-измерительных приборов, выбором достаточного количества повторности опытов и их обработкой статистическими методами с применением теории вероятности. Опыты проводили преимущественно с

использованием центральных композиционных ротатбельных униформпланов второго порядка.

Даны описание и руководство к оригинальным методикам, разработанным автором в процессе исследований. Они прошли апробацию посредством опубликования в периодической печати и обсуждения на конференциях.

Электроосаждение износостойких покрытий осуществляли на стационарной установке оригинальной конструкции с контролируемой гидродинамикой потока. Для получения покрытий использовали хлористый электролит железнения ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 400...600 кг/м^3) – один из самых производительных и широко применяемых на практике. Для изучения влияния легирующих и буферных добавок на свойства покрытия электролитические сплавы получали введением в базовый электролит солей никеля ($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0...200 кг/м^3), кобальта ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0...200 кг/м^3), алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ – 0...200 кг/м^3) и натрия ($\text{Na}_2\text{H}_4\text{C}_4\text{O}_6 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ – 0...5,2 кг/м^3). Состав электролитов поддерживали в пределах $\pm 1 \text{кг/м}^3$ и контролировали с помощью количественного химического анализа по стандартным методикам. Кислотность растворов поддерживали добавлением разбавленной соляной кислоты. Для их приготовления использовали реактивы марок «ХЧ», «ЧДА» и дистиллированную воду. Электролит-суспензию (ЭС) готовили введением в электролиты микропорошков электрокорунда белого (марок М2, М10, М14, М20, М40), карбида бора (М7, М10, М20), карбида кремния (М14), оксида кремния (М14). Содержание порошков в ЭС изменяли в пределах 25...150 кг/м^3 и контролировали весовым анализом. КЭП после нанесения стабилизировали в течение 10...20 суток хранения.

Термическую обработку ТВЧ выполняли на установке типа ИЗ-250-66. Температуру нагрева ($T=200...1200$ °С) контролировали пирометрически. Лазерное упрочнение производили на установке «TRUMPF» L2530. Интенсивность термообработки изменяли мощностью лазерного излучения, скоростью перемещения пятна нагрева, расстоянием между параллельными дорожками. Частоту импульсов и диаметр луча лазера в опытах поддерживали постоянными. Режимы лазерной обработки образцов с КЭП предусматривали нагрев без оплавления покрытия (мягкий режим), с частичным оплавлением покрытия (жесткий), полным переплавлением покрытия на подложке (очень жесткий). Температуру поверхности образцов в процессе обработки ЛИ устанавливали расчетным методом.

В работе использованы экспериментальные методы изучения морфологии и структуры покрытий и матриц КЭП: состава покрытий - стереометрическим металлографическим анализом; металлографический анализ с помощью микроскопов МБС-9, МИМ-8; рентгенографический с помощью аппарата ДРОН-3М; электронномикроскопический с помощью РЭМ «Tesla BC-300», профилографирование с помощью прибора «MarSurf PS1».

При изучении электрофизических свойств покрытий определяли термоэлектродвижущую силу (ТЭДС) и электросопротивление (четырёхконтактная схема с помощью моста типа Р333).

Основные механические методы изучения свойств покрытий включали: измерение микротвердости (по ГОСТ 9450-76), упругих свойств (динамический резонансный метод), внутренних напряжений (метод гибкого катода), прочности сцепления (метод кольцевого сдвига), прочности покрытий на растяжение (метод разрыва колец из материала покрытия), демпфирующей способности (метод измерения логарифмического декремента затухания поперечных колебаний консольных образцов), ударной вязкости (ГОСТ 9454-78). Исследование износостойкости покрытий проводили по схеме «ролик-колодка» (ГОСТ 23.208-79). Фазовые и химические превращения в КЭП изучали рентгенофазовым, дифференциальным термическим и термографическим анализом (с помощью дериватографа типа МОМ), контролем ТЭДС и электросопротивления.

В третьей главе "Теоретические основы формирования и электротермической обработки КЭП» показана взаимосвязь структуры, прочностных свойств осадков и их дилатации, установлена связь прочностных свойств и износостойкости КЭП с прочностными свойствами компонентов и межфазным взаимодействием, показана возможность формирования связей между ДФ и матрицей за счет активации химического взаимодействия между ними, а также влияние структурных и фазовых изменений КЭП при электротермической обработке на прочностные свойства композита.

Анализ связи структуры с физико-механическими свойствами КЭП показал, что дилатация может достаточно достоверно служить интегральным показателем совершенства материала. На основе теоретических зависимостей металловедения и рентгеноструктурного анализа были получены уравнения, связывающие дилатацию (δ) и размер блоков мозаики (D):

$$D = K_3^{-1} b \delta^{-1}, \quad (1)$$

а для связи плотности дислокаций (ρ) с дилатацией получено выражение:

$$\rho = 3 K_3^2 b^2 \delta^2, \quad (2)$$

где K_3 – коэффициент, зависящий от формы зерна, b – кратчайшее расстояние в решетке.

Соотношения были конкретизированы с учетом ограничений рентгеновского метода и реального строения электролитического железа ($D_{\min} = 50 \dots 100 \text{ \AA}$, $\rho = (1,08 \dots 2,16) \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $b = 2,48 \text{ \AA}$):

$$D = (15,3 \dots 37,2) \delta^{-1}, \quad (3)$$

$$\rho = (2,1 \dots 21,7) \delta^2. \quad (4)$$

На их основе разработана методика экспресс-анализа свойств покрытий.

Анализ экспериментальных данных (наших и литературных) позволил установить зависимость $D=f(\delta)$, соответствующую уравнению (3) (рис.1.а) (D , \AA):

$$D = 17,45 \delta^{-1},$$

(5)

и зависимость $\rho = f(\delta)$, которую можно разделить на два участка (рис. 1, б).

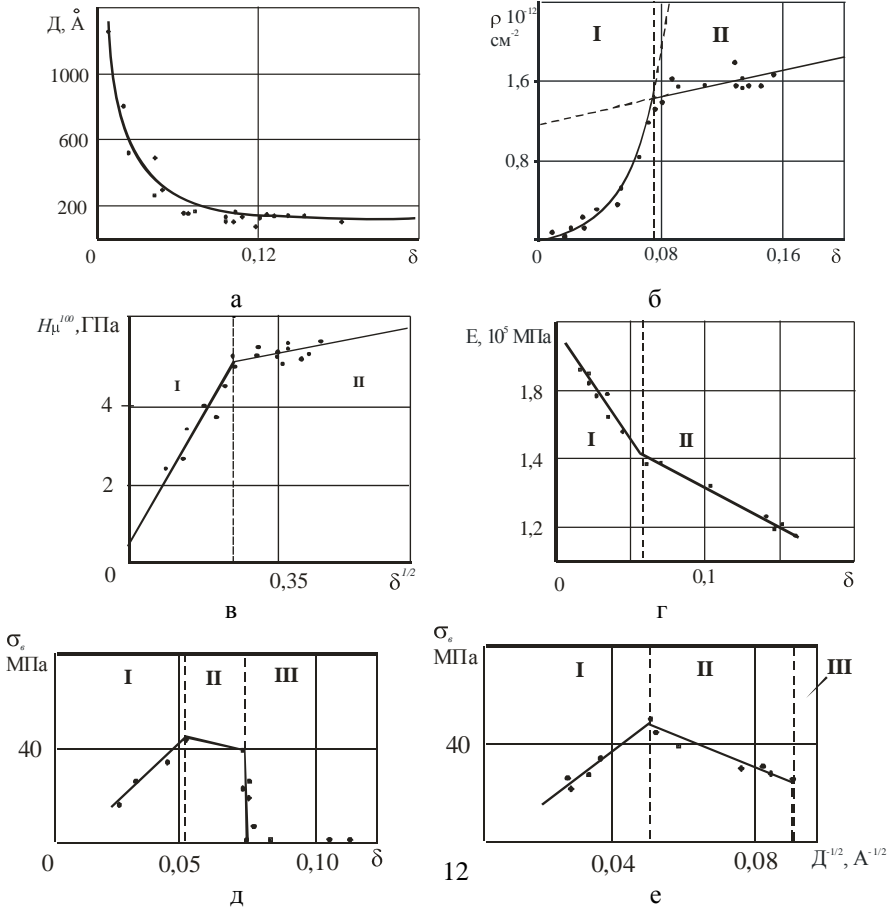


Рисунок 1 – Взаимосвязь между размером блоков мозаики и дилатацией (а), плотностью дислокаций и дилатацией (б), микротвердостью и дилатацией (в) и модулем упругости и дилатацией (г) электролитического железа, зависимости прочности на растяжение от дилатации (д) и размеров блоков мозаики (е) электролитического железа (I – участок монолитных осадков; II – участок образования и роста субмикротрещин; III – участок разрушенных осадков)

На участке I ($\delta \leq 0,055 \dots 0,065$) функция $\rho = f(\delta)$ имела вид, аналогичный (4) ($\rho \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$):

$$\rho = 18,6\delta^2, \quad (6)$$

а на участке II (при $\delta > 0,06 \dots 0,08$) она претерпевала излом и изменяла характер.

При обработке экспериментальных данных была установлена линейная зависимость $\rho = f(\delta)$ в виде:

$$\rho = 1,16 + 3,52\delta, \quad (7)$$

отражающая влияние на ρ наряду с δ субмикротрещин осадка, как нового структурного параметра, появляющихся в материале покрытия при ужесточении режимов электролиза. Влияние последнего, наряду с δ , является причиной излома и других зависимостей физико-механических свойств осадков от дилатации (рис. 1, б-е).

Установлены соотношения, связывающие модуль упругости ($E = f(\delta)$), микротвердость ($H_{\mu} = f(\delta)$) и предел текучести электролитического железа ($\sigma_m = f(\delta)$) с дилатацией покрытий.

До появления в структуре железа устойчивых субмикротрещин зависимость микротвердости (H_{μ} , ГПа) электролитического железа от дилатации имела вид (рис. 1.в):

$$H_{\mu}^{100} = 0,15 + 20,48 \delta^{1/2}, \quad (8)$$

а в области трещиноватых осадков:

$$H_{\mu}^{100} = 5,22 + 0,16 \delta^{1/2}. \quad (9)$$

Зависимость модуля упругости (E , 10^5 МПа) от дилатации до перегиба имела вид (рис. 1, г):

$$E = 2,17 - 10,13\delta, \quad (10)$$

а после перегиба функция $E = f(\delta)$ описывалась уравнением:

$$E = 1,70 - 3,29\delta. \quad (11)$$

Учитывая физическую природу микротвердости и соотношение $\sigma_m \approx H_{\mu}/3$, получили выражения для пределов текучести железных покрытий (σ_m , ГПа) до и после образования в них устойчивых субмикротрещин, соответственно:

$$\sigma_m = 0,05 + 6,83 \delta^{1/2}, \quad (12)$$

$$\sigma_m = 1,74 + 5,33 \cdot 10^{-2} \delta^{1/2}. \quad (13)$$

Установлено, что низкая прочность осадков электролитического железа объясняется особенностями формирования покрытия на катоде, исходной структурой и дефектами кристаллического строения. Действительно, если построить зависимость прочности при растяжении электролитического железа (σ_b) от дилатации и размеров блоков мозаики, можно установить, что эти величины весьма тесно взаимосвязаны друг с другом (рис. 1, д и е). Причем зависимости $\sigma_b = f(\delta)$ и $\sigma_b = f(D^{-1/2})$, обнаруживают три характерных области: I – возрастания σ_b , связанного с увеличением дилатации, обусловленной измельчением блоков мозаики и увеличением плотности дислокаций вплоть до перехода структуры в «предельно» деформированное состояние (до появления субмикротрещин); II – линейного падения σ_b с увеличением дилатации, обусловленной образованием и увеличением плотности новых дефектов (субмикротрещин), развивающихся в осадке при ужесточении условий

электролиза; III – практически вертикального падения прочности разрушенных осадков (при увеличении размеров субмикротрещин, пронизывающих осадок полностью). Таким образом, при дилатации $0,06 \dots 0,07$ покрытие перестает сопротивляться растягивающим нагрузкам. Такие осадки предельно хрупкие и не диспергируются с поверхности детали благодаря высокому сцеплению с основой и достаточно хорошему сдвигу в пределах размеров субзерен.

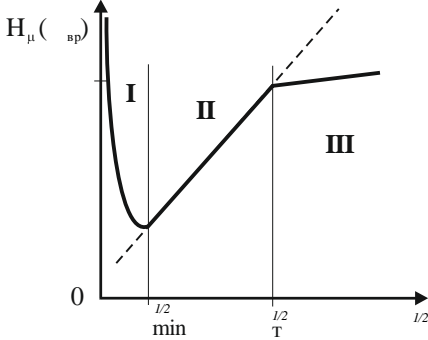


Рисунок 2 – Взаимосвязь между прочностными свойствами и дилатацией электролитического железа (I – область увеличения прочности за счет совершенствования структуры; II – повышение прочности за счет субструктурных изменений; III – область появления в материале субмикротрещин)

емкости поверхности. В области I при $\delta \leq \delta_{\text{min}}$ увеличение прочности возможно за счет перехода металла в «моноблочное» состояние.

Таким образом, установлена область получения КЭП с оптимальной структурой матрицы для последующей термической обработки. Поскольку производительность процесса нанесения покрытий требует ужесточения условий электролиза, но вместе с тем, к осадкам предъявляются требования повышенной прочности и износостойкости, необходимо в послеелектролизный период применять какие-либо технологические приемы или способы, направленные на «залечивание» субмикротрещин. К таким способам можно отнести получение КЭП на основе железа с включением твердых дисперсных частиц, например, карбида бора, и электротермической обработкой деталей с покрытиями, например, ТВЧ, ЛИ и другими способами.

Получено соотношение, связывающее объемное содержание ДФ (V) с прочностными свойствами компонентов КЭП, показывающее, что важным

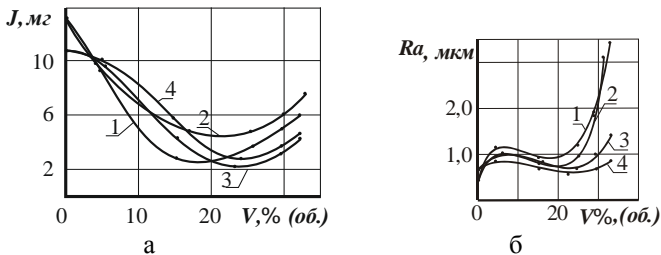
Анализ изложенного показал, что повышение прочности «чистых» электролитических покрытий за счет субструктурных изменений ограничено $\delta_{\text{min}} \dots \delta_T$ (область II, рис.2). В данной области формируются плотные монолитные осадки, обладающие наибольшей прочностью и износостойкостью. Область III ($\delta > \delta_T$) соответствует переходу структуры металла в «предельно» деформированное состояние. В данной области формируются разрушенные осадки, их износостойкость находится на высоком уровне благодаря высокой прочности сцепления с основой. Такие осадки можно использовать в случае получения покрытий, имеющих специальные свойства, например, создания сетки трещин для повышения маслостойкости.

параметром, влияющим на прочность и износостойкость, является прочность матрицы и сцепления ДФ и матрицы:

$$V = \frac{\pi}{3} \frac{1}{\left(\frac{8}{\alpha_p^2} \gamma_p + \sqrt{\frac{2}{3}}\right)^2}, \quad (14)$$

где α_p – коэффициент зависящий от типа укладки частиц ДФ в КЭП; γ_m и γ_p – удельная энергия разрушения матрицы и ДФ соответственно.

Установлено, что износ КЭП в контакте с нежестко закрепленным абразивом зависит от размеров и объемного содержания дисперсных частиц в покрытии. Износ КЭП на основе железо-никелевых и железо-кобальтовых сплавов с ростом содержания ДФ в покрытии уменьшался и проходил через минимум при содержании микропорошков порядка 18...25 % (об.) (рис.3, а). С ростом содержания ДФ в покрытии более 30...35 % (об.) износостойкость КЭП несколько снижалась. Необходимо отметить, что КЭП с более прочной матрицей имели большую износостойкость. Так, оптимальная износостойкость КЭП на основе железо-кобальтовых покрытий (содержание ДФ 22...26% (об.)) была выше, чем КЭП на основе железо-никелевых покрытий (содержание ДФ 18...20% (об.)).



1 – Fe-Ni-Al₂O₃ (M14); 2 – Fe-Ni-Al₂O₃ (M20);
3 – Fe-Co-Al₂O₃ (M14); 4 – Fe-Co-Al₂O₃ (M20)

Рисунок 3 – Зависимость износа (а) и шероховатости (б) КЭП от содержания и размеров ДФ

С увеличением объемного содержания ДФ в КЭП до 5...7% (об.) установившаяся шероховатость несколько увеличивалась (рис. 3, б). С дальнейшим ростом содержания ДФ в КЭП (до 18...25% (об.)) она уменьшалась (до $Ra=0,5...0,7$ мкм), достигая минимума при содержании ДФ в покрытии, отвечающем наивысшей износостойкости гетерогенного материала, а затем относительно резко возрастала, хотя износ покрытий при содержании в них ДФ выше оптимального увеличивался незначительно.

Анализ исследований установившейся шероховатости образцов показал, что при испытании «чистых» покрытий неровности их контактирующей с абразивом поверхности формировались особенностями структуры и упруго-пластическими свойствами материала матрицы. Причем поверхность

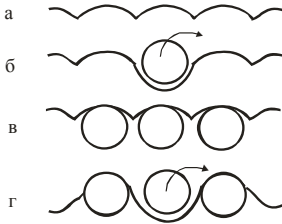
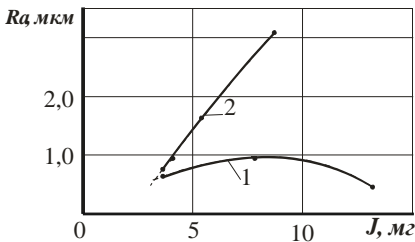


Рисунок 4 – Модель шероховатой поверхности «чистых» покрытий (а), КЭП с «малым» (б), оптимальным (в) и «насыщенным» (г) содержанием ДФ

отдельных частиц (рис.4, б).

Действительно, КЭП с менее прочной железо-никелевой матрицей хуже удерживали частицы ДФ. Соответственно, их поверхность формировалась более грубой, чем у КЭП на основе железо-кобальтовой матрицы (см. рис.3). Дальнейший рост содержания частиц в КЭП до 15...22% (об.) приводил к более полному замещению неровностей матрицы «неровностями» из твердых включений (рис.4,в). Взаимодействие неровностей твердой фазы увеличивалось, соответственно росла прочность гетерофазного материала и шероховатость уменьшалась до минимума, отвечающего оптимальному содержанию частиц ДФ (см. рис. 3 и 4,в). С увеличением содержания ДФ в КЭП выше оптимального способность связки удерживать износостойкие частицы снижалась. Они в процессе изнашивания начинают разрушаться и также выкрашиваться, что приводило к резкому увеличению шероховатости (рис.4,г).



1 – 0...20 % (об.); 2 – 24...32 % (об.)

Рисунок 5 – Зависимость установившейся шероховатости поверхности от износа КЭП Fe–Ni–Al₂O₃ (M20) от износа при содержании ДФ

более прочных железо-кобальтовых покрытий формировалась несколько более шероховатой, чем железо-никелевых. Модель такой поверхности можно изобразить в виде набора сфер (рис.4,а). С увеличением содержания частиц в КЭП до 5...7% (об.) неровности материала матрицы постепенно замещались неровностями из твердых включений (рис.4, б). Обладая относительно высокой твердостью в сравнении с матрицей, они в процессе изнашивания выступают из гетерофазной поверхности значительно выше и подвергаются большому нагружению. В связи с этим, из-за ограниченной прочности связки и связи ДФ с матрицей, происходит выкрашивание

отдельных частиц (рис.4, б). Обладая относительно высокой твердостью в сравнении с матрицей, они в процессе изнашивания выступают из гетерофазной поверхности значительно выше и подвергаются большому нагружению. В связи с этим, из-за ограниченной прочности связки и связи ДФ с матрицей, происходит выкрашивание отдельных частиц (рис.4, б).

Они в процессе изнашивания начинают разрушаться и также выкрашиваться, что приводило к резкому увеличению шероховатости (рис.4,г). Указанная зависимость легла в основу, разработанного нами метода определения состава наиболее износостойких КЭП, по их установившейся в процессе изнашивания шероховатости (рис.5). Сопоставление износостойкости и шероховатости КЭП показывает, что более износостойкие покрытия обладают меньшей шероховатостью после испытаний.

Теоретически установлены стадии формирования межфазных

связей между компонентами КЭП: образование физического контакта между частицей и матрицей; химическое взаимодействие материалов на границе раздела ДФ и матрицы; объемное взаимодействие, сопровождающееся релаксацией упругих сил.

Установлено, что формирование физического контакта между ДФ и матрицей зависит от свойств пограничных слоев «матрица – ДФ». Процесс зарастания ДФ металлом зависит от природы дисперсной фазы (проводник или диэлектрик) и соотношения скоростей электрохимических реакций на компонентах КЭП.

Показано, что энергонасыщенность и неравновесность структуры материалов, полученных электролитическими способами, может приводить к изменению температуры активации фазовых взаимодействий. Показано, что время, необходимое для образования прочных поверхностных связей между ДФ и железной матрицей при электромодификации, составляет 0,01...1 с.

Установлено, что структурные и фазовые (объемные) изменения КЭП при нагреве образцов характеризовались областями изменения остаточных внутренних напряжений (ВН): низкотемпературного нагрева – I (с незначительным изменением ВН); переходная область – II (с резким увеличением ВН); высокотемпературного нагрева – III (высокие ВН) (рис.6).

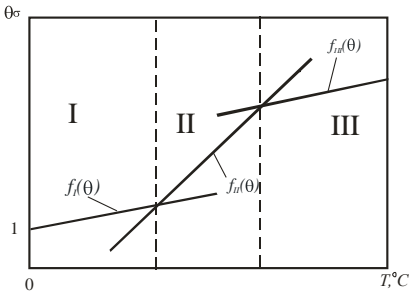


Рисунок 6 – Зависимость относительных ВН КЭП от температуры нагрева ($\theta_\sigma = \sigma/\sigma_0$, где σ – ВН после термической обработки; σ_0 – ВН обусловленные условиями получения покрытий)

большинства чистых металлов за счет изменения содержания вакансий ($\theta \approx 10^{-3} \dots 10^{-6}$) может привести к возникновению напряжений растяжения порядка 0,3...30 МПа. Для оценки ВН использовали следующее выражение:

$$\sigma = f_l(\theta) = \sigma_0 + 0,5E_k(1 - 2\mu_k)^{-1} nN^{-1}, \quad (15)$$

где E_k и μ_k – модуль упругости и коэффициент Пуассона КЭП; nN^{-1} – соотношение объемного содержания вакансий и атомов в матрице.

В области II изменение удельного объема матрицы может происходить за счет линейных, поверхностных и объемных дефектов, формирования

Теоретически установлено, что в области I изменение удельного объема КЭП связано с уменьшением микроискажений кристаллической решетки в материале матрицы, которое обусловлено миграцией вакансий к свободным поверхностям и границам зерен и аннигиляцией на них, выходом из осадка протонированного и молекулярного водорода, разложением гидроксидов железа и других химсорбированных соединений и миграцией их продуктов из покрытий. Наибольшее изменение удельного объема

прочных связей между ДФ и матрицей. Если изменение объема большинства металлов ($\theta_{cm}=10^{-3} \dots 6 \times 10^{-2}$) при структурных переходах принять $\theta_{cm} \approx 3 \alpha T \Theta^1$ (Л.А. Штремель, Г.В. Гурьянов и др.), тогда во второй области температур изменение ВН можно определить как

$$\sigma = f_{II}(\theta) = 1,5 E_k (1 - 2\mu_k)^{-1} \alpha T \Theta^1, \quad (16)$$

где α – коэффициент линейного расширения металла; T – температура нагрева; Θ – сходственная температура.

В области III в зависимости от кристаллической структуры образующихся соединений объемные изменения в КЭП будут приводить либо к росту общего объема покрытия, либо к его уменьшению. Изменение удельного объема КЭП в данной области определяется, как

$$\theta = \frac{1 - (V_{Fe-оф} \theta_{ф} + (V_{Fe} - V'_{Fe}) \theta_{cm} + (V_{оф} - V'_{оф}))}{1 - (V_{Fe} \theta_{cm} + V_{оф})}, \quad (17)$$

где $V_{Fe-оф}$ – объемное содержание продуктов реакции в КЭП; V_{Fe} и $V_{оф}$ – исходное объемное содержание железа и ДФ в КЭП; V'_{Fe} и $V'_{оф}$ – остаточное объемное содержание железа и ДФ после реакции; $\theta_{ф}$ – изменение удельного объема за счет фазовых изменений.

Соответственно, ВН, уравниваемые в объеме покрытия, можно рассчитать с помощью выражения:

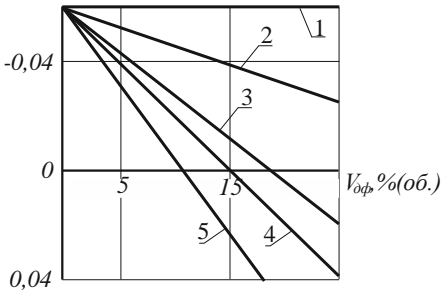
$$\sigma = f_{III}(\theta) = 0,5 E_k (1 - 2\mu_k)^{-1} \frac{1 - (V_{Fe-оф} \theta_{ф} + (V_{Fe} - V'_{Fe}) \theta_{cm} + (V_{оф} - V'_{оф}))}{1 - (V_{Fe} \theta_{cm} + V_{оф})}. \quad (18)$$

Расчет изменения объема покрытия по зависимости (17) (на примере КЭП на основе железа с различными частицами ДФ при $V_{оф} = 24\%$ (об.), что соответствует опыту) при предельном значении $\theta_{cm} = 6\%$, показал, что в процессе реакции ДФ и матрицы с образованием новых фаз объем покрытия может не только уменьшаться, но и возрасть (табл.1 и рис.7).

Таблица 1 – Исходные и возможные конечные компоненты КЭП при фазовых превращениях в области высокотемпературного нагрева (III)

Исходные компоненты КЭП	Плотность ДФ, г/см ³	Компоненты КЭП после нагрева	Плотность конечных продуктов реакции, г/см ³
<i>Fe-B₄C</i>	2,49	<i>Fe, FeB, C</i>	7,15
<i>Fe-SiC</i>	3,21	<i>Fe, FeSi, C</i>	6,15
<i>Fe-VC</i>	5,8	<i>Fe, FeV, C</i>	≈7,5
<i>Fe-WC</i>	15,8	<i>Fe, FeW, C</i>	≈12,9

Примечание
 1 В расчетах принимали плотность *Fe* – 7,85 г/см³.
 2 Образующийся углерод выступает в виде частиц с $\rho = 1,6$ г/см³.
 3 Реакции протекают до полного взаимодействия ДФ с железом.



1 – покрытие без ДФ; 2 - $Fe-B_4C$; 3 - $Fe-SiC$; 4 - $Fe-VC$; 5 - $Fe-WC$

Рисунок 7 – Зависимость изменения удельного объема покрытия (θ) от количества ДФ, вступившей в реакцию с матрицей

износостойких покрытий с прочной связью ДФ и матрицы, второе – создание материалов успешно сопротивляющихся циклическим нагрузкам за счет формирования на поверхности достаточно износостойких слоев с напряжениями сжатия. Оригинальность обоих направлений подтверждается патентами на изобретение. В настоящей работе рассматривали первое из этих направлений.

В четвертой главе «Влияние электротермической обработки на структуру и некоторые свойства КЭП» приведены результаты экспериментальных исследований влияния электронного нагрева ТВЧ и ЛИ на структурные изменения, физико-механические и эксплуатационные свойства КЭП.

Экспериментально установлено, что при термической обработке в покрытии происходили химические и фазовые превращения. Анализ термографических кривых изменения массы образцов КЭП показал, что при температурах 20...300 °С наблюдалась незначительная потеря массы образцов вследствие процессов, указанных ранее (глава 3). В диапазоне температур 300...400 °С масса образцов практически не изменялась и термические эффекты отсутствовали. Быстрое изменение массы образцов наблюдалось в диапазоне температур 500...1000 °С (рис.8,а).

Показано, что процессы, происходящие в КЭП, зависят от природы включений. Термические эффекты наблюдались только у КЭП, содержащих карбид бора (рис.8,б). Кривые изменения массы образцов «чистого» электролитического железа и КЭП $Fe-B_4C$ на третьем участке можно разбить еще на две части. При 500...600 °С масса образца увеличивается за счет образования кислородсодержащих соединений. При 600...1000 °С – происходят термические эффекты, связанные с образованием новых фаз.

Расчет ВН по формуле (18) с учетом модуля упругости компонентов показал, что для композиций, содержащих B_4C , SiC , VC и WC , при взаимодействии ДФ с железом можно получить снижение ВН растяжения в сравнении с предельным для «чистых» металлов и даже получить ВН сжатия.

Показано, что наиболее предпочтительной термической обработкой КЭП будет электроннагрев с помощью ТВЧ или ЛИ. Установлены зависимости, связывающие параметры лазерной обработки и обработки ТВЧ со структурными параметрами обрабатываемого материала и направления модификации, одно из которых – создание

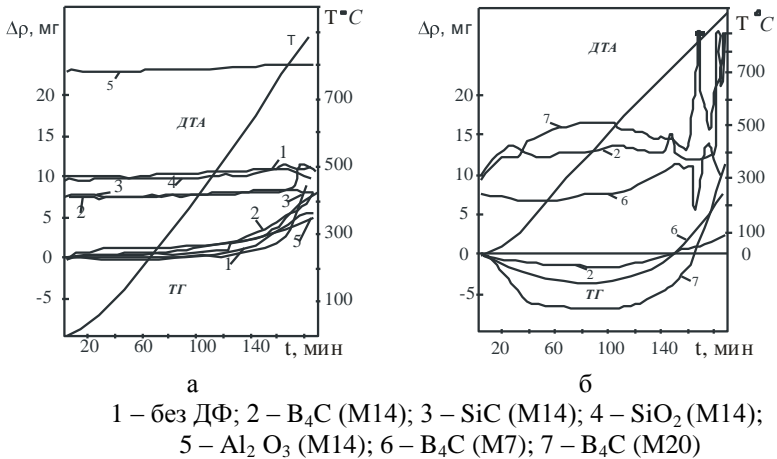


Рисунок 8 – Дериватограммы КЭП на основе сплава железа-кобальт (а) и электролитического железа (б) (ДТА – дифференциальный термический анализ; ТГ – термографические кривые)

Образованию соединений между ДФ и матрицей способствовала особая структура КЭП, формируемая в процессе электрокристаллизации. Исследования морфологии КЭП с помощью электронной микроскопии показали, что между компонентами КЭП существует тесная взаимосвязь, а также наличие структурных несовершенств поверхности раздела ДФ и матрицы, что способствует физико-химическому взаимодействию между компонентами КЭП (рис. 9, а-в).

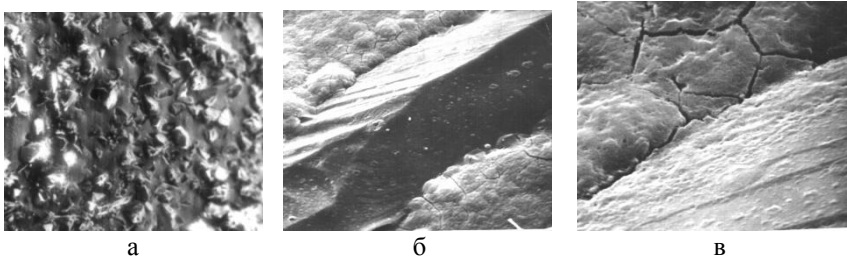


Рисунок 9 – Морфология поверхности раздела Fe- V_4C (а и б) и наблюдение дефектов на границе ДФ и матрицы (в): а) $\times 550$; б) $\times 1000$; в) $\times 5000$

После обработки ЛИ и ТВЧ структура покрытий существенно изменялась. При нагреве образцов ТВЧ до 350...450 °C значительных изменений

во внешнем виде поверхности и структуре КЭП не наблюдалось (рис. 10,а). При нагреве более 450...550 °С образцы покрывались налетом оксидов железа и других продуктов взаимодействия компонентов композиции с атмосферой и растворенными в металле газами. Температура 550...650 °С соответствовала началу взаимодействия бора и углерода с железом. Значительное изменение морфологии и структуры КЭП Fe–B₄C при высокотемпературной обработке свидетельствовало о протекании диффузионных процессов и образовании новых фаз. В структуре появлялись крупные кристаллические образования различной формы, равномерно распределенные по объему матрицы (рис.10,б). При нагреве более 800 °С наблюдалось растрескивание осадков вследствие перераспределения легирующих элементов в результате взаимодействия компонентов КЭП и роста ВН растяжения (см. главу 3).

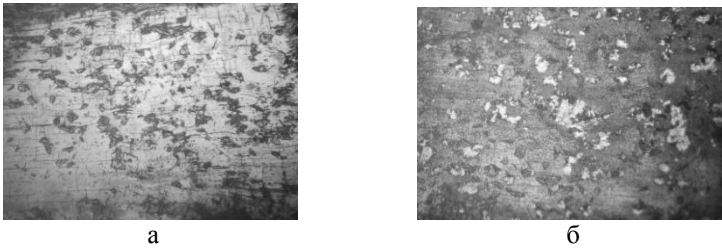


Рисунок 10 – Структура композита железо-карбид бора (×400) при нагреве ТВЧ: а) 350...450 °С; б) 600...650 °С

Так как электросопротивление боридов железа (R , мОм) значительно выше, чем чистых металлов, процесс образования новых фаз при термической обработке КЭП должен сопровождаться ростом электросопротивления образцов. Действительно, в соответствии с главой 3, зависимость $R=f(T)$ на участке температур 20...600 °С имела вид:

$$R=706,3 - 0,78T - 1,27 \times 10^{-4} T^2, \quad (19)$$

а в области температур 600...1000 °С была близкой к линейной:

$$R=0,24T + 38,23. \quad (20)$$

Таким образом, в наших опытах началом активного образования боридов и карбидов в гетерогенном материале можно считать температуру 600...650 °С, при которой наблюдается рост электросопротивления КЭП.

Термическая обработка КЭП приводила также к изменению их термоэлектрических свойств. ТЭДС КЭП до температуры 20...400 °С плавно уменьшалась, что подтверждает отсутствие фазовых превращений в КЭП. При температуре 400...600 °С происходило резкое падение ТЭДС с изменением ее знака.

Нагрев КЭП и взаимодействие их компонентов сопровождалось изменениями плотности $\gamma_{КЭП}$. Так, с увеличением температуры нагрева 400...500 °С плотность железной матрицы γ_M увеличивалась. При темпера-

турах нагрева более 500 °С плотность матрицы уменьшалась вследствие взаимодействия наполнителя и матрицы, диффузии бора и углерода в кристаллическую решетку железа и образования новых фаз. Экспериментальную зависимость $R=f(\gamma_M)$, можно разложить на две составляющих: до фазовых превращений и после. Они характеризуют различные процессы, происходящие между компонентами КЭП при нагревании. В области, где отсутствуют фазовые изменения, зависимость $R=f(\gamma_M)$ близка к линейной:

$$R = -5,08\gamma_M + 7,96. \quad (21)$$

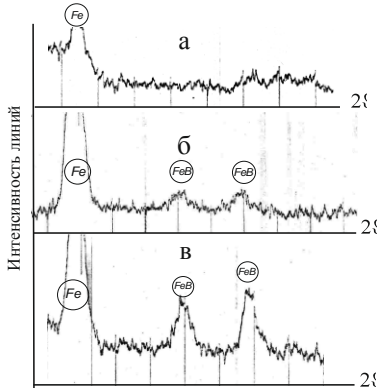
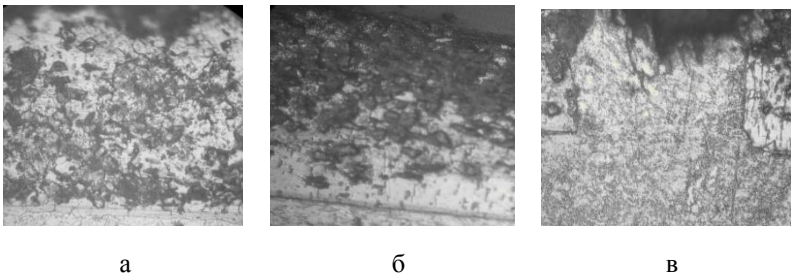


Рисунок 11 – Рентгенограммы образцов КЭП после термообработки, °С: а) 400...450; б) 600...650; в) 800...850

После нагрева образцов до 500...600 °С зависимость $R=f(\gamma_M)$ претерпевала резкий излом, свидетельствующий о начале и развитии химического взаимодействия между материалом матрицы и включениями. В данной области температур на рентгенограммах образцов КЭП появлялись характерные для боридов железа пики (рис. 11). С ростом температуры нагрева интенсивность пиков увеличивалась, что свидетельствовало о нарастании массы новообразований.

Анализ исследований структуры, электросопротивления, ТЭДС позволил уточнить температуру фазовых превращения в КЭП железо-карбид бора областью 580...620 °С.

При обработке ЛИ образцов без оплавления значительные изменения в структуре и внешнем виде не наблюдались, шероховатость поверхности изменялась незначительно (рис.12,а и 13,а).



а

б

в

Рисунок 12 – Микроструктура КЭП после лазерной обработки ($\times 400$): а) без оплавления поверхности; б) с оплавлением поверхностного слоя; в) полного переплавления покрытия с подложкой

При более жестких режимах обработки покрытия покрывались тонким слоем оксидов железа и других продуктов взаимодействия компонентов композиции с атмосферой и растворенными в металле газами (рис.12,б и 13,б). Частичное оплавление покрытий сопровождалось межфазным взаимодействием ДФ и матрицы. В расплавленных покрытиях ДФ полностью растворялась в матрице (рис. 12,в). Поверхность раздела основы и КЭП исчезала.

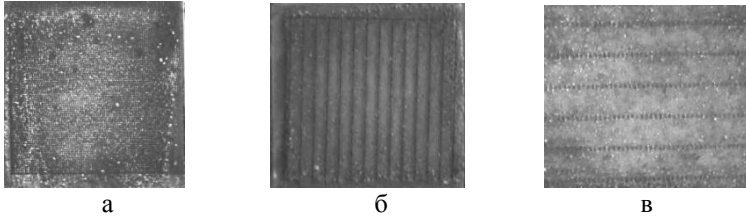


Рисунок 13 – Поверхность образцов с КЭП железо-карбид бора после лазерной обработки: а) равномерное распределение зон нагрева; б) отдельные сплошные зоны нагрева; в) отдельные точечные зоны нагрева

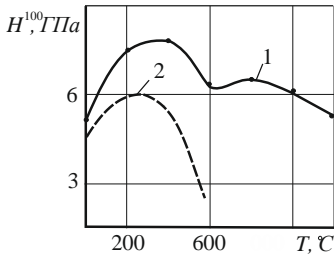
По мере увеличения мощности излучения лазера, зоны окисленного покрытия незначительно увеличивались. Изменялась и шероховатость поверхности, поэтому размеры обрабатываемых деталей должны устанавливаться с учетом припуска на последующую чистовую обработку. Хотя при импульсной лазерной обработке упрочняемая зона складывается из отдельных единичных следов действия луча, при скорости перемещения головки лазера менее 3,6 м/мин пятна нагрева перекрывались (рис. 13, б и в). Создавалась сплошная зона обработки с оптимальной равномерностью при скорости перемещения лазерной головки 3,2...3,4 м/мин и расстоянии между дорожками 1,3...1,5 мм.

Исследования показали, что ТЭДС покрытий (\mathcal{E} , мкВ) зависит от параметров лазерной обработки (мощности излучения – X_1 ; скорости перемещения лазерной головки по поверхности – X_2 ; расстояния между параллельными дорожками – X_3):

$$\mathcal{E} = -51,32 - 31,12X_1 - 2,37X_2 - 11,21X_3 + 14,53X_1^2 - 5,79X_2^2 + 30,81X_3^2 - 15,75X_1X_2 - 6,74X_1X_3 + 15,56X_2X_3, \quad (22)$$

а зависимость электросопротивления КЭП (R , 10^2 мОм) от тех же параметров имела вид:

$$R = 3,19 - 1,08X_1 - 0,11X_3 + 0,82X_1^2 - 0,4X_2^2 + 0,51X_3^2 - 0,35X_1X_2 + 0,39X_1X_3 + 0,33X_2X_3. \quad (23)$$

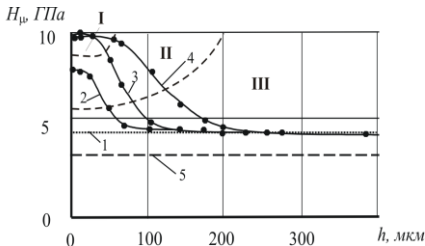


1 – матрица КЭП,
2 – «чистые» железные покрытия

Рисунок 14 – Зависимость микротвердости покрытий от температуры нагрева образцов ТВЧ

в матрице, как и показано ранее в главе 3.

При обработке ЛИ микротвердость КЭП изменялась по толщине покрытия в соответствии с изменениями его структуры (см. главу 3). В зоне с оплавлением микротвердость составляла 11...12 ГПа (слой I, рис.15). В более глубоких слоях (II и III) она уменьшалась до 9.5...10.5 ГПа и менее. Высокая микротвердость слоя I обусловлена образованием карбидов и боридов в железе, а также быстрым наклепом и пластическим деформированием, за счет термических напряжений при последующем быстром охлаждении расплава окружающей средой.



1 – без обработки; 2 – P=10...20 Вт;
3 – P=30...40 Вт; 4 – P=70...80 Вт;
5 – переплавленного с подложкой покрытия

Рисунок 15 – Микротвердость КЭП по глубине (h) слоев (I-III) после обработки ЛИ (I – слой легирования и закалки из жидкого состояния; II, III – слои термообработки в твердом состоянии)

Структурные изменения КЭП при электроннагреве приводили к изменению их физико-механических свойств. Так, микротвердость покрытий экстремально изменялась с ростом температуры нагрева ТВЧ (рис.14). Максимум $H_{\mu}=f(T)$ «чистых» покрытий при 250...300 °С при введении в них V_4C смещался в область высоких температур (450...500 °С). Причем КЭП сохраняли высокую микротвердость до 700...800 °С. Перегиб функции $H_{\mu}=f(T)$ с увеличением температуры связан с образованием боридов железа и увеличением их содержания

Предел прочности образцов из материала КЭП при растяжении (σ_0 , МПа) зависит от температуры нагрева. Анализ зависимости $\sigma_0=f(T)$ показал, что на участке температур от 20°С до 600°С она имела вид:

$$\sigma_0 = 14,137 - 0,116T + 3,9 \cdot 10^4 T^2,$$

а в области температур 600...1000 °С была близкой к линейной:

$$\sigma_0 = -0,124T + 169,4. \quad (24)$$

Следует заметить, максимальное значение предела прочности достигало 80...90 МПа, что превышает прочность «чистого» металлургического железа (70 МПа).

Износ КЭП (J , мг) также зависит от температуры нагрева поверхности ТВЧ:

$$J = 0,31 \times 10^{-4} T^2 - 0,027T + 10,312. \quad (25)$$

Износ КЭП железо-карбид бора с увеличением температуры нагрева поверхности КЭП до 620 °С уменьшался, а затем несколько увеличивался. Уменьшение износа при нагреве обусловлено улучшением структуры матрицы и ростом химических связей между матрицей и ДФ.

Исследования влияния режимов обработки ЛИ на износостойкость КЭП позволили получить уравнение регрессии в виде:

$$J=6,24+0,59 X_1-0,52 X_2-0,76 X_3-0,12 X_1^2+0,9 X_2^2+0,99 X_3^2-1,09 X_1 X_2-1,21 X_1 X_3+0,16 X_2 X_3. \quad (26)$$

Наибольшей износостойкостью обладали КЭП после обработки ЛИ и ТВЧ, сохранившие гетерофазную структуру. Она повышалась в 2...2,5 раза в сравнении с КЭП без обработки и в 8...16 раз в сравнении с «чистыми» покрытиями и закаленными легированными сталями. Глубина обработки КЭП зависела от мощности ЛИ (см.рис.15).

Таким образом, следует считать, что обработку КЭП ТВЧ и ЛИ с целью повышения их механических свойств целесообразно проводить при температуре 600...650 °С, при которой происходит улучшение структуры матрицы, повышается прочность сцепления с основой, формируется прочная поверхностная взаимосвязь между матрицей и ДФ.

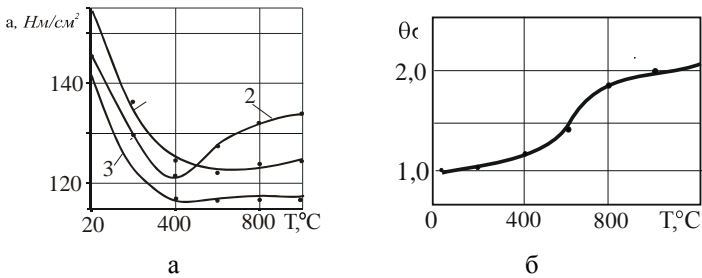
Поскольку для ряда деталей, работающих в условиях динамических нагрузок, в процессе эксплуатации возможно возникновение резонанса, важно было проверить влияние термообработки КЭП на демпфирование упругих колебаний. Логарифмический декремент затухания колебаний в образцах с КЭП на основе железа был несколько хуже, чем у «чистых» покрытий, что объясняется измененной структурой и микроструктурой, отмеченными ранее. Обработка ТВЧ образцов с покрытиями приводила к незначительному ухудшению демпфирования упругих колебаний как КЭП, так и покрытий без включений.

Исследования влияния термообработки на ударную вязкость стали с покрытиями показали, что увеличение температуры нагрева до 400...450 °С приводило к ее снижению, однако обработка КЭП при $T > 500$ °С приводила к увеличению ударной вязкости образцов в сравнении с эталонами и образцами с «чистым» электролитическим железом, что можно объяснить влиянием термообработки на характер процессов, описанных ранее (рис. 16,а).

Экспериментальные исследования ВН КЭП с нагревом ТВЧ полностью подтвердили теоретические представления, изложенные в главе 3 (рис. 16,б).

Таким образом, электротермическая обработка КЭП железо-карбид бора повышает предел прочности при растяжении до 6 раз, а износостойкость до 2,5 раз по сравнению с покрытиями без обработки, что позволяет их рекомендовать для восстановления широкого круга деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания. При этом обработка ТВЧ позволяет модифицировать покрытия на всю толщину, а лазерная – на заданную толщину до 0,15...0,25 мм. Для деталей машин, работающих в условиях динамического

нагружения, целесообразна обработка ЛИ, которая затрагивает только тонкие поверхностные слои КЭП без значительных изменений ВН.



1 – без покрытия; 2 – КЭП; 3 – «чистое» электролитическое железо
Рисунок 16 – Зависимость ударной вязкости a_n (а) и относительных ВН (б) образцов с КЭП железо-карбид бора от температуры нагрева

В пятой главе «Разработка технологических основ, производственное внедрение и технико-экономическое обоснование технологического процесса электротермической обработки КЭП» приведены технологии электромодификации КЭП с помощью ТВЧ и ЛИ, предложены меры по совершенствованию процесса электролиза КЭП. Дана их сравнительная технико-экономическая оценка и рекомендации по производственному применению.

Разработка технологических основ электротермической обработки КЭП включала: исследование влияния состава электролита на равномерность и прочность сцепления покрытий с основой; исследования по обработке деталей с покрытиями; расчет конструктивных параметров электролизеров; расчет параметров оборудования и оснастки для нанесения покрытий и их электротермической обработки; рекомендации по нанесению износостойких покрытий на детали сельскохозяйственной техники и их термической обработки.

Целью работы по усовершенствованию существующих и разработке новых технологических процессов нанесения износостойких покрытий было: апробация технологии, оснастки и приспособлений в опытных и производственных условиях, испытание технологического процесса на ряде ремонтных предприятий Брянской области, испытание ряда восстановленных и упрочненных износостойкими покрытиями деталей в полевых условиях, внедрение и технико-экономическая оценка технологии.

При разработке технологических основ установлена возможность получения равномерных покрытий без последующей механической обработки. Показано, что коэффициент равномерности покрытий (K_H) зависел от состава электролита ($Ni^{2+} - X_1; SO_4^{2-} - X_2; Na_2H_4C_4O_6 - X_3$):

$$K_H = 1,1642 + 0,011 X_1 - 0,019 X_2 - 0,018 X_3 + 0,01 X_1^2 + 0,016 X_1 X_2 + 0,021 X_1 X_3 - 0,007 X_2 X_3. \quad (27)$$

Прочность сцепления покрытий с легированной основой ($\sigma_{\text{сц}}$, кг/мм²) также зависела от изменения содержания ионов легирующих добавок в электролите:

$$\sigma_{\text{сц}}=46,23+2,40X_1-1,79X_3-2,29X_1^2-0,48X_2^2-1,81X_3^2+0,68X_1X_2. \quad (28)$$

Таким образом, для повышения равномерности и прочности сцепления с основой покрытий в ЭС введен никель серноокислый.

Была разработана схема функциональной взаимосвязи конструктивно-технологических параметров восстанавливаемых и упрочняемых КЭП деталей с технологией их термообработки (табл.2).

Таблица 2 – Принципиальная схема взаимосвязи характеристик деталей с технологией электромодификации КЭП

№ п/п	Условия работы и конструктивно-технологические параметры деталей	Вид и параметры технологического процесса получения КЭП
1	Условия работы (вид изнашивания, недостаток смазки, величина нагрузки и рабочей температуры, вид нагружения и другие)	Вид электромодификации: – формирование высокой износостойкости за счет повышения связи ДФ и матрицы; – формирование нового материала на поверхности детали с напряжениями сжатия.
2	Технологические характеристики деталей (химический состав и структура материала, вид химико-термической обработки восстанавливаемой поверхности, структура разрушенного слоя и другие)	Вид предварительной механической обработки. Составы электролитов и режимы анодной подготовки и электроосаждения покрытий. Состав технологических линий
3	Конструктивные характеристики деталей (размер, форма, масса и другие)	Типоразмеры гальванического и термомеханического оборудования. Состав технологических линий. Загрузка электролизеров.
4	Износ рабочих поверхностей (вид и величина износа, скорость изнашивания, нагрузки на контактную поверхность, температура рабочей поверхности и другие)	Толщина наносимого и модифицированного слоя. Состав технологических линий. Вид термообработки и параметры оборудования

Для получения износостойких КЭП с включениями твердых дисперсных частиц (оксидов, карбидов, боридов и других) согласно анализу, выполненному в главах 3 и 4, рекомендуется использовать ДФ с твердостью не менее 19...22 ГПа с размером частиц 10...28 мкм. Объемное содержание ДФ в КЭП порядка 20...24%.

Для равномерного распределения ДФ в КЭП необходимо обеспечить равномерное распределение ДФ в ЭС. Исследования данного вопроса показали, что этому требованию в наибольшей степени отвечают ванны с вогнутым дном, перфорированной перегородкой и мешалкой, установленной в отдельной секции, и типовая с пропеллерными мешалками, установленными в углах

(по диагонали). Для расчета параметров электролизеров адаптированы известные из литературы гидродинамические зависимости. Объем и конструкция ванн определяется программой восстанавливаемых деталей и требованиями таблицы 2.

Предложена классификация деталей, подлежащих восстановлению КЭП с последующей обработкой ТВЧ или ЛИ. Разработаны и предложены производству практические рекомендации по выбору состава ЭС и получения КЭП, выбору оборудования для обработки ТВЧ или ЛИ, финишной механической обработке модифицированных покрытий (табл.3).

Таблица 3 – Рекомендуемый вид модификации и область применения КЭП, обработанных ТВЧ и ЛИ

№ п/п	Вид модификации	Толщина модифицированного слоя, мм	Характерная область применения	Рекомендуемый состав КЭП и вид обработки
1	Получение износостойких монокристаллических КЭП	0,05...0,25	Детали, работающие в условиях недостаточной смазки, высокой температуре и нагрузке (детали механизмов рулевого управления, седел клапанов, зубчатых колес, валов в местах под подшипники и другие)	Матрица – железо и железо-никель; ДФ – карбид бора (10...40 мкм). Обработка ТВЧ и ЛИ
2	Получение износостойких монокристаллических КЭП без оплавления поверхности	0,25...1,5	Детали, работающие в условиях абразивного изнашивания (плужные лемеха, лапы культиваторов, отвалы, зубья экскаваторов и другие)	Матрица – железо и железо-никель; ДФ – карбид бора (10...40 мкм). Обработка ТВЧ.
3	Получение легированного слоя относительно высокой твердостью с напряжениями сжатия	0,05...1,5	Детали, работающие в условиях динамического нагружения (коленчатые вала, распределительные валы и другие детали)	Матрица – железо; ДФ – карбид ванадия, карбид кремния, карбид вольфрама (0,1...1 мкм). Обработка ЛИ.

Показано, что для выбора вида электротермической обработки покрытий с учетом соотношения глубины упрочненного слоя и предельного износа поверхности детали можно пользоваться коэффициентом эффективности (Тененбаум М.М. – Батищев А.Н. – Курчаткин В.В.), который позво-

ляют классифицировать рекомендации по обработке КЭП ТВЧ и ЛИ (см.табл.3)

Схема технологического процесса восстановления деталей модифицированными КЭП включает: очистку; предварительную механическую обработку; монтаж деталей на подвеску; электрохимическое обезжиривание в растворе ПАВ; промывку горячей водой; промывку холодной проточной водой; анодное декапирование; промывку холодной водой; нанесение КЭП; промывку горячей проточной водой; нейтрализацию в растворе щелочи; промывку горячей проточной водой; сушку; демонтаж деталей; контроль качества; электротермическую обработку ТВЧ и (или) ЛИ; финишную механическую обработку и хранение.

Предварительная механическая обработка необходима для восстановления формы детали и удаления верхнего окисленного, разрушенного, потерявшего первоначальную структуру слоя.

Обезжиривание и анодную обработку деталей можно выполнять по известным рекомендациям из литературы (Мелков М.П., Петров Ю.Н., Швецов А.Н., Митряков А.В. и других). Анодную обработку высоколегированных азотированных сталей, необходимо выполнять по нашим рекомендациям, в ранее выполненных исследованиях (Гурьянов Г.В., Кисель Ю.Е.).

Износостойкие КЭП на основе железа целесообразно наносить из электролита состава, кг/м³: FeCl₂·4H₂O – 550...600; NiSO₄·7H₂O – 80...90; Na₂H₄C₄O₆·2H₂O – 1...1,5; карбид бора М14 – 90...100; при плотности тока 35...40 А/дм², рН=0,7...1,0, температуре 40...50 °С. Их электротермическую обработку ТВЧ или ЛИ по рекомендациям раздела 4 и таблицы 3. Разработаны конструкции приспособлений для нанесения равномерных КЭП.

Для повышения качества электротермической обработки деталей с КЭП разработаны рекомендации по выбору параметров устройств ТВЧ и ЛИ и приспособлений, например, оснастка для обработки зуба экскаватора ЛИ (рис.18).

Для термической обработки ТВЧ можно использовать установки серийного изготовления со встроенными пирометрами. Основным регулируемым параметром является частота тока индуктора, которую можно установить теоретически и проверить опытным путем.

Для лазерной обработки КЭП можно использовать импульсные СО₂ – лазеры, например TRUMPF L2530. Режимы лазерной обработки рассчитываются в зависимости от области применения КЭП и вида термической обработки.

Финишную обработку можно выполнять на шлифовальных станках. Следует использовать круги на карборундовой или кубонитовой основе с мягкой связкой. Скорость вращения должна составлять не менее 30 м/с, а подача СОЖ увеличена в сравнении с обычным шлифованием в 1.2...1.5 раза.

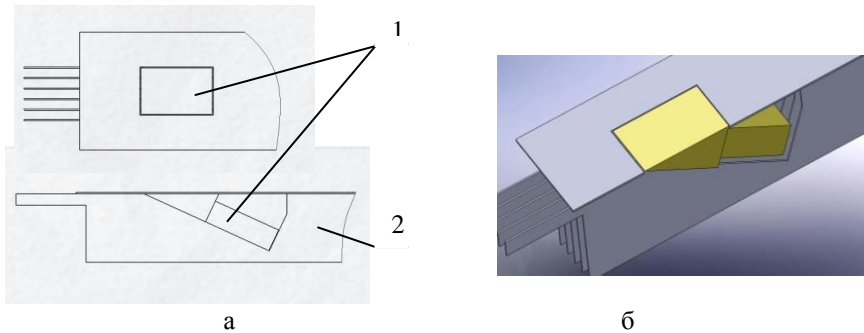


Рисунок 18 – Пример схемы (а) и общий вид (б) приспособления для термической обработки зуба экскаватора (1 – зуб экскаватора; 2 – приспособление для крепления)

Испытания технологического процесса восстановления деталей в условиях производства и испытание восстановленных и упрочненных деталей модифицированными КЭП в полевых условиях проводили в период 2001-2009 гг. на ОАО БЭЗРДМ, ОАО «Глинищеворемтехпред», ООО «ТЕХКОН» и ОАО «192 ЦЗЖТ», ОАО «Брянксельмаш», ГУП «Автоколонна 1403». По просьбе предприятия ОАО БЭЗРДМ разрабатывали технологический процесс восстановления золотников гидрораспределителей ЭО4121 КЭП без модификации, а для ОАО «Глинищеворемтехпред» технологический процесс восстановления дисков фрикционов железо-никелевыми покрытиями.

Нанесение КЭП на детали проводили на гальванических участках ОАО БЭЗРДМ, ОАО «192 ЦЗЖТ», и на опытной установке в лаборатории гальванических покрытий кафедры физики БГИТА (см. гл. 5).

Термическую обработку ТВЧ опытных деталей проводили на установке ИЗ–250–66 (ОАО БЭЗРДМ, рис.19,а) и ВЧИ2–100/0,066У2 (ОАО «192 ЦЗЖТ»). Лазерную обработку деталей с КЭП проводили на установке TRUMPF L2530 (ОАО «Брянксельмаш», рис.19,б).

Испытания гидрораспределителей с восстановленными модифицированными КЭП проводили на опытном стенде ООО «Гидроремсервис» и в хозяйствах Брянской области. Эксплуатационные испытания шкворней и крестовин проводили в ГУП «Брянская АК – 1403». Испытания зубьев экскаватора ЭТЦ – 3661 с КЭП железо-никель-карбид бора с последующей термообработкой лазером проводили на экспериментальном полигоне в г. Унеча Брянской области. Всего на испытания было поставлено 6 видов деталей по 5...20 штук в серии. Сроки наблюдения за опытными деталями – от 2 до 24 месяцев. Было установлено, что все детали, восстановленные модифицированными КЭП, имели в 1,5...2,5 раза повышенную износостойкость в сравнении с деталями, восстановленными КЭП без обработки (например, шкворни – в 2...2,5 раза, крестовины – 2...2,5 раза, зубья экскаватора – 1,5...1,8 раза) и в 6...12 раз – с серийными.



а



б

Рисунок 19 – Общий вид установок ТВЧ (а) и ЛИ с приспособлениями для обработки деталей(б)

Испытания проводили по стандартным методикам с применением поверенных измерительных инструментов класса 0,5...1,0. Контрольные измерения проводили в соответствии с рабочими чертежами на детали. Измерения проводили в процессе испытаний и после их окончания. Результаты испытаний использовали для расчета ресурса деталей по методике Острейковского В. А. Показано, что расчетный ресурс деталей с модифицированными КЭП в 1,5...2,5 раза выше деталей, восстановленных КЭП без термической обработки, и в 6...12 раз – серийных деталей.

Производству предложены и внедрены в практику ряда ремонтных предприятий АПК Брянской области технологические процессы, рекомендации и оборудование для восстановления и повышения долговечности широкой номенклатуры изношенных деталей: золотники гидрораспределителей Р100 и РХ345 (ООО «ГИДРОРЕМСЕРВИС»); золотники гидрораспределителей Р80 (ОАО «192 ЦЗЖТ»); крестовины КАМАЗ и шкворни ЛИАЗ (ГУП «Брянская АК-1403»); диски фрикционов трактора К-701 “Кировец” (ОАО «Глинищевормтехпред»); детали почвообрабатывающих машин (ООО «ТЕХКОН»).

Показана технико-экономическая эффективность применения технологии в производственных условиях в сравнении с другими методами восстановления. Расчетный и подтвержденный актами экономический эффект от внедрения технологии в период 2007...2010 гг. составил более 800 тыс.руб. (например, для деталей на программу 1000 шт.: золотники Р100 – 220 тыс.руб.; РХ346ГГ – 160 тыс.руб.; шкворни – 140 тыс.руб.; крестовины – 160 тыс.руб.; диски фрикционов – 120 тыс.руб.)

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены основные направления совершенствования технологии КЭП: формирование прочной связи между ДФ и матрицей КЭП [Пат. №2482225]; формирование КЭП с остаточными ВН сжатия [Пат. №2473715];

создание на поверхности детали материалов с заданным составом, структурой и свойствами.

2. Развита теория формирования КЭП и разработаны основы их электротермической обработки. Установлена связь прочностных свойств КЭП с их гетерогенной структурой и прочностью межфазных связей. Теоретически и экспериментально показана зависимость износостойкости КЭП от природы, размеров и объемного содержания ДФ. Разработаны и предложены методики контроля условий формирования и свойств КЭП: содержания ДФ в КЭП методом микротвердости; структуры матрицы КЭП по их дилатации; упругих характеристик методом конечных элементов; оптимизации износостойкости КЭП по их установившейся шероховатости.

3. Показано, что термическое воздействие при электротермической обработке КЭП должно быть ограничено формированием прочных связей между ДФ и матрицей без нарушения их общей структуры. Для достижения необходимого уровня прочности связей между компонентами КЭП нужно подвергать электронагреву до 0.4Θ (например, КЭП железо-карбид бора – до $580...620^{\circ}\text{C}$), превышение которой может привести к разрушению покрытий. Вместе с тем, выбор компонентов КЭП, образующих при модификации фазы с меньшей удельной плотностью в сравнении с исходной, будет способствовать формированию композитов с напряжениями сжатия.

4. Выполнен анализ процессов электротермической обработки КЭП с помощью ТВЧ и ЛИ. Установлены аналитические зависимости для выбора режимов термообработки с учетом особенностей гетерогенной структуры КЭП. Показано, что при обработке КЭП ТВЧ толщина модифицированного слоя определяется наряду с природой и структурой компонентов, частотой тока ($60...100$ кГц), а при ЛИ – мощностью излучения ($15...150$ Вт) и плотностью пятен обработки на поверхности детали. Экспериментально установлено, что обработка ТВЧ позволяет модифицировать покрытия на всю толщину, а ЛИ – на глубину, требуемую условиями эксплуатации детали (до 0.25 мм).

5. На примере КЭП железо-карбид бора экспериментально установлено, что электротермическая обработка сопровождается изменением электросопротивления, термоЭДС, плотности, прочности, износостойкости, ВН, внутреннего трения и ударной вязкости. Показано, что модификация покрытий с помощью ТВЧ и ЛИ позволяет повысить их износостойкость в $1,5...2,5$ раза и прочность при растяжении – в $4...5$ раз в сравнении с КЭП без обработки.

6. Предложена технология восстановления и повышения долговечности быстроизнашиваемых деталей сельхозтехники КЭП с последующей электротермической обработкой ТВЧ или ЛИ. Предложена классификация деталей, подлежащих восстановлению модифицированными КЭП. Разработаны и прошли испытания технологические процессы восстановления КЭП ряда деталей с повышенным ресурсом в $1,5...2,5$ раза в сравнении с покрытиями без обработки и $6...12$ раз – серийными деталями. Они внедрены на ряде

предприятий Брянской области с экономическим эффектом порядка 800 тыс. руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований:

1. Кисель, Ю.Е. Рассеяние микротвердости композиционных гальванических покрытий [Текст] /Г.В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель, П.Е.Кисель, Е.М. Юдина //Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2009. – №4 (19). – С.219-222.

2. Кисель, Ю.Е. Применение метода конечных элементов для расчета упругих характеристик композиционных материалов [Текст] /Г.В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель, П.Е.Кисель, Е.М. Юдина //Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2009. – №4 (19). – С.235-239.

3. Kisel, Y.E. Wear Resistance of Composite Electrochemical Coatings Based on Iron Alloys /Y.E. Kisel, G.V. Guryanov, D.M. Kroitoru// Surface Engineering and Applied Electrochemistry. Vol.45 №6, 2009, pp. 461-464. Allerton Press. Jns. USA

4. Кисель, Ю.Е. Повышение износостойкости деталей машин композиционными электрохимическими покрытиями [Текст] /Г.В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – №10. – С.39-42.

5. Кисель, Ю.Е.Влияние дисперсной фазы на коэффициент вариации микротвердости композиционных электрохимических покрытий [Текст] /Г.В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель //Упрочняющие технологии и покрытия. – №3. – 2009. – С.13-21.

6. Кисель, Ю.Е. Структура и некоторые прочностные свойства электролитических сплавов железа [Текст] /Г.В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – №7. – С.18-21.

7. Кисель, Ю.Е. Износостойкость композиционных электрохимических покрытий на основе сплавов железа [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов, Д.М. Кроитору //Электронная обработка материалов. – 2009. – №6. – С.30-34.

8. Кисель, Ю.Е. К структурным изменениям электрохимических покрытий при высокотемпературном нагреве [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №8. – С.42-45.

9. Кисель, Ю.Е. Лазерная обработка износостойких композиционных электрохимических покрытий [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №9. – С. 45-47.

10. Кисель, Ю.Е. Влияние термообработки на внутренние напряжения композиционных электрохимических покрытий [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2010. – №12. – С. 23-26.

11. Кисель, Ю.Е. Улучшение свойств износостойких композитов обработкой ТВЧ [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2011. – № 1. – С. 31-34.

12. Кисель, Ю.Е. Совершенствование свойств композиционных электрохимических покрытий лазерной обработкой [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2011. – № 5. – С. 4-8.

13. Кисель, Ю.Е. Влияние структурно-механических параметров композитов на их износостойкость [Текст] /Ю.Е. Кисель //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №10. – С. 45-47.

14. Кисель, Ю.Е. Оптимизация износостойкости композитов по их установившейся шероховатости [Текст] /Ю.Е. Кисель, А.С. Горьков //Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – №4(32). – С. 26-29.

15. Кисель, Ю.Е. О взаимосвязи электрофизических свойств электрохимических покрытий с фазовыми превращениями при их термической обработке [Текст] /Ю.Е. Кисель //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №2. – С. 13-17.

16. Кисель, Ю.Е. Зависимость прочностных свойств электролитических покрытий от их субструктуры [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №10. – С. 6-12.

17. Кисель, Ю.Е. Термическая обработка композиционных электрохимических покрытий [Текст] /Ю.Е. Кисель, М.А. Швыряев, А.С. Горьков //Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – №1(37). – С. 87-90.

18. Кисель, Ю.Е. Лазерная обработка композиционных электрохимических покрытий [Текст] /Г.В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – №4. – С.53-55.

19. Кисель, Ю.Е. Определение параметров микроструктуры электрохимических покрытий по их дилатации [Текст] /Ю.Е.Кисель, Г.В.Гурьянов, Е.М. Юдина //Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – №43. – С.295-299.

20. Кисель, Ю.Е. Влияние прочности компонентов электрохимических композитов на их износостойкость [Текст] /Е.М. Юдина, Е.О.Юдин, Г.В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель //Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – №43. – С.303-306.

21. Кисель, Ю.Е. Совершенствование электрохимических композитов электронагревом [Текст] /В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель //Научное обозрение. – 2013. – №10. – С.145-150.

Другие публикации:

22. Кисель, Ю.Е. Восстановление дисков фрикционов электрохимическими покрытиями на основе сплавов железа [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель //Конструирование, Использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2013. – №1. – С. 10-14.

зайственного назначения: сборник научных работ. – Брянск, 2002. – С.123-126.

23. Кисель, Ю.Е. Проблемы инженерной экологии при восстановлении деталей электрохимическими способами в ремонтном производстве АПК [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель //Проблемы природообустройства и экологической безопасности: материалы XV межвузовской науч.-практ.конф. – Брянск, 2002. – С.73-77.

24. Кисель, Ю.Е. Безреагентные методы очистки сточных вод ремонтных предприятий [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель //Проблемы природообустройства и экологической безопасности: материалы XVI межвузовской науч.-практ.конф. – Брянск, 2003. – С.64-67.

25. Кисель, Ю.Е. Микротвердость и износостойкость электролитических сплавов и композитов на основе железа [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель //Контактная жесткость. Износостойкость. Технологическое обеспечение: сборник трудов международной-научно-технической конференции. – Брянск, 2003. – С.83-86.

26. Кисель, Ю.Е. Влияние дисперсной фазы на механические свойства композиционных электрохимических покрытий [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Вестник Брянской государственной инженерно-технологической академии – Брянск, 2005. – С.79-82.

27. Кисель, Ю.Е. Влияние условий трения на износостойкость КЭП в условиях абразивного изнашивания [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель //Новые материалы и технологии в машиностроении: сборник научных работ. – Брянск, 2006. – С.68-72.

28. Кисель, Ю.Е. Антифрикционные и износостойкие электрохимические покрытия /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель. – Брянск: Издательство БГИТА, 2006. – 121 с.

29. Кисель, Ю.Е. Повышение экологичности гальванических производств /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель. – Брянск: Издательство БГИТА, 2007. – 90 с.

30. Кисель, Ю.Е. Износостойкость КПП на основе сплавов железа при трении о нежесткозакрепленный абразив [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Проблемы энергетики, природопользования, экологии: материалы международной научно-технической конференции. – Брянск, 2008. – С.47-53.

31. Кисель, Ю.Е. Влияние термической обработки на износ композиционных электрохимических покрытий [Текст] / Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, П.Е.Кисель, С.С. Годунов //Проблемы энергетики, информатизации и природопользования АПК: материалы международной научно-технической конференции. – Брянск, 2009. – С.25-32.

32. Кисель, Ю.Е. Влияние режимов лазерной обработки на износ КЭП [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, П.Е.Кисель, С.С. Годунов //Проблемы энергетики, информатизации и природопользования АПК: мате-

риалы международной научно-технической конференции. – Брянск, 2009. – С.45-49.

33. Кисель, Ю.Е. Влияние электрохимических покрытий на упругие колебания [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, П.Е.Кисель // Вестник Брянской государственной инженерно-технологической академии – Брянск, 2009. – С.35-40.

34. Кисель, Ю.Е. Расчет упругих характеристик композитов с дисперсными включениями методом конечных элементов [Текст] /И.Н.Серпик, Г.В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель //Перспективы развития агрокультуры: материалы международного симпозиума. – Кишинев, 2009. – С.127-131.

35. Кисель, Ю.Е. Влияние объемного содержания на коэффициент вариации микротвердости композиционных электрохимических покрытий [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов, П.Е. Кисель //Перспективы развития агрокультуры: материалы международного симпозиума. – Кишинев, 2009. – С.131 - 135.

36. Кисель, Ю.Е. Повышение износостойкости деталей машин композициями на основе железа [Текст] / Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов, С.С. Годунов, П.Е. Кисель// Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах: материалы 1-й международной науч.-практ. конф.Т.1 – Брянск, 2009. – С.170-172.

37. Кисель, Ю.Е. Прочность композиционных электрохимических покрытий при испытании на растяжение [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов, С.С. Годунов //Энергетический вестник СПб ГАУ. – Санкт-Петербург, 2010. – С.28-32.

38. Кисель, Ю.Е. Оптимизация износостойкости композитов по их установившейся шероховатости [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Электрические методы обработки материалов: материалы международного симпозиума. – Кишинев, 2010. – С.26-28.

39. Кисель, Ю.Е. Совершенствование свойств КЭП [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 1-го международного научно-технического семинара. – г. Свалява, Карпаты, 2011. – С.126-128.

40. Кисель, Ю.Е. Влияние термообработки на внутренние напряжения композиционных электрохимических покрытий [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов //Достижения и перспективы в области технического сервиса сельскохозяйственной техники и автомобилей: материалы международной научно-технической конференции. – Кишинев, ГАУМ, 2011. – С. 34-36.

41. Кисель, Ю.Е. Совершенствование методов расчета зернистых композитов [Текст] /И.Н.Серпик, Е.Ю.Балабанова, Г.В.Гурьянов, Ю.Е.Кисель //Проблемы энергетики, природопользования, экологии: материалы международной научно-технической конференции. – Брянск, 2010. – С. 77-82.

42. Кисель, Ю.Е. Совершенствование электрохимических компози- тов электронагревом [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, П.Е. Кисель //Стратегия качества в промышленности и образовании: материалы междуна- родной конференции. Том 3. – Варна, Болгария, 2012 г. – С. 102-106.

43. Кисель, Ю.Е. Совершенствование элетрохимических композитов электронагревом [Текст] /Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов, П.Е. Кисель //Проблемы энергосбережения, информации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК: материалы международной науч.-техн. конф. – Брянск, 2012 г. – С. 27-30.

44. Кисель, Ю.Е. Связь механических свойств покрытий с их дилата- цией [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, П.Е.Кисель, С.С. Годунов //Проблемы энергосбережения, информации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК: материалы международной науч.-техн. конф. – Брянск, 2012 г. – С. 30-33.

45. Кисель, Ю.Е. Влияние электронагрева на внутренние напряжения электрохимических композитов [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, П.Е.Кисель //Современные проблемы производства и ремонта в промышлен- ности и на транспорте: материалы 13-го международного научно- технического семинара. – г.Свяява – Киев, 2013. – С.33-35.

46. Кисель, Ю.Е. К расчету глубины лазерной обработки гетероген- ного материала [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, П.Е.Кисель //Проблемы энергообеспечения, информации и автоматизации, безопасности и природо- пользования в АПК: материалы международной науч.-техн. конф. – Брянск, 2013 г. – С. 22-25.

47. Кисель, Ю.Е.Повышение равномерности электрохимических по- крытий [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, Е.М.Юдина //Проблемы энерго- обеспечения, информации и автоматизации, безопасности и природопользо- вания в АПК: материалы международной науч.-техн. конф. – Брянск, 2013 г. – С. 25-27.

48. Кисель, Ю.Е. Термообработка КЭП железо-карбид бора [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, П.Е.Кисель //Проблемы энергообеспечения, информации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК: материалы международной науч.-техн. конф. – Брянск, 2013 г. – С. 20-22.

49. Кисель, Ю.Е. Модификация КЭП лазерным излучением [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, П.Е.Кисель // Новые технологии в научных ис- следованиях, проектировании, управлении, производстве: материалы всерос- сийской конф. – Воронеж, 2013 г. – С. 205-207.

50. Кисель, Ю.Е. Влияние механических параметров КЭП на их из- носстойкость [Текст] /Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель //Lucrari stiintifice Vol.38: Inginerie agrara si transport auto: col red.: G.Gradinariu. - 2013 г. – p. 172-177.

Патенты:

51. Патент на изобретение №2482225. Заявка №2011114751/02(021901). Дата подачи заявки 14.04.2011. Авторы Кисель

Ю.Е., Гурьянов Г.В.,RU. Патентообладатель ФГБОУ ВПО БГИТА,RU. Название изобретения: Способ нанесения композиционных электрохимических покрытий.

52. Патент на изобретение №2473715. Заявка №2011110494/02(015328). Дата подачи заявки 18.03.2011. Авторы Кисель Ю.Е., Гурьянов Г.В.,RU. Патентообладатель ФГБОУ ВПО БГСХА,RU. Название изобретения: Способ нанесения композиционных электрохимических покрытий с последующей электротермической обработкой.

КИСЕЛЬ ЮРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Формат 60×80 1/16. Усл. печ.л. 2.2. Тираж 100 экз.
Брянская государственная инженерно-технологическая академия.
г.Брянск, ул. Станке Димитрова, 3, редакционно-издательский отдел.
Подписано в печать _____. Заказ № 14896.