

На правах рукописи



ГРИГОРЬЕВ Сергей Борисович

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ
ПОКРЫТИЯ НА КОНСТРУКЦИОННЫХ
И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка метал-
лов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет» на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гадалов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Петренко Владимир Романович

кандидат технических наук, доцент
Алехин Юрий Георгиевич

Ведущая организация: ОАО «Воронежское акционерное
самолетостроительное общество»

Защита диссертации состоится «1» декабря 2009 года в 16 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.01 при Курском государственном техническом университете по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Курского государственного технического университета.

Автореферат разослан «31» октября 2009г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
Д 212.105.01



Б.В.Лушников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основной причиной возникновения и развития технологии нанесения многофункциональных защитных покрытий является стремление повысить долговечность деталей и узлов различных механизмов машин. В условиях мирового экономического кризиса прогресс промышленности видится также в «реновации» – системной деятельности по повторному использованию средств материального производства, в частности восстановлению деталей и узлов оборудования в различных отраслях техники.

Восстановление работоспособности оборудования достигается ремонтом. Но сложившаяся технология ремонтных работ, их культура и организация находятся на низком уровне и не обеспечивают полноценного восстановления работоспособности изделий. Известно, что средние затраты на ремонт и межремонтное оборудование в стране в 5...7 раз превышает затраты на изготовление новых машин.

Очевидно, что ремонтные процессы нуждаются в реорганизации и требуют широкого использования современных упрочняющих технологий и материалов. Соответственно для этого требуются высококвалифицированные научные кадры, имеющие глубокие познания в физике старения и износа конструкционных материалов и вооруженные знанием прогрессивных методов отделки и упрочнения поверхностных слоев деталей из металлов и сплавов.

Проблема использования и развития передовых технологических процессов поверхностного упрочнения и легирования обусловлена значительным влиянием структуры и химического состава приповерхностных слоев деталей различного оборудования и машин на их эксплуатационные характеристики.

На данное время наука и техника располагает большим количеством методов воздействия на структуру и изменения физико – химических, эксплуатационных свойств металлических поверхностей в заданном направлении, такие как химико – термическая обработка, газотермическое напыление, электрофизические методы обработки и др.

К числу современных методов упрочнения и нанесения защитных покрытий относится электроискровое легирование (ЭИЛ) и его разновидности: локальное электроискровое нанесение покрытий (ЛЭНП) и электроакустическое напыление (ЭН), ионно – плазменные методы, а также методы поверхностно – пластического деформирования (ППД).

В последнее время широкое применение получила комбинированная обработка (КО), сочетающая нанесение покрытий с последующим ППД или обработкой поверхности покрытий лазерным излучением.

Следует отметить, что процесс получения таких композитов связан с влиянием многих факторов и вопрос оптимизации системы подложка – покрытие плюс КО для каждого конкретного случая является сложной исследовательской задачей. Оптимизация такой системы предполагает соответствующий выбор состава покрытия, его структуры, качества (пористости и шероховатости) и адгезии с учетом рабочей температуры, совместимости материалов подложки и покрытия, выбор и оптимизация технологии КО, доступ-

ности и стоимости материалов композита, а также возможности возобновления покрытия, ремонта и надлежащего ухода во время эксплуатации.

При формировании композита протекают физико – химические процессы, основными из которых являются нагрев, охлаждение с высокой скоростью, диффузия компонентов и межфазные взаимодействия в системе подложка – покрытие – структура поверхностных слоев после КО. Природа этих явлений и связанных с ними механизмов упрочнения для создания реальных технологий требует детального изучения.

Применение КО позволяет поднять качество деталей, повысить их конкурентоспособность. Кроме того, углубленные исследования новых процессов расширяют область их эффективного использования в машиностроении. Это актуально для промышленности страны.

Результаты работы вносят существенный вклад в решение важной народно – хозяйственной задачи – повышение работоспособности и надежности современной техники.

Работа выполнялась по одному из научных направлений «ООО Газпром» 2002 – 2010г.г., а также в рамках проекта по реализации «Региональных научно – технических программ Центрально – черноземного региона России».

Целью работы является разработка на научной основе технологических принципов формирования многофункциональных композиционных покрытий, полученных электрохимикофизическими методами и комбинированной обработкой на конструкционных и инструментальных материалах, управления их структурой для повышения эксплуатационных характеристик деталей и инструмента.

Для достижения поставленной цели необходимо было **решить следующие задачи:**

1. Проанализировать, систематизировать и обобщить литературные данные по применению гальванических легированных осадков железа, подвергнутых цианированию; плазменных, ионно – плазменных и электроискровых покрытий. Оценить влияние комбинированной обработки: газового оплавления плазменных покрытий, лазерного излучения и выглаживания на структуру и качество поверхностных слоев ЛЭН покрытий. Сформулировать цель работы и задачи исследования.

2. Разработать, обосновать и исследовать специальные электродные материалы для газоплазменного и ионновакуумного напыления, ЛЭН, ЭЛАН и гальванических покрытий, обеспечивающих получение качественных измененных поверхностных слоев (ИПС) с требуемым уровнем физико – химических и эксплуатационных свойств; провести оптимизацию технологических режимов электроискровой обработки.

3. Расширить применение композиционных материалов путем создания на их основе многофункциональных покрытий и слоистых композиций типа «сэндвич».

4. Провести комплексные металлофизические исследования конструкционных и инструментальных материалов с нанесенными покрытиями. Вы-

явить главные структурные факторы и закономерности формирования (ИПС) покрытий, установить их взаимосвязь с физикомеханическими и эксплуатационными характеристиками.

5. Разработать и исследовать технологию восстановления и упрочнения деталей машин из стали (30...50) цианизированными железо-молибденовыми покрытиями.

6. Расширить возможность применения инструментальных сталей с ЛЭНП лазерной обработкой и выглаживанием минералокерамикой.

7. Провести промышленное апробирование отдельных технологических процессов нанесенных покрытий на реальных объектах газопромышленного и машиностроительного комплекса России.

Научная новизна работы заключается в:

- экспериментальном и научном развитии фундаментальных представлений в формировании и строении электросажженных гальванических, плазменных, ионно – вакуумных, электроискровых и электроакустических покрытий; установления закономерностей формирования структуры и главных структурных факторов, определяющих повышение механических и эксплуатационных свойств композиционного материала;

- развитию научно – обоснованных принципов выбора химического состава наносимых материалов и оптимальных режимов электрохимикофизической обработки;

- установлены закономерности формирования структуры, выявлены главные структурные, определяющие повышение физико – механических и эксплуатационных свойств конструкционных и инструментальных материалов с многофункциональными композиционными покрытиями;

- предложен и исследован метод упрочняющей обработки электросажженных Fe–Mo и Fe–Cr сплавов силицированием, обеспечивающий повышение износостойкости гальванических покрытий за счет образования карбонитридов железа. Установлены закономерности формирования структуры электроосажженных легированных Mo и Fe железных сплавов и их влияние на механические и эксплуатационные свойства;

- разработаны комбинированные методы обработки, заключающиеся в нанесении покрытий с последующей их обработкой лазерным излучением или ППД, в частности выглаживанием, для получения структуры поверхностных слоев композита, отвечающего высоким показателям качества поверхности и требуемым эксплуатационным характеристикам.

Объектами исследования являлись: электроосажженные легированные покрытия на основе железа, упрочненные силицированием; плазменных, ионно – плазменные и электроискровые покрытия, а также ЛЭНП после лазерного облучения и выглаживания минералокерамиков, нанесенные конструкционные и инструментальные материалы.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовался современный комплекс металлофизических методов исследований: оптическая, электронная и растровая микроскопии, неразрушающие методы контроля металла – рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный

анализы и др. Склерометрическим способом оценивалась адгезионная прочность сцепления покрытия с подложкой. Механические испытания проводились согласно существующим ГОСТам. Экспериментальные исследования проведены с использованием теории планирования экспериментов, теории вероятности и математической статистики.

Практическая значимость исследования состоит в следующем:

разработаны эффективные технологии и предложены практические рекомендации получения конструкционных и инструментальных материалов с электрохимикофизическими покрытиями с повышенным уровнем износа –, жаро – и коррозионной стойкости. Экспериментально доказана эффективность применения цианированных, гальванических, газотермических, ионно – вакуумных, электроискровых и электроакустических покрытий для деталей машин и инструментов, работающих в сложных условиях эксплуатации. Намечены пути дальнейшего совершенствования электрофизических покрытий путем обработки поверхностных слоев покрытий лазерным излучением или выглаживанием минералокерамикой. Основные выводы диссертации подтверждаются промышленными испытаниями. Результаты работы внедрены на предприятиях г.г. Оренбурга, Москвы и др. с экономическим эффектом более 350 миллионов руб.

Достоверность основных положений и выводов диссертационной работы определяется согласованностью полученных результатов с общепринятыми представлениями теории и практики ХТО, электрофизической обработки и отсутствием противоречий с результатами работ российских и зарубежных ученых, работающих в этих направлениях, достоверность результатов исследований основывается на комплексном использовании взаимодополняющих высокочувствительных металлофизических методах исследований, применения их в соответствии с действующими государственными стандартами и с учетом особенностей изучаемых объектов.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на: IV междунар. научн. – техн. конф. «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (Курск: КГТУ; 18–20 мая 2006г.); Росс. научн. – техн. конф. с междунар. участием Курск «Материалы и упрочняющие технологии – 2007, 2008, 2009» (Курск: КГТУ; 16–18 октября 2007г.; 27–29 мая 2008г.; 21–23 апреля 2009г. соответственно); III междунар. научн. – практич. конф. «Проектирование механизмов и машин» (Воронеж ВГТУ; 17 апреля 2009г.); междунар. научн. – практич. конф. «Актуальные проблемы химической науки, практики и образования» (Курск: КГТУ; 18–21 мая 2009г.); II междунар. научн. – практ. конф. «Молодежь и наука : реальность и будущее» (Невинномысск: НИЭУП; 3 марта 2009г.); междунаро. Российско – Китайском симпозиуме «Современные материалы и технологии – 2009» (Хабаровск: Тихоокеанский госуд. ун – т; (5 – 9 октября 2009г.); научн. – техн. семинаре кафедры «Материаловедение и сварка» (Курск; КГТУ; 15 сентября 2009г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 21 печатная работа, из них три в журналах, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и результатов, заключения, библиографического списка и двух приложений. Общий объем работы составляет стр. машинописного текста, иллюстраций 48, таблиц 18, литературных ссылок 168, приложений 2.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, раскрывается ее содержание, формулируется научная и практическая значимость; показана связь работы с научными программами.

Первая глава освещает обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены общие вопросы ХТО, проведен анализ ХТО сталей, подвергнутых нитроцементации и цианированию. Рассмотрены процессы, протекающие в поверхностных слоях сталей при совместном их насыщении С и N. Приводятся сведения о современном состоянии электроосаждения бинарных сплавов на основе Fe, а также гальванических композитных покрытий.

Рассмотрены упрочняющие и восстанавливающие покрытия, полученные газотермическим напылением (ГН). Приведена классификация методов ГН. Представлены сведения о материалах для плазменного напыления, анализируются свойства плазменных покрытий.

Кратко описана электроискровая обработка металлических изделий, к которой относятся: электроискровое легирование (ЭИЛ) и его разновидности – локального электроискрового нанесения и электроакустического нанесения покрытий – (ЛЭНП) и (ЭЛАНП) соответственно.

Далее рассматриваются ионно – плазменные покрытия, полученные методом КИБ. Кратко описана реализация этого метода на установках «Пуск» и «Булат».

На основании вышеизложенного сделан вывод, что исследования и разработки в области управления созданием упрочняющих и восстанавливающих композиционных покрытий на металлических материалах являются эффективным и перспективным на сегодняшний день научным направлением.

На основании анализа научно – технической информации были сформулированы цель работы и задачи, поставленные для ее решения.

Вторая глава. В ней описываются материалы, служащие объектами изучения, установки и технологии.

Объектами изучения являлись:

1. Гальванические покрытия: электроосажденное железо, легированное железо (Fe–1,5% Mo) и (Fe–(2...8)% Cr); цианированное (Fe–1,5% Cr) на доэвтектоидных сталях (30...50).

2. Плазменные покрытия из сплавов: ПГ-12Н-01 с 5%WC на сталях 30 и 65Г с газовым оплавлением и без оплавления; ПН-ХН80СЗРЗ.

3. Металлическая многослойная (2...3 слоя) полоса сталь–алюминий.

4. Ионно – плазменные вакуумные покрытия: TiC; TiN; Ti(CN); (TiZr)CN; (TiAl)N; TiN на быстрорежущей стали Р6М5 и на твердом сплаве Т15К6.

5. Электрофизические покрытия, полученные: ЭИЛ, ЛЭНП и ЭЛАНП. ЛЭНП электродом ВК6М на стали ШХ15 и ХВГ; ЭЛАНП электродом Т15К6 на сталь Р6М5; ЛЭНП из сплава $\text{FeCr}_{10}\text{B}_7\text{C}_6$ и $\text{NiFe}_4\text{Cr}_{14}\text{SiB}_3\text{C}$; из сплавов ПГ-10Н-01, ПГ-ФБХ6-2 и их смеси 50 на 50% на сталь 30Х ГСА.

5.1. ЛЭНП из сплава ПГ-10Н-01 и ПР-Н77Х15С3Р2 на сталь Р65М легированную 0,4%С и 1,6% Ti до и после лазерной обработки.

5.2. ЛЭНП из сплава «Колмоной» 15Cr, (2...3)В, (2...3)Si, (0,1...0,7)С ост. Ni в ат % на стали Р12М13К8Ф2-МП до и после выглаживания минеролокерамикой ВОК-60.

Далее в главе представлены сведения об оборудовании и технологиях, применяемых в работе, описана технология электроосаждения металлов на токе переменной полярности, даны схемы установок для осаждения Fe–Cr, Fe–Mo и др. покрытий на асимметричном токе. Кратко описан процесс гальванического композиционного насыщения.

Рассмотрена технология газотермического нанесения покрытий, установки и материалы для плазменного напыления и области его применения. Представлен ряд режимов плазменного напыления порошками с различным размером частиц, а также методы контроля качества покрытий.

В разделе «Оборудование для электроискровой обработки» приводятся сведения об установках «ЭФИ-45», «ЭЛФА-541» и «ЭЛАН-3» и по технологии ЛЭН и ЭЛАН покрытий.

Далее подробно рассмотрен метод КИБ. Приведены сведения об установках типа «Булат» и «Пуск» и технологии нанесения ионно – вакуумных покрытий.

В заключении главы описан спектрометрический метод контроля химического состава на оптико – эмиссионном спектрометре и Foundrymate, а также методика исследования внутренних напряжений в покрытиях по методу Северина М.М.

Кроме того, в данной работе для решения поставленных задач применялись следующие металлофизические и металловедческие методы исследований: оптическая микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия; растровая электронная микроскопия; рентгеноспектральный микроанализ; мессбауэровская спектроскопия; методы исследования структуры и свойств аморфных материалов; определение механических свойств; специальные испытания; в частности испытания на трение и износ и др. методы исследования.

Третья глава. Ее первая часть посвящена изучению структуры.

Фазового состава и свойств электроосажденных Fe–Mo и Fe–Cr упрочненных цианированием. В работе исследовались гальванические покрытия на образцах сталей (30...50), полученных из хлоридных электролитов с использованием асимметричного тока [118, 119]. Цианирование проводили с использованием пасты, состоящей из газовой сажи (50%) и железно – синеродистого калия (50%), связующее вещество – клей КЦМ при (600...650)°С. Состав исследуемых покрытий: 1) – Fe+1,5% Мо и 2) – Fe+ (1,5...2)% Cr. Толщина слоя гальванического покрытия в обоих случаях составляла (0,8...1,0) мм и имеет ярко выраженную слоистую структуру (рис. 1 а, б).

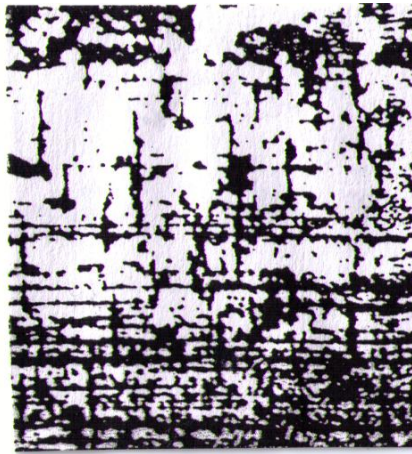
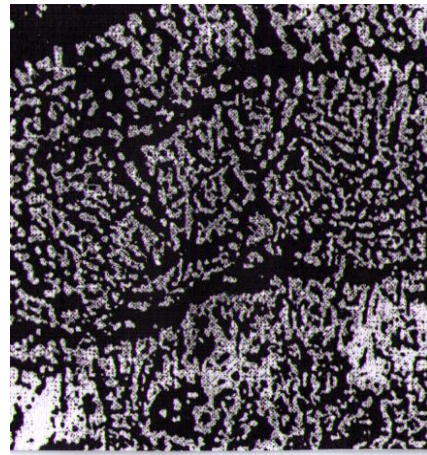
а) $\times 300$ б) $\times 300$

Рис.1. Микроструктура электроосажденных сплавов:
а) – (Fe–Mo); б) – (Fe–Cr) на стали 40

Перед электроосаждением образцы (детали) подвергали закалке. Термообработка электролитических сплавов при $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ устраняет слоистость, но на микротвердость покрытий она практически не влияет. Металлографическое исследование гальванических сплавов Fe–Mo и Fe–Cr после цианирования (рис.2 а, б) показало, что в поверхностном слое обоих покрытий карбонитридная зона толщиной до $0,5\text{ мм}$ с микротвердостью ($12000\text{...}13000$) МПа.

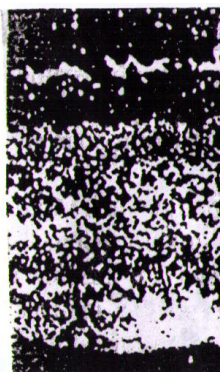
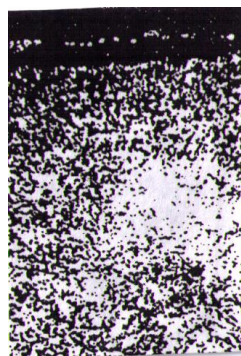
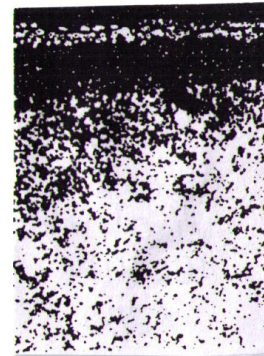
а) $\times 500$ б) $\times 200$ в) $\times 200$

Рис.2. Микроструктура цианированных электроосажденных сплавов:
2а) – (Fe–Mo) при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2б) – (Fe–Cr) при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 2в) – (Fe–Cr) при $650\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рентгеноструктурный анализ показал, что на поверхности цианированных при ($550\text{...}700$) $^{\circ}\text{C}$ доэвтектоидных сталей образовались карбонитридные слои, представленные в основном карбонитридом $\text{Fe}_{2-3}(\text{CN})$ – ϵ -фазой, которая имеет очень высокую твердость.

При температуре цианирования $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ на поверхности образуется больше карбонитридов $\text{Fe}_3(\text{CN})$ – изоморфных с цементитом, твердость которых ниже.

Низкотемпературное цианирование, создавая в тонких поверхностных слоях остаточные напряжения сжатия, значительно повышает предел выно-

ливости восстановленных деталей. Наши исследования показывают, что предел выносливости образцов с гальваническими покрытиями (0,15мм) после цианирования повышается в 2,5 раза (от ≈ 180 МПа до 450...470 МПа).

Низкотемпературное цианирование может быть с успехом использовано для упрочнения деталей, восстановленных гальваническими покрытиями, так как толщина этих покрытий невелика (0,15...0,3мм), и глубина насыщения при низкотемпературной обработке будет достаточной для их эффективного упрочнения. Кроме того, низкая температура обработки не изменяет структуры сердцевины восстанавливаемых деталей и не снижает их прочности. Цианирование электроосажденного легированного Fe позволяет получать карбонитридные слои достаточной толщины, имеющие H_u до 13000 МПа, а также высокую износостойкость в (5...6) раз превышающую износостойкость гальванических покрытий без цианирования.

Далее в главе приведены исследования по упрочнению железифосфорных электроосажденных сплавов с порошковым наполнителем из WC-5% с размером частиц (0,1...0,2) мкм. Установлено, что твердость электроосажденного Fe-P покрытия с наполнителем WC на (800...1200) МПа выше исходного. Аналогично влияние наполнителя на адгезионную прочность, определенную методом царапания. У гальванического покрытия она на (15...20)% выше при всех температурах отпуска по отношению к сплаву без WC.

Ниже представлены исследования по восстановлению изношенной части молотков кормодриболок из стали 65Г, а также на рабочие поверхности нового молотка из стали 30. На рабочие части молотка после дробеструйной обработки способом плазменного напыления наносится самофлюс ПГ-12-01 с 5%WC с последующим газовым оплавлением при (1050...1100)°C с выдержкой 5 мин. Для напыления использовали установку «УПУ-3Д». Проведены комплексные металлофизические исследования вышеуказанных композиций до и после сплавления. Металлографический анализ с косо́го шлифа плазменного покрытия ПГ-12-01 на стали 30 выявил четкую границу раздела подложка – покрытие и слоистое строение поверхностного слоя. В указанном покрытии отмечено образование дендритной структуры фазы Ni-Cr, легированной бором, и соответственно кремнием. В покрытии из сплава ПН-ХН80СЗРЗ фаза Ni-Cr, легированная бором распределена равномерно, содержание фазы легированной кремнием, несколько увеличено, дендритообразование уменьшено. Роль матрицы здесь выполняет мелкозернистая эвтектика (θ -фаза Ni_3B и твердый γ -раствор Ni-Cr). Микроструктура этого сплава при (θ -фаза Ni_3B и твердый γ -раствор Ni-Cr). Микроструктура этого сплава при оплавлении плазменной струей имеет мелкозернистую структуру с наличием игл карбидов. Формирование подобной структуры обусловлено кратковременностью цикла термообработки. Установлено, что при оплавлении покрытия из порошка ПГ-12-01 реализуется механизм самофлюсования с образованием жидкотекучих боросилицидных шлаков и переводом в них оксидов металлов.

В заключительной части настоящей главы предоставлены сведения по технологии изготовления многослойной металлической полосы сталь – алюми-

ний с использованием моталок с прижимными валами. При этом используется тепло полосы после горячей прокатки на стане «1500». Эти технологии, по сравнению с существующим производством многослойных металлических листов, ведут к снижению себестоимости в три раза за счет использования горячекатаной стали вместо коррозионностойкой стали, исключения затрат на электронагрев до 400°C холодных пакетов из стальных листов и листов из сплавов алюминия перед прокаткой на стане, и затрат на перевозку стальных листов с металлургического завода на завод-изготовитель многослойных изделий.

Нами предложен ряд технологических решений при изготовлении слоистых металлических материалов, в частности соотношение (1):

$$T = \left[1 - \exp\left(-1,25 \cdot \frac{q}{\sigma_{TK}}\right) - \eta_{оп} \right] \cdot K_{II} \cdot T_{TK} + \eta_{оп} \cdot T_K$$

может быть использовано для расчета прочности соединения составляющих биметалла в процессах плакирования [2].

Четвертая глава. Посвящена упрочнению инструментальных и конструкционных материалов физическими, электрофизическими способами нанесения покрытий и комбинированной обработкой, а ее первая часть ионно – вакуумным плазменным покрытиям, полученных методом КИБ. Описаны преимущества метода КИБ, даются критерии выбора покрытий для РИ. Проанализировано влияние толщины покрытия на износ передней и задней поверхности резца с твердосплавной пластиной с покрытием (TiN).

Представлены исследования структуры, фазового состава, напряжений и свойств в покрытиях TiN на твердых сплавах и быстрорежущих сталях. Установлено, что остаточные напряжения в ионно – плазменных покрытиях на твердых сплавах являются растягивающими и они значительно больше у многокомпонентных покрытий. С помощью атомно – силового микроскопа изучена структура поверхности TiN покрытия на твердом сплаве Т15К6. Получены трехмерные изображения (топография) и профилограммы поверхностей покрытия из нитрида титана. Установлено, что при увеличении толщины слоя покрытия его шероховатость уменьшается.

Далее в главе приводятся исследования электроискровых и электроакустических покрытий на конструкционных и быстрорежущих сталях. Установлено положительное влияние ЛЭНП на увеличение срока службы оправок притиров из стали ШХ15. Стойкость оправок увеличилась в (1,5...2) раза. Технологический режим ЛЭНП был оптимизирован по шероховатости (Ra). Получено уравнение регрессии, на основании которого был выбран режим, обеспечивающий минимальную шероховатость поверхности деталей и РИ.

Для увеличения стойкости дисковых фрез из стали Т15К6 на установке «ЭЛАН-3» на оптимизированном режиме. Проведены металлографические исследования структуры ЭЛАН покрытий. На поперечных шлифах обнаружен характерный «белый» слой. Аналогичный слой обнаружен после ЛЭНП электродом из сплава FeCr₁₀B₇C₆ на стали 30ГСА с Н_н (11500...12000) МПа. Общеизвестно применение порошковых самофлюсующихся сплавов на ни-

келевой и железной ПГ-10Н-01 и ПГ-ФБХ6-2 сплавов соответственно, а также их смесей в пропорции 50 на 50 в качестве газотермических плазменных покрытий. Вышеприведенные сплавы использовались в виде электродных материалов для ЛЭНП на сталь 30ХГСА. Проведены комплексные металлофизические исследования вышеуказанных композитов. Все покрытия, полученные методом ЛЭНП, имеют аморфно – кристаллическую структуру и повышенные по сравнению с подложкой из стали 30ХГСА износо– и коррозионную стойкость. Недостатком этих покрытий является значительная пористость (3...5)%, значительная шероховатость (4...6) мкм и значительные внутренние напряжения. Для устранения этих недостатков используется обработка покрытий лазерным излучением или выглаживанием минералокерамикой. Отмечено уменьшение пор до (0,1...0,5)% и их залечивание, уменьшение растягивающих напряжений, за счет наведения сжимающих, снижение шероховатости до значений (0,4...0,6) мкм и снижение усталостной прочности композита.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе вышеизложенных исследований решена задача повышения механических и эксплуатационных свойств, а также качества ряда конструкционных и инструментальных материалов за счет применения электроосажденных цианированных Fe–Mo и Fe–Cr осадков, электроискровых и электроакустических, плазменных, ионно – плазменных покрытий.

1. Разработана технологическая схема направленного изменения механических и эксплуатационных свойств конструктивных и инструментальных материалов, включающая целенаправленный выбор химического состава электродов, оптимизацию технологического процесса, активацию поверхности подложки и т.д., согласно которой покрытие принимая на себя основные эксплуатационные функции (износо–, жаро–, коррозионно – стойкие и другие характеристики), снижает требования к материалу основы. Это позволяет использовать менее легированные сплавы, что делает их более дешевыми.

2. Выявлены зависимости содержания Mo и Cr и закономерности формирования структуры легированных железных гальванических покрытий от параметров осаждения. Установлена взаимосвязь механических свойств электроосажденных железных покрытий легированных Mo и Cr с их структурой и фазовым составом, что позволяет прогнозировать их свойства путем целенаправленного изменения технологических параметров электроосаждения и цианирования. На выход Mo и Cr наиболее сильно влияет величина коэффициента асимметрии (β), в меньшей степени величина катодного тока (D_k).

Результаты исследования цианированных электролитических сплавов, применяемых при восстановлении изношенных деталей машин, послужили основой для разработки технологии упрочнения деталей, удобную для ремонтного производства, позволяющую значительно повысить их долговечность, а, следовательно, и надежность отремонтированных машин.

3. В плазменных покрытиях системы Ni–Cr–Fe–B–Si–C на сталях (30...50) и 65Г до сплавления главным структурным фактором является мелкозернистая эвтектика (θ -фаза Ni_3B и твердый γ -раствор Ni–Cr), а также ме-

тастабильная аморфная фаза, распределение и количество котоаой оказывает значительное влияние на износ – и коррозионную стойкость.

Напыленные плазменным способом самофлюсующиеся сплавы ПГ-12-01 и ПН-ХН80СЗРЗ повышают коррозионную стойкость сталей 65Г и 30 при $(590...950)^{\circ}\text{C}$ в расплаве $\text{NaNO}_3\text{--KNO}_3$ в 4–10 раз, в $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--K}_2\text{SO}_4$ в 3–12 раз, в $(\text{NaPO}_3)_n$ или $(\text{KPO}_3)_n$ в – 20–50 раз. В NaCl--KCl коррозионная стойкость углеродистых сталей и никельсодержащих самофлюсующихся сплавов одинакова.

В результате оплавления плазменных покрытий из сплавов системы $\text{Ni--Cr--Fe--B--Si--C}$ при $1050...1100^{\circ}\text{C}$ существенно увеличивается плотность износостойкого слоя. слоистость отсутствует, мелкодисперсная фаза каобидов и боридов (идентификация по результатам микротвердости) равномерно распределена по объему рабочего слоя. Граница раздела фаз размыта, наблюдается интенсивная диффузия углерода из покрытия в основу.

После оплавления плазменного покрытия аморфная фаза отсутствует, главным структурным фактором является размер эвтектических колоний.

4. Исследована ресурсосберегающая технология и технологические рашения при производстве металлических слоистых материалов (листов, полос и лент). Получены соотношения. Которые могут быть использованы для расчета прочности соединения составляющих биметалла в процессах плакирования.

5. Проведены комплексные металлофизические исследования ионно – вакуумных покрытий TiC , TiN ; $(\text{NiZr})\text{N}$ и др. Определен химический состав ионно – плазменного покрытия из нитрида титана на твердом сплаве Т15К6, он отвечает формуле $\text{TiN}_{0,97}$.

Для TiN характерна столбчатая форма кристаллов в направлении их роста перпендикулярно поверхности подложки, вышесказанное подтверждено наличием кристаллографической структуры у фазы TiN . Установлено, что с увеличением толщины покрытия TiN от (1,0 до 3,0) мкм значение R_a уменьшается почти в три раза. Исследование ионно – плазменных покрытий методом склерометрии показали, что наибольшей адгезионной прочностью обладают многокомпонентные $(\text{Ti}, \text{Zr})\text{CN}$, а наименьшей TiC и TiN . Покрытия сложного состава, содержащие Zr , Al и др. имеют более высокую износостойкость, по сравнению с РИ с покрытием TiN и TiC . Период стойкости РИ с покрытиями, полученными методом КИБ увеличивается в 1,5...3,5 раза.

6. Комплексными металлофизическими исследованиями в электрофизических покрытиях, полученных ЛЭН и ЭЛАН на конструкционных сталях (30ХГСА и др.), выявлен главный структурный фактор – соотношение кристаллической и аморфной фазы, которое является определяющим в повышении их износо – и коррозионной стойкости. Определено направление во взаимосвязи структуры с закономерностями ее формирования, с механическими и эксплуатационными свойствами электрофизических покрытий, что делает возможным их прогнозирование путем направленного изменения составов электродных материалов и режимов их нанесения.

7. Лазерная обработка и выравнивание минералокерамикой ЛЭН покрытий повышает эксплуатационные характеристики, а именно выравнивание повышает качество покрытий – заливает поры, уменьшает шероховатость Ra (0,4...0,6мкм), уменьшает уровень растягивающих за счет наведения сжимающих напряжений после выравнивания минералокерамикой; полигональная структура, формирующаяся при выравнивании, повышает усталостную прочность поверхностных слоев. Лазерная обработка приводит к образованию «белого слоя» с высокой микротвердостью и износостойкостью, обусловленную образованием микрокристаллической и метастабильной аморфной фазы. Структура слоя представляет собой тонкий конгломерат фаз. Оплавленное покрытие хорошо связано с подложкой химически: поры и отслоения отсутствуют, имеет высокие адгезионные характеристики, определенные в работе методом склерометрии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Российской Федерации:

1. **Серебровский, В.И.** Упрочнение электроосажденных сплавов на основе железа [Текст] / В.И. Серебровский, С.Б. Григорьев, В.Н. Гадалов и др. // Технология металлов. 2009. № 8. С. 37–39.

2. **Матвеев, А.С.** Технологические решения при изготовлении слоистых металлических материалов [Текст] / А.С. Матвеев, В.Н. Гадалов, С.Б. Григорьев и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 9. С. 42–45.

3. **Гадалов, В.Н.** Ресурсосберегающая технология производства слоистых материалов [Текст] / В.Н. Гадалов, А.С. Матвеев, С.Б. Григорьев и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 10. С. 35–36.

Статьи и материалы конференции

4. **Гадалов, В.Н.** Повышение эффективности работы деталей и инструмента многоцелевого назначения путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойких покрытий [Текст] / В.Н. Гадалов, Б.Н. Квашин, С.Б. Григорьев // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Материалы IV Междунар. научн.-техн. конф. (18 – 20 мая 2006г.). Курск: КГТУ. 2006. Ч. 1. С. 193–201.

5. **Гадалов, В.Н.** Исследование влияния комбинированной обработки на инструменты из быстрорежущих сталей. Материалы для электрофизического нанесения покрытий [Текст] / В.Н. Гадалов, Ю.В. Болдырев, С.Б. Григорьев // Материалы и упрочняющие технологии – 2007. Сб. матер. XIV Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием (16 – 18 октября 2007г.). Курск: КГТУ. 2007. С. 55–73.

6. **Гончаров, А.Н.** Скоростное цианирование стальных изделий в высокоактивных обмазках с нагревом в соляных ваннах [Текст] / А.Н. Гончаров,

С.Б. Григорьев // Материалы и упрочняющие технологии – 2008. Сб. матер. XV Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2008. Ч. 2. С. 66–67.

7. **Григорьев, С.Б.** Перспективы использования газотермического напыления стальных деталей в отечественной промышленности [Текст] / С.Б. Григорьев, В.Н. Гадалов, Ю.В. Болдырев // Молодежь и наука:

реальность и будущее. Материалы II Междунар. научн. – практич. конф. Невинномыск: НИЭУП. 2009. Т. VIII. С. 132–133.

8. **Гадалов, В.Н.** Изучение плазменных покрытий из порошковых многокомпонентных композиций на никелевой основе [Текст] / В.Н. Гадалов, С.Б. Григорьев, С.Г. Емельянов и др. // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 1. С. 12–27.

9. **Григорьев, С.Б.** Нанесение защитных покрытий методом плазменного напыления [Текст] / С.Б. Григорьев, А.Н. Гончаров, В.Н. Гадалов и др. // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 1. С. 59–66.

10. **Григорьев, С.Б.** Участок по упрочнению и восстановлению деталей методом плазменного напыления [Текст] / С.Б. Григорьев, В.Н. Гадалов, А.Н. Гончаров и др. // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 1. С. 66–69.

11. **Григорьев, С.Б.** Упрочнение инструмента из быстрорежущих сталей методом КИБ [Текст] / С.Б. Григорьев, В.Н. Гадалов, Н.А. Адоевская // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 1. С. 100–103.

12. **Гадалов, В.Н.** Нанесение покрытий методом плазменно – дугового напыления [Текст] / В.Н. Гадалов, Н.М. Стороженко, С.Б. Григорьев и др. // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 1. С. 173–179.

13. **Гадалов, В.Н.** Инструмент, приспособления и новые способы поверхностно – пластического деформирования [Текст] / В.Н. Гадалов, С.Г. Емельянов, С.Б. Григорьев и др. // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 2. С. 6–20.

14. **Григорьев, С.Б.** Приваривание электродов при ЭИЛ [Текст] / С.Б. Григорьев, И.В. Ширин, Е.В. Чернышова // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 2. С. 41–43.

15. **Григорьев, С.Б.** О состоянии отдельных современных упрочняющих технологий металлов и сплавов [Текст] / С.Б. Григорьев // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием (19 – 21 апреля 2009г.). Курск: КГТУ. 2009. Ч. 2. С. 66–73.

16. **Григорьев, С.Б.** Низкотемпературное цианирование электролитических железохромистых покрытий [Текст] / С.Б. Григорьев, В.Н. Гадалов, Д.В. Колмыков и др. // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 2. С. 77–85.

17. **Григорьев, С.Б.** К оценке качества поверхности электрофизического покрытия после выглаживания минералокерамикой [Текст] / С.Б. Григорьев, Р.Е. Абашкин, Е.Ф. Романенко и др. // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 2. С. 85–89.

18. **Григорьев, С.Б.** Упрочнение шарикоподшипниковых и инструментальных сталей электрофизической обработкой [Текст] / С.Б. Григорьев, В.Н. Гадалов, А.В. Николаенко и др. // Материалы и упрочняющие технологии – 2009. Сб. матер. XVI Рос. научн. – техн. конф. с междунар. участием. Курск: КГТУ. 2009. Ч. 2. С. 89–98.

19. **Гадалов, В.Н.** Энергосберегающие железо – фосфорные композитные покрытия с наполнителем из карбида вольфрама [Текст] / В.Н. Гадалов, А.Н. Гончаров, С.Б. Григорьев и др. // Актуальные проблемы химической науки, практики и образования. Сб. статей междунар. научн. – практич. конф. (19 – 21 мая 2009г.). Курск: КГТУ. 2009. Ч. 2. С. 25–27.

20. **Гадалов, В.Н.** Исследование в доэвтектидных сталях фазового состава методом мессбауровской спектроскопии [Текст] / В.Н. Гадалов, С.Г. Емельянов, С.Б. Григорьев и др. // Современные материалы и технологии – 2009. Материалы междунар. Российско – Китайского симпозиума (5 – 9 октября 2009г.). Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского госуд. ун.-та. 2009. С. 155-159.

21. **Гадалов, В.Н.** Изучение аморфнокристаллических покрытий из эвтектических сплавов железа и никеля на конструкционных сталях [Текст] / В.Н. Гадалов, В.В. Ванеев, С.Б. Григорьев и др. // Проектирование механизмов и машин. Труды III Всерос. научн. – практич. конф. (17 апреля 2009г.). Воронеж: ВГТУ. С. 115–123.

Подписано в печать 31.10.09. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ .

Курский государственный технический университет
Издательско-полиграфический центр
Курского государственного технического университета.
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94