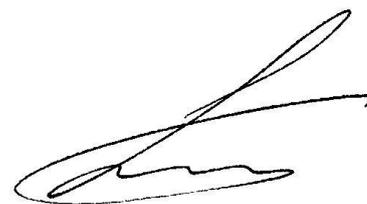


На правах рукописи



Ляхов Андрей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
И ИНСТРУМЕНТА ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ДИФФУЗИОННЫМИ И
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ
ВЫГЛАЖИВАНИЕМ**

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент
Сальников Владимир Григорьевич

Официальные оппоненты: Афанасьев Александр Александрович,
доктор технических наук, профессор, Белгородский
государственный технологический университет,
заведующий кафедрой, профессор кафедры
стандартизации и управления качеством

Ткаченко Юрий Сергеевич,
доктор технических наук, профессор, Воронежский
государственный технический университет,
профессор кафедры автоматизированного
оборудования машиностроительного производства

Ведущая организация: ОАО «Воронежское акционерное
самолетостроительное общество»

Защита состоится «15» ноября 2012 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.01 при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета

Автореферат разослан « » октября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.105.01



Б.В. Лушников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие современного машиностроения связано с увеличением ресурса работы и качества поверхности деталей и режущего инструмента для повышения эффективности процессов обработки. В настоящее время существуют современные методы повышения работоспособности деталей и инструментов за счет изменения физико-химических и эксплуатационных свойств рабочих кромок металлических поверхностей в заданном направлении. К ним относятся: технологические, термические, химические, химико-термические, в частности ХТО, электрофизические (электроискровое легирование (ЭИЛ); электронно-лучевое испарение; ультразвуковая обработка) и др. Значительный эффект дает поверхностное упрочнение деталей и электролитических покрытий ХТО, а именно нитроцементацией и цианированием, технологические возможности которых еще не исчерпаны. Достоинства ЭИЛ – возможность нанесения на обрабатываемую поверхность компактным электродом любых токопроводящих материалов и не токопроводящих порошковых материалов; высокая прочность сцепления наносимого слоя с материалом основы; низкая энергоемкость процесса (0,5...1) кВт; простота осуществления технологических операций; электроискровое легирование инструментов из быстрорежущих сталей обеспечивает по сравнению с другими методами максимальную износостойкость (до шести раз); экономия вольфрамсодержащих твердых сплавов в связи с дефицитом, дороговизной и непрерывным расширением областей применения редкого металла вольфрама. С ресурсосбережением вольфрама тесно связаны мероприятия по сбору отходов твердых сплавов и их переработка для вторичного использования при изготовлении электродов. Одним из наиболее перспективных методов получения порошка, практически из любого токопроводящего материала, в том числе и твердого сплава, отличающийся относительно невысокими энергетическими затратами, безвредностью и экологической чистотой процесса, отсутствием механического износа оборудования, получением порошка непосредственно из лома твердого сплава различной формы за одну операцию, получением частиц преимущественно сферической формы размером от нескольких нанометров до сотен микрон является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). Известно, что сдерживающими факторами широкого применения электрофизических покрытий и комбинированных обработок являются: создание новых композиционных материалов, особенно получение высокоэффективных электродных материалов с низкой стоимостью, содержащих в качестве добавок к матрице самофлюсующихся материалов, а также веществ, образующих защитную атмосферу, стабилизирующих искровой разряд в процессе ЭИЛ и обеспечивающих получение качественного легированного слоя (ЛС) с требуемым уровнем физико-химических и эксплуатационных свойств; не достаточно изучены условия возникновения, основные факторы и явления, сопровождающие протекание электроискрового и электроакустического процесса; нет оценки степени их структуры измененных слоев, его зависимость от исходной структуры электродных материалов; отсутствуют простые и эффективные методы неразрушающего контроля качества измененных слоев. В связи с этим разработка и исследование технологии электрофизической, электроннолучевой и комбинированной обработок сегодня являются наиболее актуальными.

Работа в этом направлении позволит внести несомненный вклад в решение важной народнохозяйственной задачи – создание прогрессивных, экологически чистых, энергосберегающих и безотходных технологий для повышения срока службы и качества изделий современной техники.

Данная работа выполнялась в рамках мероприятия «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, номер контракта П1288; координационным планом НИР «Реализации региональных научно-технических программ центрально-черноземного района» в 2005-2015 годов и «Повышение эксплуатационных характеристик и экологической безопасности изделий из инструментальных и конструкционных сталей электроискровой и химико-термической обработками» (гос. регистр. № П653).

Целью диссертационной работы является: повышение ресурса работы и качества поверхности деталей и инструмента из сталей и сплавов путем формирования износостойких поверхностных структур электрофизикохимическими методами с использованием выглаживания и установления взаимосвязи оптимальных составов электродных материалов и насыщающих сред, структуры, свойств и технологий.

В соответствии с целью работы решались следующие **задачи**:

1. Обобщить, систематизировать и проанализировать литературные данные по применению ХТО и электрофизических методов обработки, обеспечивающих повышение ресурса работы и качества деталей и инструмента в различных отраслях промышленности. Выявить эффективные пути и технологии повышающие работоспособность конструкционных и инструментальных материалов, служащих резервом ресурса работы деталей и инструментов, и в целом изделий из них.

2. Разработать новые и усовершенствовать уже имеющиеся электродные материалы и насыщающиеся среды (карбюраторы) для электрофизикохимических покрытий, оптимизировать технологические режимы нанесения покрытий.

3. Провести комплексные металлофизические исследования конструкционных и инструментальных материалов, подвергнутых ХТО и электрофизической обработке. Выявить основные структурные факторы, а также их взаимосвязь с химическим составом и свойствами поверхностных слоев покрытий.

4. Для повышения свойств и качества поверхностных слоев электрофизических покрытий применить выглаживание минералокерамикой.

5. Использовать электронно-лучевое испарение металлов и сплавов для повышения ресурса работы и качества ответственных деталей.

6. Провести промышленное апробирование отдельных технологий электрофизической обработки на реальных инструментах применяющихся при ремонте горнообогатительного оборудования.

Объектами исследования являлись композиты с подложкой из конструкционных и инструментальных материалов с нанесенными электрофизикохимическими покрытиями, а также покрытиями до и после поверхностного пластического деформирования.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертации были использованы следующие методы исследования: растровая, атомносиловая и

просвечивающая электронные микроскопии для изучения микроструктуры и фрактографических исследований, микрорентгеноспектральный анализ, рентгеноструктурный анализ для оценки количественного и качественного фазового состава, физико-механические испытания, с целью выявления дефектов покрытий применялись неразрушающие методы контроля. Исследования проводились согласно существующим ГОСТам.

Научная новизна результатов работы и основные положения выносимые на защиту заключаются в следующем:

- научно обоснованы инновационные технологические процессы поверхностного упрочнения деталей и инструментов, основанные на термохимических, электрофизических, акустических и радиационных воздействиях, обеспечивающих изменение структурного состояния и повышения уровня заданных физикомеханических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов, приводящих к увеличению ресурса работы и качества деталей машин, механизмов и конструкций;

- на основе комплексных металлофизических исследований предложены и обоснованы составы электродных материалов и карбюризаторов, а также технологии их нанесения, влияющие на формирование, строение электрохимикофизических покрытий и обеспечивающие повышение ресурса работы и качества поверхностей деталей и инструмента различного назначения;

- выявлены зависимости влияния химического состава, структуры и фазового состава нитроцементованных слоев в конструкционных сталях и электролитических покрытиях после цианирования на физико-механические и эксплуатационные свойства, целенаправленные пути управления структурными характеристиками материалов ХТО, увеличивающий срок службы изделий до двух раз;

- установлены закономерности формирования структуры и роль структурных факторов, определяющих повышение физикомеханических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов с диффузионными и электрофизическими покрытиями;

- в разработке комбинированного метода обработки конструкционных материалов, заключающейся в локальном электроискровом нанесении покрытий (ЛЭНП) или электроакустического нанесения покрытий (ЭЛАНП) с последующей его обработкой выглаживанием минералокерамикой ВОК (60...70) на специальном оборудовании, выглаживание уменьшает количество пор за счет их залечивания, уменьшает остаточные напряжения растяжения за счет наведения остаточных напряжений сжатия, повышает усталостную прочность за счет закрепления дислокационной структуры в приповерхностных слоях покрытий.

- в усовершенствовании метода электронно-лучевого испарения металлов и сплавов на ряде конструкционных материалов; получены конденсаты никеля, Ni-Cr-Al-Y, Ni-Cr-Co-Al-Y на жаропрочных сплавах типа ЖС; исследования подтвердили эффективность данного метода; приведены исследования двухстрочечного никелевого конденсата на стальной ленте с помощью отражателя из Мо с подслоем из окиси алюминия при различных углах отражения (α); при α ($\approx 33^\circ$) получен никелевый конденсат со стабильными значениями H_c по ширине ленты $\approx (1800)$ МПа и удовлетворительной поверхностью $\approx (1,0)$ пор/см².

Практическая значимость исследования состоит в следующем: на основе результатов экспериментальных исследований разработаны рекомендации по выбору режимов обработки поверхностей и электродных материалов, обеспечивающих наибольший эффект повышения функциональных свойств конструкционных и инструментальных сталей; намечены пути дальнейшего самосовершенствования электрофизической обработки путем комбинированной обработки поверхностных слоев покрытий в частности выглаживанием минералокерамикой. Основные выводы диссертации подтверждаются полупромышленными испытаниями. Результаты работы внедрены на предприятие ООО «Завод по ремонту горного оборудования» (г. Железногорск) и в учебный процесс для подготовки студентов кафедры «Материаловедение и сварочное производство» Юго-Западного государственного университета. Акты внедрения представлены в приложениях диссертации.

Достоверность результатов исследований, основных положений и выводов определяется корректностью постановки задач, согласованностью теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными автором и другими исследователями, работающими в данной области, и с общепринятыми представлениями, признанием полученных результатов на различных международных и отечественных семинарах и конференциях, подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, проведением экспериментов с использованием известных в металловедении современных методов и методик, сертифицированной, проверенной и аттестованной аппаратуры, применением современных программных средств автоматизации и обработки полученных результатов, а также сравнением опытных данных с расчетами и апробацией в условиях производства.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование соответствует пунктам 2, 3, 4, 6, 7 и 8 паспорта специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Объектами изучения являлись металлические материалы, описание которых даны в главе 2 диссертационного исследования (см. ниже).

Апробация работы: основные положения диссертации были доложены и обсуждены на: III межд. НТК «Прогрессивные технологии в современном машиностроении». Пенза. Приволжский Дом Знаний – 2007 г.; XI межд. научн.-техн. конф. «Современные технологии в машиностроении». Пенза. Приволжский Дом Знаний (декабрь 2007 г.); XIV Росс. НТК с межд. участием «Материалы и упрочняющие технологии». Курск: КГТУ – 2008; I межд. НПК «Молодежь и наука: реальность и будущее». Невинномыск. ин-т. эконом. управл. и права. – 2008 г.; XV Росс. НТК с межд. участием «Материалы и управляющие технологии». Курск: КГТУ–2008; 10-й юбилейной межд. научн.-практич. конф. «Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». Санкт-Петербург; гос. политехн. ун-т. 2008; XVI Рос. НТК с межд. участием «Материалы и упрочняющие технологии». Курск: КГТУ–2009; III Всеросс. НПК «Проектирование механизмов машин». Воронеж. ВГТУ–2009; I межд. НТК «Современные автомобильные материалы и технологии САМЕТ – 2009». Курск: КГТУ – 2009 г.; НМК «Образование через науку». Курск: КГТУ – 2010 г.; XVII Росс. НТК с межд. участием «Материалы и упрочняющие технологии». Курск: КГТУ – 2010 г. XVIII Росс.научн.-техн.конф. с межд. участием «Материалы и упрочняющие технологии». Курск:

ЮЗГУ – 2011; на заседании кафедры «Материаловедения и сварочного производства» Юго-Западного гос. ун-та (апрель 2012).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 28 научных работ, из них 8 в рецензируемых научных журналах, а также одна монография.

Структура и объем работы. Диссертации состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, библиографического списка из 261 наименования и приложений. Общий объем работы составляет 218 страниц машинописного текста, содержит 65 иллюстрацией и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сделана оценка состояния решаемых в работе задач, обоснована актуальность темы диссертации, показана связь с её научными программами.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме диссертации. Представлены сведения по покрытиям, получаемых ХТО, изложены ее основы. Рассмотрены покрытия, получаемые при цементации и комплексном насыщении на основе углерода. Это карбохромирование, нитроцементация, модифицированные способы азотирования и др. Сделан анализ ХТО сталей нитроцементацией и цианированием.

Во второй главе приводятся сведения о сплавах и композитах, являющихся объектами изучения; применяющихся технологиях и методах исследования.

Объектами изучения являлись следующие материалы: цементованная низкоуглеродистая сталь (0,17...0,2)% С и железохромистые электролитические покрытия с содержанием хрома: (0,44; 1,71 и 2,48)% соответственно; доэвтектидная сталь (СтЗ) после нитроцементации в пастообразном карбюризаторе с нагревом в нейтральных соляных ваннах; конструкционные стали 20 и 20Х13 цианированные в нетоксичных соляных ваннах; конструкционная сталь 30 ХГСА с электроакустическим покрытием из твердого сплава Т15К6, полученного ЭЭД и др. материалы.

– быстрорежущая сталь Р12МЗК8Ф2-МП с электроискровыми покрытиями из твердых сплавов Т15К6 и ВК6М;

– быстрорежущая сталь Р12МЗК8-МП с повышенной металлотойкостью состава по ТУ 14-1-3647-83 (С – 1,0; W – 12; Мо – 3,1; Cr – 4; V – 2,1 и Со – 8)% по массе;

– стандартные твердые сплавы Т15К6 (Со – 6; TiC – 15; WC – 79)% и ВК6М (Со – 6; WC – 94)% по массе;

– порошковый электродный материал полученный электроэрозионным диспергированием из Т15К6 и ВК8 соответственно;

– электроакустическое напыленное покрытие из смеси самофлюсующихся эвтектических сплавов ПГ-10Н-01 и ПГ-ФБХ6-2 в соотношении 60:40, химический состав, которых представлен в таблице 1 на стали (30...35) ХГСА;

Таблица 1.

Химический состав сплавов

№ п./п.	Марка сплава	Содержание компонентов, масс %						
		Ni	Fe	Cr	B	Si	C	Mn
1.	ПГ-10Н-01	ост.	3...7	14...20	2,8...4,2	4...4,5	0,6...1	–
2.	ПГ-ФБХ6-2	–	ост.	32...37	1,3...2	1...2,5	3,5...5,5	1,5...4

- спеченный титановый сплав ВТ-23 с электроакустическим покрытием из ВК8, полученным ЭЭД;
- спеченный титановый сплав ВТ-23 с электроакустическим покрытием из самофлюсующегося сплава ПН-Н80С2Р2(ПГ-СР2) с 7,5% вес добавкой сплава ВК8, полученного методом ЭЭД до и после выглаживания минералокерамикой ВОК 70;
- защитное Co-Cr-Ni-Al-Y покрытие, полученное электронно-лучевым испарением на жаропрочном сплаве ЖС6К и его аналоге с добавками 0,1% Hf и 0,5% Dy по массе;
- лента из Ст20 с конденсатом из Ni.

Электронно-лучевые покрытия систем Ni-Cr, Ni-Cr-Al-Y, Co-Cr-Al-Y и Ni-Cr-Co-Al-Y. Конденсаты металлов и композиционных материалов получали на электроннолучевой установке конструкции ИЭС им. Е.О. Патона мощностью 150 кВт. Двухфазные конденсаты получали путем одновременного раздельного испарения соответствующих компонентов из двух водоохлаждаемых медных тиглей и последующей конденсацией смешанного парового потока на прогретую до заданной температуры подложку. Расстояние между тиглями – 130 мм, расстояние тигель – подложка – 300 мм, размеры получаемого конденсата 250x120x(0,8...1,2) мм. Для отделения конденсата от подложки на нее предварительно наносили барьерный слой например из ZrO_2 толщиной (10...15) мкм. Испарение осуществляли в вакууме $1,33 \times (10^{-2} \dots 1,33) \times 10^{-3}$ Па. Скорость конденсации материала металлической матрицы (1...35) мкм/мин, скорость конденсации второй фазы (0,5...1) мкм/мин.

Кратко рассмотрены основы электроискрового легирования и его разновидностей локального электроискрового нанесения покрытий (ЛЭНП) и электроакустического нанесения покрытий (ЭЛАНП), осуществляемых на установках «ЭЛФА-541» и «ЭЛАН-3». Рассмотрен принцип работы установки для электроакустического напыления (ЭН) и физическая модель ЭН. Представлены сведения по использованию метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при изготовлении электродных материалов для ЭИЛ. В конце главы описаны следующие методы исследования используемые в работе – это: металлография – приборы «МИМ-8М» и «ЕРИQVANT»; рентгеноструктурный и микрорентгеноспекторный анализы – приборы «Дрон-3М» и «Самека»; оптическая, электронная и растровая микроскопия – приборы «ЭВМ-100Б» и «РЭМ-200». Измерение геометрических параметров поверхности оценивалось с помощью профилометров «Калибр-252» и «Абрис-ПМ7». Определение химического состава сплавов и покрытий осуществлялось на оптико-эмиссионном спектрометре «Foundry-Mate». Химический состав порошков изучался на рентгеновском аппарате для спектрального анализа «СПЕКТРОСКАНМАКС-GV». Испытания на износостойкость проведены на машине «СМЦ-2» и др.

Выглаживание осуществлялось специальными устройствами с выглаживателями с наконечниками из минералокерамики «ВОК (60...70)».

Третья глава посвящена ХТО сталей и электролитических покрытий. Разработан метод цементации, заключающейся в нанесении нитроцементующей обмазки, и после её высушиванию, нагрева и выдержке стальных деталей в нетоксичных соляных ваннах. Детали (образцы) покрытые карбюризатором (% по массе): сажа газовая (60...80); углекислый натрий (10...15); железосинеродный калий (5...20) подвергались нитроцементации с

нагревом в соляной ванне состава 50 на 50 NaCl и Na₂CO₃ при 900°С (2ч.). Нитроцементация изучалась в интервале (560...900)°С. На рис. 1 представлены микроструктуры нитроцементованных слоев Ст3 (900°С; выдержка 1,5ч.), полученных нагревом в цианистой ванне (а) и с использованием выше предложенной обмазки в нейтральной соляной ванне (б).

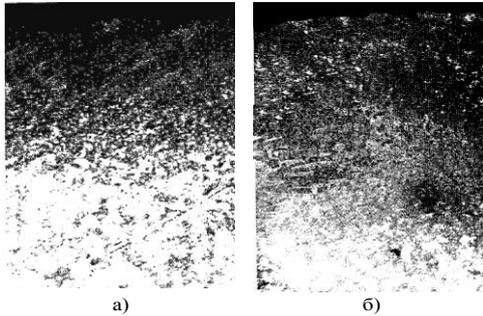


Рис. 1. (x100)

На фотографиях видно, что микроструктуры идентичны, а при обработке в комбинированной среде глубина слоя \approx на 30% выше. Установлено, что применение разработанной обмазки с нагревом в нейтральных соляных ваннах по эффективности не уступает нитроцементации в цианистых ваннах, а по экологии более безопасная.

Исследовано влияние хрома на морфологию карбидных частиц в цементованных сталях и в железохромистых электролитических покрытиях. Установлено, что хром в этих материалах, сильно влияет на форму образующихся при цементации карбидных включений. Растворяясь в цементите, хром увеличивает коэффициент поверхностного натяжения растущего карбидного зерна, искривляя межфазную границу и способствуя росту карбида в виде равноосного изолированного включения. Критическая концентрация хрома, при которой становится возможным образование сферических карбидных частиц в цементованных слоях, составляет 2,1%. При содержании хрома меньше данного значения карбидные включения образуются в виде тонких прослоек по границам зерен и поверхностной корки.

Далее в этой главе показано, что обеспечить самозатачиваемость лезвия ножей ботвоуборочной машины можно нитроцементацией дозвтектоидной стали в активных азотно-углеродистых пастах с образованием в диффузионном слое большого количества зернистых карбонитридов, отличающихся высокой износостойкостью. В конце главы представлены результаты низкотемпературного цианирования конструкционных сталей в ваннах различного состава, работающих в температурном интервале «мягкого азотирования», в состав которых не входят токсичные цианиды. Были исследованы композиции на основе карбамида и кальцинированной соды, которые в исходном состоянии не токсичны и весьма дешевы. Кроме того был опробован комбинированный способ низкотемпературного цианирования, при котором ванна состоящая из смеси хлористого кальция и хлористого натрия эвтектического состава ($t_{пл} \approx 490^\circ\text{C}$) служит для нагрева детали, а насыщающая среда представляет собой твердое покрытие (обмазку) на поверхности детали. Состав покрытия - желтая кровяная соль 40% масс. и газовая сажа 60%. Смесь разводили глинистым раствором до консистенции густой пасты, наносили на упрочняемую поверхность и высушивали. После этого образец погружали в разогретую соляную ванну и выдерживали необходимое время.

Установлено, что хром заметно уменьшает глубину диффузионного слоя при цианировании, даже при самом небольшом содержании. Так глубина слоя стали 18ХГТ, при прочих равных условиях, на 40% ниже, чем на стали 20, на стали 20Х13 в (5...6) раз, а на высоколегированной стали 09Х15Н8Ю в (40...50) раз ниже, чем на стали 20 не содержащей легирующих элементов. Несмотря на то, что скорости диффузии в α - и γ -фазах, а также в соединениях ϵ и γ' различных сталей различаются, азотный потенциал при обработке в

соляных ваннах оказывается самым высоким, и время обработки - минимальным, по сравнению с другими методами цианирования.

Особый интерес представляет комбинированный способ цианирования. По эффективности он не уступает вышеназванным способам, но имеет то преимущество, что позволяет проводить обработку с минимальным расходом азотсодержащей соли (железосинеродистого калия) – обмазка слоем (1,0...1,5) мм наносится только на упрочняемые места. Влияние температуры и длительности цианирования в нейтральной ванне с азотисто-углеродной обмазкой представлено на рис. 2.

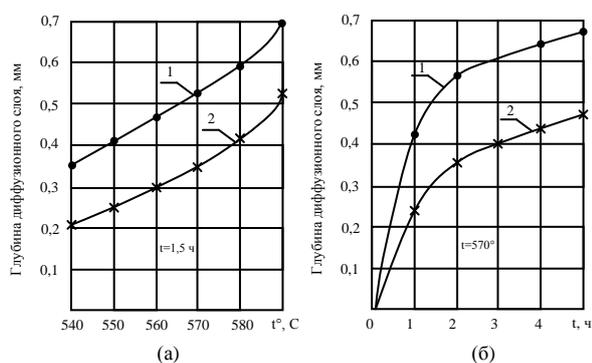


Рис 2. Влияние температуры (а) и длительности (б) цианирования в ванне с дополнительной обмазкой: 1 – сталь 20, 2 – сталь 18ХГТ

Установлено, что комбинированный метод цианирования открывает широкие технологические возможности управления характеристиками диффузионных слоев различных сталей путем изменения температуры. Недостатком этого метода является быстрое истощение цианирующей обмазки, поэтому проводить обработку длительностью более двух часов в ней нецелесообразно.

Таким образом, можно заключить, что низкотемпературное цианирование в

соляных ваннах, приготовленных из нетоксичных компонентов, эффективно для многих марок сталей, что позволяет решить экологические проблемы и рекомендовать их использование в машиностроении, ремонтном и в животноводческом производстве и других отраслях.

В начале четвертой главы обоснована прямая связь между ресурсом работы, надежностью, работоспособностью и качеством. Показано, что повышать показатели работоспособности и качества деталей и инструмента можно нанесением многофункциональных электрофизических покрытий с последующим выглаживанием. Далее приводятся исследования покрытий на стали P12M3K8Ф2-ПМ, полученных методом локального электроискрового нанесения (ЛЭИП) электродами из твердых сплавов ВК6М и Т15К6. ЛЭИП проводили используя аргон, струя которого вводилась в зону электроискрового разряда или флюс, наносимых на поверхность стали. Проведены комплексные металлофизические исследования, описана структура композита, с характерным «белым слоем» (БС) с микротвердостью (14...17) ГПа. Высокая скорость кристаллизации приводит к образованию неравновесных структур с микрокристаллической и аморфной фазами.

В ЛЭИП зафиксированы растягивающие напряжения, величина которых резко уменьшается от поверхности образца с глубины (16...23) мкм вглубь подложки. Нанесение покрытий осуществлялось после «приработка», увеличивающей массоперенос анода и на оптимизированном режиме установки «ЭЛФА-541», обеспечивающем достаточную эрозию и $\min Rz(5...12)$ мкм. Далее в главе приводятся результаты исследования выглаживания, которое осуществлялось специальным приспособлением. Инструментом служили выглаживатели из минералокерамики ВОК 70. Выглаживание осуществлялось на

оптимальном режиме, обеспечивающим $Ra(0,3...0,6)$ мкм и уменьшение растягивающих напряжений за счет наведения сжимающих. Изучены зависимости Ra и H_c от силы выглаживания с ЛЭНП из Т15К6. Проведен анализ изнашивания фрез. Фрезы без упрочнения изнашиваются с образованием нароста вследствие сильной адгезии материала инструмента и детали, после ЛЭНП нарост материала не наблюдался. Для токарных резцов нанесение ЛЭНП на переднюю поверхность создает преимущественный износ на задних поверхностях, по которым осуществляют переточку. У отрезного резца работают главная и вспомогательные кромки, которые определяют качество поверхностей разделения заготовки. Для них эффективно проводить ЛЭНП на главную и вспомогательные поверхности, а переточку делать по передней.

Инструменты, подлежащие переточкам по заданным поверхностям, подвергают упрочнению после каждой переточки. Показано, что стойкость различных инструментов после ЛЭНП увеличивается в несколько раз, в частности фрез до 2,6 раза, что подтверждено адгезионными испытаниями. Износостойкость фрез зависит от материала электрода, так фрезы с ЛЭНП из ВК6М более стойки чем из Т15К6. Далее в главе предоставлены исследования композита конструкционная сталь (30...35) ХГСА с электроакустическим покрытием из порошкового сплава Т15К6, полученного методом электроэрозионного диспергирования (ЭД) из отходов инструмента аналогичного сплава, а также смеси сомофлюсующихся сплавов ПГ-10Н-01 и ПГ-ФБХ6-2 в соотношении (60 на 40)% вес соответственно. Установлен химический состав порошков сплава Т15К6, полученного ЭЭД, изучена их морфология и распределение элементов на поверхности частиц порошка. Определены периоды решеток фаз и гранулометрический состав порошка Т15К6. Их размер составляет (0,4...1,1) мкм, а микротвердость 32,5, 30,0 и 26,4 ГПа соответственно при получении в воде, керосине и промышленным способом. Описана технология получения заготовок из порошка, полученного ЭЭД из отходов сплава Т15К6 методом порошковой металлургии, после чего исследовался рентгеновский спектр сплава Т5К6 методом РСМА.

Ниже в главе представлены структурно-фазовые изменения стали (30...35) ХГСА, являющегося подложкой в исследуемом композите, а выше указанная сталь применяется для изготовления молотка зернодробилок. Изучены структуры молотков после различной наработки их фазовый состав и микротвердость. В материале молотков, имеющих степень износа (10...30)% наряду с α -Fe обнаружен Fe_2O_3 , с увеличением степени износа количество окисла Fe_2O_3 возрастает. Установлено, что повышением износа, величина внутренних напряжений в поверхностных слоях молотков повышается и он почти в два раза больше при степени износа (40...50)%.

Для повышения срока службы молотков рекомендуется наносить на их поверхность электроакустическое покрытие (ЭП) из смеси порошков самофлюсующихся сплавов (табл. 1). Недостатком ЭП является невысокая $Ra(4...5)$ мкм, для устранения которой рекомендуется выглаживание.

Далее приводятся комплексные металлофизические исследования ЭП, полученных на установке «ЭЛАН-3». Для всех ЛЭНП обнаружен характерный «белый» слой. Покрытия имеют слоистое строение. В ЭЛАНП из смеси самофлюсующихся сплавов, кроме твердых растворов на основе железа и никеля, обнаружена метастабильная аморфная фаза.

Установлено повышение износо- и коррозионной стойкости композита по сравнению с упрочненной сталью 35 ХГСА в (2...2,5) раза.

В заключительной части главы представлены исследования композита – подложка порошковый титановый сплав ВТ-23, с электроакустическими покрытиями до и после выглаживания. В качестве электрода использовался сплав ПГ-СР2 с 7,5% добавкой твердого сплава ВК8, полученного методом ЭЭД. После выглаживания ЛЭНП имело Ra(0,2...0,4) мкм, до Ra(4...6) мкм. Приведены результаты рентгенографического изучения формирования субструктурных характеристик в ЭЛАП. Сделаны выводы, которые представлены в пункте 9 «Основные результаты и выводы». В частности, при выглаживании структурные микроискажения интенсивно развиваются, достигая максимума не на поверхности образцов, а на глубине подповерхностного слоя (30...40) мкм.

Пятая глава посвящена изучению покрытий, полученных электронно-лучевым испарением металлов. Представлены сведения по повышению ресурса работы никелевого сплава ЖС6К и его аналога с добавками Hf и Dy электронно-лучевым покрытием Ni-Cr-Al-Y. Исследован фазовый состав окалины, обнаружены окислы NiO, Cr₂O₃, Al₂O₃ и шпинели сложного состава типа M₃O₄ и Me₂O₄, для которых определены параметры их решеток. В процессе окисления содержание Cr, Al и Ti на границе подокисного слоя с окалиной убывает, причем в подокисном слое при малых добавках обнаружен преимущественно оксид диспрозия и интерметаллид на основе Ni. Следует отметить, что вакуумное осаждение рассматриваемых сплавов обеспечивает получение однородной мелкозернистой структуры в сочетании с постоянным составом в различных участках покрытия. Поэтому жаростойкость конденсаторов, как правило, выше жаростойкости исходных литых материалов.

Металлографическим анализом (рис. 3) обнаружено, что толщина покрытия после наработки от (16...50) тыс. ч. может изменяться от (40...75) мкм. Ниже на рис. 3 показаны фотографии микроструктур покрытия после эксплуатации: 16; 30 и 50 тыс. час. соответственно.

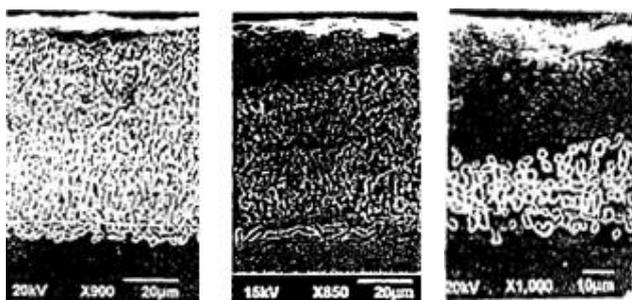


Рис. 3. Микроструктура покрытия Ni-Cr-Co-Al-Y после эксплуатации тыс. час а) 16; б) 30 и в) 50.

Анализ показывает, что в структуре поверхностного слоя покрытия существует слой с повреждениями коррозионного типа. Толщина этого слоя зависит от времени эксплуатации (28...33) тыс. час. – глубина коррозионного фронта мала и составляет не более (8...11) мкм. При эксплуатации материала с покрытием более (35...40) тыс. час коррозия интенсивно растет, а при 50 и более тыс. час. видны коррозионные дефекты на глубине до (35...45) мкм.

Таким образом, дальнейший прогресс в создании защитных покрытий с помощью электроннолучевого испарения должен базироваться на разработке композиционных материалов с особыми, возможно, уникальными свойствами и одновременном совершенствовании электроннолучевого оборудования.

В рамках вышеизложенных исследований параллельно изучены процессы реиспарения паровых потоков металлов в условиях больших перенасыщений. Установлена

экспериментальная зависимость критической температуры срыва конденсации ($T_{кр}$) от плотности парового потока температуры плавления испаряемого металла. Показано, что изменение механических свойств конденсатов чистых металлов в зависимости от температуры подложки рационально рассматривать в сопоставлении со структурой.

Приводятся сведения по влиянию размера частиц γ' -фазы на сопротивление ползучести жаропрочного сплава на никелевой основе ХН67МВТЮ, используемого для матрицы композиционных материалов. При этом для оценки характеристик жаропрочности, использовалась методика многофакторного планирования эксперимента.

Описаны исследования, направленные на получение двухстрочечного никелевого покрытия на стальной ленте с помощью отражательного устройства. Известно, что наименьшей эрозией поверхности при отражении паров металла обладают отражатели, изготовленные из окиси алюминия. Но ввиду того, что механическая обработка керамических материалов связана с определенными трудностями, в качестве материала для отражателя использовался молибден. Для уменьшения эрозии и повышения отражающей способности на отражающую поверхность предварительно наносился слой окиси алюминия. Выводы по данному разделу представлены в пункте 9.1 «Основные результаты и выводы».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании выполненных исследований решены задачи, поставленные в работе по повышению ресурса работы и качества поверхности деталей и инструмента из сталей и сплавов диффузионными и электрохимикофизическими покрытиями с последующим выглаживанием и без него.

2. Разработаны технологические схемы повышения ресурса работы и качества конструкционных и инструментальных материалов, научно обоснованные выбором составов: пастообразного карбюризатора для нитроцементации; электродов для электроискрового и электроакустического нанесения покрытий; металлов и сплавов для электронно-лучевого испарения; определением оптимальных режимов технологии их нанесения и термообработки, в частности, выглаживания для электроискровых и электроакустических покрытий.

3. Предложена технология нитроцементации стальных изделий в пастообразном карбюризаторе с нагревом в нейтральных соляных ваннах, повышающая их срок службы. Разработанная технология в (1,4...1,6) раза повышает твердость нитроцементованной стали, обусловленная образованием карбонитридной корки на основе ϵ -карбонитрида. Увеличение толщины карбонитридной корки с повышением температуры нитроцементации, способствует минимизации износа диффузионного слоя. Установлено, что хром присутствующий в цементуемой стали влияет на форму образующихся при цементации карбидных включений. Растворяясь в цементите, хром увеличивает коэффициент поверхностного натяжения растущего карбидного зерна, искривляя межфазную границу и способствуя росту карбида в виде равноосного изолированного включения. Критическая концентрации хрома, при которой становится возможным образование сферических карбидных частиц в цементированном слое, составляет 2,1%. При содержании хрома ниже указанного значения карбидные включения образуются в виде тонких прослоек по границам зерен поверхностной корки.

4. Установлено, что связь между необходимой износостойкостью лезвий ножа рабочих органов сельхозмашин и допустимым износом по длине определяется уравнением с графической интерпретацией, а необходимую износостойкость лезвия можно обеспечить нитроцементацией по вышеприведенной технологии, а также цианированием в нетоксичных соляных ваннах.

5. В результате проведения комплексных металлофизических исследований установлены морфологические закономерности структуры и фазового состава электроискровых покрытий, полученных ЛЭНП, на стали P12M3K8Ф2-МП электродами из твердых сплавов ВК6М и Т15К6. Нанесение покрытия осуществлялось после «приработки», увеличивающей массоперенос анода. ЛЭНП осуществлялось в струе аргона, под флюсом и на воздухе на оптимизированном режиме, обеспечивающем максимальную эрозию и минимальную шероховатость Rz (5...12) мкм. Применение аргона или флюса уменьшает число окислов в покрытии на (30...50)%.

5.1. Для повышения качества покрытий применено выглаживание на оптимальном режиме инструментов из минералокерамики ВОК (60...70) обеспечивающую шероховатость Ra (0,3...0,6) мкм и уменьшение растягивающих напряжений за счет наведения сжимающих.

5.2. Установлено, что стойкость различных инструментов после ЛЭНП увеличивается в несколько раз, что подтверждают адгезионные испытания методом склерометрии и акты промышленных испытаний (см. приложения диссертации).

6. Разработана технология получения электродного материала для электроискрового легирования из отходов твердого сплава Т15К6, включающая получение порошка методом электроэрозионного диспергирования и его компактирование методом порошковой металлургии. Проведены комплексные металлофизические исследования порошка Т15К6.

7. Представлены исследования структуры, фазового состава и микротвердости молотков зернодробилок из стали 30 ХГСА. Для повышения срока службы молотков и их восстановления предложены электроакустические покрытия наносимые электродами: из порошкового сплава Т15К6, полученного электроэрозионного диспергированием и из самофлюсующего сплава состоящего из смеси порошков сплавов ПГ-10Н-01 и ПГ ФБХ6-2 в соотношении (60 на 40)% вес. соответственно. Установлены структурные факторы обеспечивающие повышение износо- и коррозионной стойкости молотков с электроакустическими покрытиями.

8. Для порошкового спеченного сплава Ti6Al5V2MoCrFe разработана технология, включающая нанесение электроакустического покрытия из самофлюсующегося сплава ПН-Н80С2Р2 легированного добавками (7,5...10)% вес. порошкового твердого сплава ВК8, полученного из его отходов методом электроэрозионного диспергирования. Предложенная технология обеспечивает повышение микротвердости с шероховатостью поверхности Ra до 10 мкм. Для повышения качества поверхности и снижения внутренних напряжений применено выглаживание минералокерамикой ВОК 70, обеспечивающее Ra до 1 мкм. Рентгенографическими исследованиями установлен фазовый состав поверхностных слоев. Нанесение электроакустического покрытия приводит к развитию микроискажений и раздроблению кристаллических блоков мозаики по всему покрытию. Выглаживание

увеличивает дробление блоков мозаики, что приводит к дополнительному упрочнению композита.

9. Для повышения ресурса работы литейного жаропрочного сплава ЖС6К и его аналога с добавками 0,1 Hf и 0,5 Dy в % по массе применена технология электронно-лучевого испарения. Установлено, что сплав с добавками более жаростоек, что обусловлено меньшим обеднением подокисного слоя Cr, Al и Ti. Исследованы конденсаты систем Ni-Cr-Al-Y и Co-Cr-Al-Y, последние в условиях сульфидно-окисной коррозии более стойки. Изучено влияние Al и Cr на структуру электронно-лучевых покрытий системы Ni-Cr-Co-Al-Y после эксплуатации. Установлено, что при наработке (28...33) тыс. час. – глубина коррозионного фронта мала и составляет не более (8...11) мкм.

Исследованы также процессы реиспарения паровых потоков ряда металлов в условиях больших перенасыщений. Установлено, что при температурах подложки $T_p < T_{кр}$ толщина реиспаренного слоя определяется температурой подложки и плотностью парового потока. Также установлено, что ограничение паровых потоков нагретыми выше критической температуры, срыв конденсации поверхностями носит зеркально-диффузионный характер; с увеличением температуры плавления испаренного металла энергия активации возрастает.

9.1 Получено двухстрочечное электронно-лучевое покрытие на стальной ленте с помощью отражателя из Mo с подслоем из окиси алюминия. Получены зависимости толщины покрытия на обработанной стороне ленты при различных углах отражения. Установлен оптимальный угол наклона ($\approx 35^\circ$), обеспечивающий стабильные значения микротвердости конденсатов никеля по ширине ленты (1850...1760) МПа и удовлетворительную пористость (0,5...1,5) пор/см². Никелевый конденсат, полученный методом отражения, по сравнению с образцами, изготовленными методом электрохимического полирования, более коррозионностоек.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. Романенко, Д.Н. Нитроцементация стальных изделий в пастообразном карбюризаторе с нагревом в нейтральных соляных ваннах [Текст] / Д.Н. Романенко, В.Н. Гадалов, **А.В. Ляхов** [и др.] // Вестник Магнитогорского ГТУ им. Г.И. Носова. 2010. № 4. С. 48-51.
2. Сальников, В.Г. Влияние хрома на морфологию карбидных частиц в цементованных сталях и в железохромистых электролитических покрытиях [Текст] / В.Г. Сальников, В.Н. Гадалов, **А.В. Ляхов** [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара: изд-во Самарского научного центра РАН. 2010. Том 12(33). № 4 (3). С. 691-693.
3. Гадалов, В.Н. Эффективность цианирования конструкционных сталей в нетоксичных соляных ваннах [Текст] / В.Н. Гадалов, К.А. Крючков, **А.В. Ляхов** [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 4. С. 12-14.
4. Гадалов, В.Н. Некоторые аспекты самозатачиваемости нитроцементованных лезвий ножей [Текст] / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, **А.В. Ляхов** [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. № 10. С. 34-39.
5. Гадалов, В.Н. Исследование покрытий на быстрорежущей стали, полученных методом локального электроискрового легирования [Текст] / В.Н. Гадалов, Д.Н. Романенко,

А.В. Ляхов [и др.] // Вести высших учебных заведений Черноземья. Липецк: ЛГТУ. 2011. № 1 (23). С. 93-99.

6. Гадалов, В.Н. Влияние силовых нагрузок и химически активных сред на структурно-фазовые изменения в металлических материалах, используемых на животноводческих предприятиях [Текст] / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, **А.В. Ляхов** [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Курск: ЮЗГУ. 2011. № 5 (38). Ч. 1. С. 120-126.

7. Гадалов, В.Н. Структурно-фазовое состояние и свойства электроакустического покрытия после выглаживания металлокерамикой [Текст] / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, **А.В. Ляхов** [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Курск: ЮЗГУ. 2012. № 1. С. 107-113.

8. Гадалов, В.Н. Оптимизация режимов нанесения ионно-вакуумного покрытия TiN [Текст] / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, **А.В. Ляхов** [и др.] // Сварочное производство. 2012. №3 (928). С. 48-50.

монография:

9. Гадалов, В.Н. Диффузионные боридные покрытия на железе, сталях и сплавах с альбомом фотографий [Текст] / В.Н. Гадалов, А.С. Борсяков, В.Г. Сальников, **А.В. Ляхов** [и др.] // М.: КУРС. 2012. – 128 с.

статьи и материалы конференций:

10. Гадалов, В.Н. Исследование окисления жаропрочного никелевого сплава модифицированного малыми добавками гафния и диспрозия [Текст] / В.Н. Гадалов, **А.В. Ляхов**, Л.А. Желанова // Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сб. ст. III межд. НТК (июнь 2007г.). Пенза: Приволжский Дом Знаний. 2007. С. 29-30.

11. Ляхов, В.И. Исследование жаростойкости защитных покрытий никелевого сплава, полученных электроннолучевым испарением [Текст] / В.И. Ляхов, **А.В. Ляхов** // Материалы и упрочняющие технологии – 2007: сб. матер. XIV Росс. НТК с межд. участием (16-18 окт. 2007г.). Курск: КГТУ, 2007. С. 16-18.

12. Гадалов, В.Н. Применение метода склерометрии для оценки адизсионной прочности композиционного материала с электрофизическими покрытиями [Текст] / В.Н. Гадалов, Е.Ф. Балабаева, **А.В. Ляхов** [и др.] // Современные технологии в машиностроении: сб. статей XI межд. НТК (декабрь 2007 г.). Пенза: ПДЗ. С. 26-29.

13. Гадалов, В.Н. Разработка жаростойких и износостойких покрытий из жаропрочных никелевых сплавов с микролегирующими добавками для специальных деталей [Текст] / В.Н. Гадалов, Е.Ф. Балабаева, **А.В. Ляхов** [и др.] // Молодежь и наука: реальность и будущее: сб. матер. I межд. НПК. Невинномыск: Невинномысский ин-т экономики, управления и права, 2008. Т. 2. С. 313-314.

14. Гадалов, В.Н. Электроакустическое нанесение покрытий - прогрессивная технология упрочнения и восстановления деталей машин и инструмента [Текст] / В.Н. Гадалов, Р.Е. Абашкин, **А.В. Ляхов** [и др.] // Материалы и упрочняющие технологии – 2008: сб. матер. XV Росс. НТК с межд. участием (27-29 мая 2008г.). Курск: КГТУ, 2008. Ч. 1. С. 48-61.

15. Ляхов, В.И. Исследование зависимости толщины конденсатов от температуры подложки при электроннолучевом испарении металлов [Текст] / В.И. Ляхов, **А.В. Ляхов** //

Материалы и упрочняющие технологии – 2008: сб. матер. XV Росс. НТК с межд. участием (27-29 мая 2008г.). Курск: КГТУ, 2008. Ч. 1. С. 93-96.

16. **Ляхов, А.В.** Структура и механические свойства толстых вакуумных конденсатов вольфрама [Текст] / **А.В. Ляхов** // Материалы и упрочняющие технологии – 2008: сб. матер. XV Росс. НТК с межд. участием (27-29 мая 2008г.). Курск: КГТУ, 2008. Ч. 2. С. 26-27.

17. Ляхов, В.И. Исследование физико-химических процессов реиспарения и отражения потоков металлов [Текст] / В.И. Ляхов, **А.В. Ляхов**, С.Г. Новиков [и др.] // Материалы и упрочняющие технологии – 2008: сб. матер. XV Росс. НТК с межд. участием (27-29 мая 2008г.). Курск: КГТУ, 2008. Ч. 2. С. 64-65.

18. Гадалов, В.Н. Исследование электроискровых покрытий обработанных выглаживанием минералокерамикой [Текст] / В.Н. Гадалов, И.В. Павлов, **А.В. Ляхов** [и др.] // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: матер. 10-й юбилейной метод. научн.-практической конф. / Санкт-Петербургский государственный политехнический ун-т. Санкт-Петербург, 2008. 10 с.

19. Ляхов, В.И. Анализ физического механизма процесса реиспарения при вакуумной конденсации металлов [Текст] / В.И. Ляхов, **А.В. Ляхов**, С.Г. Новиков [и др.] // Материалы и упрочняющие технологии – 2009: сб. матер. XVI Росс. НТК с межд. участием (21-23 апреля 2009г.). Курск: КГТУ, 2009. Ч. 2. С. 150-152.

20. Ляхов, В.И. Исследование закономерности отражения паровых потоков металлов от нагретых поверхностей [Текст] / В.И. Ляхов, **А.В. Ляхов** // Материалы и упрочняющие технологии – 2009: сб. матер. XVI Росс. НТК с межд. участием (21-23 апреля 2009г.). Курск: КГТУ, 2009. Ч. 2. С. 152-156.

21. Гадалов, В.Н. Восстановление деталей электроосажденными покрытиями на основе железа [Текст] / В.Н. Гадалов, **А.В. Ляхов**, Е.А. Маркелов // Проектирование механизмов машин: труды III Всеросс. НПК (17 апреля 2009г.). Воронеж: ВГТУ, 2009. С. 102-104.

22. Ляхов, В.И. Исследование процесса нанесения двухстороннего покрытия на движущуюся ленту [Текст] / В.И. Ляхов, **А.В. Ляхов**, С.Г. Новиков [и др.] // Материалы и упрочняющие технологии – 2010: сб. матер. XVII Росс. НТК с межд. участием (20-22 апреля 2010г.). Курск: КГТУ, 2010. Ч. 1. С. 169-172.

23. Гадалов, В.Н. Исследование влияния размера частиц γ' -фазы на сопротивление ползучести сплава ЭП-202 для матрицы композиционных материалов [Текст] / В.Н. Гадалов, А.И. Лыткин, **А.В. Ляхов** [и др.] // Материалы и упрочняющие технологии – 2010: сб. матер. XVII Росс. НТК с межд. участием (20-22 апреля 2010г.). Курск: КГТУ, 2010. Ч. 2. С. 84-86.

24. Абашкин, Р.Е. Метод оценки характеристик жаропрочности на основе многофакторного планирования эксперимента [Текст] / Р.Е. Абашкин, **А.В. Ляхов** // Материалы и упрочняющие технологии – 2010: сб. матер. XVIII Росс. НТК с межд. участием (20-22 апреля 2010г.). Курск: КГТУ, 2010. Ч. 2. С. 94-97.

25. **Ляхов, А.В.** Структура и свойства защитных покрытий из сплавов типа твердых растворов [Текст] / **А.В. Ляхов** // Материалы и упрочняющие технологии – 2010: сб.

матер. XVII Росс. НТК с межд. участием (20-22 апреля 2010г.). Курск: КГТУ, 2010. Ч. 2. С. 125-127.

26. Ляхов, В.И. Структура и свойства покрытий, полученных методом электроннолучевого испарения [Текст] / В.И. Ляхов, **А.В. Ляхов** // Материалы и упрочняющие технологии – 2010: сб. матер. XVII Росс. НТК с межд. участием (20-22 апреля 2010г.). Курск: КГТУ, 2010. Ч. 2. С. 127-128.

27. Ляхов, В.И. Получение защитных покрытий с помощью электроннолучевого испарения [Текст] / В.И. Ляхов, **А.В. Ляхов** // Образование через науку: сб. матер, научно - метод, конф. Курск: КГТУ, 2010. С. 286-288.

28. **Ляхов, А.В.** Структура покрытий из композиционных материалов полученных электронно-лучевым испарением [Текст] / **А.В. Ляхов**, В.И. Ляхов, С.Г. Новиков [и др.] // Сб. матер. XVIII Росс. НТК с межд. участием (28-30 марта 2011г.) г. Курск: ЮЗГУ, 2011. С. 95-96.

Подписано в печать «28» сентября 2012г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 1,0.

Тираж 120 экз. Заказ 117

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Отпечатано в ЮЗГУ.