

На правах рукописи



Гурьев Михаил Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
И ИНСТРУМЕНТА ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность 05.16.09 – «Материаловедение» (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Околович Геннадий Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ситников Александр Андреевич

доктор технических наук, доцент
Акимов Валерий Викторович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Сибирский государственный
индустриальный университет»,
г. Новокузнецк

Защита состоится « 23 » декабря 2010 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.07 при ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

E-mail: berd50@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Автореферат разослан « » ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А. А. Бердыченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В процессе эксплуатации деталей машин и инструмента наиболее интенсивным внешним воздействиям подвергаются их поверхностные слои, поэтому нередко структура и свойства именно поверхностных слоев оказывают определяющее влияние на работоспособность изделий в целом.

Существует множество способов упрочнения поверхности: лазерное упрочнение, наплавка, накатка, применение различных технологий нанесения покрытий. Однако, применение данных технологий требует использования сложного, часто уникального, дорогостоящего и энергоёмкого оборудования, дорогостоящих упрочняющих сплавов, высококвалифицированного персонала.

Поэтому особый интерес представляет разработка новых высокоэффективных методов упрочнения деталей машин и инструмента за счет диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов различными химическими элементами, метод химико-термической обработки (ХТО). В отдельных случаях, когда требуется упрочнение не всей поверхности, а только отдельных участков деталей, метод упрочнения из насыщающих обмазок является практически единственно возможным. В тоже время широко используемая традиционная химико-термическая обработка хотя и повышает износостойкость инструмента, но кроме выше перечисленных достоинств, требует большого расхода электроэнергии в связи с длительностью высокотемпературных диффузионных процессов. Всё это приводит к повышению стоимости инструмента.

Исследования воздействия насыщающих сред в виде обмазок при ХТО показали, что использование соединений бора с хромом в качестве добавки к карбиду бора, значительно увеличивает срок службы инструмента. Борирование, хромирование, титанирование и совмещенные процессы (борохромирование и боротитанирование) эффективнее, чем традиционно используемые цементация, азотирование и др. практически по всем параметрам свойств поверхностных слоев материала. Боридные слои на сталях отличаются высокой износостойкостью, хромирование придает жаростойкость, а комбинированные покрытия совмещают в себе исходные свойства однокомпонентных. Работоспособность борохромированных слоев почти в два раза выше, чем борированных. Однако, известные методы получения таких упрочняющих покрытий несовершенны и достаточно трудоёмки.

Указанных недостатков лишен способ поверхностного упрочнения, когда упрочнение поверхности и процесс изготовления изделия совмещены в единый процесс. Такая комбинация возможно только при изготовлении деталей машин и инструмента методами литья. В этом случае образование упрочненного слоя происходит в результате взаимодействия горячего материала отливки с легирующим облицовочным слоем, нанесенным на поверхность литейной формы.

Изготовление инструмента различными методами литья приводит к сокращению расхода дорогостоящей инструментальной стали, снижению расходов на изготовление инструмента и повышению его стойкости. При использовании литейных технологий появляется возможность в широких пределах использовать дополнительное легирование, микролегирование и модифицирование стали для повышения работоспособности инструмента исходя из конкретных условий его эксплуатации. Наиболее перспективным в этом направлении является метод литья по газифицируемым моделям (ЛГМ), позволяющий получать высокоточные отливки с хорошей чистой поверхностью.

Большой практический интерес представляет получение в процессе литья диффузионных слоев на основе боридов железа, обладающих, как известно, высокой твердостью и износостойкостью. Повышение работоспособности деталей машин и механизмов, инструмента и технической оснастки, их надежности и долговечности обеспечивается в определенной мере оптимизацией технологии нанесения боросодержащих покрытий, и химическим составом насыщающей смеси.

Настоящая работа выполнялась в соответствии с программой Министерства образования и науки РФ, поддержана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по Программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК 2009»).

Цель диссертационной работы. Повышение износостойкости деталей машин и инструмента за счет комплексного диффузионного насыщения поверхностного слоя деталей из железоуглеродистых сплавов в процессе литья по газифицируемым моделям на основе оптимизации состава насыщающих смесей и установления закономерностей структурообразования.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Определить возможность упрочнения поверхностного слоя деталей из стали и чугуна комплексным насыщением бором и хромом при производстве литых изделий.
2. Определить оптимальное сочетание компонентов насыщающей смеси для проведения процесса упрочнения, а также предварительные ограничения для содержания каждого компонента в обматке в процентах от общей массы.
3. Исследовать структуру сталей и их физико-механические свойства после комплексного насыщения бором совместно с хромом и бором совместно с титаном и фазовый состав полученных диффузионных слоев.
4. Оценить влияние параметров режима насыщения при борохромировании (состав стали, состав смеси, температура процесса, длительность насыщения) на структуру и физико-механические свойства поверхностных слоев литой стали.
5. Установить аналитические зависимости (математические модели), связывающие химический состав насыщающей смеси со свойствами сталей после поверхностного легирования бором и хромом.
6. На основе изученных представлений о поведении сталей с диффузным покрытием, и, исходя из полученных математических моделей, разработать состав обматки для поверхностного упрочнения литых деталей из углеродистых и легированных сталей комплексным насыщением бором и хромом в процессе получения отливки методом литья по газифицируемым моделям.

Научная новизна работы.

1. Установлена возможность упрочнения поверхности отливок из чугуна СЧ20 и сталей различного состава (25Л, 30Л, 35Л, 45Л, 25ГЛ, 110Г13Л), полученных методами литья в открытую форму и по газифицируемым моделям. Показано, что диффузионный боридный слой на стали 35Л, полученный при литье, имеет на порядок большую толщину (до 5 мм) по сравнению с диффузионными слоями, полученными методами химико-термической обработки (до 0,25 мм).
2. Установлены аналитические зависимости, связывающие компоненты состава насыщающей смеси (борид хрома (CrB_2), карбид бора (B_4C), графит, бентонит, фтористый натрий (NaF)) с износостойкостью и толщиной диффузионного слоя после упрочнения в процессе получения отливки методом литья по газифицируемым моделям.
3. Разработан новый состав насыщающей среды для поверхностного упрочнения при получении литых деталей из серого чугуна, углеродистых и легированных сталей одновременным насыщением бором и хромом, содержащий борид хрома, карбид бора, графит, бентонит, фтористый натрий (50–60 масс. % B_4C + 20–25 масс. % CrB_2 + 2–3 масс. % NaF + 5–15 масс. % мелкодисперсного графита + 5–7 масс. % бентонита). Применение разработанной технологии упрочнения позволяет улучшить эксплуатационные свойства, в частности, износостойкость деталей машин и инструмента до 25 раз (в сравнении с ранее используемыми способами), а также уменьшить трудоемкость процесса упрочнения до 3,5 раз.

Значение полученных результатов для теории и практики состоит в том, что совокупность экспериментальных и теоретических результатов, полученных при проведении исследований, позволяет:

– с использованием полученных зависимостей обоснованно разрабатывать способы получения литых деталей машин и инструмента с упрочненной поверхностью из чугуна СЧ20 и углеродистых и легированных сталей (25Л, 30Л, 35Л, 45Л, 25ГЛ, 110Г13Л) с целью повышения их износостойкости;

– повышать эксплуатационные характеристики детали машин и инструмента.

Проведенные испытания инструмента (фильера) из стали 45Л, упрочненного с помощью разработанной технологии на ООО «Упрочняющие технологии» (г. Барнаул) для прессования древесных отходов в брикеты показали, что его стойкость повышается в 4,5 раза по сравнению с серийным, изготовленным из стали ХВГ и упрочненным карбозаотитированием, а затраты на изготовление снизились в 1,5 раза.

Замена на ООО «Алтайский завод прецизионных изделий» (г. Барнаул) цилиндров для дробеметной установки, изготовленных из высокохромистого чугуна ИЧХ28, на цилиндры из чугуна СЧ20, упрочненные по разработанной технологии, показала, что они имеют эксплуатационные свойства не ниже применяемых до сих пор, в то время как затраты на изготовление данной детали уменьшились в 3,5 раза.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных методов исследований, оборудования, стандартных методик определения структуры и свойств материалов, необходимым количеством экспериментального материала для корректной статистической обработки, сопоставлением полученных результатов с данными других авторов, успешной апробацией разработанной технологии в производстве.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установленные закономерности структурных изменений и физико-механических свойств сталей 25Л, 30Л, 35Л, 45Л, 25ГЛ, 110Г13Л (износостойкость, толщина диффузионного слоя, микротвердость) с диффузионными покрытиями на основе бора совместно с другими элементами (хром, титан, никель, вольфрам) при их получении литым.

2. Аналитические зависимости, связывающие компоненты насыщающей смеси с механическими и эксплуатационными свойствами сталей после комплексного диффузионного упрочнения бором совместно с другими элементами в процессе получения отливки.

3. Разработанный способ упрочнения поверхности деталей легированием их поверхностно хромом и бором в процессе изготовления литым из сталей и чугунов.

Личный вклад соискателя. Основные результаты, изложенные в диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично. Теоретические и экспериментальные исследования, написание статей и тезисов докладов, апробация разработок в производственных условиях формулировка промежуточных и заключительных выводов выполнены непосредственно соискателем.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: VI–XI Международных научно-практических конференций «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штампового производств» (Барнаул, 2004–2010); IV–VI Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Барнаул, 2007, 2008, 2009); Научной международной конференции «Перспективы развития вузовской науки» (Сочи, 2007); 6–8 Всероссийских научно-практических конференциях «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (Новосибирск, 2008, 2009, 2010); VIII Всероссийской школе-семинаре «Новые материалы. Создание, структура свойства – 2008» (Томск, 2008); XIV и XV Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2008, 2009); «17 international conference production and management in the steel industry», (Zakopane, Польша, 2009); IV Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур ПРОСТ–2008» (Москва, 2008); Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ, 2009)» (Санкт-Петербург, 2009); Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, Беларусь, 2009); VI Международной научной школе-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» (Барнаул, 2009); XIX Петербургских чтениях по проблемам прочности, посвященных 130-летию со дня рождения академика АН УССР Н. Н. Давиденкова (Санкт-Петербург, 2010); Общероссийской научной конференции «Новые технологии, инновации, изобретения» (Иркутск, 2010); Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функ-

циональных материалов НФМ'10» (Санкт-Петербург, 2010); 50 Международном симпозиуме «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, Беларусь, 2010).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 35 печатных работах. Из них пять статей в научно-технических журналах, рекомендованном ВАК РФ. Получено три патента РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 189 наименований и приложения. Работа содержит 191 страницу машинописного текста, включая 10 таблиц и 83 рисунка. В приложениях приведены документы о выдаче патентов на изобретение, документы об апробации и внедрении результатов исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дана характеристика изученности проблемы, указаны цель и задачи исследования, выделена научная новизна, показана практическая значимость исследования.

В первой главе на основе литературных данных рассмотрены существующие методы упрочнения поверхности и виды химико-термической обработки металлов. Изучены физико-химические процессы, обеспечивающие обогащение изделия элементами из внешней среды при поверхностном легировании и модифицировании. Проанализированы основные методы упрочнения поверхностей. Приведена классификация методов и способов борирования сталей, а также анализ внутренних процессов, происходящих при борировании. Представлены зависимости структуры, строения и состава упрочненных поверхностей от технологических параметров процесса насыщения. Подробно рассмотрено и изучено влияние углерода и легирующих элементов на фазовый состав различных диффузионных слоев. Проведен аналитический обзор существующих способов борохромирования и боротитанирования. Описаны принципы легирования поверхности и ее разновидности. Рассмотрено влияние модифицирования поверхности на физико-механические свойства сталей и чугунов. Показана эффективность объединения процессов получения отливок и упрочнения поверхности в единый процесс. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены методические основы исследований, методы проведения экспериментов, приведено описание материалов, используемых в работе.

В качестве исследуемых материалов выбраны стали различного назначения (25Л, 30Л, 35Л, 45Л, 25ГЛ, 110Г13Л), а также чугун СЧ15 и СЧ20.

Приведен химический состав компонентов насыщающей смеси, применяемой для диффузионного насыщения (карбид бора, бориды хрома и титана, и др.). Химико-термическую обработку проводили из насыщающих обмазок (паст), нанесенных на поверхность упрочняемых деталей и образцов.

Литые образцы стали и чугуна для исследования структуры и свойств упрочненного слоя получали двумя способами:

1 – литьем по газифицируемым моделям (размер образцов для стали $\varnothing 40$ мм, длина 8–30 мм, для чугуна – $90 \times 45 \times 20$ мм);

2 – в форму из стержневой смеси (холоднотвердеющая смесь (ХТС), состоящая из кварцевого песка марки 4К₂О₂02, кислоты ортофосфорной и смолы БС-40). Размер образцов: $\varnothing 25$ мм, длина 40 мм.

Плавку чугуна и стали проводили в индукционной тигельной электропечи LHGW-0,5/ISM мощностью W=500 кВт, а заливку осуществляли ковшом чайникового типа емкостью V=250 кг. Температуру расплава измеряли при помощи инфракрасного термометра Кельвин 1800П. Химический анализ исследуемых сплавов определяли на спектрометрах «Аргон-5» и «МСА П».

Упрочнение проводили из обмазки, нанесенной на поверхность газифицируемой модели и на поверхность полости формы из ХТС.

После проведения процессов диффузионного насыщения изучали структуру, фазовый и химический состав боридных слоев. Металлографическое исследование проводили на оптических микроскопах: МИМ-7, МИМ-10, Neophot-21 и методами растровой электронной мик-

роскопии (РЭМ) на электронном растровом микроскопе JSM-6510 LV JEOL с системой микроанализа INCA Energy 350, Oxford Instruments, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на электронном микроскопе ЭМ-125К и атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе «FEMTOSKAN» в режиме сканирования рельефа поверхности. Для просмотра в оптическом микроскопе шлифы готовились методами химического и электрохимического травления. Рентгеноструктурный фазовый анализ проводили с помощью дифрактометра ДРОН-1,5.

Механические свойства определяли по стандартным методикам. Износостойкость определяли в лабораторных условиях на машине Амслера по ГОСТ 47421-73. ДюрOMETрические исследования производили на твердомере Роквелла ТР 5005 по шкале С согласно ГОСТ 9013-82 и на приборе ПМТ-3М по ГОСТ 9450-76.

В третьей главе приведены результаты разработки технологии упрочнения поверхности при производстве литых изделий.

На первом этапе выбора состава насыщающей смеси применялись четыре вида насыщающих обмазок на основе смеси для борирования (70 мас. % B_4C , 15 мас. % графита, 5 мас. % NaF , 10 мас. % бентонита): №1 – с добавлением 20 мас. % диборида хрома; №2 – с добавлением 20 мас. % никеля; №3 – с добавлением 10 мас. % карбида вольфрама; №4 – с добавлением 20 мас. % диборида титана. До сметанообразного состояния обмазки доводили при помощи воды и жидкого стекла, наносили на поверхность газифицируемой модели и на поверхность полости формы из ХТС толщиной от 0,2 до 2,0 мм, далее обмазка сушилась в течение 3–4 часов на воздухе при температуре не ниже 20 °С. Готовили форму. Непосредственно перед заливкой форму подключали к вакуумному насосу и создавали разрежение 0,05 МПа, выполняли заливку расплавом при температуре 1500–1600 °С из ковша чайникового типа, предварительного разогретого в печи до $t=950$ °С. После кристаллизации отливки и ее выдержки форму отправляли на выбивку.

На сталях различного химического состава были получены упрочняющие диффузионные слои (рисунки 1, 2), распределение значений микротвердости в слоях после упрочнения бором совместно с другими элементами (Cr, Ni, Ti и W) при литье представлено на рисунке 3.

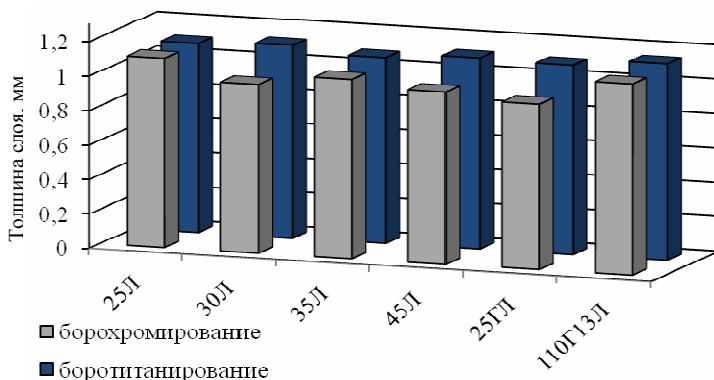


Рисунок 1 – Толщина упрочненного слоя, полученного на сталях различного состава после борохромирования и боротитанирования

На рисунке 1 приведены средние значения по результатам 10 измерений толщины диффузионного слоя. Видно, что состав стали не оказывает значительного влияния на толщину получаемого упрочненного слоя, сформировавшегося в процессе поверхностного легирования стали при литье. На всех сталях получены слои толщиной от 0,9 до 1,2 мм при толщине стенки отливки 10 мм и времени выдержки в форме 5 минут. Основное влияние на образование диффузионного слоя оказывает длительность процесса кристаллизации и охлажде-

ния в аустенитном состоянии, что определяется толщиной стенки отливки (рисунок 2 б) и временем выдержки отливки при температуре выше 800 °С (рисунок 2 а). Микротвердость слоя изменяется в значительных пределах от 7500 МПа при борохромировании и до 14000 МПа при боротитанировании. Данные на рисунке 3 приведены для образцов толщиной 10 мм и времени выдержки в форме 5 минут.

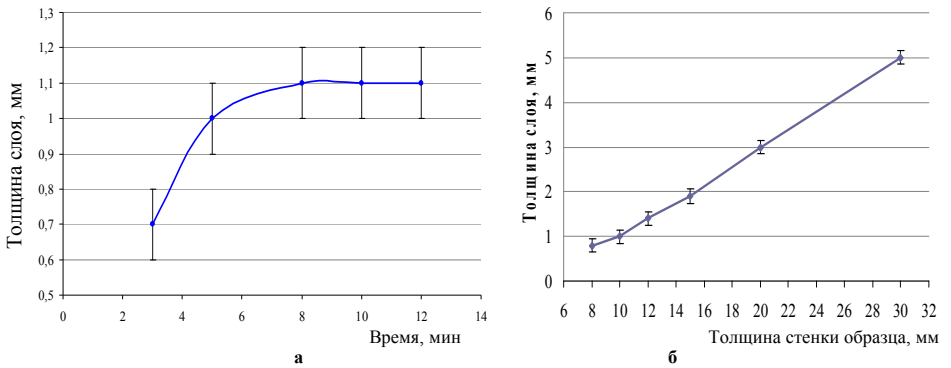


Рисунок 2 – Влияние на толщину борохромированного слоя на стали 45J1: а – время выдержки в форме (толщина образца 10 мм), б – толщины стенки образца (время выдержки в форме 5 минут)

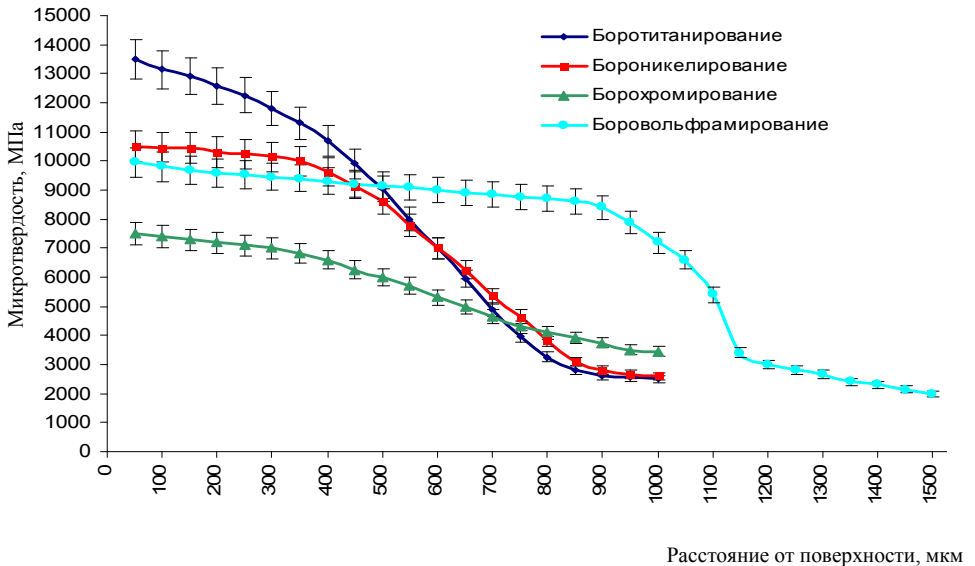
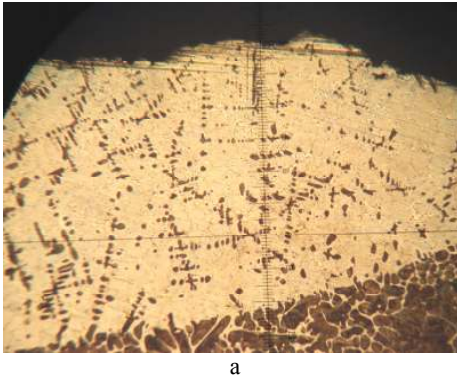
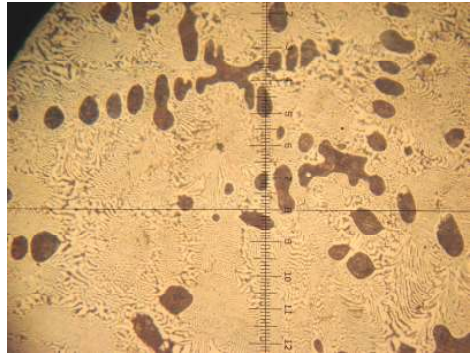


Рисунок 3 – Распределение значений микротвердости в упрочненном слое стали 45J1 после упрочнения бором совместно с другими элементами (Cr, Ni, Ti и W)

Микроструктура полученного диффузионного борохромированного слоя представлена на рисунке 4. Сформировавшиеся взамен игольчатых (рисунок 5), диффузионные слои толщиной более 1 мм имеют структуру боридной эвтектики с крупными включениями перлита (до 30 мкм), где эвтектика представляет собой мелкодисперсную механическую смесь боридов и перлита.



а



б

Рисунок 4 – Микроструктура диффузионного борохромированного слоя на стали 45Л, полученного при литье, а – цена деления шкалы 10 мкм, б – цена деления шкалы 2,5 мкм

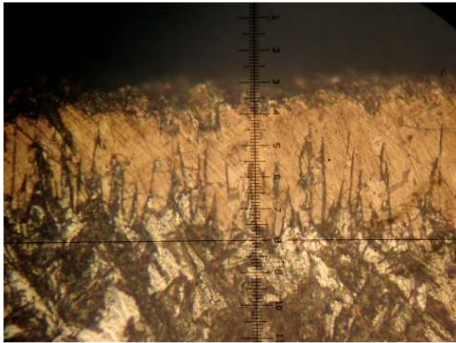
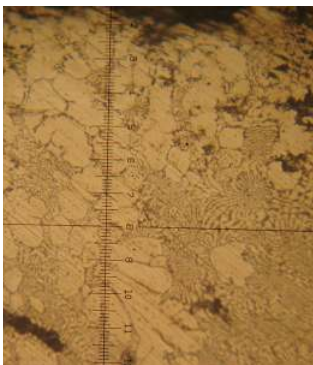


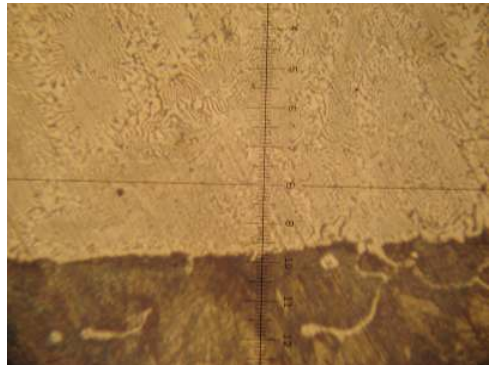
Рисунок 5 – Микроструктура диффузионного борохромированного слоя на стали 30: температура 1000 °С, время насыщения – 6 ч (цена деления шкалы 5 мкм)

Микроструктура полученного диффузионного боротитанированного слоя приведена на рисунке 6. Диффузионный слой имеет структуру боридной эвтектики с крупными включениями боридов (до 70 мкм) и твердостью до 14000 МПа. Эвтектика представляет собой мелкодисперсную механическую смесь боридов и перлита.

На примере конструкционной стали с 0,3 % углерода показано влияние способа получения упрочняющего слоя на его микротвердость и износостойкость (рисунки 7, 8).



а



б

Рисунок 6 – Микроструктура диффузионного боротитанированного слоя на стали 45Л, полученного при литье, а – цена деления шкалы 10 мкм, б – цена деления шкалы 2,5 мкм

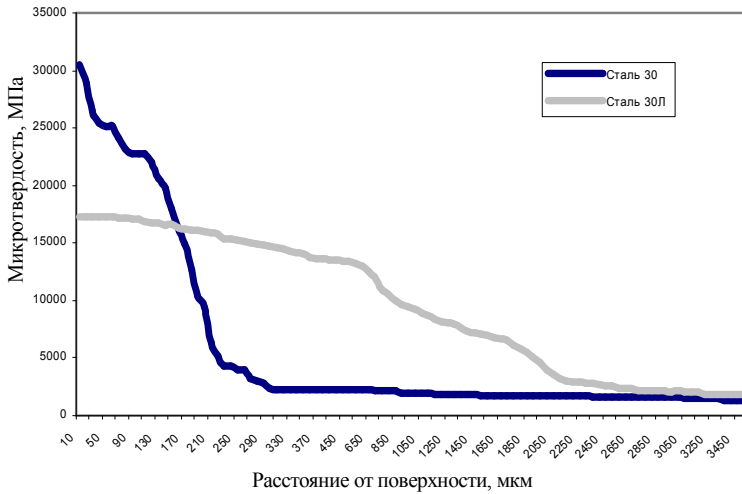


Рисунок 7 – Распределение значений микротвердости в углеродистой стали: сталь 30 – твердофазное борирование из обмазки, сталь 30Л – насыщение поверхности бором при ЛГМ

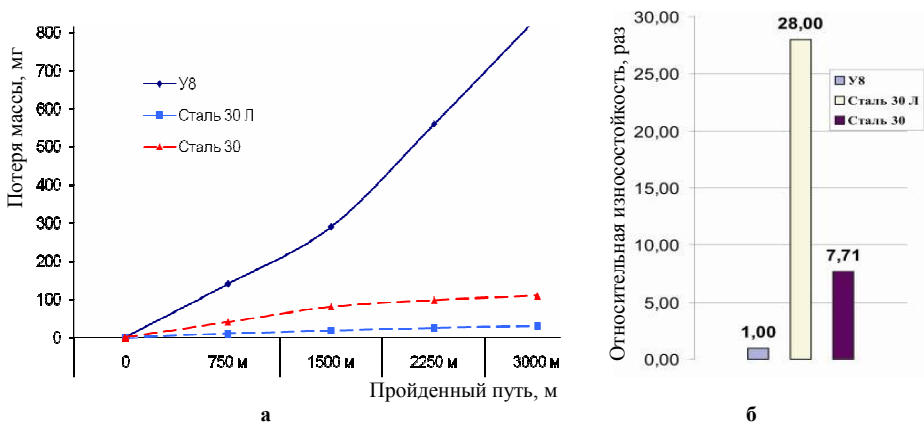


Рисунок 8 – Износостойкость при абразивном износе углеродистой стали (0,3 % углерода): сталь 30 – твердофазное борирование из обмазки, сталь 30Л – насыщение поверхности бором при ЛГМ (а – потеря массы, б – относительная износостойкость)

Из рисунков 7 и 8 видно, что диффузионный боридный слой на стали 30Л, полученный поверхностным легированием имеет на порядок большую толщину (2,5 мм) и меньшую микротвердость (до 16000 МПа) по сравнению с диффузионными слоями, полученными методами химико-термической обработки (0,25 мм с микротвердостью до 30000 МПа, см. рисунки 5, 7). Абразивная износостойкость диффузионных слоев, полученных на литой стали возрастает в 28,0 раз, тогда как износостойкость борированных в процессе, совмещенном с нагревом под закалку возрастает в 7,7 раза по сравнению с эталоном (сталь У8 с твердостью 51–52 HRC). Диффузионный слой на стали 30 имеет небольшую толщину и высокую хрупкость, поэтому при высоких нагрузках (выше 0,40 МПа) он быстрее разрушается, а при длительных испытаниях истирается значительно раньше, чем слой на стали 30Л. На рисунке 9 стрелками показано разрушение хрупкой боридной фазы (поперечный разрез).

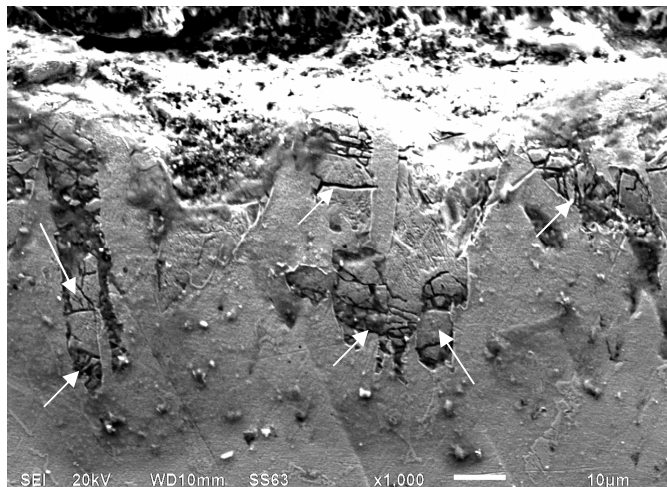


Рисунок 9 – Разрушение боридов в упрочненном слое (РЭМ)

Таким образом, показана возможность и целесообразность упрочнения поверхностного слоя деталей комплексным насыщением бором и хромом при производстве литых изделий.

Четвертая глава посвящена разработке и оптимизации химического состава насыщающей смеси для диффузионного борохромирования отливок.

Исходя из проведенных ранее исследований (глава 1, 3), в основу состава насыщающей смеси для поверхностного упрочнения стальных деталей и инструмента был принят карбид бора как поставщик бора. Следующим компонентом, входящим в состав обмазки, взят диборид хрома, являющийся поставщиком хрома. Для активизирования процесса насыщения из обмазки используется фторид натрия. Мелкодисперсный графит обеспечивает достаточную толщину диффузионных слоев и легкое отделение обмазки после процесса насыщения. Бентонит обеспечивает необходимую жесткость обмазке в процессе насыщения и предотвращает осыпание обмазки в процессе сушки. В отдельных экспериментах выбирались различные сочетания этих компонентов обмазки в процентном соотношении от общей массы.

Для уменьшения количества проводимых экспериментов при поиске оптимального состава упрочняющего покрытия было выполнено математическое планирование эксперимента. Для уменьшения области исследований по поиску оптимальных значений содержания каждого компонента насыщающей смеси для поверхностного упрочнения экспериментально были установлены следующие ограничения для каждого компонента B_4C – 40–80 %, CrB_2 – 10–30 %, графит – 5–20 %, NaF – 5–15 %, бентонит – 2–5 %.

Для аналитического описания зависимости «состав–свойство» в многокомпонентных системах более удобен метод симплексных решеток, позволяющий получать математическую модель исследуемой зависимости и не требующий большого объема экспериментов. Данный метод был применен при изучении влияния химического состава пятикомпонентной насыщающей среды на толщину и износостойкость борохромированных покрытий сталей.

В качестве испытуемых деталей были использованы упрочненные ролики из стали 35Л, применяемые для подачи проволоки на станок для ее рубки. Износостойкость роликов определялась ресурсом по количеству поданной проволоки (в тоннах). Режим работы подающего ролика: подача проволоки $\varnothing 4$ мм на станок для ее рубки.

Поскольку задача создания насыщающих смесей подобного рода является многофакторной, в ее основу должна быть положена определенная система. Предыдущие исследования показали, что в данном случае зависимость свойств борохромированных слоев от состава насыщающей обмазки необходимо изучать не во всей области изменения концентрации компонентов, а лишь ее локальный участок.

Так как изучаемая локальная область представляет собой неправильный симплекс, то для получения уравнения регрессии был составлен симплекс–решетчатый план $\{5, 2\}$ относительно псевдокомпонент z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 .

После обработки результатов и проверки значимости коэффициентов были получены уравнения регрессии второго порядка, описывающие зависимость износостойкости (y^I) и толщины диффузионного слоя (y_n^T) от химического состава насыщающей смеси, которые имеют следующий вид:

$$y^I = 105 + 36x_2 + 5x_3 + 97x_4 - 72x_5 + 13x_2x_3 + 69x_2x_4 - 40x_2x_5 + 4x_3x_4 - 73x_3x_5 - 17x_4x_5 + 14x_2^2 + x_3^2 + 132x_4^2 + 22x_5^2; \quad (1)$$

$$y_n^T = 3,42 + 1,81x_2 + 0,15x_3 + 3,78x_4 - 3,01x_5 + 0,24x_2x_3 + 1,49x_2x_4 + 2,54x_2x_5 - 0,67x_3x_4 + 3,35x_3x_5 + 3,57x_4x_5 - 0,42x_2^2 + 0,09x_3^2 + 4,74x_4^2 - 2,42x_5^2; \quad (2)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – исходные компоненты смеси, %: x_1 – карбид бора, x_2 – диборид хрома, x_3 – мелкодисперсный графит, x_4 – фторид натрия, x_5 – бентонит, y^I – износостойкость легированного ролика, определяемая его ресурсом (количество поданной роликом проволоки), т; y_n^T – средняя толщина упрочненного слоя, мм.

После анализа полученных аналитических зависимостей и с учетом лабораторных исследований, было установлено следующие пределы оптимального содержания каждого компонента в насыщающей смеси для изготовления стальных деталей способом поверхностного легирования:

– 20–25 масс. % диборида хрома. При содержании в насыщающей смеси для поверхностного легирования диборида хрома меньше 20 % от общей массы, идет преимущественно насыщение бором, что приводит к высокой хрупкости диффузионного слоя и, следовательно, к снижению ресурса работы. При содержании CrB_2 в обмазках больше 25 %, идет преимущественно процесс хромирования, что приводит к образованию более мягких диффузионных слоев, обладающих пониженной твердостью, и, соответственно, низким ресурсом.

– 50–60 масс. % карбида бора. Содержание в насыщающей смеси карбида бора меньше 50 % приводит к получению диффузионных слоев с малой твердостью и снижению ресурса получаемых деталей. Содержание B_4C больше 60 % приводит к преимущественному насыщению бором, к высокой хрупкости получающихся слоев и выходу изделия из строя еще до начала процесса эксплуатации.

– 5–15 масс. % мелкодисперсного графита. При содержании в обмазке мелкодисперсного графита в количестве ниже 5 % упрочненные слои получаются малой толщины, и отделение обмазки от поверхности упрочненной детали затруднено. Содержание мелкодисперсного графита больше 15 % от общей массы приводит к образованию тонких упрочненных слоев и, вследствие повышенного газоотделения, возможно появление поверхностных дефектов формы на готовой детали.

– 5–7 масс. % бентонита обеспечивает необходимую жесткость обмазке. При содержании в насыщающей смеси бентонита меньше 5 %, возможно осыпание обмазки в процессе сушки. Содержание бентонита в обмазке больше 7 % дает диффузионные слои малой толщины, что способствует образованию сколов при отделении обмазки из-за ее повышенной адгезии к поверхности детали.

– 2–3 масс. % фторида натрия обеспечивает необходимую активность насыщающей смеси, что приводит к формированию диффузионных слоев с оптимальными пластичностью и износостойкостью. При содержании в насыщающей смеси фторида натрия в количестве меньшем 2 % возможно получение диффузионного слоя очень малой толщины, либо полное его отсутствие по причине недостаточной активности смеси. Количество фторида натрия большее 3 % повышает активность смеси и приводит к сплавлению обмазки с упрочняемой деталью, что приводит к невозможности отделения использованной обмазки от готового изделия.

Для решения задачи по определению оптимального соотношения компонентов насыщающей смеси использовалась программа Microsoft Excel, входящая в состав Microsoft Office 2003, в частности надстройка Excel «Поиск решения».

В качестве функции оптимизации было принято уравнение регрессии для износостойкости подающего ролика (1). Значение этой функции должно стремиться к максимуму.

Уравнение регрессии для толщины диффузионного слоя (2) было принято за ограничение. Значение толщины получаемого диффузионного слоя при борохромировании выбиралось в интервале от 0,7 мм до 2,0 мм.

На содержание компонентов в насыщающей обзаке были наложены следующие ограничения:

B_4C (x_1) – 50–60 %, CrB_2 (x_2) – 20–25 %, графита (x_3) – 5–15 %, NaF (x_4) – 2–3 %, бентонита (x_5) – 5–7 %.

В результате поиска решений было получено следующее оптимальное соотношение компонентов, которое можно принять за окончательную рецептурную композицию насыщающей смеси для диффузионного борохромирования методом литья:

53 % B_4C + 25 % CrB_2 + 2 % NaF + 15 % графита + 5 % бентонита.

При этом составе насыщающей смеси расчетное значение ресурса ролика составило 78 т поданной проволоки, толщина борохромированного слоя на изготовленной детали – 1,4 мм.

По той же методике установлены пределы оптимального содержания компонентов в насыщающей смеси при диффузионном боротитанировании: B_4C – 40–80 %, TiB_2 – 10–30 %, графита – 10–20 %, NH_4F – 5–10 %, бентонита – 2–5 %.

Расчетные значения свойств были подтверждены экспериментами. Износостойкость диффузионных слоев на стали 35Л, полученных из смесей оптимального состава, представлена на рисунке 10.

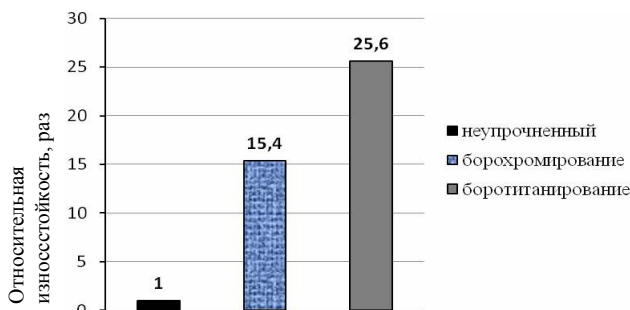


Рисунок 10 – Относительная износостойкость при абразивном износе, полученных диффузионных слоев на стали 35Л при литье

По результатам исследований и оптимизации химического состава разработаны новые составы насыщающих смесей и технология для комплексного поверхностного диффузионного упрочнения деталей машин и инструмента, на которые получено три патента РФ на изобретения.

В пятой главе приведены результаты промышленного апробирования разработанного способа упрочнения поверхности в процессе получения деталей машин и инструмента методом литья по газифицируемым моделям.

На предприятии по производству топливных гранул ООО «Упрочняющие технологии» (г. Барнаул) были проведены испытания комплекта фильер из стали 45Л для прессования древесных отходов изготовленных методом литья по газифицируемым моделям с упрочненной бором и хромом поверхностью из разработанной насыщающей смеси. Испытания фильер упрочненных по разработанной технологии, показали, что их стойкость повышается в более чем в 4,5 раза, по сравнению с карбоазотируемыми серийными фильерами из стали ХВГ, а использование разработанной технологии упрочнения позволяет уменьшить затраты на изготовление данной детали в 1,5 раза.

Замена на ООО «Алтайский завод прецизионных изделий» (г. Барнаул) цилиндров для дробеметной установки, изготовленных из высокохромистого чугуна ИЧХ28, на цилиндры из чугуна СЧ20, упрочненные по разработанной технологии, показала, что они имеют эксплуатационные свойства не ниже применяемых до сих пор, в то время как затраты на их изготовление уменьшились в 3,5 раза.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследованы и описаны структуры и фазовый состав диффузионных слоев, полученных в процессе изготовления отливки одновременным насыщением сталей 25Л, 30Л, 35Л, 45Л, 25ГЛ и 110Г13Л бором совместно с хромом и бором совместно с титаном. Установлены условия проведения процесса поверхностного легирования, в которых возникает возможность образования боридной эвтектики, боридов, карбидов, карбоборидов, твердых растворов на основе α -железа.

2. Установлена возможность получения упрочненной поверхности на конструкционном феррито-перлитном и перлитным чугунах, среднеуглеродистых сталях и износостойкой высокомарганцевистой аустенитной стали методом литья в открытую форму из стержневой смеси и литьем по газифицируемым моделям из пенополистирола. Показано, что диффузионный боридный слой на стали 30Л, полученный при литье имеет на порядок большую толщину (до 5 мм) и несколько меньшую микротвердость (11000–16000 МПа) по сравнению с диффузионными слоями, полученными методами химико-термической обработки (до 0,25 мм с микротвердостью 16500–25000 МПа).

3. Определено оптимальное сочетание компонентов насыщающей среды для поверхностного упрочнения сталей при получении деталей машин и инструмента методом литья (борид хрома, карбид бора, графит, бентонит, фтористый натрий). Исследование насыщающей способности представленных насыщающих сред показало, что соединения бора с хромом (диборид хрома, феррохром), используемые как компоненты насыщающей обмазки, эффективны и как поставщики бора, так и как поставщики хрома.

4. Установлены аналитические зависимости, связывающие компоненты состава насыщающей смеси (CrB_2 , B_4C , графит, бентонит, NaF) с эксплуатационными и физико-механическими свойствами сталей (микротвердость, износостойкость, толщина диффузионного слоя) после упрочнения в процессе получения отливки методом литья по газифицируемым моделям.

5. На основе изученных представлений о поведении сталей с диффузным покрытием, а также с учетом полученных аналитических зависимостей свойств упрочненных сталей от состава насыщающей смеси разработан новый состав насыщающей среды для поверхностного упрочнения литых сталей одновременным насыщением бором и хромом, содержащий: 50–60 масс. % B_4C , 20–25 масс. % CrB_2 , 2–3 масс. % NaF , 5–15 масс. % графит, 5–7 масс. % бентонит.

Разработан новый состав насыщающей среды для поверхностного упрочнения литых сталей одновременным насыщением бором и титаном, содержащий: B_4C – 40–80 масс.%, TiB_2 – 10–30 масс.%, графит – 10–20 масс.%, NH_4F – 5–10 масс.%, бентонит – 2–5 масс.%.

Для разработанных составов рекомендованы оптимальные температурно-временные режимы обработки.

6. Применение разработанной технологии упрочнения позволяет улучшить эксплуатационные свойства, в частности абразивная износостойкость полученных на стали 35Л диффузионных слоев возрастает в 15,4 при борохромировании и в 25,6 раз после боротитанирования.

7. Испытания фильер для прессования древесных отходов в брикеты из стали 45Л, упрочненных с помощью разработанной технологии, показали, что их стойкость повышается более чем в 4,5 раза по сравнению с ранее применяемыми из стали ХВГ упрочненные карбоазотированием, а использование разработанной технологии упрочнения позволяет уменьшить затраты на изготовление данной детали в 1,5 раза.

Основные результаты опубликованы в работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Гурьев, А. М. Влияние параметров борохромирования на структуру стали и физико-механические свойства диффузионного слоя [Текст] / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, Б. Д. Лыгденов, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев, И. А. Гармаева // Ползуновский вестник. – 2007. – № 3. – С. 28–34.
2. Хараев, Ю. П. Влияние условий формирования структуры литых резцов на эксплуатационные свойства [Текст] / Ю. П. Хараев, О. А. Власова, М. А. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, А. Д. Грешилов // Вестн. Бурятского гос. унта. Сер.9, Физика и техника. – 2006. – Вып.5. – С.92–94.
3. Кошелева, Е. А. Технология многокомпонентного диффузионного упрочнения поверхности деталей машин и инструмента для энергетического машиностроения из смесей на основе карбида бора [Текст] / Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов, Е. А. Нестеренко, М. А. Гурьев, С. А. Земляков, О. А. Власова, А. Г. Иванов // Ползуновский вестник. – 2010. – №1. – С.106–113.
4. Гурьев А. М., Многокомпонентное диффузионное упрочнение поверхности деталей машин и инструмента из смесей на основе карбида бора [Текст] / А. М. Гурьев, А. Д. Грешилов, Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, А. Г. Иванов, А. А. Долгоров // Обработка металлов. – 2010. – №2. – С. –19–23.
5. Гурьев, М. А. Комплексное диффузионное упрочнение тяжело нагруженных деталей машин и инструмента [Текст] / М. А. Гурьев, С. Г. Иванов, Е. А. Кошелева, А. Г. Иванов, А. Д. Грешилов, А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, Г. А. Околович // Ползуновский вестник. – 2010. – №1. – С.114–121.

Патенты РФ на изобретения

6. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей [Текст]: пат. 2345175 Рос. Федерация: МПК С 23 С 12/02, С 21 D 1/78/ А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, Б. Д. Лыгденов, С. А. Земляков, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова». – № 2007112368/02: заявл. 03.04.2007; опубл. 27.01.2009. Бюл. № 3.
7. Способ упрочнения деталей из штамповых сталей [Текст]: пат. 2360031 Рос. Федерация: МПК С 23 С 12/02/ А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, С. А. Земляков, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова». – № 2007127587/02: заявл. 18.07.2007; опубл. 27.06.2009. Бюл. № 18.
8. Способ упрочнения стальных деталей [Текст]: пат. 2381299 Рос. Федерация: МПК С 23 С 12/02/ А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев, Б. Д. Лыгденов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова». – №2008118705/ 02: заявл. 12.05.2008; опубл. 10.02.2010, бюл. №4.

Статьи, отражающие основное содержание работы

9. Гурьев, А. М. Упрочнение литой быстрорежущей стали термическим методом [Текст] / А. М. Гурьев, Ю. П. Хараев, М. А. Гурьев // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – №10. – С. 79–81.
10. Лыгденов, Б. Д. Активирование насыщающих порошковых смесей некарбидообразующими металлами [Текст] / Б. Д. Лыгденов, О. А. Власова, М. А. Гурьев // Ползуновский альманах. – №3. – 2006. – С. 32–33.
11. Иванов, С.Г. Разработка способа диффузионного боротитанирования деталей машин и инструмента [Текст] / С. Г. Иванов, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев О. А. Власова, А. М. Гурьев Материалы // IV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь –2007» / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. – С. 56–64.
12. Иванов, С. Г. Исследование процессов диффузионного насыщения сталей из смеси на основе карбида бора [Текст] / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, Е. А. Кошелева, О. А. Власова, М. А. Гурьев // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – № 3. – С. 55–56.
13. Guriev, A. M. Complex saturation of steels by boron and chrome / A. M. Guriev, S. G. Ivanov, O. A. Vlasova, E. A. Kosheleva, M. A. Guriev // International scientific conference “Nowadays, future and faced problems of metallurgy and machinery field”. Ulaanbaatar, 19–21 September, 2008. – P. 179–183.
14. Иванов, С. Г. Комплексное насыщение сталей бором и хромом – борохромирование [Текст] / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, Е. А. Кошелева, О. А. Власова, М. А. Гурьев // Ползуновский альманах. – 2008. – № 3. – С. 53–54.
15. Гурьев, А. М. Многокомпонентное диффузионное насыщение сталей из насыщающих обмазок [Текст] / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев // 6-я Всероссийская

научно-практическая конференция «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» / НГТУ. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. тех. ун-та, 2008. – С. 47–51.

16. Иванов, С. Г. Поверхностное легирование стали 25Л бором [Текст] / С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, О. А. Власова // VIII Всероссийская школа-семинар «Новые материалы. Создание, структура свойства– 2008» / ТПУ. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С. 141–143.

17. Лыгденов Б. Д., Влияние углерода и легирующих элементов на дюрометрические параметры борированного слоя [Текст] / Б. Д. Лыгденов, М. А. Гурьев, А. Д. Грешилов // Ползуновский альманах. – №3. – 2008. – С. 139–140.

18. Гурьев М. А., Упрочнение литых деталей поверхностным легированием [Текст] / М. А. Гурьев, О. А. Власова, А. М. Гурьев // Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии (СММТ, 2009)» / СПбГПУ. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 163–166.

19. Guriev, M. A. Surface alloying of steel [Текст] / M. A. Guriev, S. G. Ivanov, A. M. Guriev / 17 international conference production and management in the steel industry, Poland, Zakopane, 25–27.06.2009. P.12–14.

20. Гурьев, М.А. Поверхностное легирование стали бором [Текст] / М. А. Гурьев, С. Г. Иванов, А. М. Гурьев // Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» / Витебск, Беларусь 25–29 мая 2009 г.: издательский отдел ЦИТ ВГТУ УО "Витебский государственный технологический университет". – С. 195.

21. Лыгденов, Б. Д. Влияние технологических параметров борирования на изменение размеров деталей особой точности [Текст] / Б. Д. Лыгденов, Д. С. Фильчаков, М. А. Гурьев, А. А. Долгоров // VI Международная научная школа-конференция «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. Маркина В.Б.; Алт. гос. тех. ун-т им. И. И. Ползунова. – г. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 184–185.

22. Гурьев, М. А. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием на основе бора [Текст] / М. А. Гурьев, С. Г. Иванов, А. М. Гурьев // VI Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. Маркина В.Б.; Алт. гос. тех. ун-т им. И. И. Ползунова. – г. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 167–169.

23. Гурьев, М. А. Поверхностное упрочнение инструмента при литье по газифицируемым моделям [Текст] / М.А. Гурьев // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств: Сб. науч. тр. / Под ред. А.М. Гурьева и В.А. Маркова – Вып. 5. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 65–68.

24. Гурьев, М. А. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием на основе бора [Текст] / М. А. Гурьев // Ползуновский альманах – №2. – 2009. – С. 46–47.

25. Гурьев, А. М. Особенности комплексного диффузионного насыщения высоколегированных сталей бором и хромом [Текст] / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, А. Г. Иванов, М. А. Гурьев // Современные наукоемкие технологии – №1. – 2010. – С. 92–93.

26. Гурьев, А. М. Упрочнение сталей многокомпонентным диффузионным покрытием на основе бора [Текст] / А. М. Гурьев, А. Д. Грешилов, М. А. Гурьев, С. Г. Иванов, В. Е. Рогов // XIX Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 130-летию со дня рождения академика АН УССР Н. Н. Давиденкова 13 – 15 апреля 2010 г., Санкт-Петербург, – С.183–184.

27. Гурьев, А. М. Влияние добавок легирующих элементов в обложку на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного насыщения стали [Текст] / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, А. Г. Иванов // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – №7. – С. 170–172.

28. Кошелева, Е. А. Состав насыщающих смесей для комплексного диффузионного упрочнения тяжело нагруженных деталей машин и инструмента [Текст] / Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев, Е. А. Нестеренко, А. Г. Иванов, А. А. Долгоров // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин: Межвуз. сб. Выпуск 9 / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 47–55.

29. Лыгденов, Б. Д. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированной стали 45 [Текст] / Б. Д. Лыгденов, А. Д. Грешилов, Ю. П. Харавев, М. А. Гурьев, А. А. Долгоров // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2010. – №1. – С.79–83.

30. Гурьев, М.А. Поверхностное легирование бором и титаном литой стали 110Г13 [Текст] / М. А. Гурьев, С. Г. Иванов, А. М. Гурьев // XIX Петербургские чтения по проблемам прочности,

посвященные 130-летию со дня рождения академика АН УССР Н. Н. Давиденкова 13–15 апреля 2010 г., Санкт-Петербург, – С.180–182.

31. Гурьев, А.М. Исследование тонкой структуры борохромированного слоя на конструкционных и штамповых сталях [Текст] / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, А. Г. Иванов, А. Д. Грешилов, С. А. Земляков // Международная научно-техническая конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ'10) 22–24 сентября 2010 г., г. Санкт-Петербург Изд-во СПбГПУ. – С. 202–205.

32. Гурьев, М. А. Поверхностное упрочнение стальных деталей при литье по газифицируемым моделям [Текст] / М. А. Гурьев, Г. А. Околович // Ползуновский альманах – №1.– 2010.– С.102–106.

33. Гурьев, М.А. Оптимизация состава многокомпонентной насыщающей смеси на основе бора и хрома для поверхностного легирования сталей [Текст] / М. А. Гурьев, Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов // Ползуновский альманах – №1.– 2010.– С.131–135.

34. Гурьев, М. А. Упрочнение литых сталей поверхностным легированием из борсодержащих обмазок [Текст] / М. А. Гурьев, А. Г. Иванов, С. Г. Иванов, А. М. Гурьев // Успехи современного естествознания – №3.– 2010.– С.123–124.

35. Гурьев, М. А. Анализ влияния природы легирующих элементов в высоколегированных сталях на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного борирования [Текст] / М. А. Гурьев, А. М. Гурьев А. Г. Иванов, С. Г. Иванов, // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований – №5.– 2010, С. 155–157.

Издано в авторской редакции.

Подписано в печать 18.11.10. Формат 60х84 1/16.

Печать – ризография. Усл. п. л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ 2010 – 18

Издательство Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 656038, г. Барнаул, пр–т Ленина, 46.

Лицензия на издательскую деятельность ЛР№ 020822 от 21.09.98 г.