

На правах рукописи



Иванов Алексей Геннадьевич

**Разработка состава насыщающей смеси и технологии комплексного
борирования при газопламенном нагреве**

05.16.09 - «Материаловедение» (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гурьев Алексей Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ишков Алексей Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор
Плотников Владимир Александрович

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский
государственный университет технологий и
управления»

Защита состоится « 22 » декабря 2011 года в «14⁰⁰» часов на заседании диссертационного совета Д. 212.004.07 в ФГОУ 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 Федерального бюджетного государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Автореферат разослан «18» ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д. 212.004.07
кандидат технических наук, доцент



А. А. Бердыченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Внедрение новых технологических процессов в ряде случаев тормозится отсутствием материалов, способных работать в экстремальных условиях. Изыскание новых возможностей изменения комплекса физико-механических свойств металлов в заданном направлении является актуальной задачей современного материаловедения. Для решения этой задачи требуется совершенствования существующих и создания новых методов обработки металлов. В процессе эксплуатации наиболее интенсивным внешним воздействиям подвергаются поверхностные слои деталей и инструмента, поэтому зачастую структура и свойства именно поверхностных слоев оказывает важное влияние на работоспособность изделий в целом.

Одним из основных, широко известных и наиболее перспективных способов упрочнения поверхности стальных изделий является химико-термическая обработка (ХТО). Химико-термической обработкой изделиям можно придать такой комплекс эксплуатационных свойств, достижения которого объемным легированием или невозможно (азотирование, борирование), или экономически невыгодно (молибденирование, хромониобирование и др.). Ее применение экономически более выгодно, чем получение легированной стали с аналогичными свойствами и, как правило, может производиться на любом предприятии, имеющем термическое оборудование.

Химико-термическую обработку чаще всего проводят при высокотемпературной изотермической или изотермически-ступенчатой выдержке с полной перекристаллизацией стали в аустенитное состояние. Это приводит к перегреву – структура и механические свойства сталей, кроме твердости и износостойкости, ухудшаются. Есть и другие недостатки в технологии ХТО с высокотемпературной выдержкой в процессе насыщения: коррозия, высокая энергоёмкость процесса.

В настоящее время к перспективным методам ХТО относятся борирование, хромирование, титанирование и совмещенные процессы: боротитанирование, борохромирование и др. Эти способы ХТО более эффективны, чем традиционно используемые цементация, азотирование и цианирование практически по всем параметрам свойств поверхностных слоев материала. Так, например, боридные слои на сталях отличаются высокой износостойкостью, силицидные – кислотостойкостью, хромирование придает жаростойкость, а комбинированные покрытия, зачастую, совмещают в себе исходные свойства однокомпонентных покрытий и в некоторой степени нивелируют недостатки соответствующих однокомпонентных покрытий. Борохромирование, например, позволяет снизить хрупкость поверхностных слоев, повысить их жаростойкость по сравнению с борированными при практически одинаковой их твердости и износостойкости. Работоспособность борохромированных слоев в 1,50–1,75 раза выше, чем борированных. Однако, известные методы получения таких покрытий несовершенны и достаточно трудоемки. Такие покрытия обычно получают последовательным высокотемпературным насыщением этими элементами в электропечах. Известные процессы одновременного насыщения поверхности сталей бором и хромом описанные в литературе малоэффективны и недостаточно изучены, кроме того, отсутствует информация о влиянии газопламенного нагрева на процессы формирования таких покрытий. Решение этой проблемы является важной материаловедческой задачей.

Диссертационная работа выполнялась при поддержке Фонда содействия малым форм предприятий в научно-технической сфере по программе «СТАРТ-10» проект № 7893р/11425 и при поддержке Управления по экономической политике и Администрации Алтайского края – грант № 24.

Цель диссертационной работы. Разработка насыщающей смеси и технологии одновременного насыщения поверхности углеродистых сталей бором и хромом при газопламенном нагреве, на основе оптимизации ее состава и установления закономерностей структурообразования диффузионного слоя.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

– исследовать возможность получения многокомпонентных диффузионных покрытий на основе бора и хрома из насыщающих обмазок на сталях в условиях нагрева газовым пламенем;

– изучить влияние основных параметров процесса насыщения на состав и свойства получающихся диффузионных слоев;

– построить математическую модель влияния химического состава и содержания компонентов насыщающей смеси на состав и физико-механические свойства диффузионных слоев;

– разработать технологию химико-термической обработки поверхностей ножей для измельчения полипропилена с помощью газопламенного нагрева.

Научная новизна работы. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена совокупность научных положений, обеспечивающих новые технологические решения в упрочнении поверхностей сталей бором и хромом. В том числе:

1. Установлена возможность проведения процесса комплексного борохромирования углеродистых сталей (Ст3, 30, 45, У8, У10) при газопламенном нагреве. Показано, что газопламенный нагрев значительно ускоряет процессы комплексного боромирования, в режиме термоциклического насыщения диффузионный слой образуется в 40-50 раз быстрее, чем при изотермической химико-термической обработке в печи.

2. Созданы составы насыщающих сред для борохромирования углеродистых сталей в условиях газопламенного нагрева, содержащие 15–40 масс. % диборида хрома, 45–78 масс. % карбида бора и 7–15 масс. % Углерода.

3. Экспериментально исследованы и установлены общие закономерности и аналитические зависимости, связывающие механические свойства сталей с технологическими параметрами химико-термической обработки при газопламенном нагреве углеродистых сталей. Определены оптимальные режимы и составы насыщающих смесей газопламенного нагрева для борохромирования углеродистых сталей. Для одновременного борохромирования оптимален состав, содержащий 25 % масс. диборида хрома, 60 % масс. карбида бора, 15 % углерода и 2,5 % фторида натрия в качестве активатора. Окислительное пламя, имеющее повышенное содержание кислорода в отношении к пропану 0,55-0,70 значительно активизирует процесс насыщения, наиболее активно процесс насыщения протекает в интервале от 90 до 1800 секунд при температуре 900°C.

4. Исследованы особенности фазового состава и тонкой структуры полученных диффузионных слоев после борохромирования в условиях газопламенного нагрева.

Значение для теории и практики. Совокупность экспериментальных и теоретических результатов, полученных при проведении исследований, позволяет:

-разработать способы химико-термической обработки инструмента из углеродистых и легированных сталей при нагреве газовым пламенем с целью повышения его износо-

стойкости и ускорения процесса диффузионного насыщения бором и хромом;

-дать рекомендации по химико-термической обработке ножей для измельчения полипропилена в нестационарных условиях с использованием нагрева пропанокислородным пламенем;

-результаты исследований позволили разработать эффективную технологию комплексного насыщения бором и хромом ножей для измельчения полипропилена при газопламенном нагреве.

Предложена и разработана новая технология нанесения диффузионных покрытий на основе бора и хрома на поверхность быстро изнашиваемых стальных изделий – ножей для измельчения полипропилена. Применение разработанной технологии на упрочнения ООО «ИВКОМ» (г.Барнаул) позволяет улучшить их износостойкость в 5,2 раза.

Достоверность результатов обеспечивается применением современных методов исследования в материаловедении, необходимым и достаточным количеством экспериментального материала для корректной статистической обработки, сопоставлением полученных результатов с данными других авторов, совпадением теоретических расчетов и экспериментально полученных результатов.

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.

На защиту выносятся:

1. Разработанный способ одновременного поверхностного насыщения стальных изделий бором и хромом с использованием газопламенного нагрева.

2. Математические модели, описывающие влияние компонентов насыщающей среды на механические и эксплуатационные свойства комплексного упрочняющего покрытия и аналитические зависимости, связывающие технологические параметры процесса одновременного насыщения бором и хромом при газопламенном нагреве и эксплуатационные свойства упрочненных бором и хромом сталей.

3. Установленные закономерности структурных изменений и физико-механических свойств сталей Ст3, 30, 45, У8, У10 (микротвердость, толщина диффузионного слоя, износостойкость) с диффузионным покрытием на основе бора и хрома при их получении с использованием газопламенного нагрева.

Апробация работы: 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); Международной научной школе-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» (Барнаул, 2009); Общероссийской научной конференции «Новые технологии, инновации, изобретения» (Иркутск, 2010); Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов НФМ'10» (Санкт-Петербург, 2010); Вторые московские чтения по проблемам прочности материалов, посвященные 80-летию со дня рождения академика РАН Ю.А. Осипьяна (Москва, Черноголовка, 2011).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 19 печатных работах. Из них три статьи в научно-технических журналах, рекомендованных ВАК РФ

для публикации результатов исследований по кандидатским диссертациям. Получено положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 124 наименований и приложения. Работа содержит 155 страниц машинописного текста, включая 12 таблиц и 44 рисунка. В приложениях приведены документы о выдаче патента на изобретение, документы об апробации и внедрении результатов исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности проводимых исследований, отмечена научная новизна, практическая значимость и реализация результатов работы.

Первая глава посвящена анализу различных видов химико-термической обработки и изучению влияния способов ХТО на стойкость инструмента и деталей машин в различных условиях износа на основе литературных данных. Подробно рассмотрены вопросы по применению химико-термической для различных видов сталей. Выделены основные параметры химико-термической обработки при нагреве газовым пламенем. В качестве исследуемых материалов выбраны конструкционные стали Ст3, сталь 30, сталь 45, У8, У10 в силу того, что наиболее сильно влияют на результаты одновременного борхромирования такие элементы как хром и углерод.

Кроме того, использование процессов диффузионного упрочнения для высоколегированных сталей малоперспективны, так как удельное повышение ресурса работы в этом случае выражено слабо и сам способ химико-термической обработки является ни чем иным, как альтернативой объемному легированию с целью экономии ресурсов.

Современные технологии химико-термической обработки достаточно широко используют лишь несколько видов однокомпонентного (хромирование, алитирование, цинкование, цементация, азотирование) и двухкомпонентного (нитроцементация) упрочнения поверхности. Процесс борирования более предпочтителен чем цементация и азотирование с точки зрения повышения износостойкости, однако, боридные слои имеют такой существенный недостаток, как высокая хрупкость, что наряду со слабой его изученностью сдерживает широкое распространение процесса диффузионного борирования. Современные технологии диффузионного насыщения бором основываются, в основном, на работах отечественных исследователей, наибольший вклад в изучение борирования внесли: Г. В. Борисенок, Г. Н. Дубинин, А. Н. Минкевич, Г. В. Самсонов, Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов, Л. С. Ляхович, Л. А. Васильев, Е. И. Бельский, М. В. Ситкевич, Е. И. Понкратин, В. А. Стефанович, и др. Особенно много исследований и работ выполнено Л. Г. Ворошниным и возглавляемой им школой. При непосредственном участии и под руководством проф. Л. Г. Ворошниина исследованы процессы борирования в порошковых, газовых и жидких средах, даны математические и расчетные модели этих процессов, описаны кинетика, структура и свойства получаемых в каждом случае боридных покрытий на широком спектре материалов. Однако, многокомпонентное насыщение бором и другими элементами, как правило, ведут отдельно в силу высокого сродства бора к различным химическим элементам. В работах А. М. Гурьева и его учеников: Б. Д. Лыгденова, И. А. Гармаевой, Е. А. Кошелевой, С. Г. Иванова разработаны составы насыщающих сред и технологии насыщения, позволяющие проводить двух и многокомпонентное насыщение бором и другими элементами (хромом, титаном, вольфрамом, никелем и т. д.), при этом получая равномерные и работоспособные покрытия.

Кроме металлообрабатывающих заводов в современной России получили распространение малые (с числом рабочих до 10 человек) предприятия, которые генерируют значительный объем продукции как в сфере машиностроительного и сельскохозяйственного

производства, так и в других отраслях. Закономерно, что данные предприятия и являются потребителями различных рабочих органов и деталей машин, инструмента и при этом не имеют возможности содержать собственные вспомогательные производства. Наиболее простым, нетребовательным к оборудованию и квалификации рабочих способом нагрева является газопламенный нагрев. Кроме того, газопламенный нагрев – единственный способ нагрева, который можно применять в полевых условиях небольших фермерских хозяйств. Все это и предопределило направление исследований по разработке технологий диффузионного упрочнения бором с помощью газопламенного нагрева. Из всего вышеизложенного вытекают цель и задачи исследования.

Во второй главе характеризуются используемые в исследовании материалы, методы проведения экспериментов, применяемые методы исследования микроструктуры и механических свойств, рентгеноструктурного анализа.

Металлографические исследования упрочнённых образцов проводили на оптических МИМ-7, МИМ-10, “Neophot-32” и электронных микроскопах: растровом BS-300 “Tesla” и просвечивающем ЭМ-125К с использованием гониометрической приставки и при ускоряющем напряжении 125 кВ, а также атомно-силовом микроскопе «FEMTOSKAN». Для изучения тонкой микроструктуры диффузионных слоев кроме электронно-лучевой, применялась атомно-силовая микроскопия в режимах контактной атомно-силовой микроскопии и в режиме бесконтактной резонансной атомно-силовой микроскопии.

ДюрOMETрические исследования проводили на микротвердомере типа ПМТ-3. Испытания на износостойкость в лабораторных условиях проверялись на машине Амслера по методикам, описанным в ГОСТ 17367–71.

Съемки рентгенограмм проводили на дифрактометре ДРОН-1,5 в монохроматическом Fe-K_α излучении с автоматической записью на диаграммную ленту.

В третьей главе представлены математические и расчетные модели процесса комплексного борирования при газопламенном нагреве для Ст3 и многокомпонентной насыщающей обмазки для газопламенного нагрева.

Анализ результатов статистической обработки экспериментальных данных показывает, что при газопламенном нагреве основными критериями, определяющими износостойкость диффузионных борохромовых слоев, кроме химического состава обмазки, являются: средняя температура процесса насыщения, время выдержки при этой температуре, толщина слоя нанесенной на поверхность упрочняемого изделия обмазки и соотношение газов, соответствующее различным типам пламени (окислительное либо восстановительное).

Математические модели, описывающие зависимость износостойкости и толщины диффузионного слоя от варьируемых факторов и имеют следующий вид:

$$\varepsilon = 0,096X_1 + 30,325X_2 + 1,301X_3 + 0,006X_4 - 105,399,$$

$$h = 0,552X_1 + 255X_2 + 12,667X_3 + 0,05X_4 - 687,357,$$

где ε – относительная износостойкость (эталон – закаленная низкоуглеродистая сталь У8), h – толщина диффузионного слоя, мкм, X_1 – температура процесса насыщения, °С; X_2 – соотношение газов, в долях единицы (содержание кислорода в отношении к пропану), X_3 – толщина обмазки, мм, X_4 – время насыщения, сек.

Указанные факторы варьировали в следующих пределах: X_1 – от 850 до 1050°С; X_2 – от 0,4 до 0,6; X_3 – от 2 до 5 мм; X_4 – от 10 до 30 минут.

Математические модели, позволяют рассчитать свойства диффузионного слоя при заданных значениях факторов. Установлено, что:

1. При толщине нанесенной обмазки менее 2 мм происходит сквозное ее оплавление и схватывание с металлом. Полученная таким образом масса обладает высокой коррозионной активностью.

2. Наиболее благоприятный тип пламени для газопламенной ХТО - окислительный при отношении кислорода к пропану в интервале 0,55 – 0,70. Такое пламя активизирует протекание реакций.

3. Наиболее активное образование диффузионного слоя происходит во временном интервале с 90 до 1800 секунд. При этом получаемое покрытие обладает минимумом дефектов и максимальной износостойкостью на единицу толщины.

Для аналитического описания зависимости изучаемого свойства от химического состава насыщающей смеси в многокомпонентных системах более удобен метод симплексных решеток. Метод позволяет получать не только математическую модель исследуемой зависимости, но и ее графическую интерпретацию (рисунок 1). Данный метод был применен при изучении влияния состава многокомпонентных насыщающих сред на толщину диффузионного слоя борхромовых покрытий на стали Ст3.

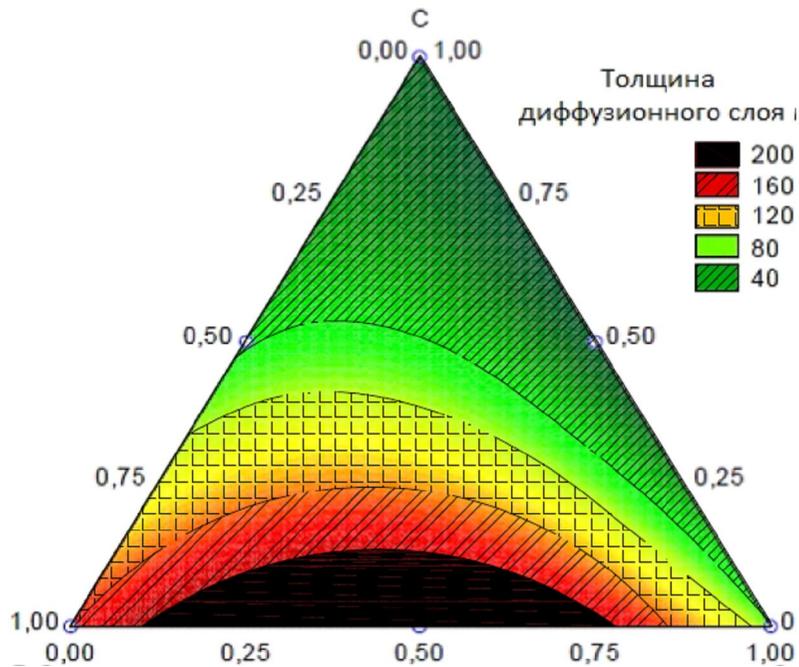


Рисунок 1 – Концентрационный треугольник оптимизации состава для борхромового покрытия по толщине диффузионного слоя

Математическая модель третьей степени, учитывающая все взаимодействия факторов выглядит следующим образом:

$$h = 51,81 \cdot m_{B_4C} + 27,69 \cdot m_{CrB_2} + 7,5 \cdot m_C + 28,08 \cdot m_{B_4C} \cdot m_{CrB_2} - 10,43 \cdot m_{CrB_2} \cdot m_C - 5,98 \cdot m_{B_4C} \cdot m_C$$

Где h – толщина диффузионного слоя;

m – значения процентных отношений масс соответствующих компонентов к общей

массе насыщающей смеси.

Из рисунка 1 видно, что наиболее оптимальны составы, содержащие 15 – 40 % масс. диборида хрома, 45 – 78 % масс. карбида бора и 7 – 15 % углерода.

Для проверки расчетов были высчитаны уровни значимости для каждого слагаемого модели, для наглядности представленные в виде диаграммы Парето эффектов, на которой все факторы и взаимодействия представлены в виде гистограмм вклада каждого в величину отклика, вертикальная линия на данной диаграмме показывает уровень значимости с доверительным интервалом $\pm 5\%$ (рисунок 2).

Для проверки правильности и точности построенной модели также были проведены контрольные эксперименты, которые подтвердили расчетные значения. Вероятность совпадения контрольной и расчетной толщин диффузионного слоя составляет 0,997. Графическая интерпретация приведена на рисунке 3, линия – расчетные значения, точки – экспериментальные.

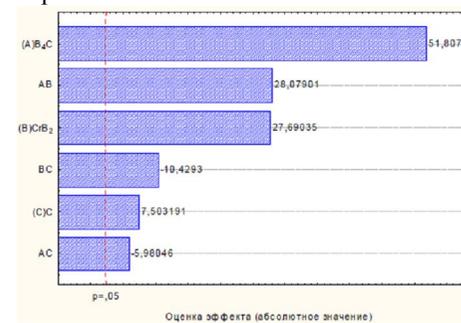


Рисунок 2 – Диаграмма Парето эффектов



Рисунок 3 – Корреляционная кривая наблюдаемых (экспериментальных) и предсказанных (расчетных) значений толщины диффузионного слоя

Четвертая глава посвящена изучению влияния химического состава образцов и параметров насыщения на структуру, фазовый состав и физико-механические свойства диффузионных слоев, образующихся при газопламенном нагреве.

Влияние времени насыщения на микроструктуру и фазовый состав полученных диффузионных слоев показано на рисунке 4.

Как видно из рисунка, в начале процесса, когда выдержка при температуре насыщения не превышает 1 минуту, образующийся диффузионный слой еще не имеет характерного для боридного слоя игольчатого строения, однако уже имеет толщину порядка 10-15 мкм, переходная зона при этом также достаточно четко просматривается и ее протяженность при этом приблизительно в 3 раза больше толщины слоя. При выдержке от 3 до 5 минут и более слой приобретает характерное для боридных слоев игольчатое строение и его толщина при этом увеличивается до 25-35 мкм, переходная зона при этом значительно больше самого слоя (протяженность ее достигает 100-150 мкм) и просматривается достаточно четко при применении методов цветного травления. Начиная с времени выдержки при температуре насыщения приблизительно в 4-5 минут микроструктура и внешний вид боридного слоя не изменяется, толщина его достигает 40-50 мкм. Переходная зона при этом не просматривается и определить ее протяженность становится возможным только путем замеров микротвердости.

Отдельно стоит обратить внимание на сердцевину образца. При времени выдержки, превышающем 8 минут в результате высокой скорости роста температуры образца не происходит увеличения размеров зерна сердцевины, приводящего к снижению ее пластичности и ударной вязкости, что выгодно отличает газопламенное насыщение от печного изотермического. Борированные газопламенным способом изделия имеют в 1,2–1,7 раз большую ударную вязкость, чем борированные в изотермических условиях, и это позволяет им работать в более экстремальных условиях. Однако наряду с положительным эффектом увеличения ударной вязкости, газопламенное насыщение имеет и отрицательную сторону – нестабильную толщину слоя, а при несоблюдении рекомендуемых режимов даже так называемый «пятнистый» слой.

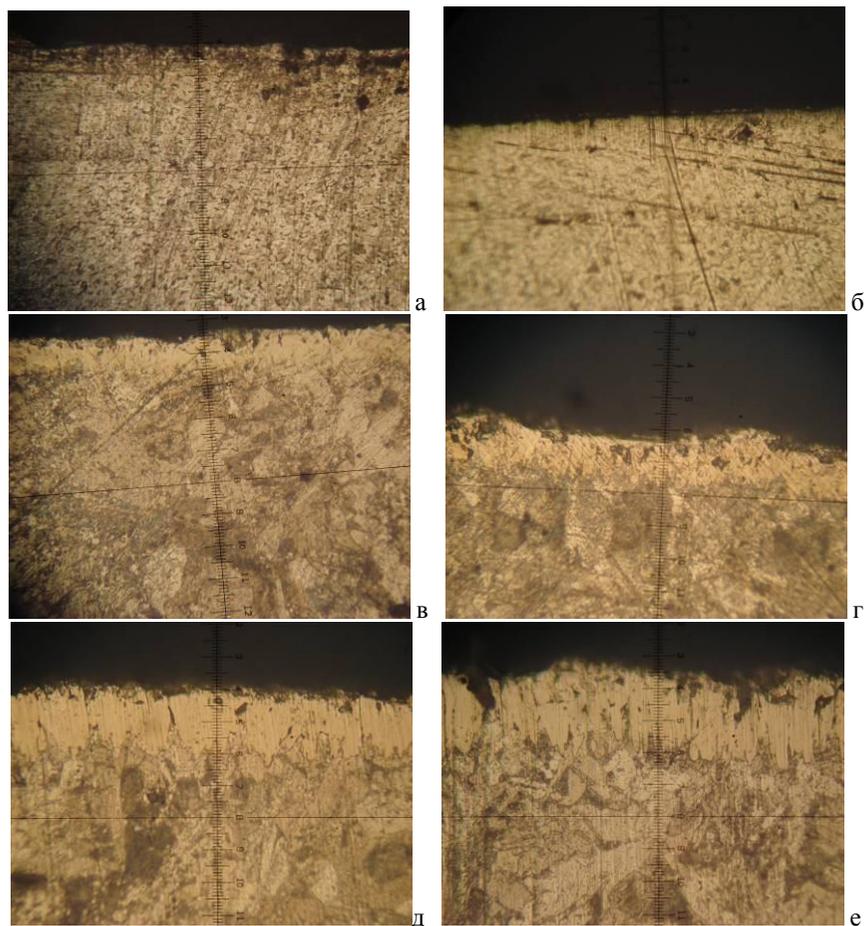


Рисунок 4 – Микроструктура диффузионного боридного слоя, полученная в результате газопламенного скоростного нагрева. а – 1 минута, б – 3 минуты, в – 5 минут, г – 10 минут, д – 15 минут, е – 20 минут, ж – 30 минут (температура 950°С, цена малого деления шкалы – 10 мкм).

График роста толщины диффузионного слоя показан на рисунке 5. На каждую точку графика приходилось не менее 10 измерений толщины слоя, исходя из которых высчитывалось среднее арифметическое.

Как видно из приведенных фотографий микроструктуры и графика кинетики роста толщины диффузионного слоя, наибольшая скорость роста диффузионного слоя наблюдается при времени выдержки от 90 до 1800 секунд. При этом образуются диффузионные слои достаточной для работы изделия толщины.

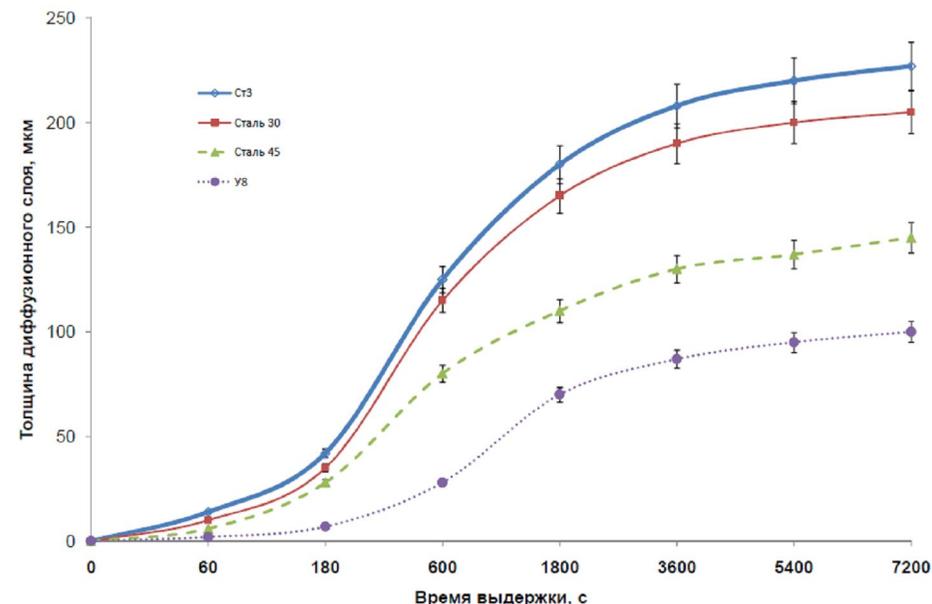


Рисунок 5 – Кинетика роста слоя на стали при диффузионном борохромировании с помощью газопламенного нагрева

С помощью атомно-силового микроскопа были проведены исследования микроструктуры упрочненного бором и хромом слоя, представленные на рисунке 6.

Данный прибор позволяет исследовать тонкую микроструктуру материала с разрешающей способностью до 10^{-15} м, однако при этом наибольшее поле сканирования не превышает 10 мкм. На рисунке 6 приведены фотографии участков боридного слоя, полученные с помощью атомно-силового микроскопа в режиме контактной атомно-силовой микроскопии. Данный режим сканирования позволяет исследовать рельеф сканируемой поверхности, измерять латеральные (боковые) силы трения и др. Из приведенных изображений тонкой микроструктуры видно, что боридные иглы не совсем гладкие, а представляют собой конгломераты частиц, преимущественно округлой формы и имеющих размеры от 10 до 450 нм. Причем, в части боридного слоя, находящегося ближе к основному металлу (рисунок 6а) размер частиц меньше, в то время как в приповерхностных частях боридного слоя размер может достигать 600 нм. Из рисунка 6б так же видно, что в случае срастания, боридные иглы на тонком уровне все равно остаются разделенными, так как

граница раздела в сотни и даже тысячи раз больше границ раздела между отдельными конгломератами частиц. Этим можно объяснить более высокие свойства борохромированного слоя по сравнению с борированным.

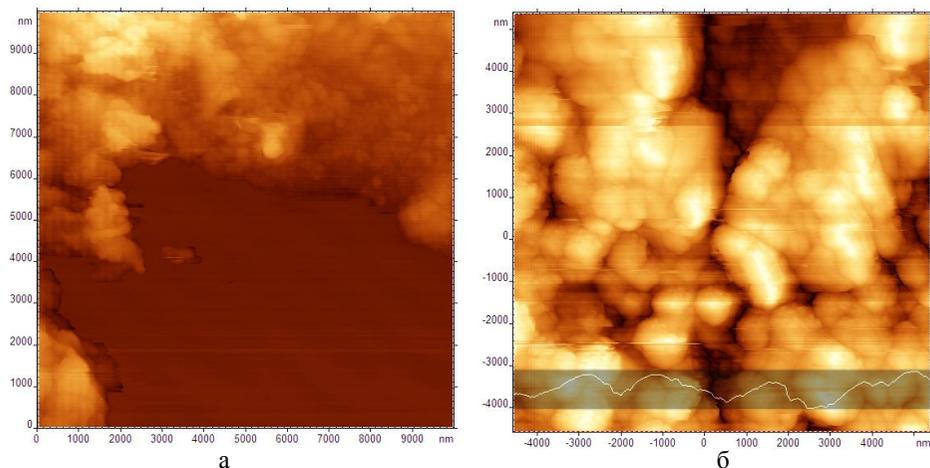


Рисунок 6 – Микроструктура борохромированного слоя, полученная с помощью атомно-силового микроскопа «FEMTOSKAN»: а – граница боридного слоя и переходной зоны, б – сопряжение двух боридных игл

На исследованных сталях диффузионный слой состоит преимущественно из борида железа Fe_2B , лишь на поверхности встречаются небольшие включения борида FeB , в небольших количествах встречаются еще 3 фазы: бориды железа FeB_2 и Fe_8B , карбоборид $\text{Fe}_7\text{C}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ и бориды хрома. Борид CrB_2 обнаруживается как методом РСА, так и методом ПЭМ. На поверхности материала в случае образования больших количеств моноборида железа частицы борида Fe_2B и CrB_2 располагаются по границам кристаллов борида FeB и имеют, в основном, округлую форму (рисунок 7). Размеры таких частиц, как правило, не превышают 10–20 нм.

В результате проведенных испытаний на износостойкость при абразивном износе выявлено, что износостойкость литой борохромированной стали 30Л превосходит износостойкость закаленной и низкоотпущенной стали У8 при адгезионном износе в 37,82 раза, борохромированной в режиме ХТО стали 30 (Сталь 30 ХТО на рисунке 8) – в 12,23 раза, борохромированной при газопламенном нагреве стали 30 (Сталь 30 ГПХТО на рисунке 8) – в 8,25 раз, сталь 30, подвергнутая закалке в соленой воде (Сталь 30 ТО) – взята в качестве вспомогательного эталона.

Испытания на износостойкость проводили на машине Амслера. При испытаниях на абразивную износостойкость в качестве контртела использовали абразивную шкурку с размером частиц 100–120 мкм, наклеенную на стальной диск. Нагрузка на испытуемый образец при этом составляла 4Н.

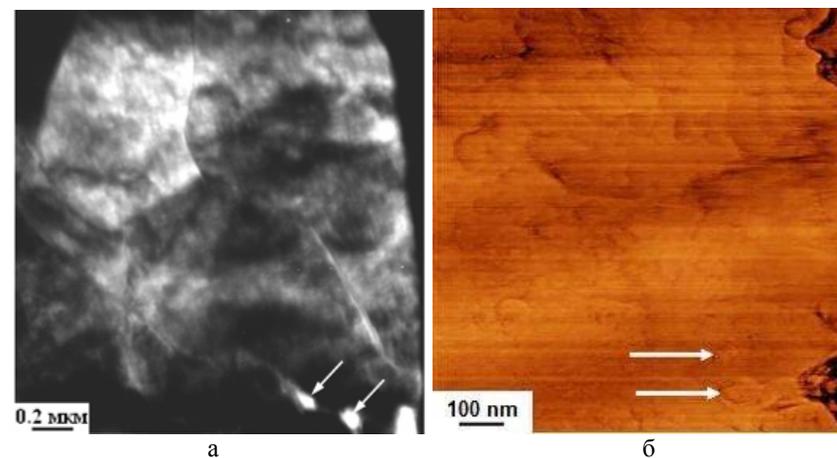


Рисунок 7 – Тонкая структура борированной стали. Изображение получено на расстоянии 10-20 мкм от поверхности образца: а – методами электронной микроскопии, б – методами атомно-силовой микроскопии. Белыми стрелками отмечены частицы боридов Fe_2B и CrB_2 , расположенные на границах кристаллов FeB

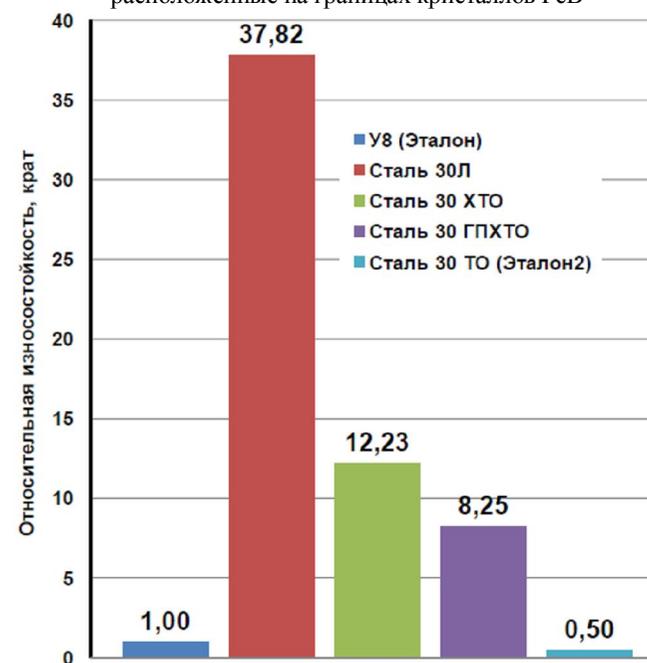


Рисунок 8 – Сравнительная износостойкость борохромированной стали 30X, упроченной разными способами, относительно износостойкости стали У8, подвергнутой закалке и низкому отпуску (твердость 51-52 HRC)

Несмотря на то, что химико-термическая обработка в режиме газопламенного нагрева имеет самую низкую износостойкость по сравнению с другими методами (в 4,58 раза ниже борхромирования в процессе литья и в 1,5 раза ниже борхромирования с помощью печного нагрева), данный вид термообработки имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- ХТО при газопламенном нагреве можно проводить в нестационарных условиях;
- данный способ ХТО имеет самые низкие требования к оборудованию и может найти наиболее широкое применение.

На рисунке 9 представлен график распределения микротвердости диффузионных слоев, нанесенных различными способами: Сталь 30 ХТО – диффузионное насыщение в камерной печи при температуре 950 °С в течение 2,5 ч; Сталь 30Л – насыщение происходило в процессе литья по газифицируемым моделям; Сталь 30 ГПХТО насыщалась при помощи газопламенного нагрева в течение 1200с при температуре поверхности изделия от 820 до 980 °С. Содержание диффузионно-активных атомов бора и хрома во всех обмзках было выбрано одинаковым, отличие состояло лишь в методе насыщения.

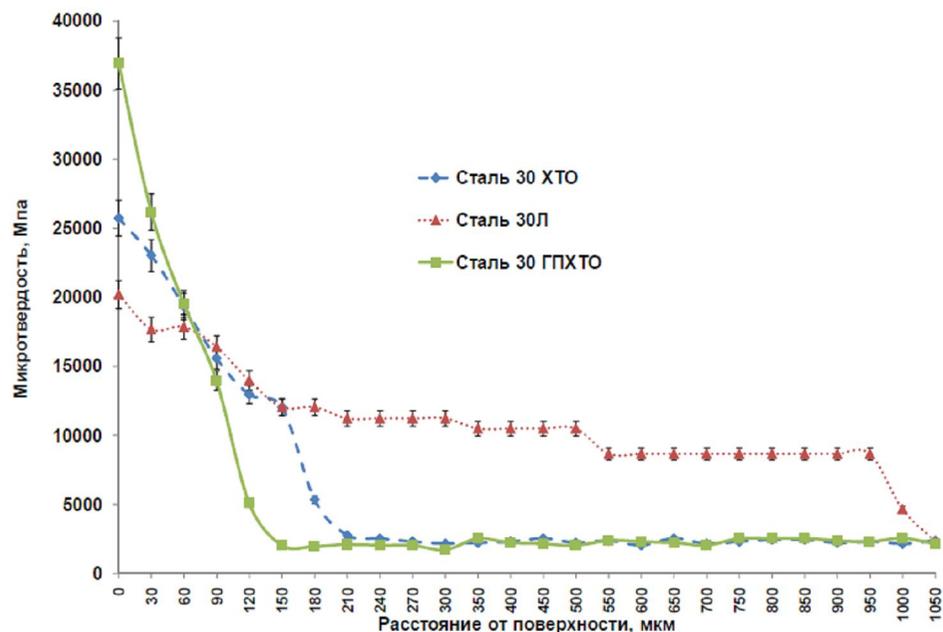


Рисунок 9 – Распределение микротвердости диффузионного слоя при различных способах насыщения

Как видно из представленного графика, наибольшую толщину имеет диффузионный слой, полученный на литой стали в процессе изготовления образца, однако микротвердость его несколько ниже микротвердости диффузионного слоя, полученного насыщением в камерной печи и значительно (более чем в 1,5 раза) уступает микротвердости слоя, полученного при газопламенном нагреве. При этом распределение толщин диффузионных слоев обратно микротвердости: наибольшую толщину имеет покрытие, полученное в

процессе литья (в 5 раз больше, чем при ХТО и в 6,5 раз – чем при насыщении с нагрева газовым пламенем).

Выявлено, что износостойкость при борировании, сопоставима с борохромированием при газопламенном нагреве, но во много раз длительнее, чем при газопламенном нагреве, и, кроме того, газопламенный нагрев – единственный метод, который может применяться в нестационарных условиях и при этом имеет невысокую стоимость. На ООО «ИВКОМ» методом диффузионного борохромирования при газопламенном нагреве были упрочнены ножи из стали У10 для измельчения полипропиленовых корпусов аккумуляторных батарей, стойкость которых увеличилась в 5,2 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Методами оптической и электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа исследованы особенности фазового состава и тонкой структуры полученных при газопламенном нагреве диффузионных слоев на углеродистых сталях.

2. Установлено, что процесс диффузионного борохромирования при газопламенном нагреве принципиально возможен. Показано, что газопламенный нагрев значительно ускоряет процессы комплексного борирования, кроме того в результате высокой скорости роста температуры образца не происходит увеличения размеров зерна сердцевины, приводящего к снижению ее пластичности и ударной вязкости, что выгодно отличает газопламенное насыщение от печного изотермического. Борохромирование газопламенным способом изделия имеют в 1,2–1,7 раз большую ударную вязкость, чем борохромированные в изотермических условиях, и это позволяет им работать в более экстремальных условиях.

3. Исследование насыщающей способности новых активных сред для ХТО показало следующее:

- процесс насыщения бором и хромом с применением в качестве источника тепла газового пламени возможен только при использовании самозащитных обмазок.
- окислительное пламя, имеющее повышенное содержание кислорода в отношении к пропану 0,55–0,70 значительно активизирует процесс насыщения.
- наиболее активно процесс насыщения протекает в интервале от 90 до 1800 секунд от прогрева до температуры 900°С.

Определено оптимальное сочетание и количественное содержание компонентов насыщающей среды для поверхностного упрочнения сталей в условиях скоростного газопламенного нагрева. На основе изученных представлений о поведении сталей с диффузным покрытием разработаны новые составы обмазок для многокомпонентного насыщения и рекомендованы для них оптимальные режимы химико-термической обработки. Для одновременного борохромирования оптимален состав, содержащий 25% масс. диборида хрома, 60% масс. карбида бора, 15% углерода и 2,5% фторида натрия в качестве активатора.

5. Предложены математические модели, описывающие процесс одновременного насыщения бором и хромом при газопламенном нагреве.

6. Установлены расчетные модели, позволяющие установить параметры упрочненного слоя в зависимости от состава насыщающей смеси и значений технологических факторов процесса нагрева.

Совокупность экспериментальных и теоретических результатов, полученных при

проведении исследований, позволяет:

-разработать способы химико-термической обработки инструмента из углеродистых и легированных сталей при нагреве газовым пламенем с целью повышения его износостойкости и ускорения процесса диффузионного насыщения бором и хромом;

-дать рекомендации по химико-термической обработке ножей для измельчения полипропилена в нестационарных условиях с использованием нагрева пропано-кислородным пламенем.

Результаты исследований позволили разработать эффективную технологию комплексного насыщения бором и хромом ножей для измельчения полипропилена при газопламенном нагреве и повысить их износостойкость в 5,2 раза.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Иванов, А.Г. Комплексное диффузионное упрочнение тяжело нагруженных деталей машин и инструмента [Текст] / Гурьев М. А., Иванов А.Г., Иванов С. Г., Кошелева Е.А., Грешилов А. Д., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Околович Г.А. // Ползуновский вестник, №1, 2010. - С. 114-121.

2. Гурьев, А.М. Многокомпонентное диффузионное упрочнение поверхности деталей машин и инструмента из смесей на основе карбида бора [Текст] / Гурьев А.М., Грешилов А.Д., Кошелева Е.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Долгоров А.А. // «Обработка металлов», №2.- 2010.- С. 19-23.

3. Кошелева, Е.А. Технология многокомпонентного диффузионного упрочнения поверхности деталей машин и инструмента для энергетического машиностроения из смесей на основе карбида бора / Кошелева Е.А, Иванов С.Г., Нестеренко Е.А., Гурьев М.А., Земляков С.А., Власова О.А., Иванов А.Г. // Ползуновский вестник, №1, 2010.- С.106-113.

Патенты РФ на изобретения

4. Способ изготовления и упрочнения деталей из чугунов и сталей [Текст]: Положительное решение о выдаче патента на изобретение РФ 2010145915/02(066190)

Статьи, отражающие основное содержание работы

5. Кошелева, Е.А. Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном борохромировании и боротитанировании инструментальных сталей [Текст] / Кошелева Е.А., Нестеренко Е.А., Иванов А. Г., Гурьев А.М. // Труды 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: Типография АлтГТУ, 2009.- С. 179- 183.

6. Иванов, А.Г. Влияние химического состава упрочняющей смеси при диффузионном насыщении бором, хромом, титаном на структуру и свойства низкоуглеродистых сталей [Текст] / Иванов А.Г., Гурьев А.М. // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 4-х частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Часть 1.- С.190-192.

7. Кошелева, Е.А. Разработка химического состава насыщающей смеси при диффузионном упрочнении инструментальных сталей [Текст] / Кошелева Е.А., Иванов А.Г., Гурьев А.М // Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2009 Труды Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С.179-182.

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

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

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

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

12. Гурьев, А.М. Структура и свойства упрочненной бором и бором совместно с титаном поверхности штамповых сталей 5ХНВ и 5Х2НМВФ [Текст] / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Лыгденев Б.Д., Земляков С.А., Долгоров А.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения, №1. - 2010. - С.27-31.

13. Иванов, С.Г. Повышение износ- и коррозионной стойкости стальных деталей методами комплексного бороникелирования и борвольфрамирания [Текст] / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Земляков С.А., Иванов А.Г., Гурьев А.М. // тезисы докладов Открытой школы-конференции стран СНГ - Уфа, Башкирский государственный университет, 2010. - С.226.

14. Иванов, А.Г. Интенсификация процессов поверхностного легирования изделий из железоуглеродистых сплавов [Текст] / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Гурьев А.М., Земляков С.А., Иванов А.Г. // Современные наукоемкие технологии №9, 2010. - С.101 – 102.

15. Гурьев, А.М. Исследование тонкой микроструктуры борохромированного слоя на конструкционных и штамповых сталях [Текст] / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Грешилов А.Д., Земляков С.А. // Материалы международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ'10) Санкт-Петербург Изд-во СПбГПУ. - С. 202-205.

16. Гурьев, А. М. Повышение эксплуатационных свойств стальных изделий в полевых условиях [Текст] / Гурьев А. М., Иванов А. Г., Марков П. А., Иванов С. Г. // Ползуновский альманах №1, 2010. - С. 205 – 206.

17. Иванов, А.Г. Повышение износ-и коррозионной стойкости стальных деталей методами комплексного бороникелирования и борвольфрамирания [Текст] / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Земляков С.А., Иванов А.Г., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения №4, 2010, С.108 -111.

18. Иванов, А.Г. Многокомпонентное комплексное диффузионное упрочнение сталей бором совместно с титаном, никелем и вольфрамом [Текст] / Иванов А.Г., Гурьев А.М. // Материалы 9-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. - С.175-176.

19. Иванов, А.Г. Интенсификация процессов многокомпонентного комплексного борирования [Текст] / Иванов А.Г. // Тезисы докладов вторых московских чтений по проблемам прочности материалов, посвященных 80-летию со дня рождения академика РАН Ю.А. Осипьяна: Типография ИПХФ РАН, г. Черноголовка, 2011. – С. 68.