

На правах рукописи



Кошелева Елена Алексеевна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
ДИФФУЗИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ БОРОМ И ХРОМОМ**

Специальность 05.02.01 – «Материаловедение в машиностроении»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2009

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гурьев Алексей Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Демьянов Борис Федорович

кандидат технических наук
Антуфьев Юрий Николаевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Сибирский государственный
индустриальный университет»

Защита состоится «12» ноября 2009 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.07 ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

Е-mail: berd50@mail.ru

Факс: 8(3852) 36-84-60

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

Автореферат разослан «9» октября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А. А. Бердыченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В процессе эксплуатации стальных деталей 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. Одним из перспективных способов упрочнения поверхности стальных изделий является химико-термическая обработка (ХТО).

Диффузионное упрочнение стали экономически более выгодно, чем получение легированной стали с аналогичными свойствами и, как правило, может производиться на любом предприятии, имеющем термическое оборудование. Также возможно совмещение термической и химико-термической обработки в единый процесс. В отдельных случаях, когда требуется упрочнение не всей поверхности, а только отдельных участков деталей, химико-термическая обработка из обзоров является практически единственно возможной в сравнении с другими способами.

Исследования воздействия насыщающих сред в виде обзоров 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. Так, например, боридные слои на сталях отличаются высокой износостойкостью, хромирование придает жаростойкость, а комбинированные покрытия совмещают в себе исходные свойства однокомпонентных. Работоспособность борохромированных слоев в 1,50–1,75 раза выше, чем борированных. Однако, известные методы получения таких покрытий несовершенны и достаточно трудоемки.

Дальнейшее развитие технологии и расширение фронта внедрения разработанных методов упрочняющих технологий требуют систематизации, унификации различных методов и выработки практических рекомендаций по эффективному применению их в конкретных эксплуатационных условиях.

Повышение работоспособности деталей машин и механизмов, инструмента и технической оснастки, их надежности и долговечности обеспечивается в определенной мере оптимизацией технологии нанесения борсодержащих покрытий, а также собственно химического состава насыщающей смеси.

Цель диссертационной работы. Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и инструмента за счёт применения установленных закономерностей структурообразования и свойств в сталях в изотермических и термоциклических условиях насыщения, а также разработка и оптимизация состава насыщающей смеси для комплексного диффузионного борохромирования сталей, проводимого из обзоров.

Для достижения цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследованы структуры стали и фазовый состав полученных диффузионных слоев и их физико-механических свойств после проведенного комплексного насыщения бором и хромом.
2. Изучен характер износа упрочненных слоев для выяснения особенностей разрушения диффузионных покрытий в процессе эксплуатации в различных условиях.
3. Изучено влияние параметров режима насыщения при диффузионном борохромировании (состав стали, состав смеси, температура процесса, длительность насыщения) на структуру и физико-механические свойства поверхностных слоев стали.

4. Определено оптимальное сочетание компонентов насыщающей смеси для проведения процесса упрочнения, а также определены предварительные ограничения для содержания каждого компонента в обзажке в процентах от общей массы.

5. Установлены аналитические зависимости (математические модели), связывающие компоненты насыщающей смеси с механическими свойствами сталей после диффузионного борохромирования.

6. На основе изученных представлений о поведении сталей с диффузным покрытием, и, исходя из полученных математических моделей, разработан новый состав обзажки для диффузионного борохромирования сталей в изотермических и термоциклических условиях насыщения.

Научная новизна работы.

1. Установлено положительное влияние циклического теплового воздействия с фазовыми $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращениями в интервале температур 600–1150 °С на интенсификацию диффузионных процессов при насыщении поверхности железоуглеродистых сплавов бором совместно с хромом. Показано, что циклический нагрев и охлаждение в интервале температур 600–1000 °С с выдержкой от 1 мин до 1 ч и количестве циклов от 3 до 20 значительно (до 2-х раз) ускоряют процесс борохромирования сталей (конструкционные стали Ст3, 30Х, 30ХМ и инструментальные стали У8 и 5ХНМ).

2. Установлены аналитические зависимости, связывающие компоненты состава насыщающей смеси (феррохром (FeCr), карбид бора (B_4C), графит, бентонит, фторид аммония (NH_4F)) с эксплуатационными и физико-механическими свойствами сталей (микротвердость, износостойкость, толщина диффузионного слоя) после диффузионного борохромирования методами ХТО и ХТЦО.

3. Разработан новый состав насыщающей среды для поверхностного упрочнения углеродистых и легированных сталей одновременным насыщением бором и хромом, содержащий феррохром (FeCr), карбид бора (B_4C), графит, бентонит, фторид аммония (NH_4F) (50–60 масс. % B_4C + 15–25 масс. % FeCr + 2–3 масс. % NH_4F + 10–15 масс. % мелкодисперсного графита + 5–7 масс. % бентонита). Использование разработанной технологии диффузионного упрочнения позволяет улучшить эксплуатационные свойства, в частности износостойкость, деталей машин и инструмента до 2,5-3,0 раз (в сравнении с ранее используемыми способами), а также уменьшить трудоемкость процесса упрочнения до 3,0 раз.

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

- обоснованно разрабатывать способы химико-термической и химико-термоциклической обработки деталей машин и инструмента из углеродистых и легированных сталей с целью повышения их износостойкости;

- корректировать традиционные технологические процессы упрочнения борохромированием инструмента из стали с целью повышения его свойств до уровня твердосплавного инструмента.

Проведенные испытания штамповых вставок для горячего деформирования из стали 5ХНМ на ООО «Алтайский завод прецизионных изделий» (г. Барнаул), упрочненных с помощью разработанной технологии, показали, что стойкость после диффузионного борохромирования повышается в 2,5 раза, а трудоемкость проведения упрочнения уменьшается в 3,0 раза.

Замена на ООО «Алтайский завод прецизионных изделий» (г. Барнаул), защитных пластин для дробеметной установки, изготовленных из высокохромистого чугуна ЧХ32, на пластины из стали 30Х, упрочненных 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 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 зависимости физико-механических и эксплуатационных свойств (микротвердость, износостойкость, толщина диффузионного слоя) сталей Ст3, 30Х, 30ХМ, У8 с диффузионными покрытиями на основе бора и хрома от режимов насыщения (температура, время, химический состав насыщающей обмазки).

2. Аналитические зависимости, связывающие компоненты насыщающей смеси с механическими свойствами сталей после комплексного диффузионного борохромирования.

3. Разработанный способ диффузионного поверхностного упрочнения, заключающийся в нагреве и выдержке упрочняемого изделия в термической печи при температуре 1050 °С в обмазке, содержащей феррохром, карбид бора, фторид аммония, бентонит и мелкодисперсный графит.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: II–III Научных международных конференциях «Актуальные проблемы науки и образования» (Куба, 2007–2008); IV–VI Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Барнаул, 2007–2009); VIII Miedzynarodowa Konferencja naukowa «Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej», Czestocowa (Польша, 2007); Научной международной конференции «Перспективы развития вузовской науки» (Сочи, 2007); Научной международной конференции «Современные материалы и технические решения» (Италия, 2007); V Научной международной конференции «Инновационные технологии» (Таиланд, 2008); IV-я Евразийской научно-практической конференции "Прочность неоднородных структур ПРОСТ–2008" (Москва, 2008); XIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2008); VI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (Новосибирск, 2008); Международной российско-японско-казахстанской научной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Усть-Каменогорск, 2008); International scientific conference “Nowadays, future and faced problems of metallurgy and machinery field”, Ulaanbaatar (Монголия, 2008); IX Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штампового производств» (Барнаул, 2008); VI Международной конференции «Фундаментальные исследования» (Хорватия, 2009), Всероссийской конференции «Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2009» (Томск, 2009), VI Международной школе-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» (Барнаул, 2009).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 27 печатных работах, из них: одна статья в издании, рекомендованном ВАК РФ; два патента РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 135 наименований и приложения, содержит 165 страниц машинописного текста, включая 8 таблиц и 49 рисунков.

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 виды химико-термической обработки металлов. Изучены физико-химические процессы, обеспечивающие обогащение изделия элементами из внешней среды при ХТО. Проанализированы основные методы ХТО. Приведена классификация методов и способов борирования сталей, а также анализ внутренних процессов, происходящих при борировании. Даны зависимости структуры, строения и состава упрочненных поверхностей от технологических параметров процесса борирования. Подробно рассмотрено и изучено влияние углерода и легирующих элементов на фазовый состав различных диффузионных слоев. Проведен аналитический обзор существующих способов борхромирования и боротитанирования. Описаны принципы ТЦО и ее разновидности. Рассмотрено влияние термоциклической обработки на физико-механические свойства сталей. Изучена эффективность объединения процессов ХТО и ТЦО в единый процесс ХТЦО. 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 конструкционные стали Ст3, 30Х, 30ХМ, инструментальная сталь У8, штамповая сталь 5ХНМ. Приведен химический состав компонентов насыщающей смеси применяемой для диффузионного насыщения (карбид бора, бориды хрома и титана, и др.). Процесс химико-термической и химико-термоциклической обработки осуществлялся из насыщающих обмазок (паст) нанесенных на поверхность упрочняемых деталей и образцов.

После проведения процессов диффузионного насыщения изучали структуру, фазовый и химический состав боридных слоев металлографическим методом.

Металлографическое исследование проводили на оптических микроскопах: МИМ–7, МИМ–10, Neophot–21 и электронном растровом микроскопе BS–300 «Tesla».

Для просмотра в оптическом микроскопе шлифы готовились методами химического и электрохимического травления. С помощью растрового микроскопа был проведен фрактографический анализ поверхности разрушения и состояния изношенной поверхности.

Механические свойства (твердость, прочность, пластичность, ударная вязкость) определяли по стандартным методикам. На универсальной испытательной машине «Instron» с максимальным усилием 50 кН определяли прочность и пластичность (ГОСТ 1497–84). Ударную вязкость определяли при испытании образцов без надреза на маятниковом копре типа 2130КМ–03. Исследование твердости производили на твердомере Роквелла ТР 5005 по шкале С (алмазный наконечник, нагрузка 150 кг) согласно ГОСТ 9013–82. ДюрOMETрические исследования осуществляли на приборе ПМТ–3 по ГОСТ 9450–76.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния параметров насыщения, химического состава насыщаемых сталей, а также химического состава насыщающей смеси (обмазки) на толщину, микроструктуру и физико-механические свойства поверхностных диффузионных слоев стали после борохромирования в изотермических и термоциклических условиях.

Изучено влияние температуры насыщения на толщину и микроструктуру диффузионных слоев после борохромирования. Эксперименты показывают, что изменения температуры насыщения в интервале от 950 °С до 1150 °С на вид микроструктуры диффузионных слоев сказываются довольно слабо, изменяется только их толщина. Исключение составляет температура 1150 °С, при которой образовался пористый, очень хрупкий слой. Высокая температура насыщения приводит к росту зерна сердцевины детали, что отрицательно сказывается на комплексе физико-механических свойств, уменьшается ударная вязкость, пластичность стали.

Немаловажное влияние на физико-механические свойства получающихся диффузионных слоев оказывает химический состав насыщаемого материала – стали (рисунок 1). В зависимости от марки стали при прочих равных условиях, микроструктура диффузионных слоев, их толщина и фазовый состав изменяются в довольно значительных пределах.

Диффузионный слой, полученный на стали У8 (рисунок 1 а), имеет толщину от 200–250 мкм. Верхняя часть слоя состоит преимущественно из карбидов хрома $Cr_{23}C_6$ и Cr_7C_3 и боридов железа (преимущественно Fe_2B). Темные включения в диффузионном слое являются боридами хрома и имеют высокую микротвердость – до 37000 МПа. Наряду с высокой твердостью данные включения имеют и высокую пластичность – сколов и трещин не обнаружено при нагрузке на индентор вплоть до 1,92 Н и расстоянии между отпечатками вплоть до 0,7 диагонали отпечатка. На границе раздела хорошо видны перистые выделения, представляющие собой бористый цементит состава типа $Fe_3(C,B)$, по литературным данным – $Fe_3C_{0,8}B_{0,2}$ и борид железа Fe_2B . Несколькими меньшая толщина диффузионного слоя, примыкающего к темным включениям, вызвана, по всей вероятности тем, что весь бор уходил на образование боридов хрома.

При борохромировании стали Ст3 (рисунок 1 б), на ее поверхности происходит преимущественно процесс насыщения хромом. Толщина диффузионного слоя достигает 250 мкм, микротвердость его незначительна (3000–4000 МПа) в сравнении со слоем после борирования (до 22500 МПа). Химический состав слоя от поверхности к сердцевине следующий: 1) твердый раствор железа в хrome с массовым содержанием хрома до 60–70 %; 2) твердый раствор хрома в железе с массовой долей хрома 35–40 % и включения карбидов хрома состава $Cr_{23}C_6$; 3) внутренний слой, прилегающий к границе раздела, представляет собой механическую смесь твердого раствора хрома в железе с содержанием хрома около 20 % и карбидов хрома состава $Cr_{23}C_6$ или Cr_7C_3 . По всей толщине диффузионного слоя заметны следы бора в виде твердого раствора, также бор легирует карбиды хрома.

Диффузионный слой, образующийся на стали 30Х (рисунок 1 в), более сложный по строению, чем слой на стали Ст3. Верхняя часть слоя состоит из смеси твердого раствора железа в хrome (белые иглы) и боридов хрома и железа (темные иглы) с преобладанием диборида хрома CrB_2 . Под игольчатой частью слоя находится рабочий подслой, представляющий собой механическую смесь, состоящую из твердого раствора железа в хrome, карбидов,

боридов и карбоборидов хрома и железа. Микротвердость данного подслоя достигает 650–700 МПа при микротвердости сердцевины, не превышающей 280 МПа. Граница раздела также претерпевает изменения – появляются боридные иглы размером 15–25 мкм. Общая толщина диффузионного слоя достигает 300 мкм, а толщина рабочего слоя 70–90 мкм, что достаточно для работы большинства инструмента и деталей машин.

Диффузионный слой, образующийся при борохромировании стали 30ХМ (рисунок 1 г), изменяется еще значительнее. Его можно разделить на три зоны: 1) верхний слой – механическая смесь твердого раствора железа в хrome и боридов хрома; 2) средний подслоя – преимущественно диборид хрома, легированный боридами железа и карбидами хрома, а также карбоборидами железа и хрома; 3) нижний (рабочий слой) состоит из боридов железа, в значительной степени легированных хромом. В данном слое можно наблюдать текстурованность структуры, характерную для боридных слоев. Граница раздела между диффузионным слоем и основным металлом представлена в виде игл, характерных для боридных слоев, длиной 20–40 мкм.

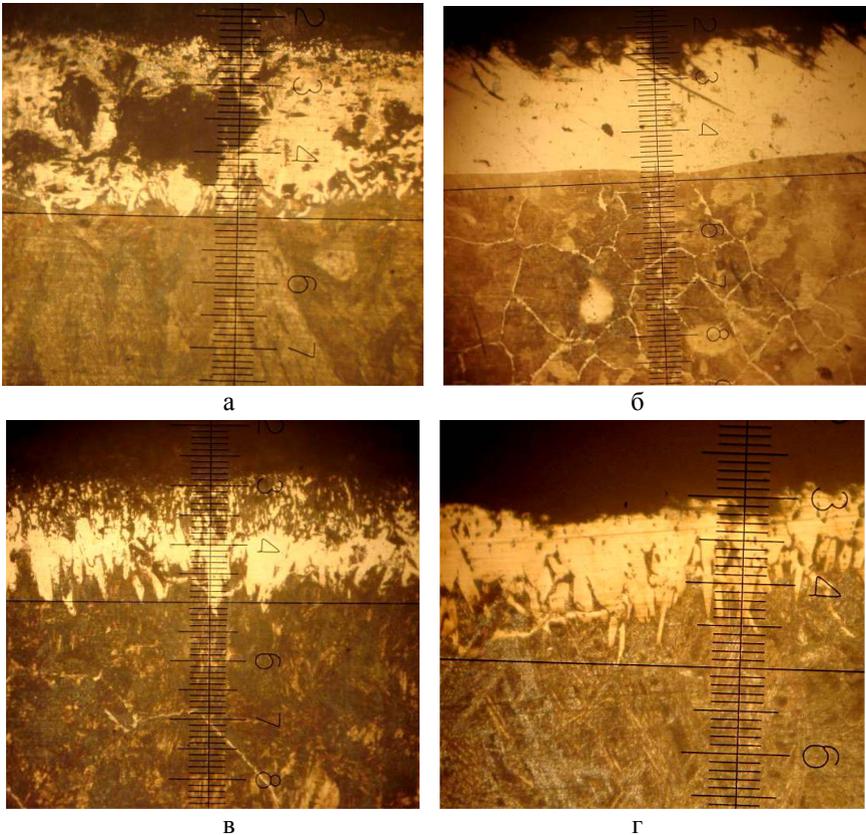


Рисунок 1 – Микроструктура диффузионных слоев после борохромирования сталей: а – У8, б – Ст3, в – 30Х, г – 30ХМ (цена малого деления шкалы 10 мкм)

Анализируя строение микроструктур, приведенных на рисунке 1 можно сделать вывод о том, что по мере увеличения степени легированности насыщаемой стали, диффузионный слой претерпевает изменения, как в химическом, так и в морфологическом составе. По мере увеличения степени легированности упрочняемого материала преимущество в адсорбции находится у бора, так как размер атомов бора намного меньше размера атомов хрома. Кроме того, значительную роль играет и тот факт, что бор является неметаллом и может образовывать химические соединения, как с хромом, так и с железом, в результате чего скорость отвода захваченных атомов бора с поверхности упрочняемого материала значительно ускоряется.

Проведена экспериментальная работа по выяснению эффективности различных компонентов насыщающей среды при комплексном борохромировании. Как поставщик бора применялся карбид бора – B_4C . В качестве поставщиков хрома изучались хлорид хрома, феррохром ФХ850, диборид хрома, оксид хрома. В качестве активаторов смеси исследованы хлорид хрома, фторид аммония, фторид натрия.

При использовании хлорида хрома, хлор, находящийся в этом соединении может выступать в качестве, как поставщика хрома, так и активатора процесса. Тем не менее, при экспериментах обнаружилось, что из-за низкой температуры плавления хлорида хрома процесс борирования не идет, так как расплавленная соль препятствует доступу кислорода, который участвует в обменных реакциях. Дополнительно, после охлаждения образцов возникли сложности с отделением обмазки от образца. К тому же соединения хрома токсичны.

Эксперименты показали, что использование оксида хрома приводит преимущественно к процессу борирования. Причем вид активатора существенных отличий не выявил. Это объясняется тем, что химическая связь хрома и кислорода очень сильна, и активатор не может ослабить ее настолько, чтобы она распалась. С карбидом бора и другими компонентами насыщающей смеси оксид хрома также, вплоть до температур около $1200\text{ }^\circ\text{C}$, не реагирует.

Наиболее экономичным и безопасным поставщиком атомов хрома следует признать диборид хрома. Самый удачный активатор в данном случае – фторид натрия. При взаимодействии фторида натрия и диборида хрома преимущественно образуются фториды хрома, а бор и натрий, взаимодействуя с кислородом воздуха, диффундирующим через обмазку, превращаются в тетраборат натрия (буру) и, продифундировав к поверхности обмазки, испаряются во внешнюю среду. Частично тетрафторборат натрия реагирует с карбидом бора, в ходе таких реакций получают углекислый натрий, борный ангидрид и свободный атомарный бор, который, диффундируя к поверхности упрочняемой детали и вступая с ней в реакцию, образует упрочненный диффузионный слой. Использование в качестве активатора фторида аммония в сочетании с диборидом хрома снижает эффективность насыщающей среды примерно на 7–10 %, а угар элементов вследствие образования неразрушимых при температуре соединений хрома и бора и испарения бора с поверхности обмазки возрастает в среднем на 3–8 %. Это связано с тем, что при нагреве свыше $140\text{ }^\circ\text{C}$ фторид аммония распадается на аммиак и фтористый водород, который, в последствии, частично реагирует с феррохромом и карбидом

бора с образованием полезных реагентов – фторидов хрома и бора, и частично уходит в окружающую среду, так как практически все полезные реакции начинаются только при нагреве свыше 700 °С. Аммиак, образующийся при распаде фторида аммония, практически весь уходит в атмосферу, разрыхляя при этом обмазку. Поры, образованные выходящим аммиаком в обмазке в дальнейшем служат каналами доступа кислорода воздуха к упрочняемой детали, а также с их помощью повышается угар бора и хрома.

При использовании в качестве поставщика атомов хрома феррохрома марки ФХ850 наилучшим активатором оказался фторид аммония. При использовании в качестве активатора фторида натрия наблюдалось незначительное (на 3–5 мкм или 10–12 %) снижение толщины слоя. Тем не менее, микротвердость его при этом возросла на 2–5 %. Но также следует учесть тот факт, что применение феррохрома в качестве поставщика атомов хрома в насыщающей среде дает возможное накопление чрезмерно большого количества железа и углерода, что ведет к отравлению насыщающей среды и снижает кратность ее использования до 5–12 раз. При использовании даже части насыщающей среды свыше 10 раз возможны «прикипания» обмазки к упрочняющим деталям, что нарушает их геометрическую точность и может привести к браку. В толще насыщающей среды вероятно образование включений боридов железа и хрома, что отрицательно сказывается на насыщающей способности обмазки, которую в таком случае приходится полностью заменять. Такая смесь пригодна только для однократного применения.

Для обеспечения достаточной толщины диффузионных слоев и легкого отделения обмазки после процесса насыщения в состав насыщающей смеси был введен мелкодисперсный графит. Бентонит был предложен как компонент насыщающей смеси для обеспечения необходимой жесткости обмазке в процессе насыщения и предотвращения осыпания обмазки в процессе сушки.

Перспективным методом ХТО является химико-термоциклическая обработка (ХТЦО), которая является наиболее эффективным способом ускорения процесса насыщения и улучшения качества покрытия.

Зависимость толщины и микроструктуры слоя от режима насыщения показаны на рисунке 2. Температура и время при обоих процессах насыщения не изменялись и составили 950 °С и 6 часов соответственно. Для термоциклического насыщения дополнительно вводились следующие параметры: минимальная температура и время цикла. В качестве минимальной температуры цикла была принята температура 550 °С, время цикла было выбрано в районе 1 часа. Выбор минимальной температуры в цикле осуществлялся для возможности охлаждения всего образца в насыщающей обмазке ниже температур фазовых превращений. Выдержки при минимальной температуре цикла не осуществляли.

Как видно из рисунка 2, при замене изотермического процесса насыщения на циклический, толщина диффузионного слоя несколько уменьшилась, на 10–15 %. Однако плотность и компактность диффузионного слоя, полученного по методу ХТЦО значительно возросли, на 40–50 %. Строение боридных игл также усложнилось, что должно сказаться на повышении адгезии диффузионного слоя. Микротвердость ХТЦО слоя несколько ниже, чем у изотермически обработанного, однако ее распределение более благоприятно в связи с возрос-

шей компактностью. Наряду с незначительно снизившейся микротвердостью самого диффузионного слоя, микротвердость переходной зоны возросла в гораздо большей степени (рисунок 3). Необходимо также отметить тот факт, что, при замене изотермической ХТО на химико-термоциклическую обработку со временем цикла, равным 1 часу при том же общем времени насыщения, действительный размер зерна уменьшился в 2,5–3,0 раза.

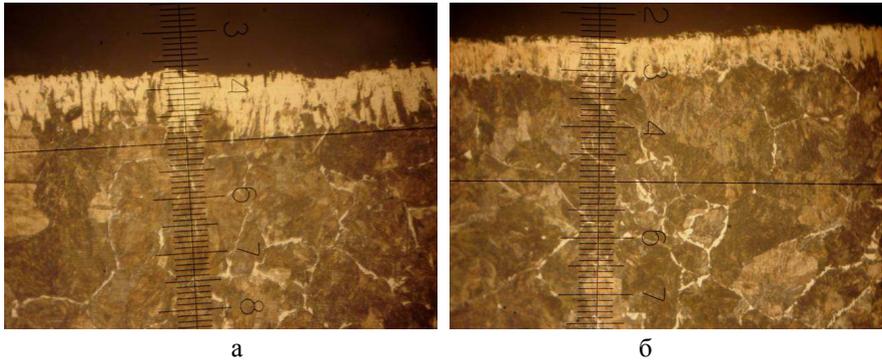


Рисунок 2 – Микроструктура диффузионных слоев после борхромирования стали 30X, в зависимости от условий процесса насыщения: а – изотермическое насыщение, б – термоциклическое насыщение (цена малого деления шкалы 10 мкм)

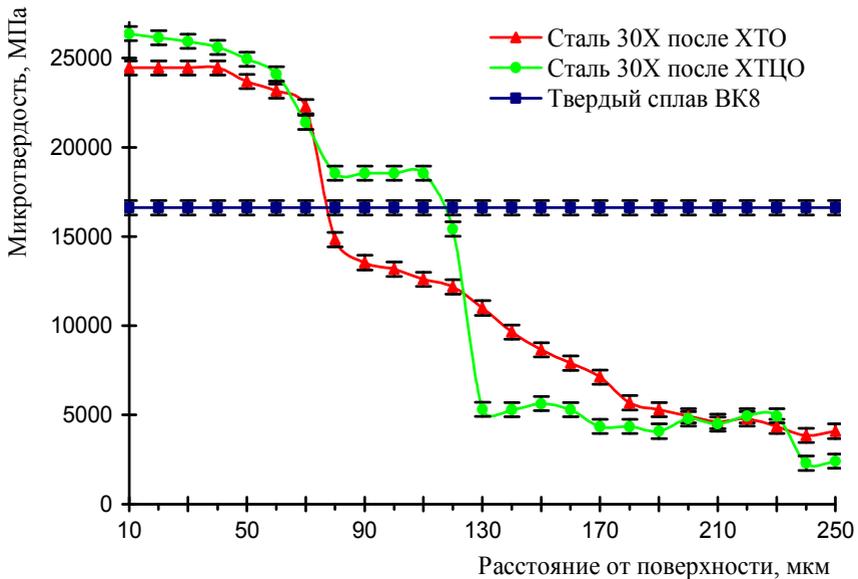


Рисунок 3 – Распределение микротвердости в упрочненном слое стали 30X после борхромирования в зависимости от режима насыщения

При химико-термоциклическом насыщении получают более дисперсные структуры, имеющие перистое строение (рисунок 4). При «цветном» травлении четко определяется, что между боридными иглами находятся значительные выделения механической смеси боридов, карбидов и карбоборидов, легированных хромом. Фаза FeV отсутствует полностью. Боридные иглы представляют собой Fe_2B , фазу более благоприятную для служебных характеристик. Переходная зона диффузионных слоев на всех представленных сталях полностью состоит из перлита. Отчетливо выделяется конгломерат перлитных зерен, выросших из большого аустенитного зерна при его превращении.

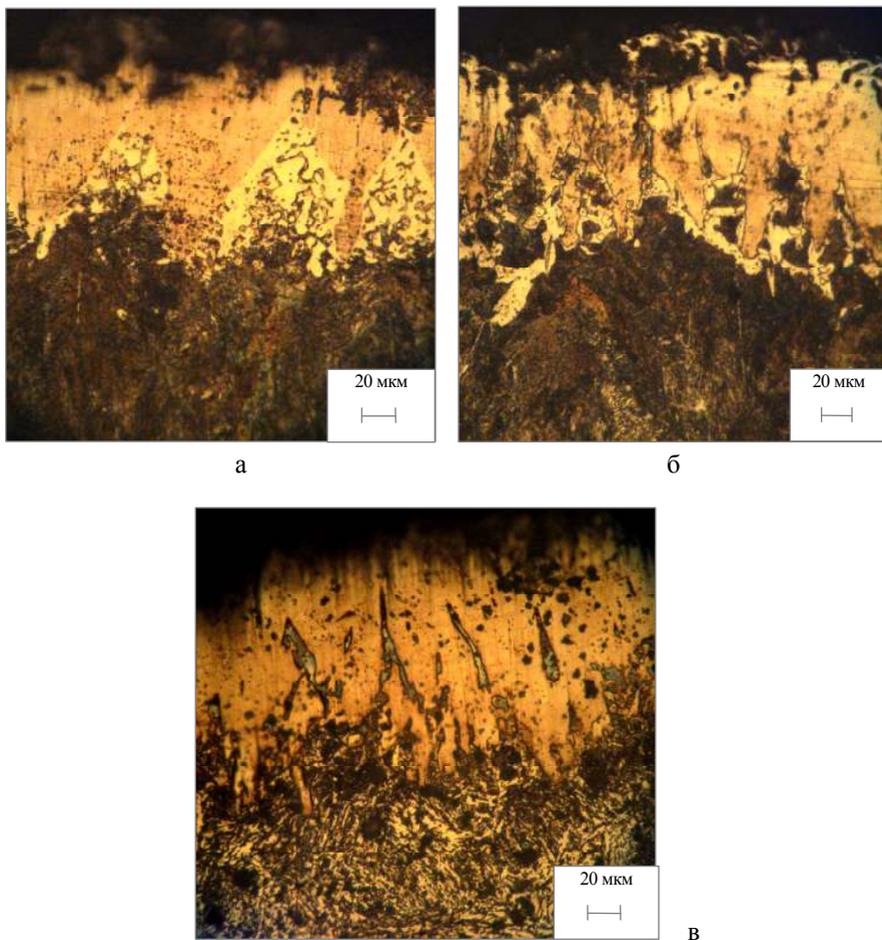


Рисунок 4 – Микроструктура диффузионного слоя после борохромирования в термоциклических условиях: а – сталь У8, б – сталь 30Х, в – сталь 30ХМ

Различные расстояния между аустенитными прослойками указывают на то, что прослойки цементита расположены под разными углами к плоскости рисунка. Темные точки представляют собой включения карбоборидов $Fe_3(C,B)$, как правило, глобулярной формы. Рост карбоборидов происходит на цементитных пластинах. Серые участки – карбобориды, обогащенные хромом. Их микротвердость на 10–15 % выше микротвердости окружающих участков. Местами наблюдается нарушение типичного строения микроструктуры, которое, по-видимому, представляет собой следы выхода дислокаций, в результате чего нарушается периодичность решетки и сетка цементитных пластин. После проведения процесса ХТЦО получается больше зернистых (глобулярных) включений на единицу площади, поэтому уровень пластичности растет. ХТЦО приводит к изотропности свойств за счет диспергирования фаз.

Четвертая глава посвящена описанию разработки и оптимизации химического состава для диффузионного борохромирования. Исходя из анализа исследований, проведенных в 3 главе, для создания насыщающей смеси были выбраны следующие вещества: карбид бора (B_4C), феррохром ($FeCr$), мелкодисперсный графит, фторид аммония (NH_4F) и бентонит; наложены следующие ограничения на содержание каждого вещества в смеси: B_4C – 40–80 %, $FeCr$ – 10–30 %, мелкодисперсный графит – 10–20 %, бентонит – 5–10 %, NH_4F – 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 упрочняемых деталей способом диффузионного борохромирования при изотермических условиях были использованы штамповые вставки для горячего деформирования из стали 5ХНМ. Предварительно насыщающая смесь разводилась в воде до пастообразного состояния. Приготовленная таким образом обмазка наносилась на упрочняемую поверхность детали слоем 4–6 мм, после чего была произведена сушка деталей на воздухе до получения твердой корки. Далее производилось насыщение поверхности детали из обмазки в термической печи при нагреве до температуры 1050 °С. Время процесса насыщения – 6 ч. Затем было проведено охлаждение непосредственно с температуры насыщения в масле с температурой 40 °С и последующий отпуск при 480 °С в течение 1 ч. Обмазка была отделена от поверхности детали. На деталях было получено равномерное покрытие. Износостойкость определялась ресурсом упрочненной штамповой вставки по количеству выштампованных деталей. Режим работы штамповой вставки: горизонтально-ковочная машина с рабочим усилием 30 т, скорость движения ползуна порядка 30 мм/с, температура штампуемого изделия «серьга» 450–500 °С.

Поскольку задача создания насыщающих смесей подобного рода является многофакторной, в ее основу должна быть положена определенная система. Так как в данном случае на содержание каждого компонента в смеси были наложены ограничения, то зависимость свойств борохромированных слоев от состава насыщающей обмазки необходимо изучать не во всей области изменения

концентрации компонентов, а только на ее локальном участке. Изучаемая локальная область представляет собой неправильный симплекс, поэтому для получения уравнения регрессии были составлены симплекс-решетчатые планы $\{5, 2\}$ относительно псевдокомпонентов, представляющих собой полный план, и, соответственно, исходных компонентов насыщающей смеси. Были получены коэффициенты уравнения регрессии в координатах псевдокомпонентов, проверена адекватность реализованного плана. Произведен перевод координат из одной системы в другую и получены уравнения регрессии в исходных координатах.

Уравнения регрессии второго порядка, описывающие зависимость эксплуатационных и физико-механических свойств (износостойкости и толщины диффузионного слоя) от химического состава насыщающей смеси, имеют следующий вид:

$$\hat{y}^P = 6498 - 213x_2 + 555x_3 - 6150x_4 - 1347x_5 - 1088x_2x_3 - 6251x_2x_4 - 16998x_2x_5 - 12031x_3x_4 - 10350x_3x_5 + 19571x_4x_5 - 70x_2^2 + 1090x_3^2 - 153315x_4^2 - 952x_5^2, \quad (1)$$

$$\hat{y}_n^T = 78 + 10x_2 + 36x_3 - 362x_4 + 39x_5 - 19x_2x_3 + 23x_2x_4 + 70x_2x_5 - 96x_3x_4 - 267x_3x_5 + 466x_4x_5 + 6x_2^2 + 34x_3^2 - 1246x_4^2 - 43x_5^2, \quad (2)$$

где \hat{y}^P – ресурс штамповой вставки, шт.;

\hat{y}_n^T – толщина диффузионного борохромированного слоя в изотермических условиях, мкм;

x_2 – количество феррохрома в насыщающей смеси, масс. %;

x_3 – количество мелкодисперсного графита, масс. %;

x_4 – количество фторида аммония, масс. %;

x_5 – количество бентонита, масс. %.

После анализа полученных уравнений регрессии были установлены оптимальные пределы содержания каждого вещества в обматке для диффузионного борохромирования в изотермических условиях, которые составили следующие величины:

1) 15–25 масс. % феррохрома, так как при данном содержании образуются упрочненные слои с наиболее высоким ресурсом;

2) 50–60 масс. % карбида бора, при этом содержании образуются диффузионные слои с наибольшей пластичностью и износостойкостью;

3) 10–15 масс. % мелкодисперсного графита, что обеспечивает легкое отделение обматки и достаточную толщину диффузионных слоев;

4) 5–7 масс. % бентонита обеспечивает необходимую жесткость обматке в процессе насыщения и предотвращает осыпание обматки в процессе сушки;

5) 2–3 масс. % фторида аммония обеспечивает необходимую активность насыщающей смеси, что приводит к формированию диффузионных слоев с оптимальными пластичностью и износостойкостью.

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

В качестве функции оптимизации было принято полученное уравнение регрессии для износостойкости упрочненной штамповой вставки. Значение этой функции должно стремиться к максимуму. Уравнение регрессии для толщины диффузионного слоя на стали, полученного борохромированием, было принято за ограничение. Толщина диффузионного слоя на стали после борохромирования должна принимать значение в интервале 70–120 мкм. На содер-

жание компонентов в насыщающей обмазке были наложены ограничения, равные найденным оптимальным пределам концентрации каждого вещества.

В результате поиска решений было получено следующее оптимальное соотношение компонентов в насыщающей смеси, которое можно взять за рецептурную формулу насыщающей смеси (обмазки) для комплексного диффузионного борохромирования при изотермических условиях:

52 % V_4C +25 % $FeCr$ +3 % NH_4F +15 % графита+5 % бентонита.

Для подтверждения возможности использования разрабатываемой насыщающей смеси для диффузионного упрочнения стали бором и хромом и в условиях циклического изменения температуры были построены уравнения, описывающие зависимость свойств получаемых слоев от состава смеси.

В качестве упрочняемых деталей способом диффузионного борохромирования были использованы стандартные образцы из стали 30ХМ, упрочнение которых проводилось по указанной выше методике ХТЦО. За параметры оптимизации были выбраны толщина получаемого при упрочнении диффузионного слоя и его микротвердость.

Построение уравнений регрессии производилось по указанной выше методике. Уравнения регрессии второго порядка, описывающие зависимость физико-механических свойств (микротвердости и толщины диффузионного слоя) от химического состава насыщающей смеси, имеют следующий вид:

$$\hat{y}^M = 33107 + 6315x_2 + 14092x_3 + 36048x_4 - 1404x_5 + 6607x_2x_3 + 7973x_2x_4 + 5376x_2x_5 + 42035x_3x_4 - 22841x_3x_5 + 19571x_4x_5 - 1247x_2^2 + 15070x_3^2 + 21687x_4^2 + 13034x_5^2, \quad (3)$$

$$\hat{y}_c^T = 83 + 10x_2 + 34x_3 + 61x_4 + 3x_5 + 10x_2x_3 + 2x_2x_4 + 7x_2x_5 + 104x_3x_4 - 48x_3x_5 - 77x_4x_5 - 6x_2^2 + 36x_3^2 + 346x_4^2 + 39x_5^2, \quad (4)$$

где \hat{y}^M – микротвердость полученного слоя, МПа;

\hat{y}_c^T – толщина диффузионного борохромированного слоя в термоциклических условиях, мкм;

x_2 – количество феррохрома в насыщающей смеси, масс. %;

x_3 – количество мелкодисперсного графита, масс. %;

x_4 – количество фторида аммония, масс. %;

x_5 – количество бентонита, масс. %.

После анализа полученных уравнений регрессии были установлены оптимальные пределы содержания каждого вещества в обмазке для диффузионного борохромирования в термоциклических условиях, которые совпадают с представленными выше для диффузионного борохромирования в изотермических условиях.

Исходя из полученных результатов можно сделать выводы, что разработанный состав насыщающей смеси для комплексного диффузионного борохромирования возможно использовать как в изотермических, так и термоциклических условиях. Метод ХТЦО, в сравнении с ХТО, позволяет добиться нужных и даже лучших результатов за менее продолжительный период времени.

Испытания упрочненных по разработанной технологии штамповых вставок из стали 5ХНМ показали, что использование разработанной технологии диффузионного упрочнения позволяет улучшить эксплуатационные свойства данной детали в 2,5 раза в сравнении с ранее используемой, а также уменьшить трудоемкость процесса упрочнения в 3,0 раза без применения специального сложного оборудования. Сравнение результатов экспериментов, проведенных для получения аналитических зависимостей, подтверждает вероятность замены стали 5ХНМ на сталь 30ХМ, упрочненную разработанным способом борохромирования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследованы и описаны структуры диффузионных слоев, полученных одновременным насыщением сталей (конструкционные стали Ст3, 30Х, 30ХМ, инструментальные стали У8 и 5ХНМ) бором и хромом в изотермических и термоциклических условиях. Установлены условия проведения процесса диффузионного насыщения, в которых возникает возможность образования боридов, карбидов, карбоборидов, твердых растворов на основе α -железа.

2. 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. Использование соединений бора с хромом в качестве добавки к карбиду бора дает большой эффект: на малоуглеродистой стали образуются хромистые, либо смешанные борохромистые слои (в зависимости от количества добавляемого соединения), а на высокоуглеродистой стали – в слое образуются карбиды, карбобориды и бориды. Добавка хрома к борирующей обмазке позволяет на 7–10 % ускорить процесс насыщения и на 10–15 % увеличить толщину диффузионного слоя.

3. Установлено положительное влияние циклического теплового воздействия с фазовыми $\alpha \rightarrow \gamma$ превращениями в интервале температур 600–1150 °С на интенсификацию диффузионных процессов при насыщении поверхности железоуглеродистых сплавов бором совместно с хромом. Показано, что, циклический нагрев и охлаждение в интервале температур 600–1000 °С с выдержкой от 1 мин до 1 ч и количестве циклов от 3 до 20, значительно (в 1,5–2,0 раза), ускоряют процесс борохромирования сталей (конструкционные стали Ст3, 30Х, 30ХМ и инструментальные стали У8 и 5ХНМ). Совмещение ХТО с ТЦО в единый процесс химико-термоциклической обработки (ХТЦО) позволяет получить упрочненный диффузионный слой необходимой толщины за меньшее (в 1,5–2,0 раза) время на стандартном оборудовании любого термического цеха или участка.

4. Определено оптимальное сочетание компонентов насыщающей среды для поверхностного упрочнения сталей (феррохром (FeCr), карбид бора (B_4C), графит, бентонит, фторид аммония (NH_4F)).

5. Установлены аналитические зависимости, связывающие компоненты состава насыщающей смеси (феррохром (FeCr), карбид бора (B_4C), графит, бентонит, фторид аммония (NH_4F)) с эксплуатационными и физико-механическими свойствами сталей (микротвердость, износостойкость, толщина диффузионного слоя) после диффузионного борохромирования в изотермических и термоциклических условиях.

6. 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 сталей одновременным насыщением бором и хромом, содержащий: 50–60 масс. % B_4C (карбид бора), 15–25 масс. % FeCr (феррохром), 2–3 масс. % NH_4F (фторид аммония), 10–15 масс. % графит, 5–7 масс. % бентонит. Рекомендованы для него оптимальные режимы химико-термической и химико-термоциклической обработки.

7. Проведенные испытания штамповых вставок для горячего деформирования из стали 5ХНМ, упрочненных с помощью разработанной технологии, показали, что стойкость после диффузионного борохромирования повышается в 2,5 раза, а трудоемкость проведения упрочнения уменьшается в 3,0 раза.

Испытания упрочненных по разработанной технологии защитных пластин для дробеметной установки из стали 30Х показали, что использование разработанной технологии диффузионного упрочнения позволяет уменьшить затраты на изготовление данной детали в 3 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.

Патенты РФ на изобретения

2. 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.

3. 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.

Статьи, отражающие основное содержание работы

4. Иванов, С. Г. Диффузионное хромирование сталей из насыщающей обматки [Текст] / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, С. А. Земляков, Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. - 2006. - № 3. - С. 191.

5. Кошелева, Е. А. Разработка способа термоциклического борохромирования деталей машин и инструмента [Текст] / Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов, О. А. Власова, М. А. Гурьев, Т. Г. Другова, А. М. Гурьев // 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. 45-48.

6. Власова, О. А. Повышение прочности диффузионных карбоборидных покрытий термоциклированием в процессе их получения [Текст] / О. А. Власова, С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, Е. А. Кошелева, А. М. Гурьев // 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. 65-67.

7. Иванов, С. Г. Разработка способа диффузионного борогитанирования деталей машин и инструмента [Текст] / С. Г. Иванов, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев, О. А. Власова, А. М. Гурьев // 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. 28-30

8. Иванов, С. Г. Диффузионное насыщение сталей из насыщающих обматок [Текст] / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, Е. А. Кошелева, Т. А. Бруль // Фундаментальные исследования. - 2007. - № 4 - С. 37-38.

9. Guriev, A. M. Diffusion saturation of steels from coats / S. G. Ivanov, B. D. Ligdenov, O. A. Vlasova, E. A. Kocheleva, I. A. Garmaeva, A. S. Mijitov // VIII Miedzynarodowa Konferencja Naukowa. Czestochowa, 25 maja 2007. - P. 179-183.

10. Гурьев, А. М. Диффузионное термоциклическое упрочнение поверхности стальных изделий бором, титаном и хромом [Текст] / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, С. Г. Иванов, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, И. А. Гармаева, М. А. Гурьев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2007. - № 1. - Т. 4. - С. 26-32.

11. Гурьев, А. М. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом [Текст] / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, С. Г. Иванов, О. А. Власова, И. А. Гармаева, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев // Успехи современного естествознания. - 2007. - № 10. - С. 89-91.

12. Кошелева, Е. А. Разработка методов интенсификации химико-термоциклической обработки инструментальных сталей [Текст] / Е. А. Кошелева, А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, О. А. Власова // Фундаментальные исследования. - 2007. - № 10. - С. 91.

13. Гурьев, А. М. Термоциклическое боромирование как метод повышения прочности инструментальных сталей [Текст] / А. М. Гурьев, О. А. Власова, Б. Д. Лыгденов, И. А. Гармаева, А. М. Кириенко, С. Г. Иванов, Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. - 2007. - № 1-2. - С. 85-88.

14. Лыгденов, Б. Д. Диффузионное борирование быстрорежущей стали р18 [Текст] / Б. Д. Лыгденов, А. Д. Грешилов, А. Ц. Мижитов, М. А. Гурьев, Е. А. Кошелева // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин: Межвуз. сб. Выпуск 7 (ч. 1) / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. - С. 40-44
15. Власова, О. А. Оптимизация многокомпонентной химико-термической обработки стали 30X [Текст] / О. А. Власова, С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, Е. А. Кошелева, С. А. Чех // Современные наукоёмкие технологии. - 2008. - № 3. - С. 54-55.
16. Кошелева, Е. А. Оптимизация химико-термоциклической обработки стали 30X [Текст] / Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, О. А. Власова, Т. А. Бруль // Фундаментальные исследования. - 2008 - № 2 - С. 108-109.
17. 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 наукоёмкие технологии. -2008. - № 3. - С. 55-56.
18. Гурьев, А. М. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей [Текст] / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, С. Г. Иванов, О. А. Власова, И. А. Гармаева, Е. А. Кошелева // IV-я Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур». Москва, МИСиС. - 2008. - С. 65.
19. Кошелева, Е. А. Разработка методов химико-термоциклической обработки деталей машин и инструмента [Текст] / Е. А. Кошелева, О. А. Власова, Е. А. Нестеренко, А. М. Гурьев // XIV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т.2.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - С. 92-93.
20. Кошелева, Е. А. Методы поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента [Текст] / Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов, И. Л. Шишковская // Труды V Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь - 2008» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. - С. 55-57.
21. 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.
22. Гурьев, А. М. Новый способ диффузионного термоциклического упрочнения поверхностей железоуглеродистых сплавов [Текст] / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, С. Г. Иванов, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев, С. А. Земляков // Ползуновский альманах. - 2008. - № 3. - С. 10-16.
23. 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.
24. Кошелева, Е. А. Эффективность комплексного насыщения сталей бором и хромом – борохромирования [Текст] / Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов, Е. А. Нестеренко // Труды VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2009» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. - С. 67-70.
25. Кошелева, Е. А. Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном борировании инструментальных сталей [Текст] / Е. А. Кошелева, А. М. Гурьев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2009 - № 5 - С. 76-77.
26. Кошелева, Е. А. Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном упрочнении инструментальных сталей [Текст] / Е. А. Кошелева, Е. А. Нестеренко, А. Г. Иванов, А. М. Гурьев // Труды VI Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. - С. 179-183.
27. Кошелева, Е. А. Разработка химического состава насыщающих смесей при диффузионном упрочнении инструментальных сталей [Текст] / Е. А. Кошелева, А. Г. Иванов, А. М. Гурьев // Труды Всероссийской конференции «Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2009» / Томский политехнический университет. - Томск, 2009. - С. 93-96.

Издано в авторской редакции.

Подписано в печать 5.10.09. Формат 60x84 1/16.

Печать - ризография. Усл. п. л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ 2009 – 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.