



ИВАНОВ СЕРГЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ  
ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННОГО ДИФФУЗИОННОГО  
НАСЫЩЕНИЯ БОРОМ, ХРОМОМ И ТИТАНОМ**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка  
металлов и сплавов

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Барнаул – 2019

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

Научный консультант: Гурьев Алексей Михайлович  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Шморгун Виктор Георгиевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и композиционные материалы» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Ишков Алексей Владимирович, кандидат химических наук, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология конструкционных материалов и ремонт машин» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»

Сизов Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе и инновациям ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»

Защита состоится «18» февраля 2020 г. в 10<sup>00</sup> часов в ауд. 3П на заседании диссертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, д. 42, СибГИУ.

Факс: 8 (3843) 46-57-92,

E-mail: ds21225201@sibsiu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» [www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.252.01,  
д.т.н., профессор



О.И. Нохрина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Эффективность работы машиностроительной отрасли определяется повышением качества выпускаемой продукции наряду с уменьшением металлоемкости производства, что в свою очередь, приводит к снижению себестоимости и обеспечивает конкурентоспособность производимой продукции. Решение этой проблемы имеет комплексный характер: снижение материалоемкости производства, повышение ресурсо- и энергоэффективности производства, оптимизация технологических процессов, внедрение новых материалов, разработка новых способов увеличения эксплуатационного уровня материалов.

Внедрение новых технологических процессов и конструктивных решений достаточно часто не имеет должного эффекта по причине отсутствия материалов, работоспособных в условиях сложного, комплексного нагружения, например, одновременного воздействия коррозионно-активных агентов и абразивного износа при повышенных температурах и т.п. Несмотря на постоянно растущие объемы производства и появление на рынке новых марок все более легированных сталей, они не могут удовлетворять рост требований к эксплуатационным свойствам. Улучшение физико-механических свойств сталей возможно не только при помощи объемного легирования, кроме этого могут применяться такие варианты, как производство малоуглеродистых сталей (с малым и очень малым содержанием углерода), применение специальных методов производства сталей (электрошлаковый, вакуумный переплав и т.п.), производство так называемых «экономнолегированных сталей» - когда легирующие элементы в стали содержатся в максимально узких пределах (в качестве примеров таких сталей можно привести стали торговой марки «Хардокс», имеющие допуски на разброс содержания легирующих элементов, измеряемые сотыми долями процента).

Большая часть деталей и рабочих органов машин и инструмента выходит из строя по причине обусловленного износом изменения геометрии поверхности. В связи с этим в промышленности повышенное внимание уделяется применению более дешевых и простых материалов, но при этом в комбинации с различными способами их поверхностной обработки, позволяющей в значительных пределах регулировать требуемые свойства.

Химико-термическая обработка (ХТО) особенно эффективна, когда необходимо получить материал с требуемыми физико-механическими свойствами. При этом применение ХТО экономически выгоднее, чем использование материала с аналогичными свойствами, но получаемого методом объемного легирования.

Кроме того, ХТО, как правило, может быть произведена на любом предприятии, имеющем термические печи, подходящие для операций термообработки большинства сталей.

Наиболее часто в условиях массового производства в Российской Федерации и за рубежом применяются только лишь основные, хорошо изученные способы химико-термической обработки как: цементация, азотирование, хромирование, цианирование, нитроцементация, карбонитрирование. Намного реже, в условиях единичного производства, реализованы силицирование, борирование, алитирование, титанирование. При этом растет интерес, проявляемый как исследователями, так и промышленными предприятиями к перспективным способам ХТО, в число которых входят борирование, а также насыщение титаном, кремнием, алюминием и другими элементами, еще больший интерес представляют различные процессы двух и трехкомпонентного насыщения несколькими элементами. Область применения и номенклатура изделий, упрочняемых при помощи этих способов постоянно увеличиваются.

Развитие известных и разработка эффективных способов химико-термической обработки, является актуальной задачей, решением которой занимаются большое количество исследователей как в РФ так и в мире (США, Китай, Турция, Индия, Германия, Франция, Италия и т.д.). Для успешного решения данной задачи необходимо совершенствовать существующие, а также разработать новые методы химико-термической обработки материалов, в том числе за счет разработки и внедрения новых технологий одновременного многокомпонентного диффузионного насыщения несколькими элементами.

Процессы химико-термической обработки в промышленных масштабах получили широкое распространение, начиная с первой трети XX в. Также к этому периоду относится практически взрывной рост количества исследований и числа публикаций, посвященных теме химико-термической обработки различными элементами, как металлами, так и неметаллами.

В разработку новых способов и развитие новых технологий борирования внесли вклад как отечественные, так и зарубежные ученые-металловеды: Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошнин, М.Г. Крукович, Г.В. Земсков, Р.Л. Коган, М.В. Ситкевич, Г.В. Самсонов, Е.И. Бельский, Б.С. Кухарев, Я. Б. Чернов, А. И. Анфиногенов, A. Graf von Matuschka, H. Kunst, H. Noguerra, G. Palombarini, M. Carbucicchio, S. Motojima, G. Sambogna, R. Chatterjee-Fischer, N. Trausner и др.

Интерес в исследованиях по развитию и внедрению диффузионных покрытий на основе бора в настоящее время смещается в сторону изучения способов получения многокомпонентных покрытий на основе бора и других элементов

(хрома, титана, кремния, алюминия, ванадия, меди, никеля и др.) а также исследования закономерностей формирования таких покрытий на различных материалах.

Получение диффузионных боридных покрытий на сталях, имеет целью повышение износостойкости, хром, алюминий, кремний в виде покрытий – повышают коррозионную стойкость сталей в окислительных атмосферах, а также теплостойкость, диффузионное хромирование в значительной степени может повысить жаростойкость. Кроме того, физико-механические свойства однокомпонентного покрытия и присущие ему недостатки могут быть нивелированы при одновременном, либо последовательном насыщении несколькими элементами, т.е. при получении многокомпонентных покрытий. Например, покрытие из борида железа, легированное хромом, имеет меньшую хрупкость по сравнению с однокомпонентным борированием, а также более высокие показатели коррозионной, износостойкости. Борид железа, легированный титаном, имеет более высокую износостойкость, в сравнении с боридом железа и более высокую коррозионную стойкость в растворах кислородсодержащих кислот.

Исследования проводились в рамках научно-исследовательских работ по заданию Минобрнауки РФ, при финансовой поддержке РФФИ (Грант РФФИ «Сибирь\_а» Проект № 13-08-98107 на 2013–2014гг.), Грантов Президента РФ для молодых кандидатов наук 2014 (№14.Z56.14.656-МК), государственного задания Минобрнауки РФ (№2014/885), гранта Администрации г. Барнаула «Исследование диффузионных покрытий на сталях, полученных вакуумной химико-термической обработкой» 2012, 2013гг., государственного задания Минобрнауки РФ № 11.1085.2017/4.6-ПЧ.

**Цель работы:** Повышение износостойкости деталей машин и механизмов из сталей и сплавов химико-термической обработкой с применением совмещенного диффузионного насыщения поверхностей бором, хромом и титаном.

Для достижения цели были сформулированы задачи:

1. Установить закономерности формирования структурно-фазового состава диффузионных покрытий на сталях и сплавах, получаемых комплексным их насыщением бором, хромом и титаном.
2. Выявить связь физико-механических свойств и структурно-фазового состояния комплексных бор-хром-титановых диффузионных покрытий с технологическими параметрами процесса упрочнения и химическим составом насыщаемого материала и насыщающей среды.
3. Разработать составы насыщающих сред и технологии одновременного бор-хром-титанирования углеродистых и легированных сталей и сплавов.

4. Развить теоретические основы повышения эксплуатационных свойств многокомпонентных диффузионных покрытий, получаемых при совмещенном насыщении бором, хромом и титаном сталей и сплавов.

5. Научно обосновать закономерности формирования комплексных диффузионных бор-хром-титановых покрытий на сталях и их влияния на эксплуатационные свойства упрочненных рабочих органов машин и инструмента.

6. Разработать ресурсо- и энергоэффективную технологию химико-термической обработки с применением насыщающей обмазки и совмещенной термической обработки.

7. Провести промышленные испытания и внедрить упрочненные одновременным диффузионным бор-хром-титанированием изделия (ножи для измельчения аккумуляторных батарей, фильеры для прессования катализаторной массы, твердосплавный инструмент, сопла пескоструйных аппаратов и др.) в условиях эксплуатации на предприятиях.

**Научная новизна** диссертационного исследования:

1. Проведены комплексные исследования условий формирования диффузионных покрытий на сталях и сплавах в результате одновременного диффузионного насыщения тремя элементами: бором, хромом и титаном. Выявлено, что одновременное диффузионное насыщение сталей хромом, титаном и бором позволяет повысить скорость формирования диффузионного слоя в среднем на 10–15 % по сравнению с двухкомпонентным насыщением бором и хромом. Кроме того, на 10–30 % повышается износостойкость в коррозионно-активных средах.

2. Получено частное решение уравнения Онзагера для случая одновременного трехкомпонентного насыщения железа бором, хромом и титаном относительно функций толщины диффузионного покрытия с непрерывно изменяющимся коэффициентом диффузии атомов бора, хрома и титана.

3. Установлено, что образование атомов бора при разложении карбида бора возможно и термодинамически выгодно в присутствии кислорода. При температурах, более 920 °С активируются реакции образования атомов хрома и титана, происходящие также с участием кислорода.

4. Методом рентгеновской дифрактометрии установлено, что при одновременном насыщении железоуглеродистых сплавов бором, хромом и титаном, на углеродистых сталях диффузионные покрытия содержат высокобористую (FeB) и низкобористую (Fe<sub>2</sub>B) фазы, а также бориды и карбобориды хрома и железа. Титан в случае насыщения сталей с содержанием углерода до 0,5 масс. % собственных боридов не образует, а легирует бориды и карбобориды железа, также образует кар-

бид титана  $TiC$  и силид  $Ti_5Si_3$ . На высокоуглеродистых и легированных сталях отмечается присутствие боридов титана  $TiB$  и  $Ti_2B$  а также карбида  $TiC$ .

5. Получены новые научные данные о структурно-фазовом состоянии диффузионных покрытий на титановых сплавах для случаев их одновременного комплексного диффузионного насыщения из насыщающих сред, содержащих бор, хром и титан. Формируются диффузионные покрытия толщиной до 75 мкм, состоящие из ди- и моноборида титана, карбида титана, переходная зона содержит интерметаллидные соединения титана и хрома типа  $TiCr_2$ ,  $TiFe_2$ ,  $FeTi$  и т.д. Микротвердость комплексных покрытий на титане достигает 3500  $HV_{0,1}$ .

6. Показано, что совмещенное одновременное бор-хром-титанирование твердых сплавов ВК8 и Т5К10 позволяет получить диффузионные покрытия толщиной до 80 – 90 мкм, имеющие микротвердость до 4300  $HV_{0,1}$  на Т5К10 и 2400  $HV_{0,1}$  на ВК8 при исходной твердости этих материалов 1650–1740  $HV_{0,1}$ .

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологические решения по упрочнению сталей и сплавов методами химико-термической обработки, обеспечивающие повышение ресурса работы упрочненных изделий в 2 – 50 раз. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать толщину комплексных бор-хром-титановых диффузионных покрытий на сталях, определять основные технологические параметры процесса насыщения с целью получения диффузионного слоя с требуемой толщиной и фазовым составом.

2. Разработанные технологические решения и составы насыщающих сред позволяют получать диффузионные покрытия с высокими эксплуатационными свойствами:

- для одновременного бор-хром-титанирования углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода до 0,4 масс. % разработан состав, содержащий бориды хрома и титана, карбид бора в качестве основных компонентов-поставщиков активных атомов бора, хрома и титана;

- для углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода свыше 0,4 масс. % разработан состав, основными поставщиками активных атомов бора, хрома и титана в котором являются карбид бора, феррохром и ферротитан.

Разработанные технологии обеспечивают повышение поверхностной твердости при одновременном комплексном насыщении бором, хромом и титаном: на углеродистой стали (стали типа Ст3, сталь 45) – до 2200–2500  $HV_1$ , на легированных сталях (стали типа 5ХНВМФ, 7ХГ2ВМФ) – до 2400–2900  $HV_1$ , на высоколегированных сталях (стали типа Р6М5, Х12М) – до 2700–3200  $HV_1$ .

3. Методами совмещенного диффузионного насыщения бором, хромом и титаном из твердофазных насыщающих сред (порошковым и из насыщающих обмазок) получены упрочняющие покрытия на титановых сплавах ВТ1-0 и ОТ-4, имеющие протяженность до 75 мкм. Насыщение титановых сплавов из порошковых сред и насыщающих обмазок более технологичны, а также не требуют специальных инертных атмосфер из аргона, либо криптона в сравнении с борированием из расплавов.

4. На спеченных сплавах с кобальтовой связкой ВК8 и Т5К10, используемых для производства металлорежущего инструмента, способом комплексного бор-хром-титанирования получены диффузионные покрытия толщиной до 90 мкм, которые в 10–15 раз превышают толщину покрытий, получаемых другими способами диффузионного насыщения на материалах данных классов.

5. Упрочненные по разработанным способам изделия внедрены на промышленных предприятиях Алтайского края (ООО «МОКВИН», ООО «Алтайский завод прецизионных изделий», ООО «РАКУРС», ООО «СВЭЛ», ООО «Вектор»), Новосибирской области (ПАО «Новосибирский завод химконцентратов»), Республики Бурятия (ООО «Теплоарматура»), Вологодской области (завод «Северсталь-метиз», ПАО «Северсталь», г. Череповец,). Практическая реализация результатов работы на предприятиях Алтайского края отмечена Премией Алтайского края в области науки и техники за 2014 год (проект «Разработка насыщенных сред и технологий диффузионного поверхностного упрочнения стальных изделий бором, хромом и титаном») и 2018 год (проект «Разработка насыщающих сред на основе бора и технологий одновременного трехкомпонентного диффузионного поверхностного упрочнения стальных изделий»).

6. Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 22.04.01. «Материаловедение и технология материалов» и 15.04.05. «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», обучающихся по направлению «22.06.01 Технологии материалов» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре.

**Методы исследования.** Исследования в рамках работы проводились на оборудовании в лабораториях «Проблемная научно-исследовательская лаборатория самораспространяющегося высокотемпературного синтеза» (ПНИЛ СВС) и «Центра коллективного пользования лабораторным оборудованием» (ЦКПЛО) АлтГТУ, центра коллективного пользования «Лаборатория электронной микроскопии» Новосибирского государственного технического университета, центра коллективного пользования «Прогресс» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, центра коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» (ФХМИ) Волгоградского государствен-



ного технического университета, лаборатории электронной микроскопии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Химико-термическая обработка проводилась в камерных печах типа СНОЛ, оснащенных программируемыми пропорционально-интегрально-дифференцирующими регуляторами (ПИД-регулятор) «Термодат». Химико-термическая обработка в условиях скоростного нагрева производилась на установке ТВЧ-нагрева «ЭЛ-СИТ» мощностью 210 кВА, частотой 20-40 кГц. Исследования микроструктуры проводили на оптических микроскопах Carl Zeiss Axio Observer Z1m, совмещенном с программным комплексом «Thixomet Pro», сканирующих электронных микроскопах Carl Zeiss EVO 50 XVP, Jeol JSM 6510-LV, Phenom 2G Pro, MIRA 3, Versa 3D с приставками для рентгеноспектрального энергодисперсионного анализа (EDS X-Max). Для идентификации фазового состава использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-6. Исследования износостойкости проводили по схеме «диск-палец» на машине трения МФТ-1, регистрацию износа производили периодическим взвешиванием на лабораторных аналитических весах с точностью  $10^{-8}$  кг. Микротвердость измеряли на микротвердомере МН-6 по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 при нагрузках 25, 50 и 100 г ( $HV_{0,025}$ ,  $HV_{0,05}$ ,  $HV_{0,1}$ ), поверхностную твердость измеряли при нагрузке 1000 г ( $HV_1$ ).

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности формирования структурно-фазового состояния диффузионных покрытий, полученных комплексным насыщением сталей бором, хромом и титаном.

2. Составы насыщающих смесей для диффузионного комплексного насыщения бором, хромом и титаном. Рациональный химический и фазовый состав основных компонентов насыщающей среды и количественное содержание комплексного активатора – смеси фторида натрия, хлорида аммония.

3. Результаты экспериментальных исследований формирования работоспособных диффузионных слоев при одновременном диффузионном насыщении бором, хромом и титаном, имеющих толщину: на сталях – до 650 мкм, на титановых сплавах – до 75 мкм, на твердых сплавах ВК8, Т5К10 – до 90 мкм.

4. Результаты математического моделирования формирования диффузионного слоя на сталях при насыщении одновременно бором, хромом и титаном.

5. Зависимости и закономерности влияния параметров химико-термической обработки, химического состава насыщаемых сталей и насыщающих сред для комплексного диффузионного насыщения бором, хромом и титаном на структурно-фазовый состав и свойства комплексных диффузионных покрытий.

6. Результаты испытаний комплексных бор-хром-титановых диффузионных покрытий в производственных условиях, работающих на изнашивание, в том числе

при наличии коррозионно-активной среды в виде растворов азотной и серной кислот.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационная работа по своим целям, задачам, методам исследования, научной новизне и содержанию соответствует паспорту научной специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» по п. 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях», п. 4 «Теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий изменения структурного состояния и свойств металлов и сплавов», п.6 «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химикотермической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим воздействием, а также специализированного оборудования».

**Личный вклад автора** состоит в постановке цели, задач, выборе экспериментальных и теоретических методов исследования, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке выводов. В теоретической части разработана модель одновременной диффузии бора, хрома и титана в железе, приведено решение теоремы Онзагера для случая одновременной трехкомпонентной диффузии бора, хрома и титана в железе. Лично, либо при непосредственном участии автора, выполнены работы по упрочнению деталей и оснастки машин и инструмента, проведены лабораторные и промышленные испытания упрочненных по разработанным технологиям изделий.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается объемом полученных в ходе работы экспериментальных данных; сопоставлением и непротиворечивостью оригинальных теоретических и экспериментальных результатов с данными, полученными другими исследователями, имеющимися в литературе; высокой воспроизводимостью разработанных технологических приемов в лабораторных и производственных условиях при проведении работ по комплексному бор-хром-титанированию деталей машин, оснастки и инструмента; корреляцией результатов лабораторных и промышленных испытаний упрочняющих комплексных покрытий, полученных одновременным бор-хром-титанированием, подтвержденных актами промышленных испытаний и внедрением в производство.

Основные результаты диссертационной работы представлены и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Международной научно-технической конфе-

ренции «Композиты в народное хозяйство», Барнаул 2005 г.; Научной конференции «Актуальные проблемы науки и образования» 2006 г. Куба (Варадеро), Международной научно-практической конференции «Nowadays, future and faced problems of metallurgy and machinery field» 2006 in Ulaan baatar, Mongolia (Монголия), VII Miedzynarodowa Konferencja Naukowa «Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii i materialowej 2006», Czestochowa, Politechnica Czestochowska (Польша); III научной конференции с международным участием «Современные проблемы науки и образования», Хорватия, 2006г.; XVII петербургских чтений по проблемам прочности, Санкт-Петербург, 2007 г.; VIII Miedzynarodowa Konferencja Naukowa. Czestochowa, 2007 г (Польша); XIII Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии», Томск, 2007 г., Научной международной конференции «Перспективы развития вузовской науки», Сочи, 2007 г.; 6-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», Новосибирск, 2008 г.; 9-й Международной научно-технической конференции «Технологии термической и химико-термической обработки сталей и сплавов», Харьков, 2008 г.; V Еразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур», Москва, 2008 г., Всероссийской научной конференции «Перспективы развития ВУЗовской науки», Сочи (Дагомыс), 2008 г.; XIV и XV Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2008, 2009 г.); Международной научной школе-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» (Барнаул, 2009 г.); Общероссийской научной конференции «Новые технологии, инновации, изобретения» (Иркутск, 2010); Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов НФМ'10» (Санкт-Петербург, 2010 г.); VI сессии Научного совета РАН по механике Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (2012); «Перспективные материалы и технологии в строительстве» (ПМТС-13–16), г.Томск, 2013–2016г.; External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys. (China, 2014 г.), XIII – XV Международных школах-семинарах «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» (Барнаул, 2014–2018гг.), VII–XVIII Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств» (Барнаул, 2004–2017гг.), Proceedings of the 4th 2016 International Conference on Material Science and Engineering (ICMSE 2016, China, 2016), The 3rd International Conference on New Material and Chemical Industry (China, Sanya, 2018), «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» XV Международной школы-семинара (2018), «Explosive

Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations» 14th International Symposium (Россия, 2018), «Инновации в машиностроении» – IX Международной научно-практической конференции (2018) и др.

**Публикации.** Основное содержание работы опубликовано в 195 работах, в том числе в 3 коллективных монографиях, 74 статьях в журналах из перечня ВАК, 9 статьях, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus, 10 патентах РФ на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из Введения и шести глав, выводов по работе и 16 приложений. Общий объем работы составляет 356 страниц машинописного текста, содержит 165 рисунков, 31 таблицу, список литературы на 227 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, указаны новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, описана структура работы и функциональные связи между отдельными главами, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, что определяет общую концепцию диссертационного исследования и используемый инструментарий.

**Первая глава «Основные технологии диффузионного упрочнения. Современное состояние и постановка задач исследования»** представляет обзор известных результатов исследований технологии поверхностного легирования сталей, в том числе насыщения бором, хром, титаном и совмещенными процессами. Обобщены литературные данные об известных особенностях процесса насыщения и диффузии. Показано, что тема поверхностного упрочнения стальных изделий методами диффузионного насыщения является актуальной, однако, большинство работ в этой области носит полуэмпирический характер. Проблема одновременной многокомпонентной диффузии разнородных атомов металлов и неметаллов в сталях имеет крайне малое освещение.

Проведен анализ существующих на рынке коммерческих составов для процессов диффузионного борирования и многокомпонентного насыщения бором совместно с другими элементами. Установлено, что на мировом рынке присутствуют составы подразделения hef Groupe немецкой компании Duferrit GmbH, а также составы Borocoat®, BORINOX® и EKABOR® немецкой компании BorTec GmbH & Co. KG. Данные составы могут поставляться, как в виде гранул либо порошка (DURBORID® G, EKABOR®, Borocoat®), так и в виде пасты (DURBORID® PASTE, BORINOX®). Характеристики составов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики составов для борирования

Продукт	DURBORID <sup>®</sup> G	DURBORID <sup>®</sup> PASTE	EKABOR <sup>®</sup> , Borocoat <sup>®</sup>	BORINOX <sup>®</sup>
Температура насыщения, °С	850–1000	850–1000	750–950	750–950
Консистенция	Порошок или гранулы от 0,25 до 2 мм	Паста для нанесения кистью либо распылителем	Порошок от 0,25 до 2 мм	Порошок либо паста
Время насыщения, ч	3,5–6,0	3,5–6,0	2,5–6,0	2,5–6,0
Толщина слоя	60–150	60–135	10–250	10–60
Особенности	–	На водной основе	–	–
Твердость покрытия	до 2000 HV	до 2000 HV	до 2000 HV	до 2500 HV

При насыщении из порошковых смесей производители рекомендуют использовать герметизируемые контейнера с плавким затвором, либо наличие в печи защитной атмосферы из аргона или азота, а при насыщении из насыщающей пасты – обязательное наличие защитной атмосферы. Предпочтение отдаётся защитной атмосфере на основе аргона, что само по себе удорожает процесс.

Показано, что диффузионными процессами при химико-термической обработке можно управлять не только путем изменения температурно-временных параметров, но также и путем управления одновременной диффузией нескольких элементов.

**Во второй главе «Материалы и методы исследований»** приведен список используемых для приготовления насыщающих сред веществ и объектов исследований. Перечислены методы исследований, приведены методики приготовления образцов и их дальнейшего исследования, описана методика химико-термической обработки сталей и сплавов. Объектами исследований являлись поверхность диффузионных покрытий на углеродистых сталях Ст3, 45, У8, а также легированных сталях 5ХНВМФ, Х12М, Х12МФ, Р6М5. Выбор сталей обусловлен стремлением изучить зависимости параметров одновременной диффузии бора, хрома и титана от содержания углерода (стали Ст3, сталь 45, У8) и легирующих элементов, прежде всего хрома, вольфрама и молибдена (стали 5ХНВМФ, Х12М, Р6М5) в стали, а также определить влияние содержания легирующих элементов на физическое и структурное состояние комплексных диффузионных покрытий на углеродистых и легированных сталях, чаще всего применяемых в производстве. Кроме сталей диффузионному насыщению бором, хромом и титаном в различных сочетаниях подвергали титановые сплавы ВТ1-0, ОТ-4, а также твердые сплавы ВК8 и Т5К10.

В третьей главе «Развитие теоретических основ процессов одновременно многокомпонентного диффузионного насыщения бором, хромом и титаном» проведен анализ возможности протекания химических реакций в процессе насыщения стали бором, хромом и титаном, определены константы равновесия и энергетические параметры (энергия Гиббса, рисунок 1) рассмотренных реакций в широком интервале температур.

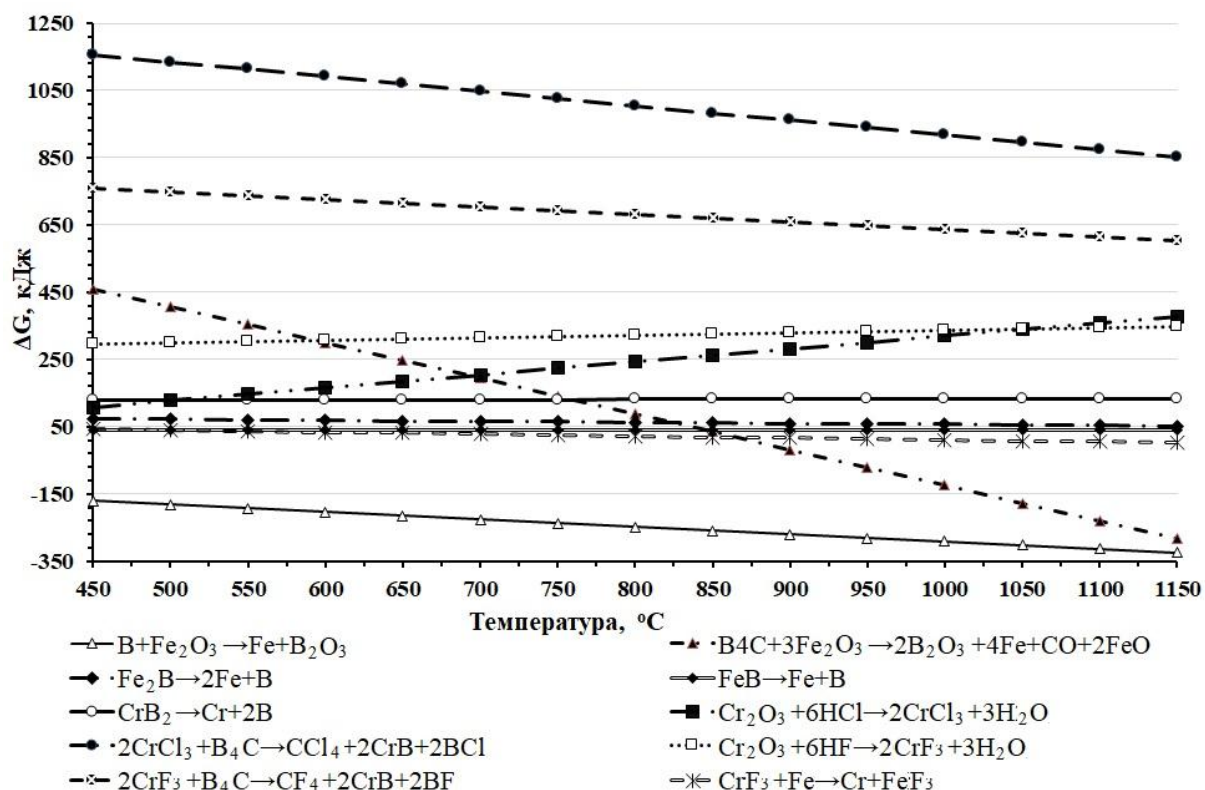


Рисунок 1 – Температурная зависимость энергии Гиббса реакций образования активированных атомов в насыщающей среде

Определенные константы равновесия и энергетического эффекта используются при расчетах толщины диффузионных покрытий. Показано, что при повышении температуры процесса насыщения начиная с 950 °С количество реакций образования активированных атомов бора, хрома и титана увеличивается, что должно приводить к пропорциональному увеличению скорости формирования диффузионных покрытий. По результатам экспериментов установлено, что при одновременном трехкомпонентном насыщении бором, хромом и титаном при температурах вплоть до 1050 °С и временах выдержки вплоть до 3 ч, образование высокобористой фазы FeB не фиксируется ни металлографически, ни при помощи рентгеновской дифрактометрии.

По мере повышения температуры, начиная с 950 °С в диффузионном покрытии фиксируются рентгеновские спектры боридов титана (преимущественно TiB, TiB<sub>2</sub> и других) и легированных хромом боридов железа, изоморфных гемибориду железа (например, (Fe,Cr)<sub>2</sub>B, (Fe,Cr)<sub>2</sub>B<sub>2</sub>). При температурах, больших 1000

°С, в диффузионном слое фиксируются фазы, изоморфные дибориду хрома, легированные железом, типа  $(\text{Cr,Fe})_2\text{B}_4$ .

Весовым методом определена величина адсорбции активированных атомов бора, хрома и титана на стали (таблица 2).

Таблица 2 – Данные эксперимента по определению величин адсорбции на стали

Образец	Прирост массы образца $m$ , кг	Прирост площади поверхности образца $S$ , $\text{м}^2$	Давление в системе «насыщающая среда – насыщаемая поверхность» $P$ , Па	Адсорбция $a$ , г/г
Борирование				
Обмазка	$33,6 \cdot 10^{-6}$	$11,01 \cdot 10^{-6}$	84	0,282
Обмазка+1мм $\text{SiO}_2$	$34,7 \cdot 10^{-6}$	$11,07 \cdot 10^{-6}$	93	0,290
Обмазка+2мм $\text{SiO}_2$	$39,4 \cdot 10^{-6}$	$11,02 \cdot 10^{-6}$	147	0,331
Обмазка+3мм $\text{SiO}_2$	$42,8 \cdot 10^{-6}$	$11,04 \cdot 10^{-6}$	265	0,359
Борохромирование				
Обмазка	$33,8 \cdot 10^{-6}$	$11,03 \cdot 10^{-6}$	97	0,293
Обмазка+1мм $\text{SiO}_2$	$36,2 \cdot 10^{-6}$	$11,05 \cdot 10^{-6}$	121	0,314
Обмазка+2мм $\text{SiO}_2$	$37,3 \cdot 10^{-6}$	$11,01 \cdot 10^{-6}$	183	0,367
Обмазка+3мм $\text{SiO}_2$	$44,3 \cdot 10^{-6}$	$11,03 \cdot 10^{-6}$	293	0,395
Боротитанирование				
Обмазка	$33,6 \cdot 10^{-6}$	$11,01 \cdot 10^{-6}$	63	0,271
Обмазка+1мм $\text{SiO}_2$	$34,2 \cdot 10^{-6}$	$11,03 \cdot 10^{-6}$	81	0,289
Обмазка+2мм $\text{SiO}_2$	$34,8 \cdot 10^{-6}$	$11,02 \cdot 10^{-6}$	123	0,306
Обмазка+3мм $\text{SiO}_2$	$36,7 \cdot 10^{-6}$	$11,07 \cdot 10^{-6}$	196	0,333
Одновременное насыщение бором, хромом и титаном				
Обмазка	$36,2 \cdot 10^{-6}$	$11,05 \cdot 10^{-6}$	96	0,303
Обмазка+1мм $\text{SiO}_2$	$38,1 \cdot 10^{-6}$	$11,07 \cdot 10^{-6}$	116	0,348
Обмазка+2мм $\text{SiO}_2$	$41,7 \cdot 10^{-6}$	$11,03 \cdot 10^{-6}$	163	0,404
Обмазка+3мм $\text{SiO}_2$	$46,5 \cdot 10^{-6}$	$11,05 \cdot 10^{-6}$	243	0,483

Исходя из данных таблицы 2, построены графики температурной зависимости обратной величины адсорбции (рисунок 2). Используя зависимости, представленные на рисунке 2, возможно определить константу адсорбции  $K$  для пары «сталь-адсорбат» при температуре насыщения, равной 950 °С, в случае:

борирования:

$$K = \frac{tg\alpha}{a_0} = \frac{0,268}{2,529} = 0,106,$$

борохромирования:

$$K = \frac{tg\alpha}{a_0} = \frac{0,324}{2,848} = 0,114,$$

боротитанирования:

$$K = \frac{tg\alpha}{a_0} = \frac{0,105}{3,299} = 0,032,$$

одновременного насыщения бором, хромом и титаном:  $K = \frac{tg\alpha}{a_0} = \frac{0,366}{3,146} = 0,116$ ,  
 где  $tg\alpha$  – тангенс угла наклона прямой,  
 $a_0$  – свободное слагаемое – начальная (или «базовая») величина адсорбции.

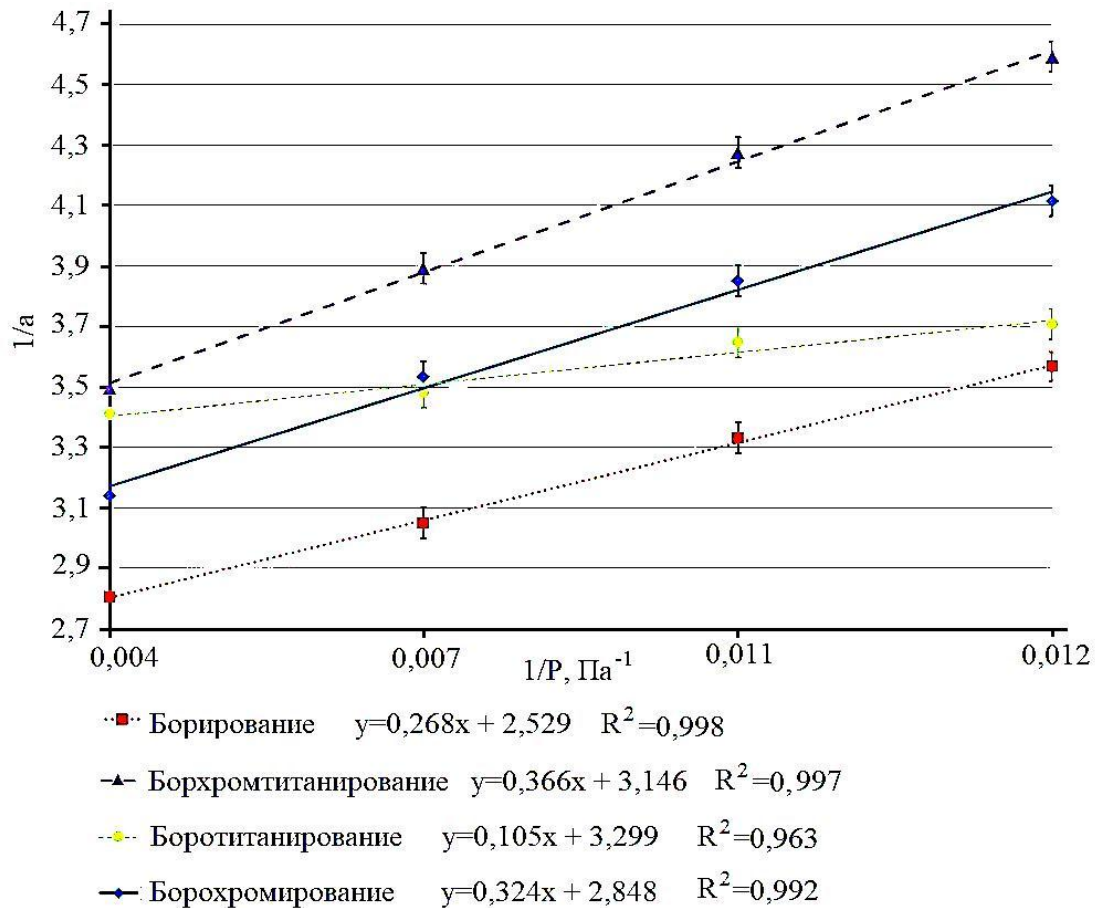


Рисунок 2 – Зависимости обратной величины адсорбции ( $1/a$ ) от обратной величины парциального давления ( $1/P$ ) в системе «насыщающая среда – сталь» в случае насыщения стали 45 при температуре 950 °С

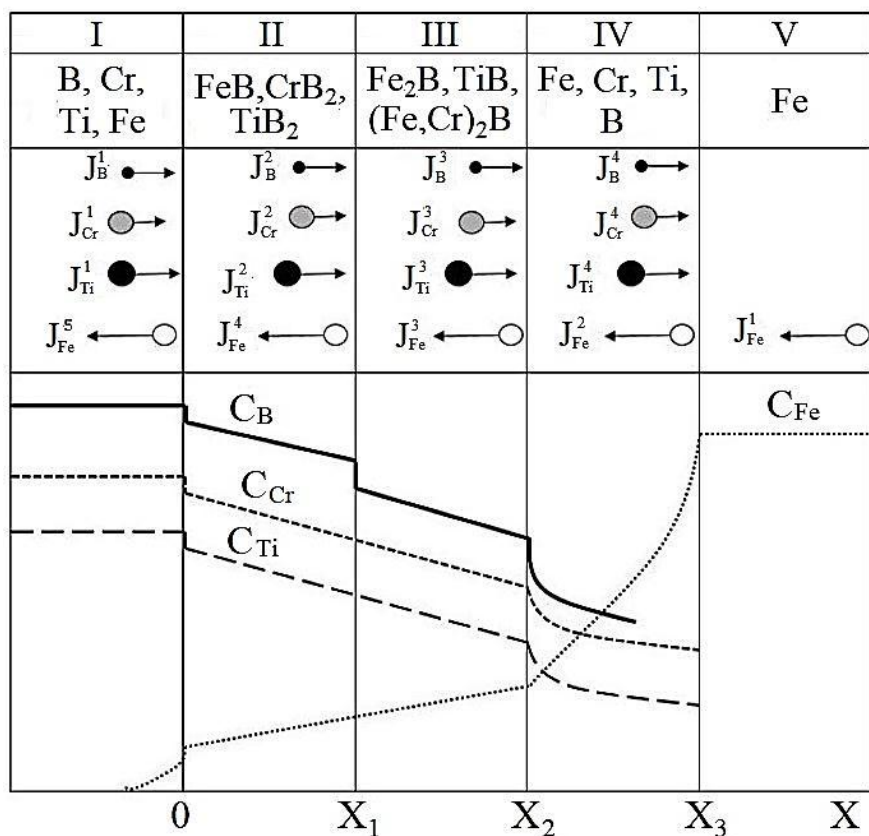
В итоге получено значение энергии активации адсорбции, которое во всех случаях находится в интервале от 147 до 151 кДж/моль, что свидетельствует о химическом механизме адсорбции. Итогом определения параметров адсорбции являются значения поверхностной концентрации насыщающих атомов, которые в дальнейших расчетах определяют мощность диффузионного источника.

Проведен анализ возможных механизмов процесса одновременной многокомпонентной диффузии атомов бора, хрома и титана в железоуглеродистые сплавы. Показано, что ни растворы внедрения, ни растворы замещения в случае диффузии бора не возможны, тогда как хром и титан могут образовывать с железом растворы замещения, при этом внося некоторые искажения в кристаллическую решетку насыщаемого сплава и облегчая таким образом совместную диффузию бора и других атомов.



Для физического описания процесса диффузии рассмотрены схемы диффузии из постоянного мощного источника диффузии в поверхность полубесконечного тела. Данная схема характерна для растущего диффузионного слоя. Схема диффузии из непостоянного источника диффузии в поверхность полубесконечного тела характерна для расчёта параметров диффузионного процесса в переходной зоне. Рассмотренные схемы диффузии определены исходя из второго закона Фика для однокомпонентной диффузии, поэтому для описания диффузионных процессов, происходящих при одновременной диффузии нескольких элементов, данные выражения не совсем корректны, так как не учитывают взаимное влияние одновременно диффундирующих разнородных атомов.

В работе предложено решение уравнения Онзагера для случая одновременного трехкомпонентного насыщения железа бором, хромом и титаном. Для вывода уравнения применена схема диффузии, приведённая на рисунке 3.



I – адсорбированный слой, II – часть слоя, содержащая высокобористые фазы, III – часть слоя, состоящая из низкобористых фаз, IV – твердые растворы бора, хрома и титана в железе, V – железо как основной материал

Рисунок 3 – Схематичное изображение диффузионного слоя и распределение диффузионных потоков и концентраций бора, хрома и титана при одновременном трехкомпонентном насыщении

Теорема Онзагера для многокомпонентной одновременной диффузии нескольких атомов в общем виде записывается следующим образом

$$J_i = \sum_j L_{ij} X_j; \quad (1)$$

где  $J_i$  – диффузионный поток  $i$ -й компоненты;  $X_j$  – термодинамическая сила;  $L_{ij}$  – матрица кинетических коэффициентов.

Термодинамическая сила по Онзагеру определяется как градиент от частной производной энтропии

$$X_j = \frac{\partial s(n)}{\partial n_i} \quad (2),$$

где  $n_i$  – «термодинамические координаты». Для тепло- и массопереноса можно предположить  $n_0 = u$  (плотность внутренней энергии),  $n_i$  – концентрация  $i$ -ой компоненты. Соответствующее значение движущих сил в таком случае выражаются следующим образом:  $X_0 = \text{grad} \frac{1}{T}$ ,  $X_i = -\text{grad} \frac{\mu_i}{T}$ , ( $i > 0$ ), где  $T$  – температура,  $\mu_i$  – химический потенциал  $i$ -ой компоненты.

В случае, когда  $T = \text{const}$ , что характерно для изотермических условий химико-термической обработки, тогда матрицу диффузионных коэффициентов можно записать в виде:

$$D_{ik} = \frac{1}{T} \sum_{j \geq 1} L_{ij} \frac{\partial \mu_j(n, T)}{\partial n_k}, \quad (i, k > 0) \quad (3),$$

$$\mu = RT \ln c + \mu_0 \quad (4).$$

Результирующая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_1(x, t)}{\partial t} = D_{11} \frac{\partial^2 n_1(x, t)}{\partial x^2} + D_{12} \frac{\partial^2 n_2(x, t)}{\partial x^2} + D_{13} \frac{\partial^2 n_3(x, t)}{\partial x^2} + k_1 [n_{F_1} - n_1(x, t)] \lambda \\ \frac{\partial n_2(x, t)}{\partial t} = D_{21} \frac{\partial^2 n_1(x, t)}{\partial x^2} + D_{22} \frac{\partial^2 n_2(x, t)}{\partial x^2} + D_{23} \frac{\partial^2 n_3(x, t)}{\partial x^2} + k_2 [n_{F_2} - n_2(x, t)] \lambda \\ \frac{\partial n_3(x, t)}{\partial t} = D_{31} \frac{\partial^2 n_1(x, t)}{\partial x^2} + D_{32} \frac{\partial^2 n_2(x, t)}{\partial x^2} + D_{33} \frac{\partial^2 n_3(x, t)}{\partial x^2} + k_3 [n_{F_3} - n_3(x, t)] \lambda \end{cases} \quad (5)$$

Начально-граничные условия:

При  $t = 0$ , соответственно  $n_1(x, t) = n_2(x, t) = n_3(x, t) = 0$ ,

При  $x = 0$ , соответственно  $n_1(x, t) = n_1^0$ ,  $n_2(x, t) = n_2^0$ ,  $n_3(x, t) = n_3^0$ ,

При  $x \rightarrow \infty$ , соответственно  $\frac{\partial n_1(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial n_2(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial n_3(x, t)}{\partial x} = 0$ ,

где  $D_{11}, D_{22}, D_{33}$  – коэффициенты самодиффузии бора, хрома и титана соответственно,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $D_{12}, D_{13}, D_{21}, D_{23}, D_{31}, D_{32}$  – соответствующие перекрестные коэффициенты диффузии бора, хрома и титана,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

Основным процессом в нашем случае является процесс борирования, поэтому примем его основным процессом и в расчетах. Решением данной системы уравнений является система:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{(1 - e^{-2(1-3C_{F_1})tk\lambda})(12 + 12\Phi_1 k_1((k_1 + k_2 + k_3) - (1 - k_1) - k_2 - k_3))}{2(1 - 3C_{F_1})}}; \quad (6)$$

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{(1 - e^{-2(k_2/k_1 - 3k_1 C_{F_2})tk\lambda})(12 + 12\Phi_2(1 + k_1 + k_3) + 12\Delta_1/k_1(1 - (1 - \frac{1}{k_1}) - k_3))}{2((k_1 + k_3) - 3k_1 C_{F_2})}}; \quad (7)$$

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{(1 - e^{-2(k_2/k_1 - 3k_1 C_{F_3})tk\lambda})(12 + 12\Phi_4(1 + k_1 + k_2) + 12\Delta_2/k_1(1 - (1 - \frac{1}{k_1}) - k_2))}{2((k_1 + k_2) - 3k_1 C_{F_3})}}. \quad (8)$$

где  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – соответственно глубина проникновения бора, титана и хрома,  $C_1(U, V) = n_1(x, t)/n_1^0$ ;  $C_2(U, V) = n_2(x, t)/n_1^0$ ;  $C_3(U, V) = n_3(x, t)/n_1^0$ ;  $\Delta_1 = D_{22}/D_{11}$ ;  $\Delta_2 = D_{33}/D_{11}$ ;  $\Phi_1 = D_{12}/D_{11}$ ;  $\Phi_2 = D_{13}/D_{11}$ ;  $\Phi_3 = D_{21}/D_{11}$ ;  $\Phi_4 = D_{23}/D_{11}$ ;  $\Phi_5 = D_{31}/D_{11}$ ;  $\Phi_6 = D_{32}/D_{11}$ ;  $C_{F_1} = n_{F_1}/n_1^0$ ;  $C_{F_2} = n_{F_2}/n_1^0$ ;  $C_{F_3} = n_{F_3}/n_1^0$ ;  $K_1 = k_2/k_1$ ;  $K_2 = k_3/k_1$ ;  $C_1^0 = n_2^0/n_1^0$ ;  $C_2^0 = n_3^0/n_1^0$ .

Граничные и начальные условия при этом будут:

$$C_1(U, 0) = C_2(U, 0) = C_3(U, 0) = 0; C_1(0, V) = 1; C_2(0, V) = C_1^0; C_3(0, V) = C_2^0; \frac{\partial C_1(\infty, V)}{\partial U} = \frac{\partial C_2(\infty, V)}{\partial U} = \frac{\partial C_3(\infty, V)}{\partial U} = 0.$$

Найденное решение имеет область определения, лежащую в интервалах, за исключением областей, где значения выражений  $1 - 3C_{F_1}$ ,  $(k_1 + k_3) - 3k_1 C_{F_2}$ ,  $(k_1 + k_2) - 3k_1 C_{F_3}$  обращаются в ноль. Таким образом, полученные решения относительно функций толщины диффузионного покрытия в условиях одновременного насыщения сталей бором, хромом и титаном  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ , являются обобщенным частным случаем решения уравнения Онзагера для одновременной трехкомпонентной диффузии бора, хрома и титана в железоуглеродистые сплавы.

Расчеты по формулам (6)–(8) произведены при условии, что  $C_{MFe} = 8,7 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ;  $\lambda = 2,2 \cdot 10^{-48}$ ;  $k\lambda = 1,9 \cdot 10^{-11}$ ;  $C_{MB} = 1,3 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ;  $C_{MCr} = 8,33 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ;  $C_{MTi} = 5,67 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ;  $k_1 = 1,02$ ;  $k_2 = 1,26$ ;  $k_3 = 1,003$ ;  $D_{11} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $D_{22} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $D_{33} = 6,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $D_{12} = 8,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $D_{13} = 2,0 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $D_{31} = 4,1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $D_{21} = 1,7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $D_{23} = 7,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $D_{32} = 2,9 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $C_1^0 = 2,50 \cdot 10^{30} \text{ м}^{-3}$ ;  $C_2^0 = 4,27 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ;  $C_3^0 = 4,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

Более простая формула, обычно применяемая для инженерных расчетов толщины диффузионных покрытий в условиях однокомпонентного насыщения (9), в случае борирования, а тем более многокомпонентного насыщения бором, хромом и титаном имеет серьезную (в десятки процентов) погрешность.

$$h = \sqrt{2k_d \tau} \quad (9).$$

Расчеты по формуле (9) получены при условии, что коэффициент диффузии бора в бориде железа при температуре 950 °C:  $k_d = 1,82 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ , в переходной зоне  $1,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ . Данное значение коэффициента диффузии было получено при

условии, что бор диффундирует по монокристаллу бориде железа. Значение коэффициента диффузии бора при его диффузии в условиях многокомпонентного насыщения бором, хромом и титаном, полученный в работе Ивановой Т. Г. для сталей Ст3, равный  $5,096 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ , 5ХНВМФ –  $3,023 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ , Х12М –  $2,347 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ . Исходя из известных коэффициентов диффузии по формуле (9) можно рассчитать толщину формирующегося диффузионного слоя. Для стали 45 примем коэффициент диффузии, равный  $5,096 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ . Сравнительные данные расчетов толщины диффузионного слоя, полученного одновременным многокомпонентным насыщением бором, хромом и титаном стали 45 и сравнение расчетных и экспериментальных данных приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение толщин диффузионного слоя на стали 45, полученного одновременным многокомпонентным насыщением бором, хромом и титаном при температуре 950 °С

Номер серии	Время, мин	Толщина слоя при $k_{д1}=1,82 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ , мкм	Толщина слоя при $k_{д2}=5,096 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$	Толщина слоя В/Cr/Ti по форму- лам (6)–(8)	Эксперимен- тальные дан- ные	Отношение Расч/Эксп, раз
1	0	0	0	0/0/0	0	0
2	30	33	55	97/91/46	85	2,58/1,54/0,88
3	60	47	78	137/129/64	122	2,61/1,56/0,89
4	90	57	96	167/158/79	150	2,64/1,58/0,90
5	120	66	111	193/183/91	175	2,64/1,58/0,90
6	150	74	124	216/204/102	195	2,64/1,58/0,90
7	180	81	135	237/224/112	209	2,58/1,54/0,88

Как видно из таблицы 3, коэффициенты диффузии не совсем точно отражают суть процесса диффузии и его изменение с течением времени. При этом, расчетная толщина диффузионного покрытия, рассчитанная по формулам (6)–(8), имеет большую сходимость с экспериментальными данными. Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями толщины диффузионного покрытия можно объяснить тем, что коэффициент диффузии не является константой, а непрерывно изменяется в процессе диффузии. Расхождение между экспериментальными и расчетными данными объяснимо тем, что приведенные в литературных источниках данные соответствуют либо идеализированным условиям, либо являются результатом статистической обработки реальных экспериментальных данных, отнесенных к конкретному набору плавок сталей. Сравнение расчет-

ных толщин диффузионных покрытий, полученных одновременным диффузионным насыщением бором, хромом и титаном сталей 45 и X12МФ при температуре 950 °С, представлены на рисунке 4.

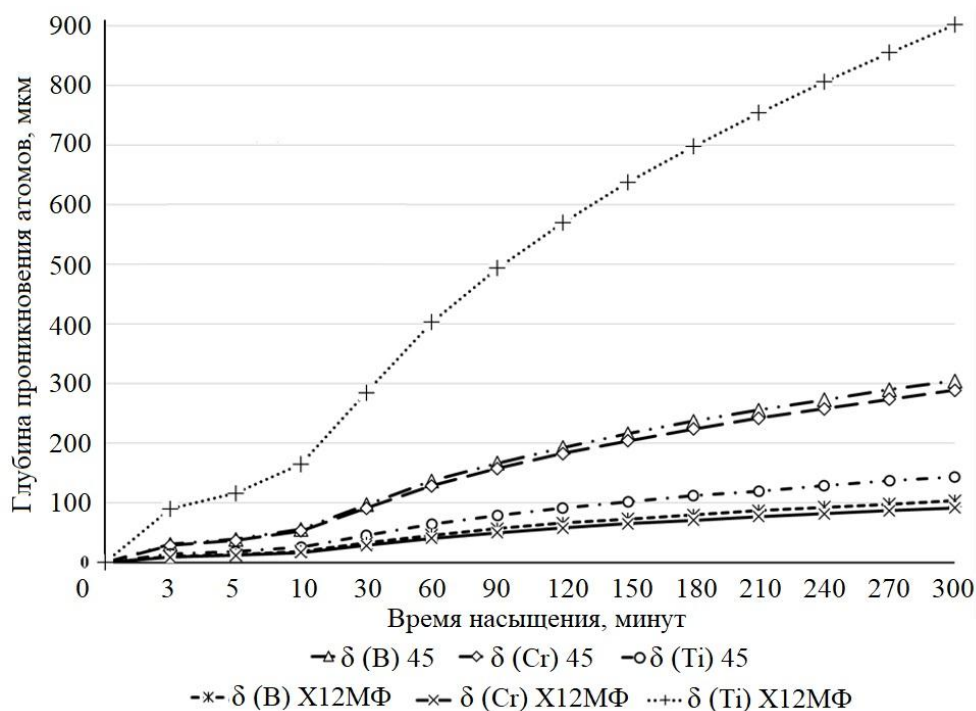


Рисунок 4 – Глубина проникновения атомов бора, хрома и титана в поверхность сталей 45 и X12МФ, рассчитанная по формулам (6)–(8)

Таким образом, одновременное насыщение сталей бором, хромом и титаном позволяет формировать более градиентные по химическому и фазовому составу покрытия в сравнении с одно– и двухкомпонентными покрытиями. Рост степени градиентности состава покрытия приводит к появлению новых свойств диффузионных покрытий (закаливаемость поверхностного слоя на стали Ст3), а также повышает эксплуатационные характеристики (твердость, износостойкость, коррозионную стойкость) упрочняющих покрытий в целом.

**В четвертой главе «Разработка составов насыщающих сред и технологий комплексного диффузионного насыщения бором, хромом и титаном»** показано, что при одновременном насыщении бором, хромом и титаном, скорость роста диффузионного покрытия на 20–40 % больше по сравнению с процессом одновременного борирования.

Для измельчения исходных компонентов порошковых смесей в последнее время повышенный интерес проявляется, прежде всего, к атриторам и планетарным мельницам, так как данные типы измельчающего оборудования помимо измельчения, позволяют получать материалы, обладающие более высокими показателями физической и химической активности. Планетарные мельницы позволяют

не только измельчать вещества, но и реализовывать условия, при которых возможна механическая активация химических реакций, обычно протекающих при высоких температурах. Применение измельчённых в планетарной мельнице насыщающих сред приводит к активизации целого комплекса диффузионных процессов: более мелкие частицы, имеющие более высокие концентрации легирующих элементов (хрома, кремния, железа) способствуют формированию более плотных, беспористых слоев за счет одновременной с бором, более интенсивной диффузии, компенсирующей недостаточную восходящую диффузию тяжелых элементов из переходной зоны.

По результатам экспериментов распределение микротвердости от поверхности до глубины 3 мм закаленной после диффузионного насыщения бором, хромом и титаном стали Ст3 имеет вид, представленный на рисунке 5.

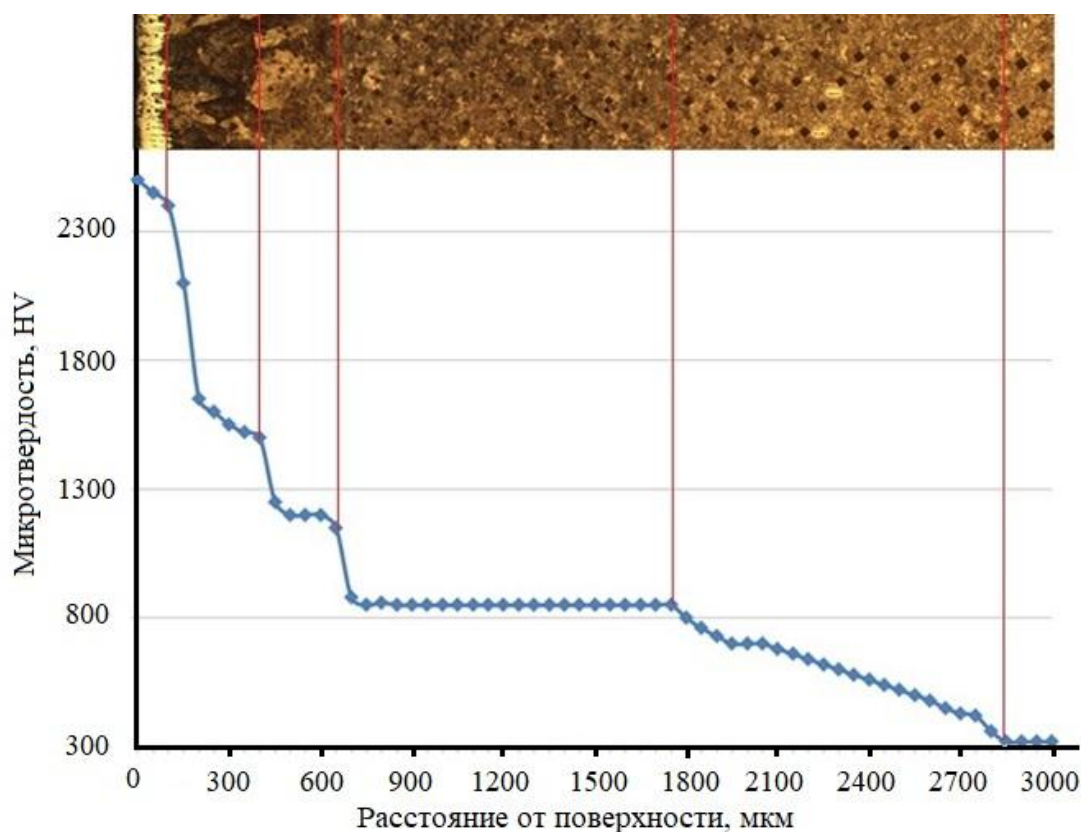


Рисунок 5 – Распределение микротвердости по диффузионному слою на стали Ст3 после закалки с температуры насыщения (950 °С) и отпуска при 200 °С, 2ч

Толщина слоя боридов на стали Ст3 после 2 ч насыщения при температуре 950 °С достигает 140–180 мкм. Далее под слоем боридных кристаллов располагается верхняя часть переходной зоны. Несмотря на то, что видимых выделений карбидных либо боридных фаз не происходит, но микротвердость верхней части переходной зоны находится в интервале значений 1350–1550 НВ<sub>0,1</sub>.

Также следует обратить внимание на микротвердость слоя боридов – он имеет однофазное строение, соответствующее фазе гемиборида железа, но при этом микротвердость этого слоя составляет порядка  $2250 \text{ HV}_{0,1}$ , тогда как известная микротвердость чистого гемиборида железа не превышает  $1800 \text{ HV}_{0,1}$ , то есть примерно на  $450 \text{ HV}_{0,1}$  ниже, чем наблюдаемая. Зона перлита на стали Ст3 после одновременного насыщения бором, хромом и титаном достигает значений порядка  $1,8\text{--}2,0 \text{ мм}$ , кроме того, эта область также обогащена бором, хромом и титаном. Достигаемой в результате такой ХТО концентрации легирующих элементов (преимущественно бора, хрома, титана и углерода) становится достаточно для появления закаливаемости стали Ст3 на глубину до  $2,0\text{--}3,0 \text{ мм}$ .

**В пятой главе «Исследование структуры диффузионных покрытий, формируемых на сталях и сплавах в результате одновременного диффузионного насыщения бором, хромом и титаном»** представлены составы насыщающих сред и технологические параметры процесса одновременного трехкомпонентного диффузионного насыщения бором, хромом и титаном сталей различного класса – от углеродистых до легированных, включая быстрорежущие. В разделе «Насыщение углеродистых сталей» представлены составы насыщающих смесей и параметры насыщения углеродистых сталей. Для одновременного диффузионного насыщения бором, хромом и титаном углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода до  $0,4 \text{ масс. \%}$  рекомендован состав:

$15\% \text{ CrB}_2 + 10\% \text{ TiB}_2 + 50\% \text{ B}_4\text{C} + 5\% \text{ NaF} + 3\% \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 7\% \text{ Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 10\% \text{ графита}$ .

Тогда как состав для насыщения углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода свыше  $0,4 \text{ масс. \%}$  предлагается следующий:

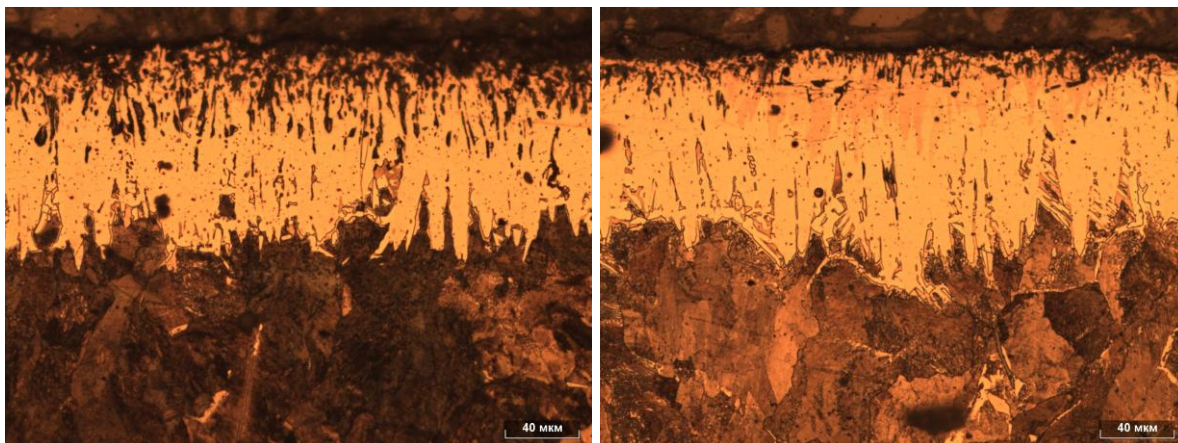
$15\% \text{ ФХр850} + 15\% \text{ ФТи 5} + 50\% \text{ B}_4\text{C} + 5\% \text{ NaF} + 3\% \text{ NH}_4\text{Cl} + 7\% \text{ Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 5\% \text{ графита}$ .

Технологическими параметрами насыщения в данных смесях являются температура –  $920\text{--}950 \text{ }^\circ\text{C}$ , время – от  $1,5$  до  $4$  часов. При этом на стали образуется диффузионное покрытие с толщиной боридного слоя от  $120$  до  $250 \text{ мкм}$ , имеющее микротвердость боридного слоя около  $2500 \text{ HV}_{0,1}$ , а твердость упрочненного материала при измерении по нормали к диффузионному покрытию изменяется от  $970$  до  $1980 \text{ HV}_1$  при изменении толщины слоя боридов соответственно от  $120$  до  $250 \text{ мкм}$ .

Фазовый состав диффузионных покрытий на углеродистых сталях при одновременном насыщении бором, хромом и титаном представлен фазами  $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$ . При времени насыщения, меньшем  $2$  часов высокобористая фаза  $\text{FeB}$  практически отсутствует и локализована отдельными островковыми включениями на поверхности боридного слоя. При максимальном времени насыщения  $4$  часа высокобористая фаза занимает до  $10\%$  по объему всей боридной фазы. Структуры



диффузионных покрытий, полученных одновременным насыщением бором, хромом и титаном представлены на рисунке 6.



а – насыщение 2 часа,

б – насыщение 4 часа

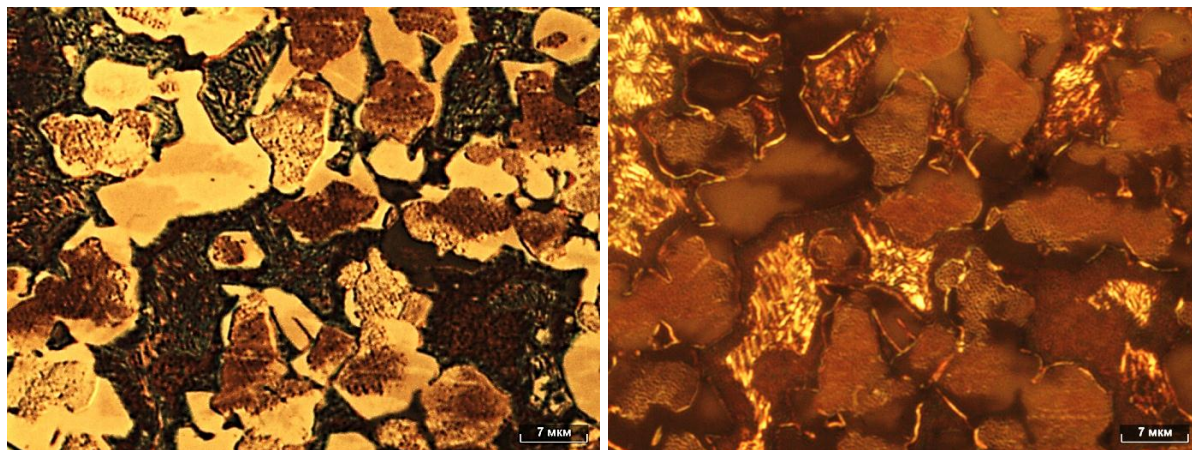
Рисунок 6 – Микроструктура однофазного боридного слоя на стали Ст3, полученная насыщением бором, хромом и титаном

Как видно из представленных рисунков 6 а) и 6 б), при увеличении времени насыщения, толщина слоя боридов увеличивается в меньшей степени, однако сплошность боридных игл значительно возрастает. Кроме того, в верхней части боридного слоя просматриваются иглы высокобористой фазы. В силу особенностей высокобористой фазы (высокие показатели твердости и хрупкости, значительный коэффициент линейного расширения), при охлаждении с температуры насыщения в слое высокобористой фазы и по границе между фазами  $\text{FeV}$  и  $\text{Fe}_2\text{V}$  формируются трещины в направлении, параллельном поверхности образца. При дальнейшей эксплуатации изделия с двухфазным боридным слоем возможен скол высокобористой фазы. Изучение поверхностной микроструктуры диффузионного покрытия, проведенное параллельно поверхности, позволило также выявить механизмы диффузии хрома и титана в процессе одновременной диффузии совместно с бором – хром, диффундирует по всей поверхности, стремясь при этом к диффузии прежде всего по телу зерна. Предполагаемый механизм диффузии хрома – преимущественно вакансионный, с образованием твердых растворов хрома в железе в силу его неограниченной растворимости в железе. Тогда как титан стремится к преимущественной диффузии по границам зерен и фаз. Соответствующие изображения микроструктур представлены на рисунке 7. Для наглядности показана структура диффузионного покрытия после съема части диффузионного слоя на глубину порядка 100 мкм.

Как видно из рисунка 7, светлая оторочка с более темными областями в центре представляет собой сечение боридных игл, представляющих собой пре-



имущественно гемиборид железа  $\text{Fe}_2\text{B}$ , легированный хромом, тогда как сама светлая оторочка – смесь боридов железа, хрома и титана. При этом, именно благодаря легированию титаном, химическая стойкость к травлению этой структурной составляющей выше. Между иглами боридов заметны выделения перлита.



а

б

а – специальным травлением контрастировано распределение титана

б – специальным травлением контрастировано распределение хрома

Рисунок 7 – Микроструктура поверхности диффузионного покрытия на стали 45, полученного одновременным насыщением бором, хромом и титаном

В разделе «насыщение легированных сталей» представлены результаты исследований сталей 5ХНВМФ, Х12МФ и Р6М5 после одновременного насыщения бором, хромом и титаном.

Результаты исследований по влиянию температурно-временных параметров процесса одновременного диффузионного насыщения стали Р6М5 бором, хромом и титаном представлены в таблице 4. Согласно приведенным данным, вне зависимости от последующей термической обработки, химико-термическая обработка стали Р6М5 при температуре 950 °С позволяет сохранить твердость сердцевины упрочняемой детали и получить на поверхности упрочненный диффузионный слой, имеющий твердость 2500–2800 НВ<sub>1</sub>. Изделия из стали Р6М5, подвергнутые одновременному бор-хром-титанированию могут работать в условиях повышенных температур и при наличии коррозионно-абразивных сред.

На стали Х12МФ возможно формирование диффузионного покрытия значительно большей протяженности, нежели покрытие получаемое однокомпонентным борированием. Данный эффект может быть достигнут при высокотемпературном насыщении стали Х12МФ при температурах 1050–1100 °С из смеси, содержащей повышенное количество хрома и титана следующего состава: 15% ФХр850+20%ФТи 35+45% В<sub>4</sub>С+5% NaF+3% NH<sub>4</sub>Cl+12%Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Таблица 4 – Свойства стали Р6М5 после термической обработки

Направление исследования микроструктуры	Балл зерна	Твердость, HRC	Плотность карбидов, шт/мм <sup>2</sup>	Средний размер карбидов, мкм	Объемная доля карбидов, %
Закалка с 1250 °С в масло + 3 кратный отпуск при 550 °С					
Вдоль проката	11	64,2	3 043 509	2,39	14,3
Поперек проката	12	64	1 216 913	1,62	15,7
Отжиг при 950 °С в течение 1,5ч, охлаждение с печью до 300 °С далее – на воздухе					
Вдоль проката	12	60,8	759 841	2,13	21,3
Поперек проката	10	61	7 472 743	1,3	10,9
Закалка с 950 °С, 1,5ч, масло. Отпуск при 200 °С, 2 ч.					
Вдоль проката	12	60,7	940 340	2,46	28,6
Поперек проката	11	60,5	753 539	1,96	8,98

Распределение микротвердости по диффузионному слою на стали Х12МФ после одновременного насыщения бором, хромом и титаном представлено на рисунке 8.

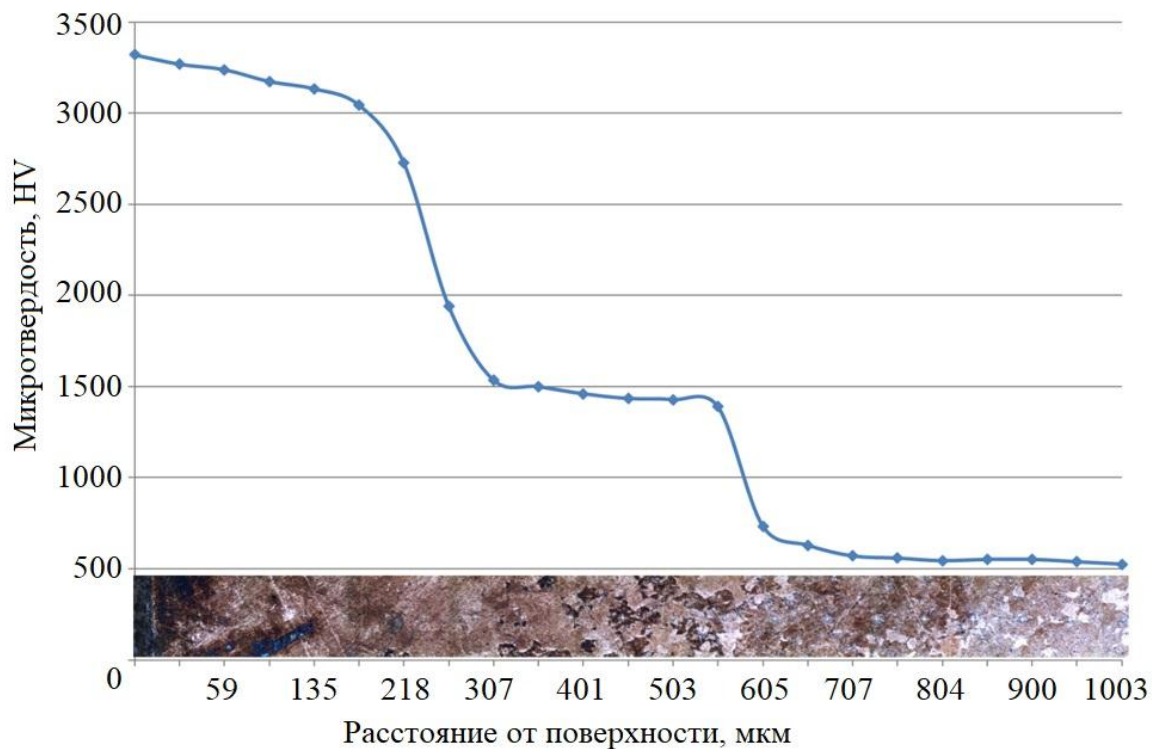


Рисунок 8 – Распределение микротвердости по диффузионному слою на стали Х12МФ, полученному высокотемпературным бор-хром-титанированием

За счет комбинации высокой температуры и повышенного содержания в насыщающей среде хрома и титана реакции с образованием активированных атомов хрома и титана идут более интенсивно, особенно на начальных этапах насыщения, что в свою очередь приводит к формированию на поверхности карбидных слоев, содержащих диффундирующие атомы хрома и титана. Далее карбидные слои диффузионным путем дробятся и продавливаются вглубь материала диффундирующим бором. Такая особенность процесса приводит к формированию на поверхности стали слоя боридов толщиной до 120 мкм против 50-70 мкм при однокомпонентном борировании. При этом боридные иглы растут не сплошным фронтом, а между боридными иглами располагается карбидная матрица, содержащая до 7% масс. Ti. Под слоем боридов формируется развитая переходная зона, имеющая соизмеримую с боридами железа микротвердость до 2000 HV, представляющая собой твердый раствор с включениями мелкодисперсных карбидов хрома и титана. Следует отметить, что хром в сталь Х12МФ также диффундирует, так как концентрация хрома в диффузионном слое по данным EDS анализа составляет от 14 до 16 масс. % по сравнению с 11,5–12,3 масс. % в самой стали. При бор-хром-титанировании сталей, в составе диффузионного покрытия обнаруживаются бориды железа, карбиды и карбобориды хрома и легирующих элементов стали, входящих в состав стали. Титан присутствует в виде боридов TiB и  $TiB_2$ , карбид TiC и силицид  $Ti_5Si_3$ .

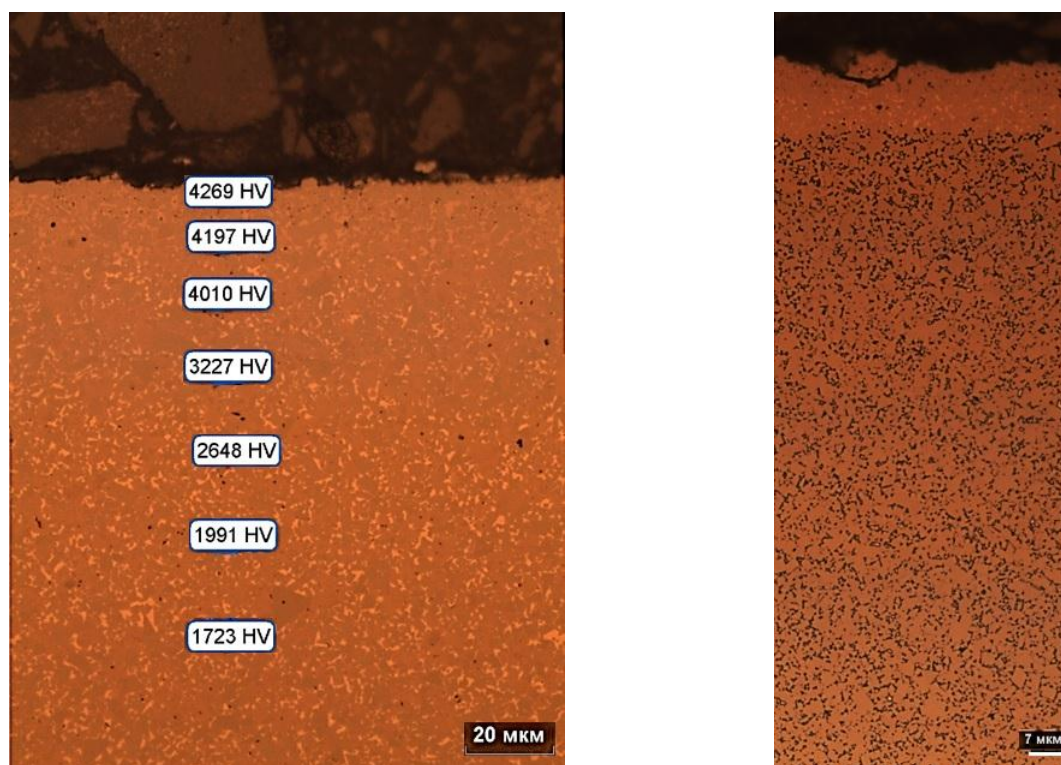
В разделе «насыщение других материалов» представлены результаты диффузионного насыщения из смесей, содержащих бор, хром и титан, титановых сплавов и твердых сплавов ВК8 и Т5К10. При диффузионном насыщении из смесей, содержащих бор, хром и титан, титановых сплавов возможно формирование диффузионных покрытий толщиной до 70-80 мкм и имеющих структуру, представленную на рисунке 9.



Рисунок 9 – Микроструктура образца титана VT1-0 после диффузионного насыщения из смесей, содержащих бор, хром и титан



При одновременном бор-хром-титанировании твердых сплавов, получены диффузионные покрытия, представленные на рисунке 10.



а – Т5К10

б – ВК8

Рисунок 10 – Микроструктура диффузионного покрытия на твердых сплавах

**В шестой главе «Свойства и внедрение диффузионных покрытий»** представлены результаты лабораторных испытаний сталей, упрочненных одновременным бор-хром-титанированием в условиях сухого трения о закрепленные частицы абразива и трения о закрепленные абразивные частицы, сопряженного с коррозионным воздействием растворов серной, азотной и соляной кислот (рисунки 11, 12).

Согласно результатам промышленных испытаний ножей для измельчения корпусов кислотных аккумуляторных батарей, упрочненных в разработанной насыщающей среде изготовленных из стали 45, показано что износостойкость упрочненных деталей повысилась в результате упрочнения в 13–18 раз (с 10–12 тонн измельченных корпусов до 160–180 тонн). Упрочненные по разработанному способу ножи из углеродистой стали Ст3 по стойкости не уступают ножам из стали 65Г2С и в 2,12 раза и превосходят ножи из стали У8А упрочненные методом борохромирования. На данный способ упрочнения и разработанный состав обмазки получены патенты РФ на изобретения. По данным ООО «РАКУРС» расчетный экономический эффект от применения упрочненных ножей из углеродистой стали Ст3 по сравнению с применяемыми ранее закаленными ножами из стали Х12М составляет 12 тыс. руб. на один комплект.

Экономический эффект от использования упрочненных бор-хром-титанированием ножей из стали 45 составил 50 тыс. руб. на 1 комплект в ценах 2016г. При условии, что упрочненных ножей в год требуется 10-12 комплектов, годовой экономический эффект достигает 0,5–0,6 млн. руб. в год с одной дробилки.

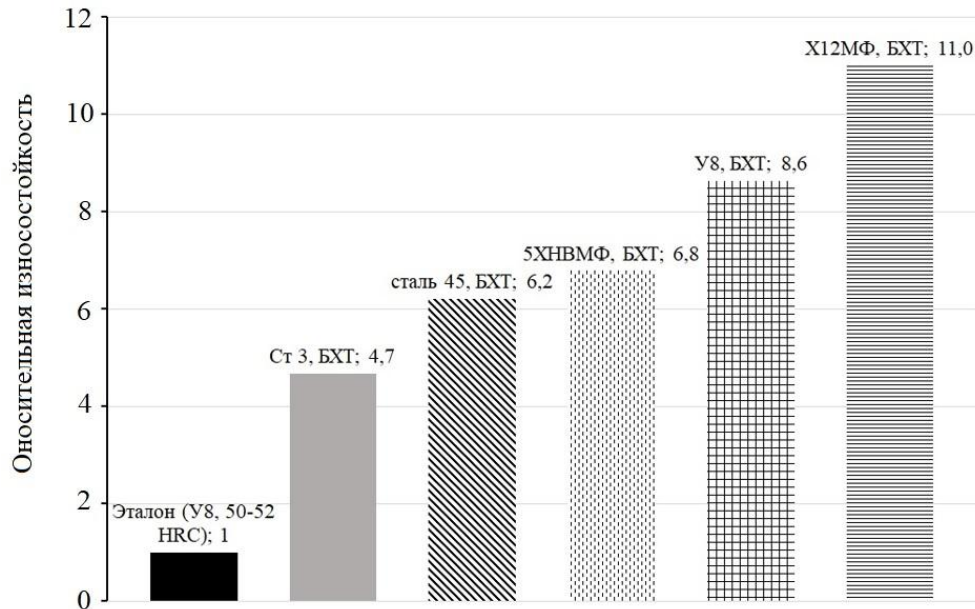


Рисунок 11 – Относительная износостойкость сталей разных марок, упрочненных одновременным бор-хром-титанированием при удельном давлении на образец 1 МПа в условиях сухого трения о жестко закрепленные частицы абразива

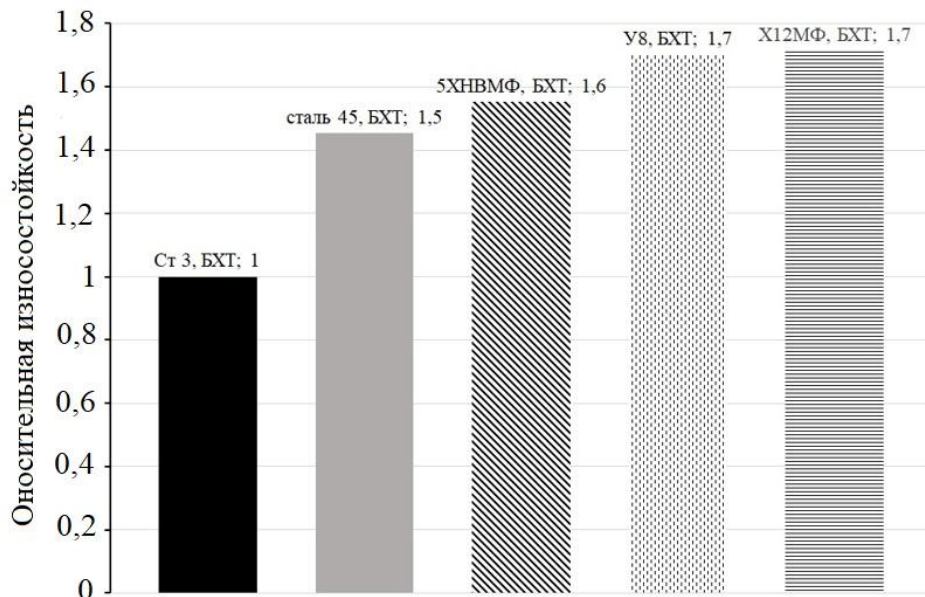


Рисунок 12 – Относительная износостойкость при трении о жестко закрепленные абразивные частицы в 15% растворе  $H_2SO_4$  сталей разных марок, упрочненных одновременным бор-хром-титанированием при удельном давлении на образец 1 МПа

Для ООО «Вектор», г. Барнаул, была упрочнена партия сопел для установки пескоструйной обработки в количестве 4 штук. Предложена замена стали 45 на сталь СтЗсп в комбинации с одновременным диффузионным насыщением рабочей поверхности сопел бором, хромом и титаном. По результатам испытаний принято решение о внедрении разработанной технологии упрочнения внутренней поверхности сопел методом одновременного бор-хром-титанирования и замене материала сопла на более дешевый.

По результатам промышленных испытаний фильер для гранулятора цеолита из стали 7ХГ2ВМФ, упрочненных по разработанному способу, стойкость составила 1840–2200 кг гранулированной катализаторной массы. Износ формующих отверстий при этом составил 0,229–0,299 мм, что не превысило критического износа. Скорость износа упрочненной фильеры составила в среднем порядка 0,013мм/100 кг катализаторной массы, что в 6,7–7,2 раза ниже, чем скорость износа неупрочненной фильеры (0,08–0,1 мм/100 кг катализаторной массы). По предварительным расчетам, произведенным в ПАО «НЗХК», минимальный экономический эффект от внедрения упрочненных по разработанной технологии многокомпонентного насыщения бором, хромом, кремнием и титаном фильер составляет не менее 25 тыс. руб. на 1 т катализаторной массы или от 1,5 до 3 млн. руб. в год.

Для ООО «Теплоарматура», г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, было произведено упрочнение 2-х комплектов защитных пластин (брони) для дробеметной установки Q-326, изготовленных из стали 30Х. При этом, один комплект брони был упрочнен методом химико-термоциклической обработки с одновременным насыщением бором и хромом, второй комплект – методом изотермической химико-термической обработки с одновременным бор-хром-титанированием. Отмечено, что износостойкость обоих комплектов была равнозначной. Однако технология одновременного насыщения бором, хромом и титаном в изотермических условиях по сравнению с технологией двухкомпонентного насыщения имеет несколько преимуществ:

- 1) При одновременном насыщении тремя элементами получаются диффузионные слои, толщина которых не уступает толщине диффузионных слоев, получаемых путем двухкомпонентного насыщения бором и хромом в условиях циклического изменения температур.

- 2) ХТО в изотермических условиях имеет в 2-3 раза меньшую трудоемкость, чем ХТО в условиях циклически изменяемых температур, что дает приблизительно в 2-2,5 раза больший экономический эффект.

Для предприятия завод «Северсталь-метиз», ПАО «Северсталь», г. Череповец, упрочнена партия волок из ВК8 в количестве 4 штук. При нормативе расхода

волокон 10,5 шт/т проволоки диаметром 0,30 и 0,38 мм, стойкость упрочненных одновременно насыщением бором, хромом и титаном волокон составила 3,5–5,3 шт/т, что в 2–2,5 раза выше. Результаты подтверждены актами производственных испытаний.

### Заключение

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической проблемы – повышению износостойкости и коррозионной стойкости диффузионных боридных покрытий на сталях и сплавах за счет формирования боридных диффузионных слоев, легированных хромом и титаном, формируемых в один термический цикл. Решение данной проблемы имеет важное значение для развития машиностроения, газо- и нефтедобывающей, обрабатывающей отраслей промышленности Российской Федерации. А также благоприятствует импортозамещению поставляемой из-за рубежа продукции тяжелого машиностроения.

Решение задач, поставленных в работе, позволяет сформулировать следующие выводы:

1. В результате теоретического анализа и предварительных экспериментальных изысканий показаны и научно обоснованы перспективы и эффективность использования одновременного многокомпонентного насыщения сталей и сплавов титана, карбидовольфрамовых твердых сплавов типа ВК8 бором, хромом и титаном.

2. Установлены закономерности формирования структурно-фазового состава на сталях и сплавах в результате их комплексного насыщения бором, хромом и титаном:

– на сталях с содержанием углерода до 0,45–0,5 масс. % и общим содержанием легирующих элементов до 3–5 масс. % формируются диффузионные боридные слои, состоящие из гемиборида железа  $\text{Fe}_2\text{B}$ , дополнительно легированные хромом и силицидами титана;

– на сталях с содержанием углерода свыше 0,5 масс. % и общим содержанием легирующих элементов свыше 5 масс. % формируются диффузионные боридные слои, состоящие из гемиборида железа  $\text{Fe}_2\text{B}$ , дополнительно легированные хромом и карбоборидами хрома и титана, боридами титана и карбидом титана;

3. По результатам термодинамических расчетов, установлено, что образование активированных атомов бора при разложении карбида бора возможно и термодинамически выгодно в присутствии кислорода. Без кислорода распад карбида бора энергетически затратен. Для наилучшей активации процесса диффузионного насыщения (увеличения толщины, формирования благоприятных микроструктуры и фазового состава боридного слоя), а также компенсации «отравления»

насыщающей среды железом наибольшую эффективность показал комплексный активатор на основе смеси фторида натрия, фторида аммония и йодида калия.

4. Термодинамически обоснована оптимальная температура процесса одновременного трехкомпонентного диффузионного насыщения выше 920 °С, так как при температурах, больших 920 °С активируются дополнительные реакции образования атомов хрома и титана. Предложена модель и решение на основе уравнения Онзагера для случая одновременного трехкомпонентного насыщения бором, хромом и титаном относительно функций толщины диффузионного покрытия с непрерывно изменяющимися коэффициентами диффузии насыщающих атомов.

5. Установлено, что комплексное насыщение бором, хромом и титаном низкоуглеродистых сталей типа Ст3 приводит к появлению закаливаемости данных сталей на глубину до 3 мм. Данное явление имеет перспективы для замены низкоуглеродистыми сталями с соответствующей обработкой средне- и высокоуглеродистых сталей для изготовления некоторых рабочих органов и деталей машин. Показана возможность борирования высоколегированных сталей типа Х12М, Р6М5, при этом содержание бора в диффузионном слое может достигать 23 мас. %, а толщина слоя боридов – 60–70 мкм.

6. Разработаны составы и технологии для одновременного насыщения поверхности углеродистых сталей бором, хромом и титаном. В качестве оптимального состава для одновременного бор-хром-титанирования углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода до 0,4 масс. % (по сталь 45 включительно) предложена следующая смесь:

15%  $\text{CrB}_2$ +10%  $\text{TiB}_2$ +50%  $\text{B}_4\text{C}$ +5%  $\text{NaF}$ +3%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ +7%  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + 10% графита.

Для углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода свыше 0,4 масс. % предложена следующая смесь:

15%  $\text{ФХр850}$ +15%  $\text{ФТи35}$ +50%  $\text{B}_4\text{C}$ +5%  $\text{NaF}$ +3%  $\text{NH}_4\text{Cl}$ +7%  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ +5% графита.

Технологические рекомендации по одновременному насыщению поверхности углеродистых, легированных и специальных сталей бором, хромом и титаном из предлагаемых смесей следующие: температура 920–950 °С, время – от 1,5 до 4 часов. При этом образуется диффузионное покрытие с толщиной боридного слоя от 120 до 250 мкм, имеющее микротвердость боридного слоя 2500–3700  $\text{HV}_{0,1}$ , а твердость упрочненного материала при измерении по нормали к диффузионному покрытию – от 1970 до 2450  $\text{HV}_1$  при толщине боридного слоя от 120 до 250 мкм соответственно.

7. Показана возможность получения упрочняющих боридных слоев на титановом сплаве из порошковых насыщающих сред на основе аморфного бора и многокомпонентных смесей на основе карбида бора. Установлено, что в условиях твердо-



фазного насыщения титана из порошковых смесей, процессы диффузии идут достаточно интенсивно и формируются покрытия с рабочей толщиной от 30 до 150 мкм, в зависимости от температурно-временного режима насыщения. Возможна технология газового борирования титана ВТ-1,0 с генерацией газовой фазы в ходе реакций разложения порошковой насыщающей среды непосредственно в герметизируемом контейнере. Толщина диффузионных покрытий при этом достигает 75 мкм.

8. Представлены результаты диффузионного упрочнения карбидовольфрамовых твердых сплавов ВК8 и Т5К10. Толщина диффузионного покрытия на этих материалах, устанавливаемая металлографически достигает 17-20 мкм, тогда как протяженность измененного слоя, измеренная дюрметрически достигает 70-90 мкм. Средняя микротвердость упрочненного слоя при этом составляет 1965 HV<sub>0,1</sub> для ВК8 и 3150 HV<sub>0,1</sub> для материала Т5К10.

9. Разработанные технологии одновременного бор-хром-титанирования внедрены на предприятиях РФ, в числе которых ООО «МОКВИН» (г. Новоалтайск, повышение ресурса ножей для измельчения аккумуляторного лома), ПАО «Новосибирский завод химконцентратов» (г. Новосибирск, повышение ресурса фильер гранулятора катализаторной массы), ООО «Алтайский завод прецизионных изделий» (г. Барнаул, упрочнение защитных пластин для дробеметной установки Q-326, упрочнение ножей для бесцентрового шлифования, кондукторных втулок для глубокого сверления), ООО «РАКУРС» (г. Барнаул, упрочнение ножей для дробления аккумуляторного лома), ООО «Теплоарматура» (г. Улан-Удэ, упрочнение защитных пластин для дробеметной установки Q-326), ООО «СВЭЛ» (г. Барнаул, упрочнение роликов для подачи проволоки), завод «Северсталь-метиз», ПАО «Северсталь», г. Череповец.

10. По результатам НИОКР, проведенных в рамках диссертационного исследования разработаны следующие объекты интеллектуальной собственности: Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей (Патент РФ 2345175); Способ упрочнения деталей из штамповых сталей (Патент РФ 2360031); Способ упрочнения стальных деталей (Патент РФ 2381299); Способ изготовления и упрочнения деталей из чугунов и сталей (Патент РФ 2381299); Способ нанесения керамического покрытия на детали из чугунов и сталей (Патент РФ 2482215); Способ индукционного упрочнения и восстановления деталей (Патент РФ 2507027); Способ изготовления упрочненных стальных и чугунных деталей (Патент РФ 2508959); Способ упрочнения стальных деталей (Патент РФ 2556808); Способ индукционного упрочнения почвообрабатывающего рабочего органа (Патент РФ 2582840); Способ диффузионного упрочнения стальных деталей (Патент РФ 2589954);

11. Результаты исследований внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» и используются при подготовки магистров по направлениям 22.04.01. «Материаловедение и технология материалов» и 15.04.05. «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» профиля «Конструкторско-технологическое обеспечение высокоэффективных процессов обработки материалов» а также аспирантов по направлению «22.06.01 Технологии материалов».

### **Список основных публикаций по теме диссертации**

#### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Гурьев А.М. Микроструктура диффузионного покрытия, полученного одновременным насыщением бором, хромом и титаном углеродистой стали 45 / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15. – №2. – С. 283 – 288.
2. Гурьев А.М. Влияние режимов термической обработки на структуру и физико-механические свойства быстрорежущей стали / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Бердыченко А.А., Черных Е.В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15. – №1. – С. 103-108.
3. Иванов С.Г. Борирование титана ОТ4 из порошковых насыщающих сред / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Логинова М.В., Деев В.Б., Гурьев А.М. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2017. – №2. – С. 59-65.
4. Гурьев А.М. Изменение размеров и шероховатости поверхности образцов из стали Ст3 при диффузионном насыщении бором, хромом и титаном / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Собачкин А.В., Иванова Т.Г. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14. – №2. – С. 215-220.
5. Гурьев М.А. Упрочнение поверхности стальных изделий бором совместно с металлами / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Мэй Ш., Янь С., Вэй Ш. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14. – № 3. – С. 357-362.
6. Гурьев А.М. Эволюция фазового состава диффузионных покрытий стали Р6М5 при многокомпонентном насыщении бором, хромом и титаном / Гурьев а.м., Гурьев М.А., Иванов С.Г., Логинова М.В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14. – №4. – С. 542-546.
7. Гурьев А.М. Особенности микроструктуры стали Ст3 после совмещенного диффузионного насыщения поверхности бором, хромом и титаном / Гурьев А.М., Иванова Т.Г., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Мэй Ш. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т.13. – №2. – С. 230-232.

8. Иванов С.Г. Исследование микроструктуры диффузионных покрытий на чугунах ЧМН-35М, полученных химико-термической обработкой / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Марков А.М., Гурьев М.А., Габеев А.В., Габеев Д.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т.13. – №4. – С. 497-500.

9. Гармаева И.А. Сравнительное исследование насыщающей способности борированных сред различного состава / Гармаева И.А., Гурьев А.М., Иванова Т.Г., Гурьев М.А., Иванов С.Г. // Письма о материалах. – 2016. – Т.6. – №4(24). – С. 262-265.

10. Гурьев А.М. Химико-термическая обработка материалов для режущего инструмента / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М. А., Черных Е.В., Иванова Т.Г. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т.58. – №8. – С. 578 - 582.

11. Логинова М.В. Фазовый состав композиционных покрытий на углеродистых сталях / Логинова М.В., Иванов С.Г., Яковлев В.И., Гурьев М.А., Дон Я., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т.12. – №1. – С. 99-102.

12. Иванов С.Г. Структура и свойства сталей с диффузионными покрытиями, полученными из разных обмазок на основе карбида бора / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Гармаева И.А., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т.12. – №2. – С. 198-202.

13. Иванов С.Г. Микроструктура диффузионной зоны в железоуглеродистых сплавах после совмещенного поверхностного диффузионного насыщения бором и хромом / Иванов С.Г., Иванова Т.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Бильтриков Н.Г., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т.12. – №2. – С. 223-226.

14. Гурьев А.М. Математическое моделирование и оптимизация состава насыщающей среды / Гурьев А.М., Иванова Т.Г., Гурьев М.А., Иванов С.Г., Черных Е.В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т.12. – № 3. – С. 366-372.

15. Гурьев М.А. Поверхностное легирование деталей в процессе их производства методом литья по газифицируемым моделям / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Черных Е.В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т.12. – №4. – С. 429-431.

16. Иванов С.Г. Особенности приготовления насыщающих смесей для диффузионного борохромирования / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Старостенков М.Д., Иванова Т.Г., Левченко А.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т.57. – №2. – С. 116-118.

17. Гурьев А.М. Механизм совместной диффузии атомов бора и хрома при двухкомпонентном насыщении поверхности углеродистых сталей / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Иванова С.А., Черных Е.В., Иванова Т.Г. // Вестник алтайской науки. – 2014. – №1(19). – С. 296-299.

18. Гурьев А.М. Структура и свойства диффузионно упрочненных бором и титаном поверхностей горячештамповых сталей / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Ситников А.А., Мархасаев А.В., Мархасаева Ю.А., Цыреторов Б.Ш. // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – №4. – С. 60-62.

19. Гурьев А.М. Исследование приращения размеров изделий в результате многокомпонентного насыщения бором, хромом и титаном / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Иванова Т.Г. // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – №4. – С. 63-64.

20. Иванов С.Г. Термодинамическое моделирование реакций в насыщающей среде при диффузионном борировании сталей / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Черных Е.В., Гурьев М.А., Иванова Т.Г., Гармаева И.А., Зобнев В.В., Гонг В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т.11. – №1. – С. 13-16.

21. Гурьев А.М. Изменение массы и размеров стальных образцов в зависимости от способа диффузионного насыщения их поверхности бором и хромом / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Бильтриков Н.Г., Иванова С.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т.11. – №2. – С. 149-152.

22. Иванов С.Г. Эволюция химического состава поверхности стали при комплексном насыщении бором, хромом и титаном / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Гармаева И.А., Иванова Т.Г., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т.11. – №2. – С. 257-259.

23. Зобнев В.В. Упрочнение рабочих поверхностей стальных деталей наплавленным материалом на основе борида железа / Зобнев В.В., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Гурьев А.М., Марков А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т.11. – №3. – С. 398-401.

24. Guriev A.M. Structure of boride coatings on steels of different purpose / Guriev A.M., Ivanov S.G., Mei Sh., Guriev M.A., Chernykh E.V., Garmaeva I.A. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т.11. – №4. – С. 537-539.

25. Гурьев М.А. Взаимосвязь химического состава насыщающей среды и диффузионного покрытия на сталях 45 и 45Л / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Алонцева Д.Л., Иванова Т.Г., Гурьев А.М. // Письма о материалах. – 2014. – Т.4. – №3(15). – С. 179-181.

26. Guriev A.M. Comparison of the microstructure of boron-based diffusion coatings obtained from different pastes / Guriev A.M., Ivanov S.G., Guriev M.A. // Письма о материалах. – 2014. – Т.4. – №4(16). – С. 257-260.

27. Гурьев М.А. Технология упрочнения стальных изделий в процессе литья / Гурьев М.А., Фильчаков Д.С., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Деев В.Б. // Литейщик России. – 2013. – №6. – С. 36-38.

28. Гурьев А.М. Оптимизация состава насыщающей смеси и технологических параметров процесса твердофазного борирования углеродистых сталей / Гурьев А.М., Куркина Л.А., Грешилов А.Д., Иванов С.Г. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т.10. – №1. – С. 105-111.

29. Иванов С.Г. Микроструктура поверхности многокомпонентных диффузионных покрытий на основе бора / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Русакова А.В., Гурьев М.А., Старостенков М.Д. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т.10. – №1. – С. 130-133.

30. Гурьев М.А. Исследование элементного состава боридного покрытия на сталях 45 и 45Л / Гурьев М.А., Алонцева Д.Л., Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М., Ситников А.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т.10. – №3. – С. 437-442.

31. Гурьев А.М. Методика сканирующей зондовой микроскопии поверхности диффузионных боридных покрытий / Гурьев А.М., Старостенков М.Д., Иванов С.Г., Черных Е.В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т.10. – №4. – С. 535-539.

32. Иванов С.Г. Фазовые превращения и структура комплексных боридных покрытий / Иванов С.Г., Гармаева И.А., Андросов А.П., Зобнев В.В., Гурьев А.М., Марков В.А. // Ползуновский вестник. – 2012. – №1-1. – С. 106-108.

33. Гурьев М.А. Технология нанесения многокомпонентных упрочняющих покрытий на стальные детали / Гурьев М.А., Фильчаков Д.С., Гармаева И.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Околович Г.А. // Ползуновский вестник. – 2012. – №1-1. – С. 73-78.

34. Иванов С.Г. Особенности диффузии атомов бора и хрома при двухкомпонентном насыщении поверхности стали Ст3 / Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т.9. – №1. – С. 86-88.

35. Иванов С.Г. Оценка скорости диффузии бора и хрома при различных режимах диффузионного упрочнения поверхности стали Ст3 / Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т.9. – №2. – С. 248-251.

36. Гурьев А.М. Сравнение морфологии и износостойкости многокомпонентных диффузионных покрытий на основе бора на конструкционной и инструментальной сталях / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Малькова Н.Ю., Разгуляев А.О. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т.9. – №3. – С. 299-303.

37. Иванов С.Г. Исследование зависимости морфологии диффузионных боридных покрытий на углеродистых сталях от состава и фракции насыщающей смеси / Иванов С.Г., Куркина Л.А., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т.9. – №4. – С. 556-559.

38. Лыгденев Б.Д. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 20Л, 45, 55 и 5ХНВ / Лыгденев Б.Д., Гармаева И.А., Попова Н.А., Козлов Э.В., Гурьев А.М., Иванов С.Г. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т.9. – №4-2. – С. 681-689.

39. Гурьев А.М. Механизм образования боридных игл при диффузионном комплексном борохромировании из насыщающих обмазок / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Грешилов А.Д., Земляков С.А. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – №3(52). – С. 34-40.

40. Иванов С.Г. Макроскопическая и атомная структура тонких металлических пленок / Иванов С.Г., Макаров С.В., Демьянов Б.Ф., Плотников В.А., Старостенков М.Д. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т.8. – №1. – С. 110-113.

41. Гурьев А.М. Механизм диффузии бора, хрома и титана при одновременном многокомпонентном насыщении поверхности железоуглеродистых сплавов / Гурьев А.М., Иванов С.Г. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т.8. – №3. – С. 92-96.

42. Гурьев А.М. Многокомпонентное диффузионное упрочнение поверхности деталей машин и инструмента из смесей на основе карбида бора / Гурьев А.М., Грешилов А.Д., Кошелева Е.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Долгоров А.А. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – №2(47). – С. 19-23.

43. Кошелева Е.А. Технология многокомпонентного диффузионного упрочнения поверхности деталей машин и инструмента для энергетического машиностроения / Кошелева Е.А., Иванов С.Г., Нестеренко Е.А., Гурьев М.А., Земляков С.А., Власова О.А., Иванов А.Г. // Ползуновский вестник. – 2010. – №1. – С. 106-113.

44. Гурьев М.А. Комплексное диффузионное упрочнение тяжелонагруженных деталей машин и инструмента / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Кошелева Е.А.,

Иванов А.Г., Грешилов А.Д., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Околович Г.А. // Ползуновский вестник. – 2010. – №1. – С. 114-121.

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

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

47. Иванов С.Г. Влияние добавок легирующих элементов в обмазку на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного насыщения стали / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Гурьев А.М. // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – №7. – С. 170-172.

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

49. Гурьев А.М. Структура и свойства упрочненных бором и бором совместно с титаном поверхности штамповых сталей 5ХНВ и 5Х2НМВФ / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Лыгденов Б.Д., Земляков С.А., Долгоров А.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2010. – Т.7. – №1. – С. 27-31.

50. Иванов С.Г. Повышение износо-и коррозионной стойкости стальных деталей методами комплексного бороникелирования и боровольфрамирания / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Земляков С.А., Иванов А.Г., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2010. – Т.7. – №4. – С. 108-111.

51. Гурьев А.М. Фазовый состав и механизм образования диффузионного слоя при борировании сталей в условиях циклического теплового воздействия / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А., Иванов С.Г., Козлов Э.В., Гармаева И.А. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №1(37). – С. 20-27.

52. Кошелева Е.А. Оптимизация химико-термоциклической обработки стали 30Х / Кошелева Е.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Власова О.А., Бруль Т.А. // Фундаментальные исследования. – 2008. – №2. – С. 108-109.

53. Власова О.А. Оптимизация многокомпонентной химико-термической обработки стали 30Х / Власова О.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Чех С.А. // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – №3. – С. 32.

54. Иванов С.Г. Исследование процессов диффузионного насыщения сталей из смесей на основе карбида бора / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Власова О.А., Гурьев М.А. // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – №3. – С. 33.

55. Гурьев А.М. Влияние параметров борохромирования на структуру стали и физико-механические свойства диффузионного слоя / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Лыгденов Б.Д., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Гармаева И.А. // Ползуновский вестник. – 2007. – №3. – С. 28-34.

56. Гурьев А.М. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Гармаева И.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. // Успехи современного естествознания. – 2007. – №10. – С. 84-85.

57. Кошелева Е.А. Разработка методов интенсификации химико-термоциклической обработки инструментальных сталей / Кошелева Е.А., Гурьев А.М., Иванов С.Г., Власова О.А. // Фундаментальные исследования. – 2007. – №10. – С. 48.

58. Иванов С.Г. Диффузионное насыщение сталей из насыщающих обмазок / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Бруль Т.А. // Фундаментальные исследования. – 2007. – №4. – С. 38.

59. Хараев Ю.П. Особенности формирования карбидной фазы литой быстрорежущей стали / Хараев Ю.П., Власова О.А., Иванов С.Г., Попова Н.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – Т. 4. – №1. – С. 129-131.

60. Гурьев А.М. Диффузионное термоциклическое упрочнение поверхности стальных изделий бором, титаном и хромом / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гармаева И.А., Гурьев М.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – Т. 4. – №1. – С. 30-35.

61. Иванов С.Г. Влияние борохромирования на структуру и физико-механические свойства диффузионного слоя роликов из ферритоперлитной стали / Иванов С.Г., Лыгденов Б.Д., Власова О.А., Попова Н.А., Гармаева И.А., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – Т. 4. – №4. – С. 96-101.

62. Иванов С.Г. Хромирование сталей из насыщающих паст / Иванов С.Г., Гурьев А.М. // Фундаментальные исследования. – 2006. – №11. – С. 73.

63. Гурьев А.М. Особенности формирования структуры диффузионного слоя на литой стали при химико-термической обработке / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Махаров Д.М., Мосоров В.И., Черных Е.В., Гурьева О.А., Иванов С.Г. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2005. – Т.2. – №1. – С. 39-41.



**Статьи в российских переводных и зарубежных изданиях  
(цитируемые в Scopus, Web of Science)**

1. Guriev A. M. Investigation of the microstructure of diffusion coatings of carbon steel obtained by simultaneous diffusion saturation with boron, chromium and titanium / Guriev A. M., Ivanov S. G., Guriev M. A., Chernykh E. V. Mei S. Q. // 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 479 012077
2. Mei S. Q. Research on the chance of increasing the wear resistance of high-speed steel Using chemical thermal treatment methods / Mei S. Q., Guriev A. M., Ivanov S. G., Lygdenov B. D., Tsydypov B. S., He X. Z., Liang Q. Y. // 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 479 012055
3. Ivanov, S.G. Boriding of titanium OT4 from powder saturating media / Ivanov, S.G.; Guriev, M.A.; Loginova, M.V., Deev V.B., Guriev A.M. // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2017 – V. 58. – № 3. – P 244 - 249.
4. Garmaeva, I.A. Comparative study of saturating power boriding media of different composition / Garmaeva, I.A.; Guriev, A.M.; Ivanova, T.G., M.A. Guriev, S.G. Ivanov // Letters on Materials. – 2017. – V. 6. – № 4. – P 262 - 265.
5. Shun-Qi Mei Morphology and Wear Resistance of Multicomponent Diffusion Coatings / Shun-Qi Mei; Ya-Jie Dong; A.M. Guriev, Wen-li Zhang, Chao Liu, S.G. Ivanov, M.A. Guriev, T.G. Ivanova, Chernykh E.V. // Proceedings of the 4th 2016 International Conference on Material Science and Engineering (ICMSE 2016). – 2016. – P 308 - 313.
6. Guriev A. M. Comparison of the microstructure of boron-based diffusion coatings obtained from different pastes / Guriev A. M.; Ivanov S. G.; Guriev M. A. // Letters on Materials. – 2016 – V. 4. – № 4. – P 257 - 260.
7. Ivanov, S.G. Features of multicomponent saturation alloyed by steels / Ivanov S.G., Garmaeva I.A., Guriev M.A., Guriev A.M., Starostenkov M.D. // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2015. – V. 22. – P 49 - 53.
8. Gur'ev A.M. Chemicothermal treatment of tool material / Gur'ev A.M., Ivanov S.G., Gur'ev M.A., Chernykh E.V., Ivanova T.G. // Steel in Translation. – 2015. – V. 45. – № 8. – P 555 - 558.
9. Ivanov S.G. Special features of preparation of saturating mixtures for diffusion chromoborating / Ivanov S.G., Guriev A.M., Starostenkov M.D., Ivanova T.G., Levchenko A.A. // Russian Physics Journal. – 2014. – V. 57. – № 2. – P. 266 – 269.

**Патенты**

1. Патент РФ 2345175, МПК С 23 С 12/02/С 21 D 1/78. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей / А.М. Гурьев, С.Г. Ива-

нов, Б.Д. Лыгденов, С.А. Земляков, О.А. Власова, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 2007112368/02; заявл. 03.04.2007; опубл. 27.01.2009.

2. Патент РФ 2360031, МПК С 23 С 12/02. Способ упрочнения деталей из штамповых сталей / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, С.А. Земляков, О.А. Власова, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 007127587/02; заявл. 18.07.2007; опубл. 27.07.2009.

3. Патент РФ 2381299, МПК С 23 С 12/02. Способ упрочнения стальных деталей / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, О.А. Власова, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев, Б.Д. Лыгденов; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 2008118705/02; заявл. 12.05.2008; опубл. 10.02.2010.

4. Патент РФ 2381299, МПК В 22 D 27/12. Способ изготовления и упрочнения деталей из чугунов и сталей / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, М.А. Гурьев, С.А. Земляков, А.Д. Грешилов, А.Г. Иванов; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 2010145915/02; заявл. 10.11.2010; опубл. 27.01.2012.

5. Патент РФ 2482215, МПК С 23 С 8/78/С 23 С 12/02. Способ нанесения керамического покрытия на детали из чугунов и сталей / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, М.А. Гурьев, А.Г. Иванов, В.В. Зобнев; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 2011148197/02; заявл. 25.11.2011; опубл. 20.05.2013.

6. Патент РФ 2507027, МПК В 22 D 19/10/В 23 Р 6/00. Способ индукционного упрочнения и восстановления деталей / С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, И.А. Гармаева, М.А. Гурьев, Н.Ю. Малькова, С.А. Иванова; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 2012140663/02; заявл. 21.09.2012; опубл. 20.02.2014.

7. Патент РФ 2508959, МПК В 22 С 9/04/В 22 D 27/18. Способ изготовления упрочненных стальных и чугунных деталей / А.М. Гурьев, М.А. Гурьев, С.Г. Иванов, Д.С. Фильчаков; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 2012123120/02; заявл. 04.06.2012; опубл. 10.03.2014.

8. Патент РФ 2556808, МПК В 22 D 19/00/С 23 С 12/02. Способ упрочнения стальных деталей / А.М. Гурьев, М.А. Гурьев, С.А. Гурьева, С.Г. Иванов, Т.Г. Иванова, Н.Г. Бильтриков; ГОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 2014108454/02; заявл. 04.03.2014; опубл. 20.07.2015.

9. Патент РФ 2582840, МПК С 21 D 10/00/С 23 С 24/08/В 23 К 13/01. Способ индукционного упрочнения почвообрабатывающего рабочего органа / А.М. Гурьев, М.А. Гурьев, С.А. Гурьева, С.Г. Иванов, С.А. Иванова, О.А. Власова, Т.Г. Иванова, В.В. Зобнев; ГОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 2014148656/02; заявл. 02.12.2014; опубл. 27.04.2016.

10. Патент РФ 2589954, МПК В 22 D 19/00/С 23 С 12/00/С 21 D 1/78. Способ диффузионного упрочнения стальных деталей / А.М. Гурьев, М.А. Гурьев, С.А. Гурьева, С.Г. Иванов, С.А. Иванова, О.А. Власова; ГОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». // № 2014148655/02; заявл. 02.12.2014; опубл. 10.07.2016.

### **Монографии**

1. Насыщающие смеси и технология диффузионного борохромирования (монография) / С.Г. Иванов, А.М. Гурьев. – Саарбрюккен, изд-во «LAP LAMBERT». – 2017. – 123с.

2. Диффузионные покрытия сталей и сплавов (монография) / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, И.А. Гармаева. – Барнаул, изд-во «Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский центр "Системы управления"». – 2013. – 221с.

3. Структурно-фазовые состояния перспективных металлических материалов (монография) / В.П. Багмутов, Е.Г. Белов, И.А. Божко, Е.А. Будовских, Е.С. Ващук, О.А. Власова, А.А. Викарчук, А.В. Вострецова, В.Е. Громов, А.В. Громова, Г.С. Гун, А.М. Гурьев, В.И. Данилов, С.В. Дмитриев, О.Ю. Ефимов, А.Ю. Ерошенко, Л.Б. Зуев, Ю.Ф. Иванов, С.Г. Иванов, О.В. Иванова и др. Ответственный редактор Громов В.Е. – Новокузнецк, изд-во «Новокузнецкая полиграфическая компания». – 2009. – 613с.

Подписано в печать 13.11.2019г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.  
Усл. печ.л. 2,34. Уч.- изд.л. 2,58. Тираж 100 экз. Заказ 283.

Сибирский государственный индустриальный университет  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.  
Издательский центр СибГИУ