

Мишустин Никита Михайлович

**ИЗНОСОСТОЙКИЕ БОРИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ,
ПОЛУЧЕННЫЕ НА КОНСТРУКЦИОННЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ
СТАЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЧ-НАГРЕВА**

Специальность 05.16.09 – «Материаловедение»
(в машиностроении)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул - 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный аграрный университет» (г. Барнаул)

- Научный руководитель: Ишков Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии конструкционных материалов и ремонта машин
- Официальные оппоненты: Гурьев Алексей Михайлович, доктор технических наук, профессор (ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул), заведующий кафедрой начертательной геометрии и инженерной графики;
- Корчагин Михаил Алексеевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник (ФГБУН Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН, г. Новосибирск), старший научный сотрудник лаборатории химического материаловедения
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ», г. Томск).

Защита состоится 28 мая 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.07 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ФГБОУ ВПО «АлтГТУ». E-mail: berd50@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан 27 апреля 2012 г.

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



А. А. Бердыченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современном машиностроении для поверхностного упрочнения конструкционных и легированных сталей и деталей машин широко применяют методы создания различных износостойких покрытий из функциональных материалов (порошковые покрытия, керамика и термостойкие полимеры, одно- и многокомпонентные металлические и композиционные гальванические покрытия, твердосплавные покрытия и пр.).

Одним из наиболее эффективных и простых методов поверхностного упрочнения стальных деталей, используемых на заключительных стадиях механической обработки и легко совмещаемых с термической обработкой материала, является химико-термическая обработка (ХТО). Но если такие виды ХТО как цементация, азотирование и карбонитрация, а также их совмещенные варианты, уже прочно вошли в арсенал машиностроительных предприятий, а состав, структура, свойства и технологии получения износостойких покрытий этими методами исследуются материаловедцами уже более 100 лет, то процессы насыщения поверхностного слоя конструкционных и легированных сталей бором и получения соответствующих износостойких боридных покрытий все еще недостаточно исследованы. При борировании на поверхности стальной детали, как правило, удается получать протяженные (до 100–200 мкм) слои, однако большинство из известных процессов борирования длительны (4–12 ч), трудоемки и плохо встраиваются в технологические схемы современных производств, а при реализации наиболее освоенного в машиностроении диффузионного борирования образуются хрупкие, двухфазные покрытия с невысокой адгезией к основе. Поэтому интенсификация борирования, получение боридных покрытий устойчивых к скалыванию, исследование их структуры и получение у них заданных свойств является актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнялась в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ № 11-08-98016-р_сибирь_а, а также госконтракта № 6-11ф от 03.06.2011, сравнительные испытания стрельчатых лап упрочненных борированием с использованием ТВЧ-нагрева по технологии АГАУ и коммерческих стрельчатых лап производства ОАО «АНИТИМ» и ЗАО «РЗЗ» проводились по хоздоговору № 1/11 от 22.02. 2011 г с ЗАО «Рубцовский завод запасных частей».

Цель работы – разработка технологии получения износостойких боридных покрытий на конструкционных и легированных сталях с использованием ТВЧ-нагрева.

Для достижения указанной цели потребовалось решение следующих **задач**:

- проведение анализа известных методов получения боридных покрытий, исследований их структуры и свойств, интенсификации и управления процессами борирования и обоснование использования ТВЧ-нагрева для осуществления борирования конструкционных и легированных сталей;
- теоретическое и экспериментальное исследование фундаментальных физико-химических процессов, лежащих в основе новой разновидности борирования, процесса получения боридного покрытия на стали с использованием ТВЧ-нагрева за счет протекания топохимической реакции (ТПХР) между материа-

лом, борирующим агентом и другими компонентами, входящими в состав борирующей смеси;

- исследование влияния природы борирующего агента, состава борирующей смеси, состава стали, а также параметров борирования (время, температура и пр.) на состав, структуру и свойства боридных покрытий, получающихся с использованием ТВЧ-нагрева;

- экспериментальное изучение износа основных типов боридных покрытий, полученных на конструкционных и легированных сталях с использованием ТВЧ-нагрева и выявление связи между их составом, структурой и износостойкостью;

- проведение оптимизации параметров борирования с использованием ТВЧ-нагрева для стали 65Г, наиболее часто применяемой при изготовлении почвообрабатывающих органов (ПОО) сельхозмашин, методами полнофакторного эксперимента, и на основе полученных моделей разработка основ технологии упрочнения конкретной детали;

- исследование влияния технологических факторов борирования с использованием ТВЧ-нагрева и условий его эксплуатации на износ и работоспособность упрочненных деталей типа ПОО.

Объекты исследования: конструкционные и легированные стали, состав, структура и свойства боридных покрытий, получаемых на сталях с использованием ТВЧ-нагрева, а также свойства упрочненных ПОО.

Предмет исследования – химические и физико-химические процессы, происходящие между борирующими агентами, поверхностью металла и компонентами борирующего состава, термодинамика и кинетика ТПХР процесса борирования, осуществляемого с использованием ТВЧ-нагрева.

Для решения задач и достижения цели исследования использовались **методы** термодинамики и кинетики, термического анализа, физико-химического и спектрального анализа, металлографии, электронной растровой микроскопии, рентгенофазового и микрорентгеноспектрального анализа, полнофакторного эксперимента, лабораторного и полевого эксперимента.

Научная новизна диссертации:

- доказана возможность борирования с использованием ТВЧ-нагрева сталей Ст3, 45, 50Г, 65Г, 50ХГА за 1–3 мин на глубину до 300–800 мкм из смесей, содержащих В, В₄С в составе плавного флюса П-0,66 с активаторами;

- выявлено, что насыщение поверхности стали 65Г бором с использованием ТВЧ-нагрева происходит за счёт протекания ТПХР для которой экспериментально получены кинетические параметры процесса: константа скорости ($-lnk$ от 10,35 до 15,05); порядок реакции (n от 2,72 до 4,15); кажущаяся энергия активации ($E_a = 365,8$ кДж/моль);

- показано, что при использовании аморфного бора в борирующих составах образуются покрытия в виде кристаллов боридов марганца, расположенных в железо-боридной матрице, а при использовании В₄С – покрытия в виде ледобуриноподобной железо-боридной эвтектики, а оптимальное содержание борирующего агента (вне зависимости от его природы) составляет 86–90 % масс;

- установлено оптимальное время и температура борирования с использова-

нием ТВЧ-нагрева, которое для сталей 65Г и 50ХГА составляет 90–120 сек и 1150–1250 °С, соответственно, при проведении борирования в течение указанного времени в износостойком покрытии образуются структуры в виде ледобу-ритоподобной железо-боридной эвтектики;

- методом полнофакторного эксперимента получено уравнение поверхности отклика целевой функции толщины и износостойкости боридного покрытия, позволившее установить интервалы варьирования: содержание плавного флюса П-0,66 10–14 масс. % времени нагрева 90–120 с и температуры 1150–1250 °С для оптимизации параметров режима и выявления оптимального режима борирования с использованием ТВЧ-нагрева для разработки основ технологии.

Теоретическая значимость исследования заключается в определении параметров фундаментальных химических и физико-химических процессов, лежащих в основе процесса получения боридных покрытий с использованием ТВЧ-нагрева, доказательстве протекания ТПХР и установлении закономерностей состав-структура-свойство у получаемых боридных покрытий.

Практическая значимость и реализация результатов исследования определяется разработкой новых типов износостойких покрытий и их применения в машиностроении для замены более дорогих твердосплавных покрытий, наносимых на те же детали методом индукционной наплавки. Проведение борирования с использованием ТВЧ-нагрева позволяет увеличить гарантированный ресурс наработки на одну стрельчатую лапу (СЛ) типа 3 с нормированных 25 га/лапу (ОСТ 23.2.164-87) до 79,5 га/лапу и обеспечить эффект самозатачивания в течение всего периода её эксплуатации.

Полученные результаты были внедрены на ведущих предприятиях сельхозмашиностроения Алтайского края ОАО «АНИТИМ» (г. Барнаул), ЗАО «Рубцовский завод запасных частей» (г. Рубцовск) и ОАО «Авторемзавод Ленковский» (ст. Ленки, Благовещенского р-на Алтайского края).

Апробация работы. Результаты и научные положения диссертации докладывались на I-ой Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Бийск, 2010), Международной инновационно-ориентированной конференции с элементами научной школы для молодежи «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2010), III-ей Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы сельского хозяйства горных территорий» (г. Горно-Алтайск, 2011), VI-ой Международной научно-практической конференции «Аграрная наука - сельскому хозяйству» (г. Барнаул, 2011), XVI-ой и XVII-ой Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2010, 2011).

Разработанные технологии и детали сельхозмашин с боридными покрытиями, полученными с использованием ТВЧ-нагрева, экспонировались на XVI-ой и XVII-ой Международной агропромышленной выставке-ярмарке «Алтайская Нива» (г. Барнаул, 2010, 2011), III-ей Региональной выставке «Ярмарка изобретений. Алтайский край - 2011» (г. Барнаул, 2011), а также на 13-ой Международной специализированной выставке «MASHEX-2010» (г. Москва, ВЦ Кро-

кус-Экспо, 2010), где были отмечены дипломами и медалями конкурсов.

Достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием данным, полученным другими исследователями, а также справочными данными, данными литературных источников, использованием аттестованных методов и методик выполнения измерений, сертифицированного и стандартизированного испытательного оборудования, а также проведением статистической обработки экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя заключается в формулировании цели и задач работы, выполнении большинства исследований по получению новых материалов, исследованию их структуры и свойств, анализе и обсуждении результатов, испытании упрочнённых деталей машин.

На защиту выносятся:

- комплекс результатов теоретических и экспериментальных исследований, доказывающий, что образование боридных покрытий на исследованных сталях с использованием ТВЧ-нагрева в смесях, содержащих В, B_4C в составе плавляемого флюса П-0,66 с активаторами, осуществляется за счет сложного интегрального химического и физико-химического процесса ТПХР – близкого по природе к реакционной наплавке;

- теоретически предсказанные и экспериментально обнаруженные ТПХР между компонентами борлирующей смеси, поверхностью стали и оксидами железа, взаимодействие B_4C с $CaSi_2$ и продуктами его термодиссоциации, взаимодействие компонентов боратного флюса с поверхностью стальной детали и борлирующим агентом, взаимодействие $CaSi_2$ с компонентами боратного флюса и др.;

- обнаруженные закономерности влияния природы борлирующего агента, состава и характеристик борлирующей смеси (наличие активаторов, доли борлирующего агента, размера его частиц и пр.) на типичную структуру боридных покрытий, полученных с использованием ТВЧ-нагрева;

- обнаруженные закономерности влияния состава стали (содержание углерода, вид и содержание легирующих элементов) и параметров борирования с использованием ТВЧ-нагрева на соотношение состав-структура-свойства, образующихся износостойких боридных покрытий;

- математическая модель процесса в виде функции поверхности отклика, полученная методом ПФЭ и позволяющая разрабатывать основы технологии получения износостойких боридных покрытий на конструкционных и легированных сталях с использованием ТВЧ-нагрева;

- технология упрочнения ПОО типа СЛ, выполненных из стали 65Г, путем получения на их поверхности по оптимальным режимам износостойких боридных покрытий с использованием ТВЧ-нагрева и результаты конструирования покрытия для увеличения гарантированного ресурса наработки СЛ в 1,6-3,1 раза по сравнению с аналогами и сохранения эффекта самозатачивания в течение всего периода эксплуатации ПОО.

Публикации. Основные результаты и научные положения работы опубликованы в 26 печатных работах. Из них 4 статьи в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов кандидатских и доктор-

ских диссертаций, получен один патент РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Выводов, Списка использованной литературы из 166 источников и Приложений. Работа содержит 182 страниц машинописного текста, включает 32 таблицы и 74 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследований, сформулирована цель и задачи получения, исследования закономерностей состав-структура-свойство износостойких боридных покрытий, полученных на конструкционных и легированных сталях с использованием ТВЧ-нагрева для их дальнейшего применения в сельхозмашиностроении. Приведены основные формальные признаки диссертации: научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность и отражен личный вклад соискателя, приведены результаты апробации работы и публикации ее результатов.

Первая глава содержит критический обзор и информационный анализ доступных источников по теме диссертации, опубликованных за последние 10 лет.

Анализ результатов исследований, опубликованных в ведущих российских и зарубежных журналах, а также содержащихся в базах данных ВИНТИ, РЖ «Машиностроение», открытых реестрах ФИПС, тем зарегистрированных НИР и НИОКР ЦИТИС, электронной библиотеке «E-library», Chemical Abstr. и др., позволили установить, что современные исследования боридных покрытий, полученных различными методами, преимущественно проводятся по направлениям интенсификации процессов диффузионного борирования различными способами, разработке «высоких» технологий и способов борирования (борирование в плазме и вакууме, лазерный нагрев, СВЧ-технологии и пр.), вопросам исследования возможности совмещения борирования с другими процессами упрочнения поверхности, исследованиям термодинамики и кинетики процессов, а также вопросам встраивания ХТО вообще, и борирования, в частности, в современные производственно-технологические процессы, а вопросам применения новых, прогрессивных источников тепла (СВЧ, ТВЧ-нагрев) посвящено лишь незначительное число работ. Указанное обстоятельство позволило обоснованно выбрать цель и задачи настоящей диссертации.

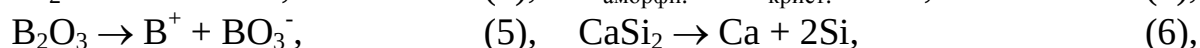
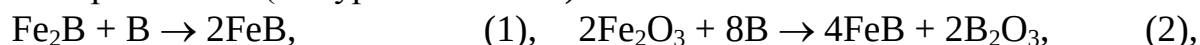
Во **второй главе** приведено описание используемых в работе материалов, оборудования и установок, а также методик исследования состава, свойств и структуры получаемых боридных покрытий.

В качестве основных объектов исследования в работе были выбраны стали 65Г, 50ХГА, износостойкие боридные покрытия на которых исследовались методами оптической (МИМ-7) и электронной растровой микроскопии (РЭМ Philips SEM 515), рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-6, излучение Fe-K_α), металлографии и микротвердомерии (ПМТ-3, нагрузка 50, 100, 200 гр.), микрорентгеноспектрального анализа (РФА-анализатор EDAX ECON IV, U_{ускор.} 30,0 кВ), атомно-эмиссионного спектрального анализа (анализатор состава сталей FOUNDRY MASTER UV), термического анализа (дериватограф Q-Derivatograph системы F.Paulik, J.Paulik, L.Erdey - на воздухе, термический анализатор Netzsch STA 409 PC/PG - в Ar). Износостойкость боридных покрытий,

полученных с использованием ТВЧ-нагрева определялась по ГОСТ 23.208-79, 23.224-86, а в полевых условиях - по оригинальной методике.

В третьей главе приведены результаты термодинамических расчетов и экспериментального исследования фундаментальных химических и физико-химических процессов, приводящих к образованию износостойких боридных покрытий на сталях с использованием ТВЧ-нагрева, исследования влияния природы борирующего агента и состава борирующей смеси на типичную структуру покрытия, исследования влияния состава стали и параметров борирования в режиме реакционной наплавки на структуру и механические свойства боридных покрытий, исследования фазового и химического состава основных компонентов покрытий.

Для реакций, по которым имелись справочные данные, без учета возможных полиморфных превращений веществ в интервале температур 298–1498 К, но с учетом зависимости их термодинамических констант от температуры, были выполнены расчеты термодинамических потенциалов при $T = 298, 1198, 1298$ и 1498 К (ΔH_p° , ΔS_p° , ΔG_p°) для установления возможности их самопроизвольного протекания (см. уравнения 1–8).



Среди этих реакций образуют бориды железа, и являются экзотермическими реакции 1 и 2, причем В, как исходный реагент, может быть введен в систему извне заранее (в составе борирующей смеси - см. таблицу 2), так может образоваться и самопроизвольно по реакциям 5, 7 и 8, у которых изобарно-изотермический потенциал (ΔG_p°) остаётся отрицательным во всем исследованном интервале температур. После удаления окисной плёнки с поверхности стали, за счёт действия боратного флюса при 838–848 К, бориды железа и цементит могут образовываться уже при взаимодействии простых веществ по уравнениям:



Проведенный анализ реакций 9–12 показал что, в исследованном интервале температур 298–1498 К, самопроизвольно протекают и термодинамически разрешены все процессы, кроме реакции 9 (рисунок 1). Следовательно, наиболее твердый из боридов железа FeB может образовываться в покрытии с использованием ТВЧ-нагрева, только за счет протекания реакций 1, 3, 11.

Исследование, расшифровка и сопоставление термограмм борирующих и модельных составов, дополнительно содержащих порошок железа марки ПЖВ, снятых в инертной среде и на воздухе вплоть до температуры 1598 К, подтвердили протекание в них реакций 1, 2, 6, 7, 10, а также были зафиксированы конкурирующие экзотермические реакции окисления как железа, так и его боридов, возможные при осуществлении борирования с использованием ТВЧ-нагрева на воздухе, которые замедляют процесс образования износостойкого покрытия.

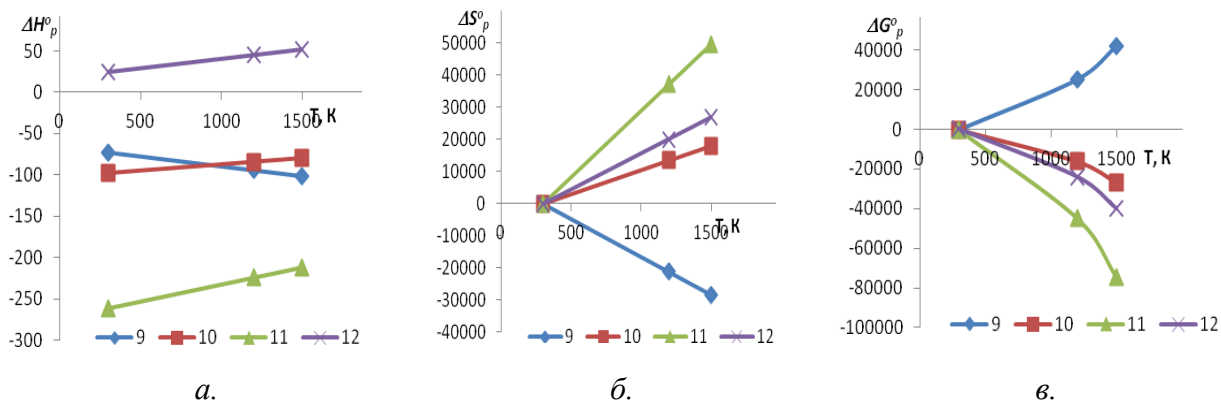


Рисунок 1 – Зависимость термодинамических потенциалов (ΔH_p^o – энтальпия, ΔS_p^o – энтропия, ΔG_p^o – изобарно-изотермический потенциал) реакций борирования с использованием ТВЧ-нагрева (9–12) от температуры: а - энтальпия реакции, б - энтропия реакции, в - изобарно-изотермический потенциал

Была исследована кинетика интегрального процесса борирования с использованием ТВЧ-нагрева при различных температурах в рамках формального подхода, чтобы определить механизм ТПХР, а также рассчитать параметры кинетического уравнения и кажущуюся энергию активации процесса борирования. На рисунке 2а, приведены кинетические кривые борирования стали 65Г при различных температурах. Линейная форма кинетической кривой роста боридного покрытия на стали 65Г с использованием ТВЧ-нагрева при $T = 900$ °С приведена на рисунке 2б.

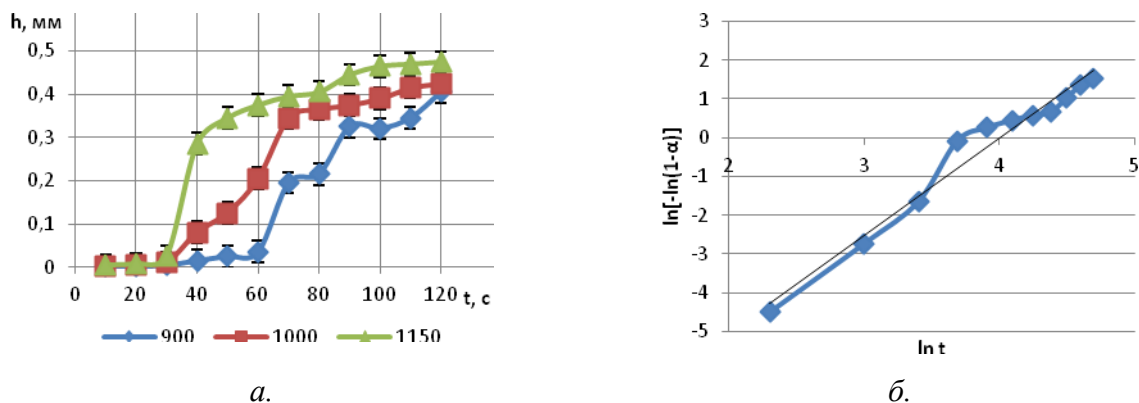


Рисунок 2 – Кинетические кривые борирования стали 65Г из смеси, содержащей, масс. %: B_4C (84) + флюс П-0,66 (16), при температурах 900, 1000 и 1150 °С (а) и линеаризация кинетической кривой при $T = 900$ °С (h – толщина покрытия, α – степень превращения вещества, t – время)

Для расчёта параметров кинетического уравнения было использовано известное уравнение ТПХР Ерофеева-Колмогорова (13), и проведена линеаризация кинетических кривых в координатах $\ln[-\ln(1-\alpha)] = f(t)$ методом наименьших квадратов:

$$\alpha = 1 - \exp(-kt^n), \quad (13)$$

где: α – степень превращения; $n = \sigma + 3$, или в общем случае $n = \sigma + m$ (порядок реакции); σ - число элементарных стадий превращения центра кристаллизации новой фазы (Fe_nB) в растущее ядро; m - число направлений, в которых растут ядра (1, 2, 3); k – константа скорости, s^{-n} .

Таблица 1 – Кинетические параметры интегрального процесса борирования стали 65Г с использованием ТВЧ-нагрева ($n = 5$; $P = 0,95$)

T, К	Параметры кинетического уравнения		σ , при $m = \text{const}$			E_a^* , кДж/моль
	$\ln k$	n				
			1	2	3	
1198	-10,35±0,03	2,72±0,02	1,72	0,72	-	365,8±0,2
1298	-12,25±0,02	3,32±0,03	2,32	1,32	0,32	
1498	-15,05±0,03	4,15±0,03	3,15	2,15	1,15	

Примечания: T – температура, $\ln k$ – константа скорости, n – порядок реакции, σ – число элементарных стадий превращения центра кристаллизации новой фазы (Fe_nB) в растущее ядро, E_a – кажущаяся энергия активации.

Исследованные составы 3, 4-х компонентных борирующих смесей, наносимые на образцы сталей Ст3, 45, 50Г, 65Г, 50ХГА в виде обмазок на жидком стекле, гидролизованном этилсиликате или полимерной основе для осуществления борирования с использованием ТВЧ-нагрева представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Составы обмазок для получения износостойких покрытий с использованием ТВЧ-нагрева

Состав	Компонент 1 /масс.% борирующий агент	Компонент 2 /масс.% компонент основа	Компонент 3 /масс.% компонент активатор	Компонент 4 /масс.% компонент модификатор
1	$\text{B}_4\text{C}/92$	П-0,66/8	-	-
2	$\text{B}_4\text{C}/84$	П-0,66/16	-	-
3	$\text{B}_4\text{C}/80$	П-0,66/20	-	-
4	$\text{B}_4\text{C}/84$	П-0,66/11	$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/2,5$	-
5	$\text{B}/92,5$	$\text{CaF}_2/5$	П-0,66/2,5	-
6	$\text{B}/90$	$\text{CaF}_2/5$	П-0,66/5	-
7	$\text{B}/89$	П-0,66/5	$\text{NH}_4\text{Cl}/6$	-
8	$\text{B}/84$	П-0,66/10	$\text{NH}_4\text{Cl}/6$	-
9	$\text{B}/85$	$\text{CaF}_2/5$	П-0,66/5	$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/5$
10	$\text{B}/79$	П-0,66/10	$\text{NH}_4\text{Cl}/6$	$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/5$

Были обнаружены 4-е основных типа структур износостойкого боридного покрытия, образующегося с использованием ТВЧ-нагрева (рисунок 3): I – в виде железо-боридной эвтектики с замкнутыми карбидными областями, II – покрытие, состоящее из кристаллов борида марганца, в виде пластин, расположенных в более мягкой матрице из ледебуритоподобной железо-боридной эвтектики, III – структура в виде железо-боридной эвтектики с крупными зёрнами, и IV – покрытие, состоящее из игольчатых кристаллов борида марганца или хрома, расположенных в более мягкой матрице из ледебуритоподобной железо-боридной эвтектики.

При исследовании влияния углерода и легирующих элементов было установлено, что для сталей с низким содержанием углерода (Ст3, 45) при температурах осуществления борирования (1050–1100 °С) с использованием ТВЧ-нагрева в течение 2–3 мин. происходит выгорание межзёрненного углерода, что подтверждается наличием видманштеттовых структур в основном материале.

Толщина износостойких боридных покрытий на стали 50ХГА оказалась значительно меньше, чем на марганцовистых сталях 50Г, 65Г, что в условиях абразивного износа деталей машин типа ПОО при их эксплуатации является существенным недостатком. В связи с этим все дальнейшие исследования было принято проводить на стали 65Г, так как эта марка более износостойка, более доступна и, к тому же, широко применяется в машиностроении для изготовления ПОО – стрелчатых лап, долотообразных лемехов и пр.

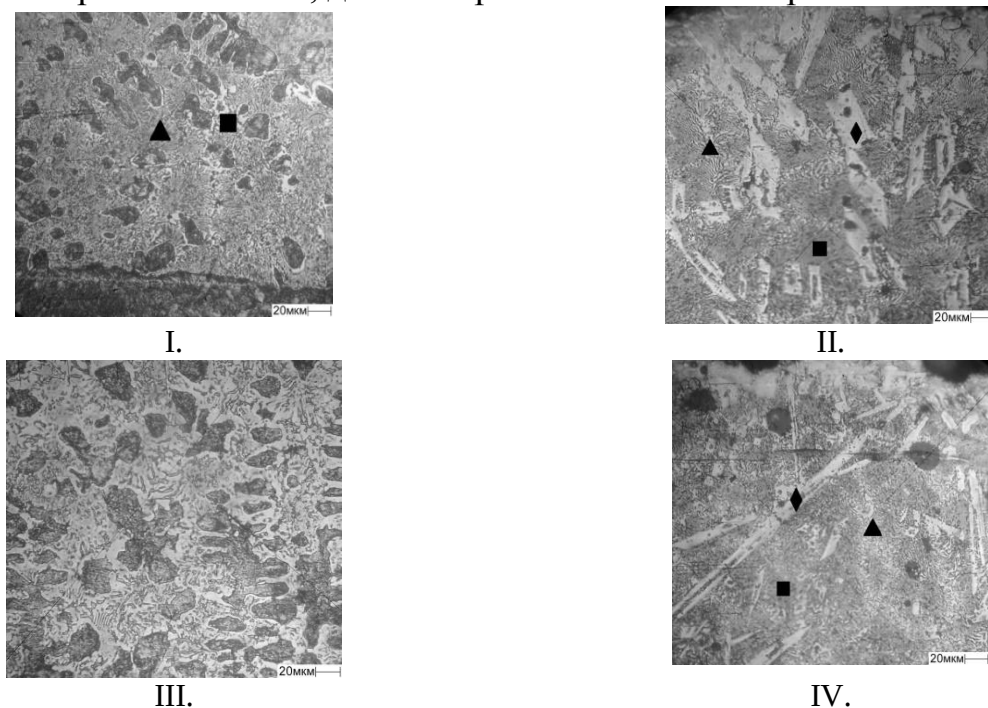


Рисунок 3 – Типичные структуры боридных покрытий, получаемых на конструкционных и легированных сталях с использованием ТВЧ-нагрева: I – эвтектика Fe – В с замкнутыми карбидными областями; II – пластинчатые кристаллы борида марганца; III – эвтектика Fe – В с крупными зёрнами; и IV – игольчатые кристаллы борида марганца

Для основной структуры боридного покрытия типа I было проведено исследование ее тонкой микроструктуры путём последовательного увеличения изображения рассматриваемой области покрытия в отраженных электронах (рисунок 4).



Рисунок 4 – Микроструктура боридного покрытия типа I, полученного на стали 65Г с использованием ТВЧ-нагрева в отраженных электронах

Как видно и рисунка 4, морфология структуры типа I представляет собой две зоны: более мягкую (замкнутая карбидная область), в которой при шлифовании получают углубления, и более твёрдую (эвтектика Fe – В), в виде выступов. При дальнейшем увеличении в области железо-боридной эвтектики от-

чётливо проявляется ее пластинчатое строение с характерным рисунком.

В таблице 3 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа боридного покрытия, полученного на сталях 65Г и 50ХГА, показывающие, что в состав основной матричной и упрочняющих фаз покрытия, полученного при ТВЧ-нагреве, помимо железа и бора также входит и углерод, причем его доля колеблется от 13,4 до 28,0 масс. %, что отвечает нестехиометрическим фазам от цементита Fe_3C и карбоборидов FeC_nB_m , близких по структуре к борированному цементиту, до специальных карбидов $(Fe, Mn)_3C$ и карбоборидов Fe, Mn и Cr (рисунок 4).

Таблица 3 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа основных фаз в боридном покрытии, полученном на сталях 65Г, 50ХГА с использованием ТВЧ-нагрева

Обозначение фазы, элементы (рисунок 3)	Описание фазы, морфология	Состав, элемент		Химическая формула
		весовой %	атомный %	
■ - Fe, C, B	Матрица - серое поле в ледебурито-подобной эвтектике Fe-B	Fe – 57,25 C – 28,02 B – 14,73	21,72 49,42 28,86	$FeC_{2,3}B_{1,3}$
■* - Fe, C, B	То же	Fe – 64,31 C – 22,30 B – 13,38	27,12 43,73 29,15	$FeC_{1,6}B_{1,1}$
▲ - Fe, C, B	Упрочняющая фаза - светлые замкнутые области эвтектики Fe-B	Fe – 50,63 C – 23,11 B – 26,25	17,24 36,59 46,17	$FeC_{2,1}B_{2,7}$
◆ - Fe, Mn(Cr), C, B	Упрочняющая фаза - пластинчатые кристаллы или иглы боридов и(или) карбоборидов	Fe – 64,70 Mn(Cr) – 1,21(1,35) C – 23,01 B – 11,08	28,11 0,54(0,62) 46,49 24,87	$Fe_{58}MnC_{96}B_{51}$ $Fe_{58}CrC_{96}B_{51}$
◆* - Fe, C	Упрочняющая фаза - темные замкнутые области эвтектики Fe-B	Fe – 86,60 C – 13,40	58,15 41,85	$Fe_{1,4}C$

* Данные для аналогичной фазы в покрытии на стали 50ХГА.

На рисунке 5а представлено распределение микротвёрдости по толщине боридного покрытия, полученного, при использовании состава 2 за различное время, из которого видно, что покрытие, полученное за 76 и 106 с, обладает более высокой микротвёрдостью (HV_{100} 13770 МПа) по сравнению с покрытиями, полученными за 120 и 136 с, или, например, с покрытием, полученным из состава 1 при этом же времени борирования. На рисунке 5б представлены результаты испытания износостойкости боридных покрытий, полученных на стали 65Г при использовании ТВЧ-нагрева в составах 1 и 2 в течение разного времени. Увеличение износостойкости упрочнённых слоёв при увеличении времени ТВЧ-нагрева у состава 2 (таблица 2) объясняется уменьшением твёрдости основной упрочняющей фазы. Это позволяет утверждать, что характеристики боридных покрытий, получаемых на конструкционных и легированных сталях с использованием ТВЧ-нагрева, изменяются не монотонно, а имеют некий оптимум в своих зависимостях от времени.

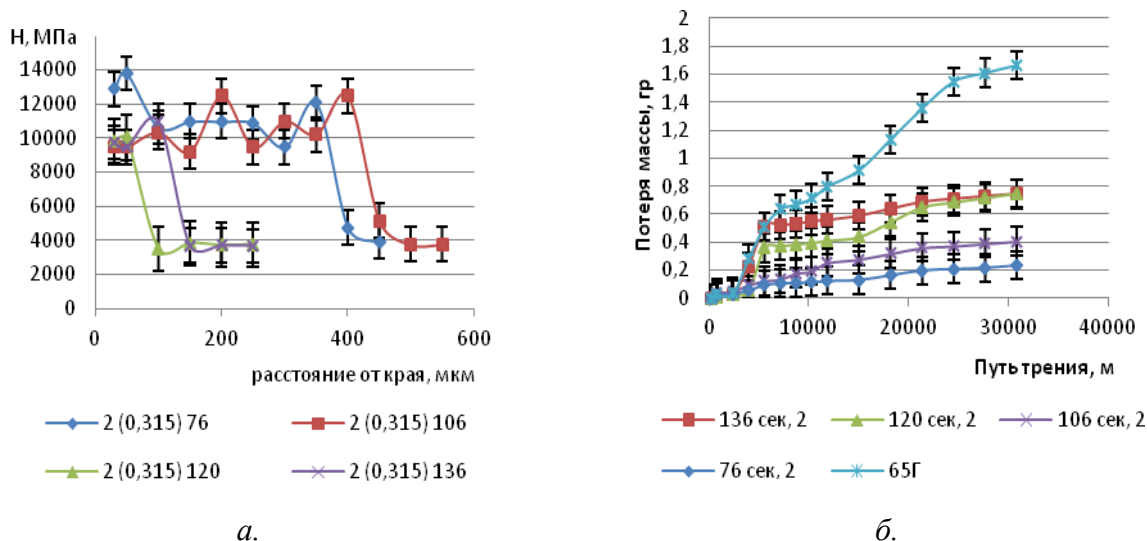


Рисунок 5 – Распределение микротвёрдости по толщине (а) и износостойкость боридного покрытия на стали 65Г (б), полученного из составов 1,2 (таблица 2) за разное время

В четвёртой главе представлены результаты оптимизации борирующих составов и параметров борирования сталей с использованием ТВЧ-нагрева, путем построения математических моделей процесса в виде поверхностей отклика целевых функций толщины (h) и износостойкости (ε) боридного покрытия методом полнофакторного эксперимента, по уравнениям вида:

$$\varepsilon = 537,938 - 0,557 \cdot x_1 - 10,569 \cdot x_2 - 17,487 \cdot x_3 + 0,011 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,018 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,339 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (14)$$

$$h = 1206,143 - 0,376 \cdot x_1 - 37,633 \cdot x_2 - 18,071 \cdot x_3 + 0,010 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,012 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,517 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (15)$$

где: ε – относительная износостойкость упрочнённого слоя по ГОСТ 23.208-79 (эталон закалённая и подвергнутая низкому отпуску сталь 65Г); h – толщина упрочнённого слоя, мкм; x_1 – температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$; x_2 – время выдержки при заданной температуре, с; x_3 – скорость нагрева, $^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Графическое отображение поверхности отклика указанной целевой функции от количества флюса П-0,66 и времени ТВЧ-нагрева, при заданной температуре (рисунок 6), позволяет легко определить оптимальные значения параметров для разработки основ технологии упрочнения таких деталей сельхозмашин как ПОО типа СЛ, не в углу куба значений факторов, а в той его области, где целевая функция имеет протяженное плато второго экстремума.

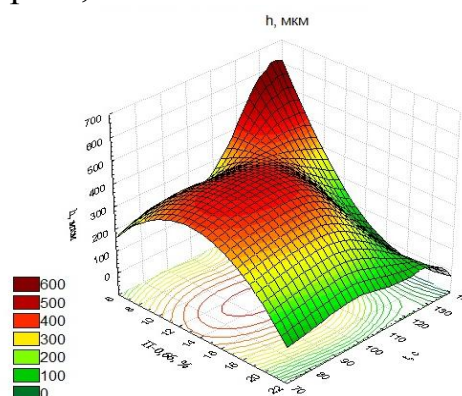


Рисунок 6 – Поверхность отклика целевой функции $h = f(t, [\text{П-0,66}], \%)$ для боридного покрытия на стали 65Г (h – толщина покрытия, t – время нагрева)

Указанные факторы варьировались в следующих пределах: x_1 от 900 до 1100 $^{\circ}\text{C}$; x_2 от 30 до 180 секунд; x_3 от 30 до 37 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а после оценки влияния состава борирующих смесей совместно с технологическими параметрами были получены и новые уравнения рабочих моделей, которые могут служить для предска-

ния результатов на практике с вероятностью 0,95 и доверительным интервалом $\pm 5\%$, например, для толщины покрытия (h).

В пятой главе описана разработанная на основе ранее полученных экспериментальных данных технология упрочнения деталей машин типа ПОО (СЛ типа 3 по ОСТ 23.2.164-87), путём нанесения на их поверхность оптимально сконструированного износостойкого боридного покрытия, полученного с использованием ТВЧ-нагрева (технология АГАУ), а также результаты полевых испытаний упрочнённых СЛ в условиях посевных кампаний в 2010, 2011 г.г.

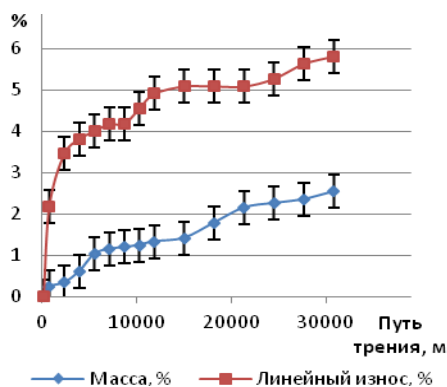
Разработанная технология упрочнения СЛ состоит из 7-и стадий. Основная стадия упрочнения осуществляется в индукторе треугольной формы, позволяющем одновременно нагревать носок и оба крыла СЛ (рисунок 7).



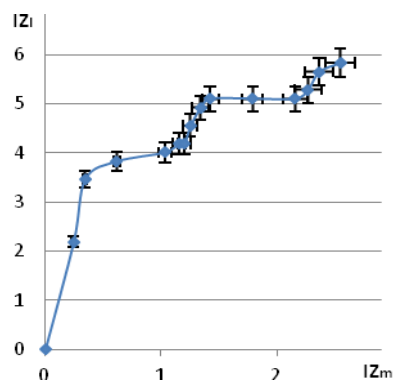
Рисунок 7 – Борирование с использованием ТВЧ-нагрева СЛ типа 3, предназначенной для установки на ПК-9,7 «Кузбас»

Готовую деталь после удаления остатков обмазки контролируют по HRC (не менее 64).

Перед проведением испытаний боридных покрытий в полевых условиях была установлена корреляция между весовым износом (легко определяется лабораторно) и линейным износом (позволяет прогнозировать ресурс наработки СЛ) для боридных покрытий полученных с использованием ТВЧ-нагрева на стали 65Г из оптимизированного состава и на оптимизированных режимах (рисунок 8).



а.



б.

Рисунок 8 – Зависимости линейного и весового износа от пути трения (а) и корреляция между линейным и весовым износом (б), для покрытия, полученного на стали 65Г с использованием ТВЧ-нагрева из состава 2, (IZ_1 – линейный износ, IZ_m – весовой износ)

Исходя из характера зависимости, приведенной на рисунке 8б, упрочнённый слой должен состоять как минимум из двух зон, обладающих разными физико-механическими характеристиками, но для данного типа покрытия структура и физико-механические свойства оказались практически одинаковыми по всей толщине (см., также рисунки 4 и 6а).

В качестве основных технологических факторов, влияющих на износ упрочнённых борированием с использованием ТВЧ-нагрева СЛ были исследова-

ны: способ нанесения обмазки на поверхность лапы, предварительная подготовка поверхности, время выдержки в индукторе при оптимальной температуре, последующая термообработка. Параметрами, контролируемыми при износе, являлись: ширина захвата лапы (B), ширина крыла лапы (b), длина крыла лапы (l), площадь перекрытия лапы (S), средний весовой износ (m), а также качественные параметры износа поверхности лап и их отдельных участков (таблица 5).

Таблица 5. - Относительный износ поверхностно-упрочненных СЛ ПК-9,7 «Кузбасс» в посевную кампанию 2010 г. ($n = 3$; $P = 0,95$)

Шифр	Износ по параметру I_x , %				
	B	b	l	S	m
I-2-БП,О	12,1	17,2	20,7	33,8	28,6
III-1-БП,О	12,3	16,8	20,9	34,9	28,6
V-2-БП,З	9,9	8,8	13,7	23,5	19,1
V-1-П,З	9,3	16,3	13,2	25,2	25,0
I-1-БП,О	8,4	11,1	13,6	23,5	20,2
I-1-БП,З	13,4	13,1	18,9	31,1	22,6
контроль	19,9	43,6	32,5	50,4	40,5

Из таблицы 5 видно, что между износом поверхностно-упрочненных СЛ по отдельным размерным параметрам существует определенная взаимосвязь. Износостойкость и гарантированные параметры СЛ различных производителей (ОАО «АНИТИМ» (1), ЗАО «РЗЗ» (2)) и СЛ, упрочненных по технологии АГАУ (3), следующие: наработка, га/лапу/массовый износ, г (1) 31,5/204, (2) 28,2/362, (3) 41,4/347. Оценка профиля лезвия крыла коммерческих и упрочненных по технологии АГАУ стрелчатых лап показала, что у детали с нанесенным на неё по схеме V износостойким боридным покрытием, наблюдается выраженный эффект самозатачивания в течение всего периода эксплуатации, вплоть до наработки 41,4 или 79,5 га/лапу.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан новый способ и предложены составы для осуществления борирования с использованием ТВЧ-нагрева, позволяющие получать износостойкие боридные покрытия толщиной до 800 мкм с микротвёрдостью до HV_{100} 30470 МПа, и износостойкостью в 4–7 раз превышающей износостойкость стали 65Г (подвергнутой закалке и низкому отпуску), при трении о не жёстко закреплённый абразив.
2. Определены основные вероятные химические реакции, приводящие к образованию активного бора (B^*) и боридных покрытий на конструкционных и легированных сталях с использованием ТВЧ-нагрева, и проведены расчёты их термодинамических потенциалов при 298, 1198, 1298 и 1498 К (ΔH_p° , ΔS_p° , ΔG_p°) для установления возможности самопроизвольного протекания процессов и выбора тех реакций образования покрытий, которые разрешены термодинамически.
3. Установлены кинетические параметры интегрального процесса борирования стали 65Г с использованием ТВЧ-нагрева, подтверждающие осуществление борирования по механизму ТПХР ($-\ln k$ от 10,35 до 15,05, n от 2,72 до 4,15,

кажущаяся энергия активации $E_a = 365,8$ кДж/моль), что позволяет в 10 - 60 раз ускорить процесс борирования с использованием ТВЧ-нагрева по сравнению с диффузионным борированием.

4. Исследованы составы 3-х и 4-х компонентных борлирующих смесей для борирования с использованием ТВЧ-нагрева сталей Ст3, 45, 50Г, 65Г, 50ХГА на основе B_4C , В, плавленного флюса П-0,66 и различных активаторов, и установлены основные типы образующихся структур износостойкого покрытия: I - в виде эвтектики Fe-B с замкнутыми карбидными областями, II - в виде пластинчатых кристаллов борида марганца, расположенных в более мягкой матрице из ледебуритоподобной эвтектики Fe-B, III - в виде крупнозерненной эвтектики Fe-B, и IV - покрытие, состоящее из игольчатых кристаллов борида марганца или хрома, расположенных в более мягкой матрице из ледебуритоподобной эвтектики Fe-B.
5. Определены физико-механические характеристики боридных покрытий, получаемых с использованием ТВЧ-нагрева на сталях 65Г, 50ХГА и выявлена взаимосвязь состав-структура-свойство износостойких покрытий от состава борлирующей смеси, состава стали, режимов процесса, а также определена морфология, фазовый и химический состав основных упрочняющих фаз покрытий.
6. Методом ПФЭ получено графическое отображение поверхности отклика целевой функции толщины (h) и износостойкости покрытия (ϵ), зависящей от количества флюса П-0,66, температуры и времени ТВЧ-нагрева при заданной температуре, которая позволила определить, что изменение содержания флюса в интервале 10–14 масс. %, а времени ТВЧ-нагрева - в интервале 90–120 с при температуре 1150–1250 °С, приводит к получению на стали 65Г боридного покрытия с гарантированной толщиной до 300 мкм.
7. Разработана технология упрочнения ПОО типа СЛ, путём нанесения на их поверхность оптимально сконструированного износостойкого боридного покрытия, получаемого с использованием ТВЧ-нагрева (технология АГАУ), и проведены испытания упрочнённых СЛ в реальных условиях, которые показали, поддержание ресурса этих деталей сельскохозяйственных машин на том же уровне, что и твердосплавные покрытия, и превосходство боридных покрытий по отдельным показателям износа, установили факт сохранения стреловидной рабочей формы детали, а также увеличение гарантированного ресурса наработки на одну СЛ до 3-х раз (79,5 га) и получение эффекта самозатачивания в течение всего периода эксплуатации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. **Ишков, А. В. Получение износостойких и защитных покрытий на рабочих поверхностях почвообрабатывающих органов сельхозтехники: современное состояние и перспективные направления исследований (обзор)** [текст]. / А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, Н. М. Мишустин, А. С. Шайхудинов // Научные исследования: информация, анализ, прогноз. – глава LVIII в колл. монографии. – Воронеж: Изд-во ВГПУ, 2011. – С. 185–205.
2. **Ишков, А. В. Влияние природы борлирующего агента, флюсов и активаторов на характеристики покрытий, полученных при скоростном борировании легированных**

- сталей [Текст] / А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, А. А. Максимов, Н. М. Мишустин // Ползуновский вестник. – №3. – 2010. – С. 201–203. (статья ВАК).
3. **Ишков, А. В. Износостойкие боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники** [Текст] / А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, А. А. Максимов, Н. М. Мишустин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – № 9. – 2010. – С. 71 – 75. (статья ВАК).
 4. **Ишков, А. В. Влияние технологических факторов на износ поверхностно-упрочненных стрельчатых лап** [Текст] / А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, Н. М. Мишустин, А. А. Максимов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – № 10. – 2010. – С. 82–86. (статья ВАК).
 5. **Мишустин, Н. М. Состав, структура и свойства износостойких покрытий, полученных на сталях 65Г и 50ХГА при скоростном ТВЧ-борировании** [Текст] / Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский, А. В. Ишков // Известия Томского политехнического университета. – Т. 320. – № 2. – 2012. – С. 68–72. (статья ВАК).
 6. **Ишков, А. В. Структура и свойства износостойких слоев, полученных на стали 65Г высокоскоростным борированием** [Комп.]. / А. В. Ишков, Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский // Горизонты образования: электронный научный журнал. – Вып.12, – 2010. – режим доступа: <http://www.edu.secna.ru/main/review/>
 7. **Мишустин, Н. М. Борирование марганцовистых и хромомарганцовистых сталей при ТВЧ-нагреве в среде боратных флюсов** [Текст]. / Н. М. Мишустин, А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров // Новые химические технологии: производство и применение: Сб. статей XII-ой Всеросс. научн.-техн. конф. – Пенза: Изд-во ПДЗ, – 2010. – С. 47–50.
 8. **Мишустин, Н. М. Функциональные покрытия для рабочих органов сельхозтехники** [Текст]. / Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, А. В. Ишков // Защитные и специальные покрытия, обработка поверхности в машиностроении и приборостроении: Материалы VII-ой Всеросс. научн.-практ. конф. – Пенза: Изд-во ПДЗ, – 2010. – С. 23–26.
 9. **Ишков, А. В. Износостойкие покрытия, полученные при скоростном борировании легированных сталей** [Текст]. / А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, Н. М. Мишустин // Инновации в машиностроении: Материалы I-ой Междунар. научн.-практ. конф. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, – 2010. – С. 153–156.
 10. **Мишустин, Н. М. Повышение качества и ресурса рабочих органов почвообрабатывающего комплекса оптимизацией схемы нанесения упрочняющего покрытия** [Текст]. / Н. М. Мишустин, Н. Т. Кривочуров, В. В. Иванайский, А. В. Ишков // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды: Сб. матер. 7-ой Всеросс. научн.-практ. конф. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, – 2010. – С. 189–191.
 11. **Мишустин, Н. М. Скоростное борирование сталей 65Г и 50ХГА** [Текст]. / Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский, А. В. Ишков // Современные проблемы машиностроения: Сб. докладов V-ой Междунар. научн.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, – 2010. – С. 250–254.
 12. **Мишустин, Н. М. Функциональные боридные покрытия для конструкционных сталей: получение при ТВЧ-нагреве, структура и свойства, применение в сельхозмашиностроении** [Текст]. / Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский, А. В. Ишков, Н. Т. Кривочуров // Новые материалы и технологии в машиностроении: Сб. материалов XII-ой Междунар. научн.-практ. конф. – Вып. 10. – Брянск: Изд-во БГИТА, – 2010. – С. 57–60.
 13. **Мишустин, Н. М. Получение боридных покрытий на высокоуглеродистых легированных сталях при ТВЧ-нагреве** [Текст]. / Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, А. В. Ишков // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 139–143.
 14. **Мишустин, Н. М. Структура и некоторые свойства боридных покрытий для почвообрабатывающих органов сельхозтехники** [Текст]. / Н. М. Мишустин, Н. Т. Кривочуров, В. В. Иванайский, А. В. Ишков // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 43–46.
 15. **Мишустин, Н. М. Конструирование упрочняющего покрытия с учетом реального износа детали** [Текст]. / Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, А. В. Ишков // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 75–80.
 16. **Ишков, А. В. Физико-химические и инженерные основы создания функциональных**

- боридных покрытий на сталях при ТВЧ-нагреве** [Текст]. / А.В. Ишков, Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский // Казанская наука. – № 9. – 2010. – С. 92–97.
17. **Мишустин, Н. М. Исследование абразивного износа поверхности почвообрабатывающего органа с упрочняющим покрытием** [Текст]. / Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, А.В. Ишков // Проблемы исследования и проектирования машин: Сб. статей VI-ой Междунар. научн.-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, – 2010. – С. 126–128.
18. **Ишков, А. В. Разработка технологии поверхностного упрочнения деталей автомобилей при ТВЧ-борировании** [Текст]. / А. В. Ишков, Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров // Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: Материалы Всеросс. научн.-практ. конф. – Магадан: Изд-во СВГУ, – 2010. – С. 76–78.
19. **Мишустин, Н. М. Получение износостойких боридных покрытий на сталях при ТВЧ-нагреве и исследование их свойств** [Текст]. / Н. М. Мишустин, А. В. Ишков, В. В. Иванайский // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII-ой Междунар. научн.-практ. конф. В 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, – 2011. – Т. 2. – С. 193–194.
20. **Мишустин, Н. М. Повышение ресурса почвообрабатывающих органов сельхозтехники путем создания на их поверхности боридных покрытий** [Текст] / Н. М. Мишустин, В. В. Иванайский, А. В. Ишков, Н. Т. Кривочуров // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов VI-ой Междунар. научн.-практ. конф. – Барнаул: Изд-во АГАУ, – 2011. – С. 73–76.
21. **Мишустин, Н. М. Физико–химические основы технологии поверхностного упрочнения деталей сельхозтехники при ТВЧ-борировании** [Комп.] / Н. М. Мишустин, К. В. Федосеенко, Д. И. Снегирев, А. В. Ишков // Вестник молодых ученых: сборник научных работ. – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, – 2011. – режим доступа: <http://e-lib.gasu.ru/vmu/arhive/2011/01/index.shtml>
22. **Ишков, А. В. Функциональные боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники. Часть I: Получение и свойства покрытий** [Текст]. / А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, Н. М. Мишустин, А. С. Шайхудинов // Актуальные проблемы сельского хозяйства горных территорий: материалы III-ей Междунар. научн.-практ. конф. – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, – 2011. – С. 318–321.
23. **Ишков, А. В. Функциональные боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники. Часть II: Износ поверхностно-упрочненных стрельчатых лап** [текст]. / А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, Н. М. Мишустин, А. С. Шайхудинов // Актуальные проблемы сельского хозяйства горных территорий: материалы III-ей Междунар. научн.-практ. конф. – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, – 2011. – С. 322–327.
25. **Ишков, А. В. Способ химико-термической обработки режущей кромки стального рабочего органа почвообрабатывающего орудия** [комп.]. / А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, Н. М. Мишустин // Патент РФ № 2447194 МПК С23С 26/00 Способ химико-термической обработки режущей кромки стального рабочего органа почвообрабатывающего орудия. – заявл. 03.08.2010. – опубл. 10.04.2012. – Бюл. № 10.
26. **Иванайский, В. В. Способ изготовления почвообрабатывающего рабочего органа стрельчатого типа** [текст]. / В. В. Иванайский, А. В. Ишков, Н. Т. Кривочуров, Н. М. Мишустин, А. С. Шайхудинов // Заявка на пат. РФ № 2011128457/(042095) от 08.07.2011.