

На правах рукописи



**НГУЕН ВАН ВИНЬ**

**ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ  
МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ОПЛАВЛЕНИЯ БОРСОДЕРЖАЩЕЙ  
СМЕСИ ПОРОШКОВ**

Специальность: 2.6.17. Материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Комсомольск-на-Амуре – 2025**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: **Балановский Андрей Евгеньевич**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», город Иркутск

Официальные оппоненты: **Коберник Николай Владимирович**, доктор технических наук, доцент, директор ФГАУ «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана», город Москва

**Атеняев Александр Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры Транспортно-технологических комплексов, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», город Хабаровск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук», город Улан-Удэ

Защита состоится «11» апреля 2025 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.01 в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте [https://sovnet.knastu.ru/diss\\_defense/show/196](https://sovnet.knastu.ru/diss_defense/show/196)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту [diss.material@yandex.ru](mailto:diss.material@yandex.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н.



Проценко Александр Евгеньевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В современном машиностроении актуальной проблемой является износ деталей машин, работающих в жестких условиях динамических нагрузок и абразивного изнашивания. Изготовление деталей из высоколегированных износостойких сталей для увеличения срока их службы не всегда экономически и технологически целесообразно из-за их высокой стоимости. Для увеличения срока службы деталей машин, изготавливаемых из стали, применяются методы поверхностного упрочнения, направленных на повышение их износостойкости путём формирования на поверхности слоёв с высоким уровнем необходимых эксплуатационных характеристик.

Использование добавок бора позволяет получать слои с высокими механическими характеристиками. Высокая твёрдость получаемых покрытий и низкий коэффициент трения являются ключевыми факторами, обеспечивающими высокую износостойкость боридных покрытий в условиях трения и абразивного изнашивания. В промышленности для получения боридных покрытий широко используется метод диффузионного насыщения в твёрдых, жидких и газообразных средах. Однако этот метод имеет ряд недостатков, таких как сложность подготовительных процессов, длительное воздействие высоких температур и небольшая глубина упрочненного слоя. Кроме того, получаемые таким способом покрытия имеют высокую хрупкость, что повышает склонность наносимого слоя к растрескиванию под воздействием нагрузок.

Для решения указанных проблем в последние годы в России и за рубежом разработаны методы упрочнения поверхности стальных изделий с использованием высококонцентрированных источников энергии. Применение данных технологических процессов позволяет обрабатывать необходимые части изделия без изменения свойств основы, сократить продолжительность обработки за счет высокой скорости нагрева и охлаждения, минимизировать термические деформации и остаточные напряжения в изделии и сформировать композиционные боридные износостойкие покрытия с высокой пластичностью. Отмечено, что плазменное оплавление представляет собой перспективную альтернативу другим высокоэнергетическим методам поверхностного упрочнения благодаря своей простоте, возможности использования стандартного сварочного оборудования и относительно низкой стоимости по сравнению с лазерными или электронно-лучевыми источниками. Таким образом, использование плазменной дуги для формирования боридных покрытий на поверхности стали решает указанные выше проблемы и позволяет получать боридные слои с высокими эксплуатационными характеристиками, что делает данный метод востребованным в машиностроении.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросу повышения надежности и долговечности стальных изделий путем формирования износостойких покрытий на их поверхности посвящено множество научных исследований. По результатам анализа литературных источников было отмечено, что борирование является одним из перспективных методов повышения твердости и износостойкости деталей машиностроения.

В области химико-термической обработки металлов в печах Тарасов С. Ю. применил науглероживание перед борированием для снижения напряжений в слое боридов. Другие авторы Дукаревич И. С., Можаров М. В. и Шагаев А. С. предложили

оптимальные режимы борирования для уменьшения содержания хрупкой высокобористой фазы FeB в слое. Баландин Ю. А. и Крукович М. Г. разработали процесс одновременного диффузионного насыщения стальной поверхности несколькими элементами (бором, азотом и медью) с целью улучшения эксплуатационных характеристик стали.

Чудина О. В., Постников В. С., Лысенко А. Б., Колесников Ю. В., Абильтитов Г. А. и Сафонов А. Н. исследовали процесс борирования стали с использованием лазерного излучения.

Сизов И. Г., Смирнягина Н. Н., Семёнов А. П., Поболь И. Л., Батаев И. А. и Прусаков Б. А. проанализировали влияние параметров электронно-лучевого нагрева (мощность луча, продолжительность воздействия, температура) на процесс диффузии бора в сталь и образование боридов.

Л. Буритис и Г. Пападимитриу провели исследование, направленное на повышение износостойкости углеродистой стали путём обработки её поверхности бором и диборидом хрома с использованием плазменно-дугового нагрева.

В результате анализа литературных данных было выявлено, что изучению структуры и эксплуатационных характеристик боридных покрытий, полученных методом плазменного оплавления, посвящено ограниченное количество научных работ. Это указывает на необходимость проведения более глубоких исследований структуры и анализа уровня эксплуатационных свойств боридных слоёв, нанесённых на поверхность стальных заготовок методом плазменного оплавления борсодержащих смесей.

**Целью диссертационной работы является** повышение твердости и износостойкости стальных изделий за счет формирования упрочненных боридных слоев на их поверхности с использованием метода плазменного оплавления борсодержащей смеси.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработать состав обмазки, в качестве основных легирующих элементов рассмотреть возможности использования аморфного бора и карбида бора. Определить связующее вещество, а также разработать технологию приготовления и нанесения обмазки на поверхность конструкционной стали.

2. Провести оценку влияния основных параметров плазменного поверхностного оплавления борсодержащей смеси, нанесенной на поверхность стали на формирования оплавленной поверхности, ширину и глубину поверхностного слоя, микроструктуру, микротвердость.

3. Изучить структурно-фазовые и химические превращения в процессе формирования борированных поверхностных слоев.

4. Исследовать связь микроструктуры борированных слоев на образцах низкоуглеродистой стали в процессе испытаний на абразивный износ по закрепленному абразиву, в условиях сухого трения скольжения, на трещиностойкость, адгезию.

5. Разработать технологию упрочнения рабочих органов сельскохозяйственной техники для продления их срока службы на основе полученных данных проведенных исследований.

**Научная новизна работы:**

1. Установлены закономерности формирования борированных упрочненных слоев в поверхностном слое низкоуглеродистой стали в зависимости от

технологических параметров плазменного оплавления борсодержащей смеси, включающей карбид бора в качестве основного компонента, железо и связующий компонент. Изменение погонной энергии от 525 до 700 кДж плазменной дуги и содержания бора в борсодержащей смеси приводят к формированию различных структурных зон по глубине поверхностного слоя: заэвтектической, эвтектической и доэвтектической. Глубина упрочнения составляет от 600 до 2500 мкм, а значения микротвердости в диапазоне от 800 до 1400 HV.

2. Установлено, что при плазменном оплавлении борсодержащей смеси с погонной энергией 525 кДж формируется фаза боридов железа ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ), которая является центром кристаллизации для ориентированного роста эвтектических колоний ( $\text{Fe}_2\text{B} + \alpha\text{-Fe}$ ), создавая непрерывный каркас из упрочняющих равновесных фаз:  $\text{Fe}_2\text{B}$  и  $\alpha\text{-Fe}$ . При плазменном оплавлении с погонной энергией 700 кДж формируются первичные бориды ( $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ) и неравновесные фазы боридов железа ( $\text{Fe}_3\text{B}$ ,  $\text{Fe}_3(\text{B,C})$ ) и  $\alpha\text{-Fe}$ . Бороцементитная фаза по стехиометрическому составу соотносится с фазой  $\text{Fe}_3\text{B}_{0,6}\text{C}_{0,4}$ .

3. Выявлено, что микротвердость боридных слоев зависит от объемной доли боридов железа в борсодержащей смеси и варьируется в диапазоне от 600 до 1535 HV. Максимальная твердость достигается при плавлении борсодержащей смеси (содержании бора 40%) с погонной энергией плазменной дуги 525 кДж. Увеличение погонной энергии плазменной дуги до 700 кДж приводит к формированию доэвтектической структуры и снижению твердости.

4. Установлена прямая зависимость между содержанием бора в оплавляемой борсодержащей смеси, микроструктурой и износостойкостью легированных слоёв. Высокие показатели износостойкости, которые в три раза превышают показатели цементированной стали 20, достигаются при погонной энергии плазменной дуги 525 кДж и содержании бора 40% в борсодержащей смеси. Снижение содержания бора до 25% приводит к уменьшению объемной доли боридов железа и, как следствие, к увеличению скорости износа материалов. Увеличение содержания бора в смеси свыше 40% приводит к появлению трещин в упрочнённом слое.

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

1. Развитие научных представлений о процессах формирования упрочнённых поверхностных слоёв при плазменном оплавлении борсодержащих смесей. В ходе работы были установлены закономерности изменения микроструктуры, фазового состава и свойств легированных слоёв в зависимости от технологических параметров плазменного оплавления (сила тока, содержание легирующих элементов). Это способствует углублению понимания процессов формирования боридных фаз и их влияния на механические свойства материалов.

2. Предложен новый подход к моделированию процессов теплопроводности и структурных преобразований при плазменном плавлении борсодержащей смеси порошков нанесенных на поверхность металла с использованием современных компьютерных программных средств. В диссертации использован программный комплекс Simufact Welding для точного моделирования термических процессов, что позволило предсказать температурные поля, глубину и ширину зоны оплавления борсодержащей обмазки, напряжения и деформации в поверхностном слое металла. Эти результаты имеют теоретическую ценность для дальнейшего развития моделей теплопередачи и кристаллизации в условиях плазменной обработки металлов.

3. Полученные результаты расширяют научные представления о механизмах абразивного износа и трения скольжения в упрочнённых поверхностных боридных слоях низкоуглеродистых сталей, что важно для разработки новых материалов с повышенной стойкостью к износу.

4. Разработка технологических режимов плазменного оплавления борсодержащих смесей, нанесенных на поверхность металла, для формирования упрочнённых поверхностных слоёв в низкоуглеродистой стали. В ходе работы предложены режимы плазменного оплавления (сила тока, состав борсодержащей смеси), которые обеспечивают получение упрочнённых слоёв с высокими эксплуатационными свойствами – твёрдостью, износостойкостью и адгезией. Эти данные могут быть использованы в промышленной практике при обработке деталей и машин, работающих в условиях высоких механических нагрузок и износа.

5. Полученные результаты могут быть внедрены в металлургической, машиностроительной и горнодобывающей отраслях для улучшения долговечности и надёжности оборудования. Это позволит снизить издержки на ремонт и замену деталей за счёт увеличения их износостойкости.

6. Результаты, полученные в диссертационной работе, применяются в учебном процессе в Иркутском национальном исследовательском техническом университете при подготовке студентов по курсам «Материаловедение», «Теория сварки плавлением и давлением», «Источники энергии для сварки».

### **Методы исследования**

Технология поверхностного легирования стальных заготовок методом плазменного поверхностного плавления реализована в институте авиамашиностроения и транспорта ИрНITU. Исследования полученных материалов проводились на современном аналитическом оборудовании, соответствующем уровню российских и зарубежных научных лабораторий в области материаловедения. Структурные изменения материалов после плазменного оплавления были изучены с использованием оптического микроскопа MET-2 и двухлучевого сканирующего микроскопа JIB-4500, оснащенного электронной пушкой LaB6. Анализ фазового состава исследуемых материалов проводили с применением дифрактометра Shimadzu XRD-7000 с системой поликапиллярной оптики в лаборатории электронной микроскопии ИрНITU. Оценку уровня микротвердости полученных материалов выполняли в процессе дюрометрических испытаний на SHIMADZU HNV-2. Для оценки износостойкости материалов после обработки были проведены испытания в условиях абразивного износа и трения скольжения с использованием оборудования, соответствующего требованиям ГОСТа.

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

1. Результаты влияния характеристик плазменного поверхностного оплавления борсодержащей смеси на степень разбавления легированного слоя, а также на глубину, структуру и свойства сформированных слоёв.

2. Составы борсодержащей смеси, включающие пропорции компонентов, размер частиц порошков и толщину нанесенной обмазки, способствующий формированию упрочнённых и качественных слоёв на поверхности низкоуглеродистой стали.

3. Результаты сравнения и исследования структуры и фаз поверхностного слоя, полученного после плазменного оплавления борсодержащей смеси.

4. Результаты экспериментальных исследований борированного поверхностного слоя металла низкоуглеродистой стали на абразивный износ, и в условиях сухого трения скольжения.

5. Результаты промышленных испытаний борированного поверхностного слоя металла низкоуглеродистой стали на деталях почвообрабатывающей техники.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Для проведения экспериментальных исследований использовалось современное аналитическое оборудование. Свойства материалов оценивались с применением статистических анализов для определения допустимого уровня погрешности измерений. Результаты, полученные в ходе экспериментальных испытаний, согласуются с данными, опубликованными в работах как российских, так и зарубежных исследователей.

Основные положения и результаты работы докладывались на: 1. XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, ИрННТУ, 2022 г.); 2. XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, ИрННТУ, 2023 г.); 3. Международная научно-практическая конференция «Материаловедение и металлургические технологии» (г. Сочи, г. 2022); 4. XVI Международной научно-практической конференции «International Conference on Aviation Engineering» (г. Иркутск, 2023 г.).

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в разработке плана исследования, подборе и подготовке материалов для проведения экспериментов, изготовлении образцов для обработки, исследовании характеристик и свойств упрочненных слоев, полученных в результате обработки, анализе и обработке полученных экспериментальных данных, формулировании выводов и подготовке научных материалов для публикации.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных статьях, из них 3 статьи в международной системе SCOPUS, 6 статей в журналах, внесенных в перечень ВАК.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка литературных источников и приложений. Содержит 158 страниц машинописного текста, 91 рисунок и 7 таблиц. Библиография включает 115 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** приведён анализ литературных источников, посвящённых строению, структурным особенностям и свойствам боридных покрытий. Подробно рассмотрены системы упрочнения Fe-B и Fe-C-B, механизм диффузионного насыщения бором на поверхность сталей, традиционные технологии борирования в промышленности, а также различные методы нанесения боридных покрытий с использованием высококонцентрированных источников нагрева.

**Во втором разделе** диссертационной работы представлены материалы, использованные в ходе исследования, а также описаны технологические режимы процесса плазменного оплавления в режиме дуги. Кроме того, изложены методы изучения структуры, фазового состава с использованием оптического, электронного микроскопа, рентгенофазового анализа, оценки механических свойств и износостойкости полученных материалов с использованием стандартных методик и оборудования.

В качестве основного материала для поверхностного упрочнения методом плазменного оплавления была выбрана низкоуглеродистая сталь 20, которая является одним из лидеров на рынке черных металлов по объему продаж благодаря своим сбалансированным свойствам, которые делают ее востребованной в различных отраслях промышленности, обладает отличной свариваемостью, не склонна к образованию флокенов и отпускной хрупкости. Ее предел текучести и прочность находятся на среднем уровне, а вязкость разрушения и соотношение цена-качество — удовлетворительные. Сталь 20 широко используется в качестве материала для цементации, что позволяет заменить высокоуглеродистые и легированные стали.

В связи с низкой электропроводностью бора в диапазоне температур от 0°C до 600°C были разработаны требования к составу борсодержащих смесей. В качестве основы борсодержащей смеси были использованы аморфный бор, карбид бора  $B_4C$  и добавки железа, фенолформальдегидное полимерное соединение в виде связующего. Гранулометрический состав используемых порошков представлен на рис. 1. Выбор аморфного бора и карбида бора в качестве легирующих элементов обусловлен их способностью значительно повышать твёрдость и износостойкость поверхностных слоёв стали. Добавки железа в состав смеси способствуют улучшению распределения легирующих элементов в ванне расплавленного металла, что ведет к усилению смачиваемости и сцепления оплавленного слоя и основы.

Образцы из стали 20 в виде пластин размером 70×20×10 мм были разрезаны и отшлифованы с использованием абразивных бумаг с зернистостью от P240 до P1000. Для приготовления борсодержащей смеси порошки карбида бора и железа были смешаны с фенолформальдегидным полимерным соединением. Полученная смесь была нанесена на поверхность образцов, после чего образцы просушивались при температуре 70 °C в течение 30 минут. Для обеспечения равномерного распределения толщины борсодержащей пасты на поверхности образцов после сушки был использован вихретоковый толщиномер. Образцы были установлены на медную пластину для обеспечения эффективного охлаждения и затем подвергнуты сканированию плазменной дугой.

Для проведения процесса плазменного поверхностного оплавления использовалось оборудование лаборатории кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий ИРНИТУ, которая неоднократно использовалась в работах других соискателей и подробно описана в их диссертационных работах.

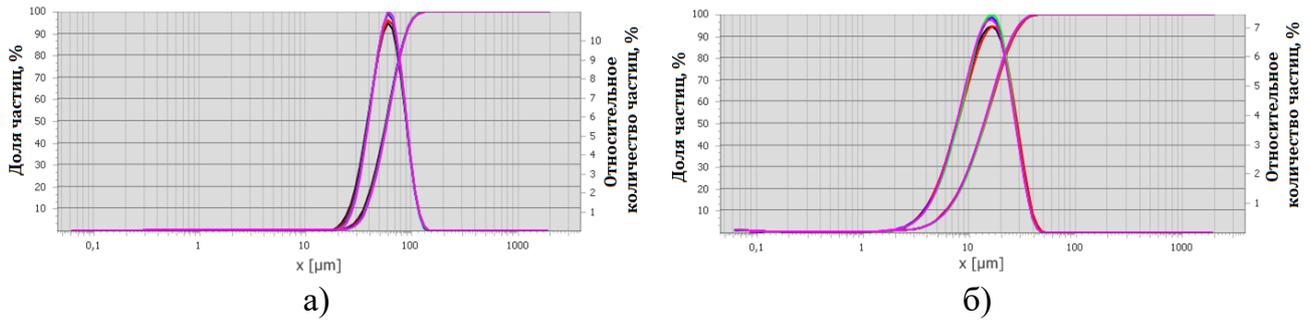


Рисунок 1 – Гранулометрический состав порошков: а – карбид бора; б - железо

В третьем разделе диссертационной работы представлены результаты компьютерного моделирования с помощью программного обеспечения Simufact Welding процесса плазменного оплавления и исследований структурных преобразований, определения химических элементов, анализа морфологии частиц и фазового состава боридных покрытий после плазменного оплавления борсодержащей смеси «аморфный бор – Fe» и «карбид бора – Fe».

Моделирование процесса плазменного плавления осуществляется с помощью программного обеспечения Simufact Welding (рис. 2). Полученные результаты позволяют определить оптимальные параметры процесса для получения равномерного нагрева и предотвращения перегрева или недостаточного оплавления материала, точно предсказать глубину упрочнённого слоя низкоуглеродистой стали, что важно для обеспечения его необходимой толщины.

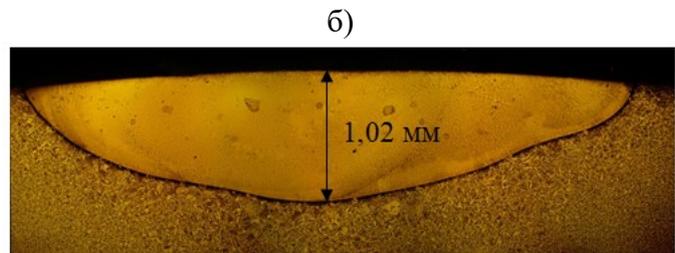
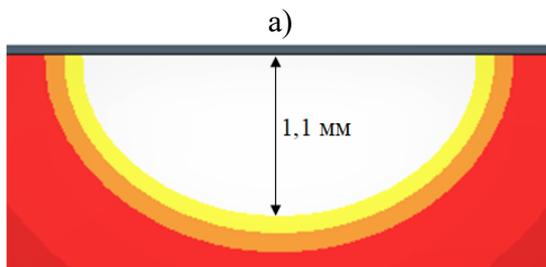
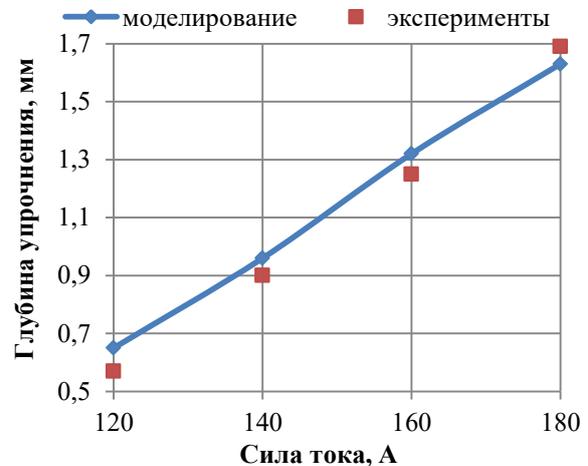
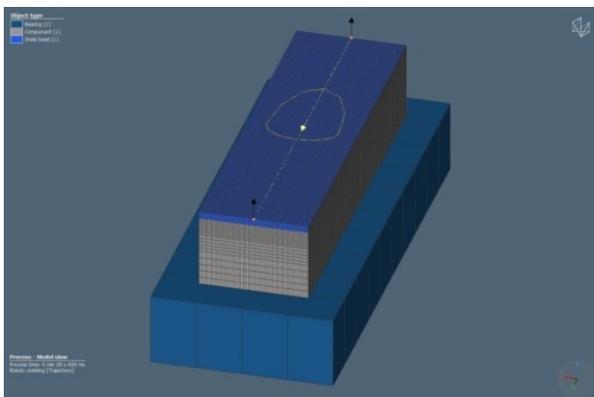


Рисунок 2 – Результаты моделирования процесса плазменного оплавления: а – Модель 3D; б – зависимость глубины упрочнённого слоя от силы сварочного тока; в, д – сопоставление данных модели с реальным экспериментом

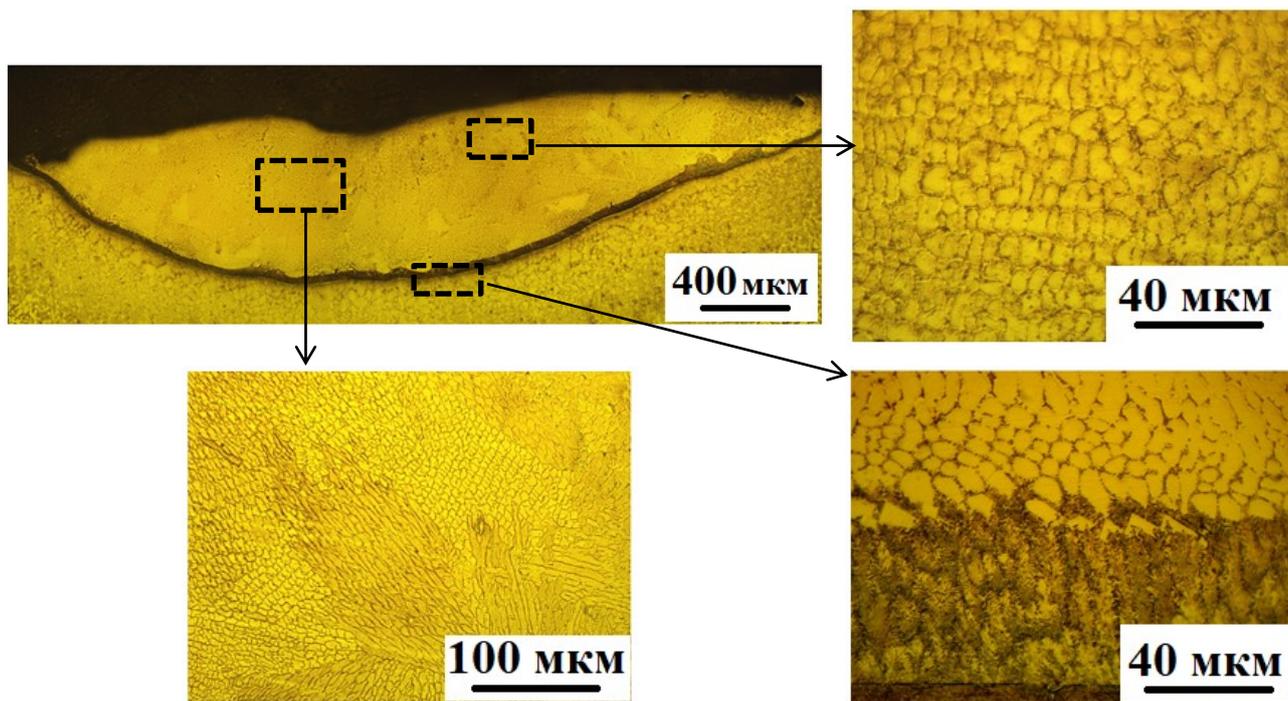


Рисунок 3 – Микроструктура поперечного сечения поверхностного слоя после плазменного оплавления 40В-10Fe с погонной энергией 525 кДж

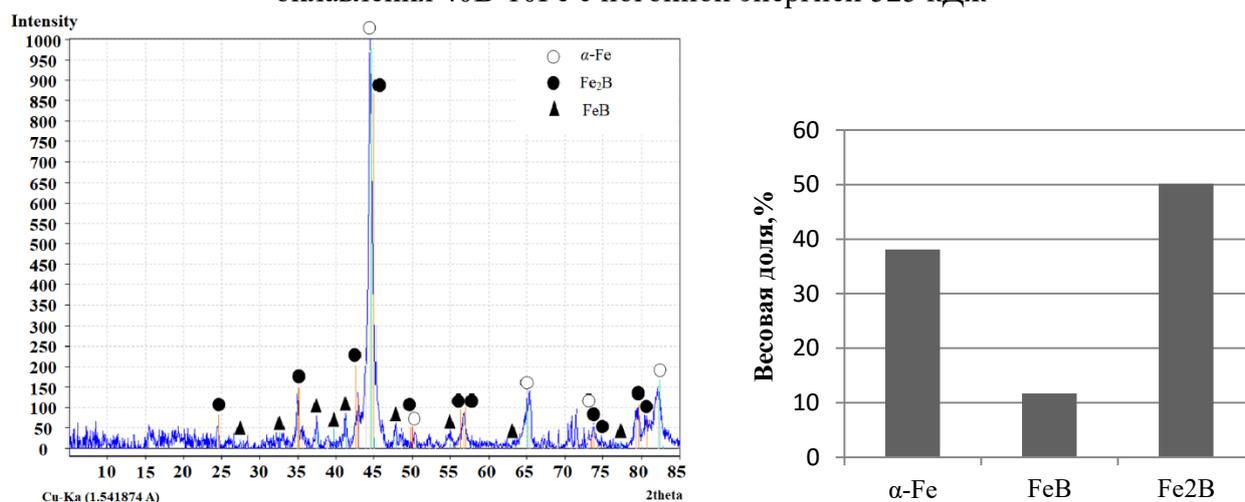


Рисунок 4 – Рентгенограмма материала после плазменного оплавления 40В-10Fe с погонной энергией 525 кДж

Согласно результатам металлографического исследования, в поверхностном слое стали 20 после плазменного оплавления борсодержащей смеси, в состав которой входит 40% бора и 10% железа, при погонной энергии плазменной дуги 525 кДж сформировалась гетерогенная микроструктура (рис. 3). В оплавленной зоне материала наблюдается заэвтектическая область, состоящая из первичных боридов железа различной морфологии и расположенной между ними эвтектической матрицы. Под заэвтектической зоной располагается зона эвтектического строения. При приближении к основному металлу выявляется зона термического влияния, характеризующаяся укрупненными зернами вследствие нагрева до высоких температур, не достигающих температуры плавления, и последующего быстрого охлаждения. Далее следует основной металл, структура которого не претерпевает изменений после плазменного оплавления. Рентгенофазовый анализ (рис. 4) показал,

что в оплавленном материале присутствуют первичные бориды железа FeB (11,72%), Fe<sub>2</sub>B (50,18%) и ферритная фаза α-Fe (38,1%).

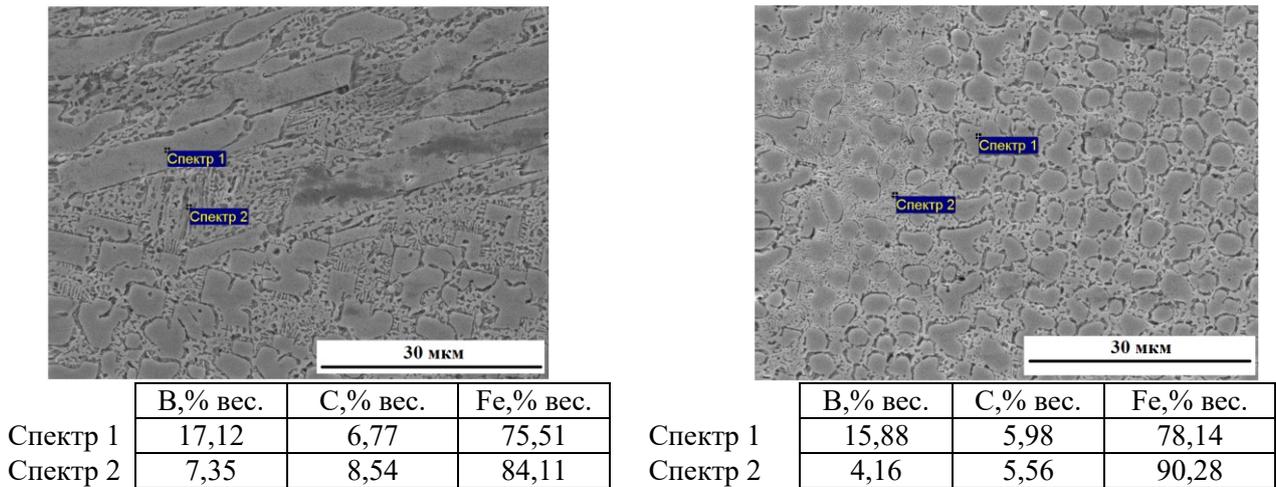


Рисунок 5 – Особенности структуры и химический состав локального места оплавленного слоя 40В-10Fe с погонной энергией 525 кДж

Для изучения особенностей структуры боридных слоёв и определения химического состава в их локальных зонах используется метод электронной микроскопии. По данным литературы, бориды железа Fe<sub>2</sub>B образуются в виде стержневых кристаллов, которые в поперечном сечении имеют форму квадратов, ромбов или треугольников. Реальные кристаллы Fe<sub>2</sub>B в большинстве случаев содержат дефекты. Одним из распространённых типов дефектов является отклонение от геометрически правильной формы кристаллов, обусловленное высокой скоростью кристаллизации и локальной неоднородностью химического состава расплава. Эти отклонения можно обнаружить в продольных и поперечных сечениях кристаллов (рис. 5). Это связано с тем, что кристаллы, растущие из множества центров, взаимодействуют между собой и препятствуют взаимному росту, что мешает образованию кристаллов правильной формы.

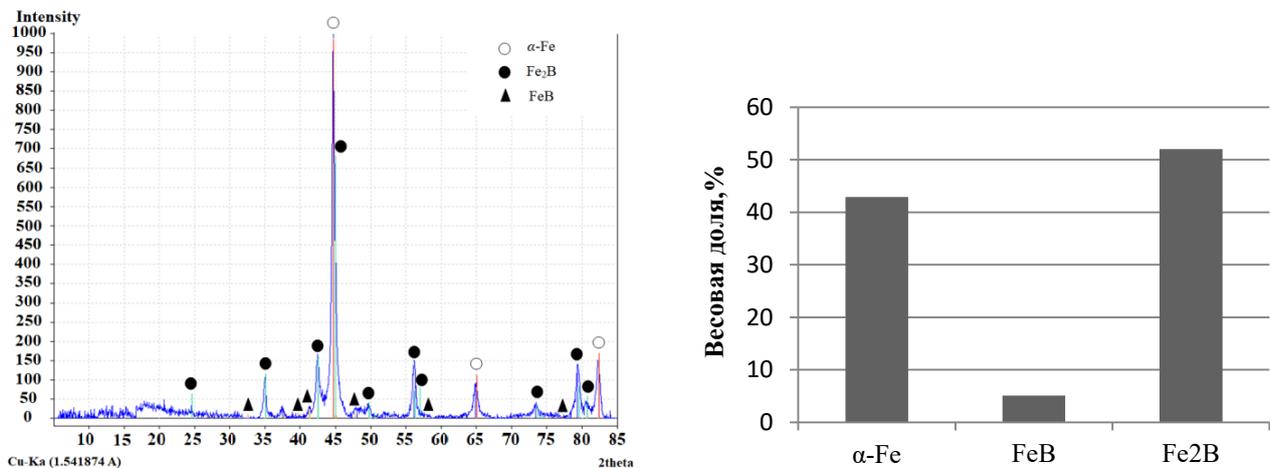


Рисунок 6 – Рентгенограмма материала после плазменного оплавления 40В-10Fe\_140А

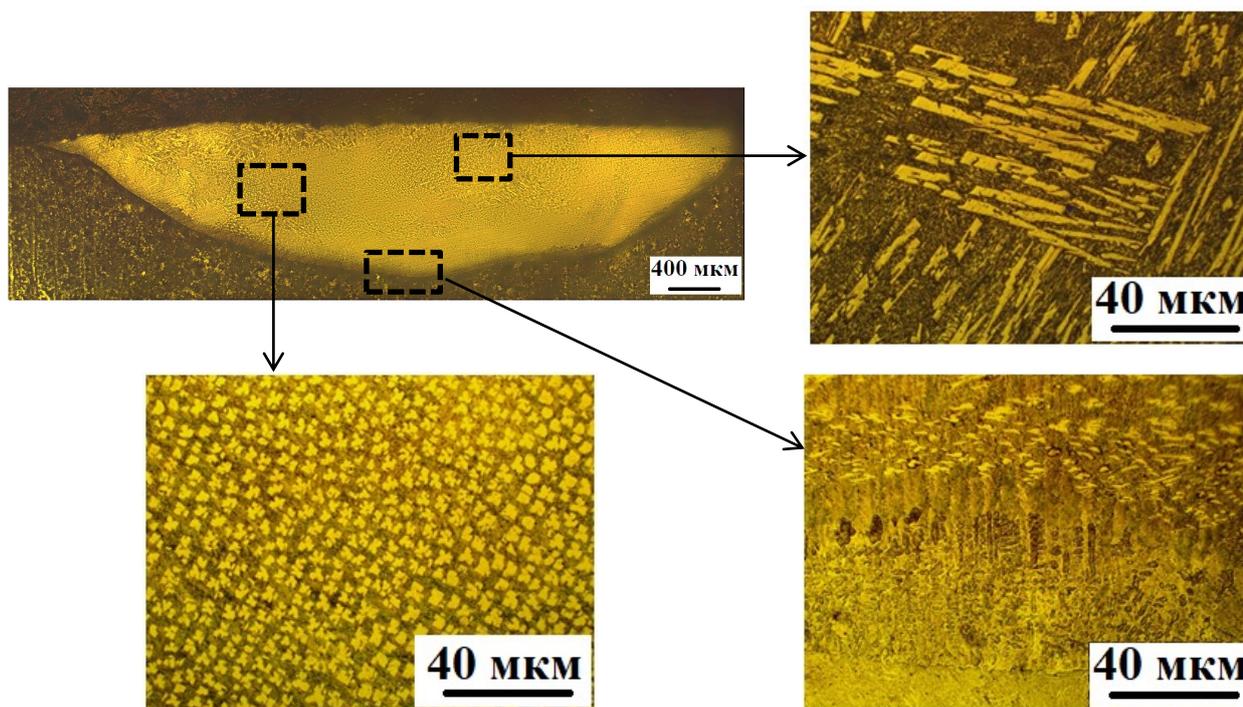


Рисунок 7 – Микроструктура поперечного сечения поверхностного слоя после плазменного оплавления 40В-10Fe с погонной энергией плазменной дуги 612 кДж

Результаты рентгенофазового анализа (рис. 6) показали, что в обработанном материале после плазменного оплавления борсодержащей смеси 40В-10Fe при погонной энергии плазменной дуги 612 кДж присутствуют бориды железа FeB (5,09%), Fe<sub>2</sub>B (50,18%) и α-Fe (42,9%). Отмечено, что при увеличении погонной энергии плазменной дуги до 612 кДж объемная доля боридов FeB уменьшается на 6,63%, содержание α-Fe увеличивается на 4,8%, а доля Fe<sub>2</sub>B увеличивается на 1,83% по сравнению с обработкой при погонной энергии плазменной дуги 525 кДж.

По результатам исследования поверхностного слоя, полученного после плазменного оплавления борсодержащей смеси 40В-10Fe при погонной энергии плазменной дуги 612 кДж (рис. 7), установлено, что микроструктура поверхностного слоя имеет заэвтектическое строение. В ней наблюдаются первичные бориды железа с зернами различной морфологии – овальной, пластинчатой, игольчатой и др., между которыми располагается эвтектическая матрица, состоящая из Fe<sub>2</sub>B и α-Fe. Вблизи границы оплавленного слоя с основным металлом зафиксирована область доэвтектической микроструктуры, характеризующаяся формированием дендритных структур.

По результатам анализа химического состава поверхностного слоя после плазменного оплавления борсодержащей смеси 40В-10Fe при погонной энергии плазменной дуги 612 кДж (рис. 8) установлено, что повышенное содержание бора наблюдается в областях, соответствующих боридам железа Fe<sub>2</sub>B и FeB, и составляет 12,25% и 13,21% соответственно. В эвтектической матрице, состоящей из Fe<sub>2</sub>B и α-Fe, содержание бора значительно ниже и составляет 7,25% и 6,26%.

Исследования микроструктуры оплавленного слоя, полученного при погонной энергии плазменной дуги 612 кДж, с использованием электронного микроскопа показали, что структура является неоднородной не только по глубине, но и по поверхности образца. На одном и том же расстоянии от поверхности были обнаружены участки с повышенным и пониженным содержанием боридов, что

обусловило различия в твёрдости этих зон. Образовавшиеся кристаллы боридов железа не находились в непосредственном контакте друг с другом, а были разделены эвтектическими областями.

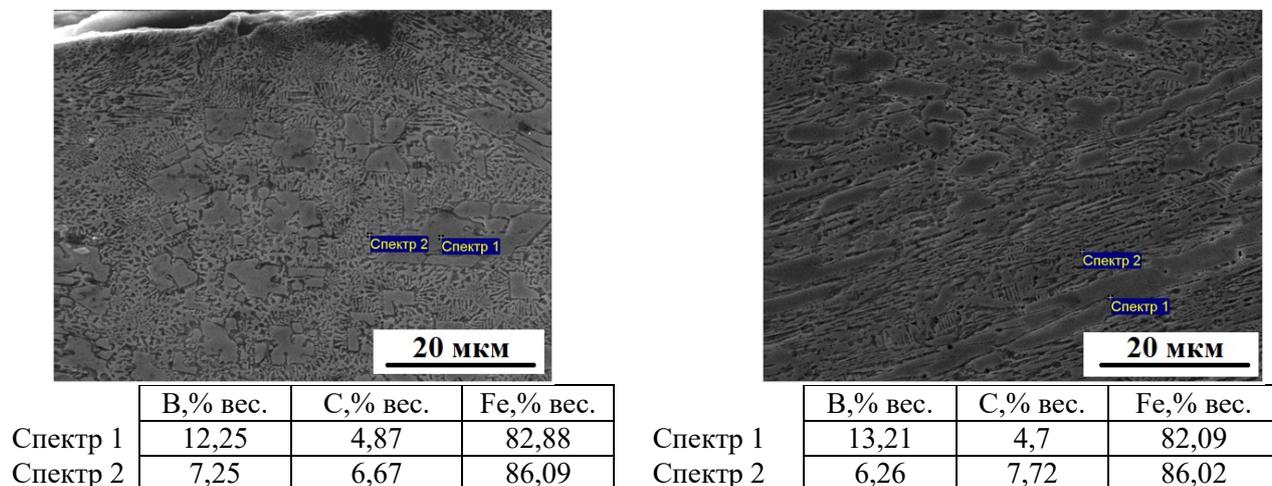
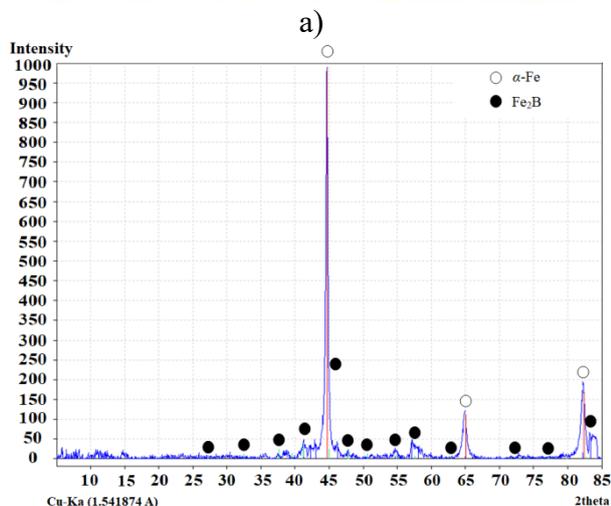
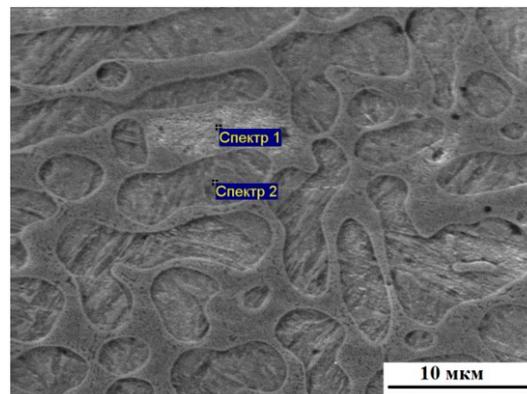
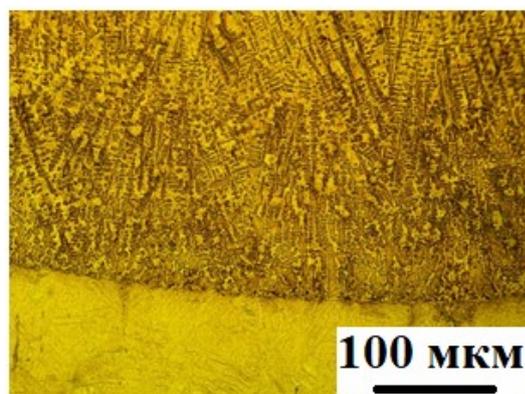


Рисунок 8 – Особенности структуры и химический состав локального места оплавленного слоя 40В-10Fe с погонной энергией плазменной дуги 612 кДж



	В,% вес.	С,% вес.	Fe,% вес.
Спектр 1	3,94	5,04	91,03
Спектр 2	1,87	7,04	91,08

в)

Рисунок 9 – Структура (а), (б) и рентгенограмма материала (в) после плазменного оплавления 40В-10Fe с погонной энергией плазменной дуги 700 кДж

Увеличение погонной энергии плазменной дуги до 700 кДж приводит к повышению глубины упрочнения оплавленного слоя и более заметному разбавлению борсодержащей смеси с материалом подложки. Поверхностное плазменное оплавление борсодержащей смеси 40В-10Fe при погонной энергии плазменной дуги 700 кДж приводит к формированию структуры доэвтектического типа (рис. 9а). Отмечено, что после обработки в оплавленном поверхностном слое располагаются дендриты первичного феррита  $\alpha$ -Fe, вокруг которых находится матрица боридной эвтектики, состоящей из  $Fe_2B$  и  $\alpha$ -Fe (рис. 9б).

В ходе исследования микроструктуры поверхностного слоя после обработки не были обнаружены первичные бориды железа. Это объясняется тем, что при увеличении погонной энергии плазменной дуги 700 кДж плотность энергии и глубина проплавления возрастают, вследствие чего значительный объем основного металла (Fe) перемешивается с борсодержащим покрытием. В результате этого концентрация бора в оплавленном слое значительно снижается и становится недостаточной для формирования первичных боридов. Наличие рефлекса фазы  $Fe_2B$  на рентгенограмме связано с присутствием  $Fe_2B$  в составе матрицы боридной эвтектики.

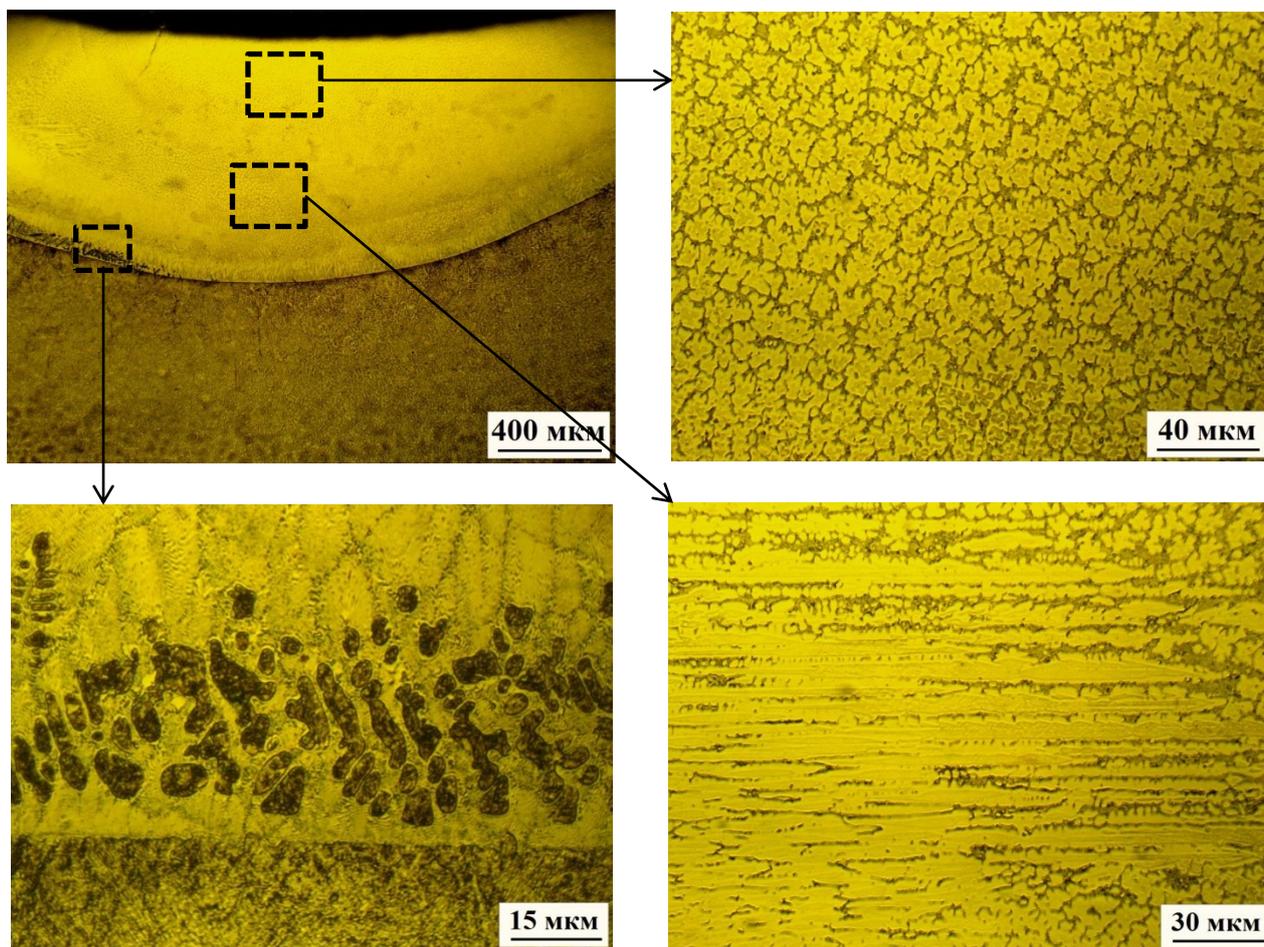


Рисунок 10 – Микроструктура поперечного сечения поверхностного слоя после плазменного оплавления 40В4С-10Fe с погонной энергией 525 кДж

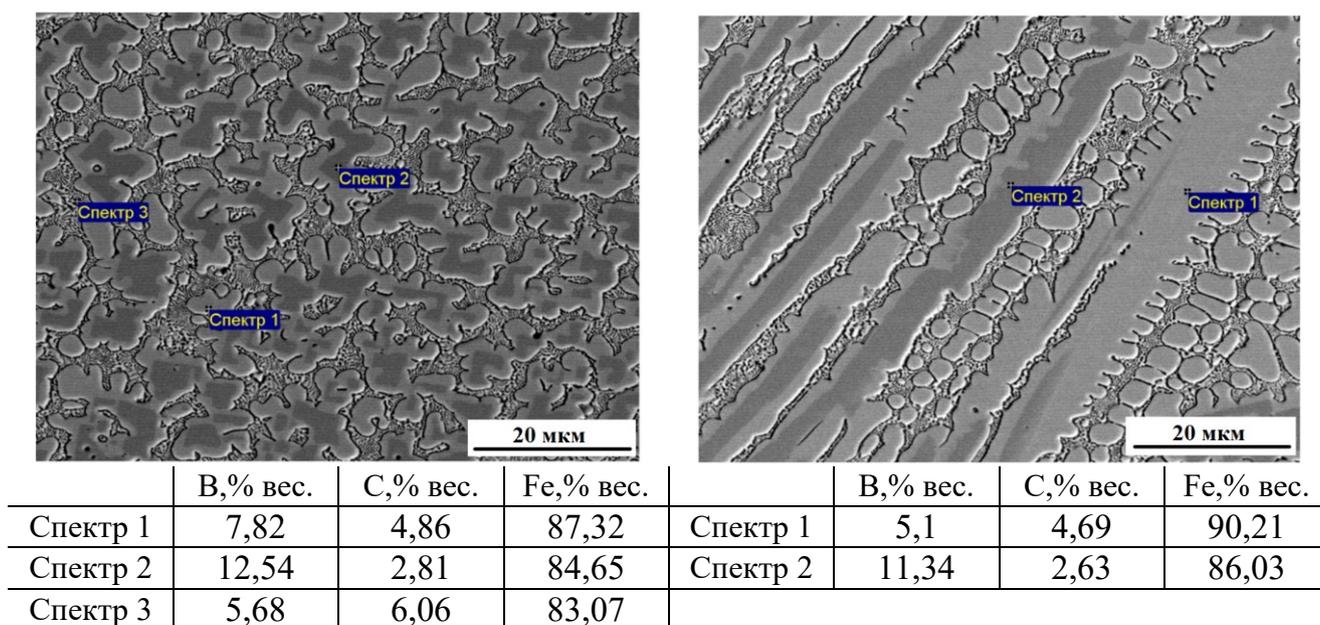


Рисунок 11 – Исследование особенности структуры и химического состава поверхностного слоя после плазменного оплавления 40В4С-10Fe с погонной энергией 525 кДж (СЭМ)

Плазменное оплавление смеси 40В4С-10Fe при погонной энергии плазменной дуги 525 кДж приводит к формированию поверхностных слоёв с гетерогенной структурой (рис. 10), характеризующейся наличием заэвтектических, эвтектических и доэвтектических областей. В ходе исследования микроструктуры с использованием оптического микроскопа было обнаружено, что на боридах имеются области, различающиеся по степени травимости. Для определения элементного состава в этих специфичных зонах боридов применялся метод микрорентгеноспектрального анализа. Результаты измерений показали, что бороцементит  $Fe_3(B,C)$  выделяется вокруг первичных боридов железа  $Fe_2B$ , ориентированных перпендикулярно плоскости шлифа.

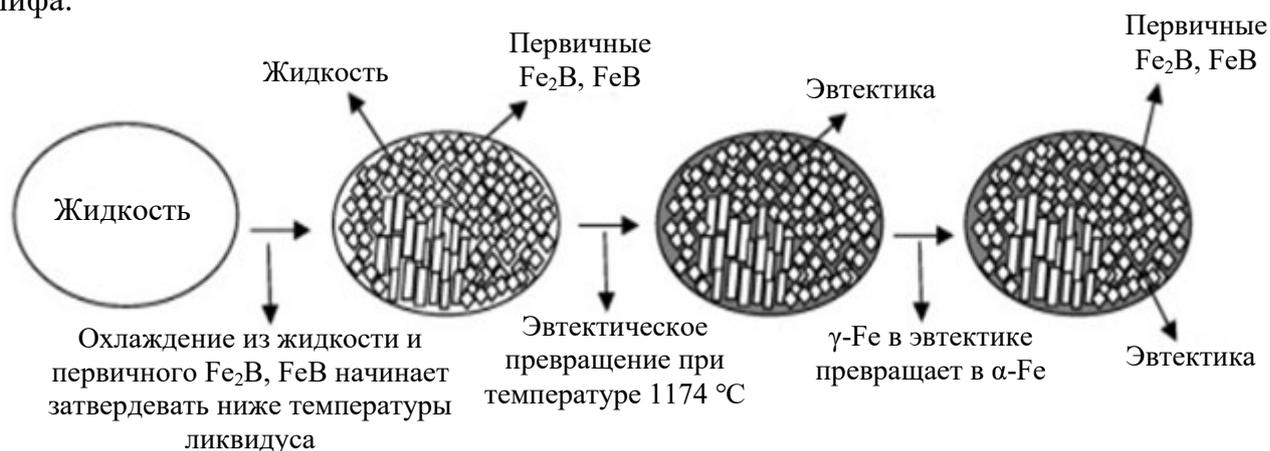


Рисунок 12 – Схема изображения фазовых превращений в оплавленной зоне поверхностного слоя

С учетом бинарных диаграмм состояния Fe–В и Fe–Fe<sub>3</sub>C фазовые превращения в покрытии и переходной зоне можно записать в виде:

В покрытии: эвтектическое превращение (1174°C)

жидкость →  $Fe_2B$  (первичный) + FeV + жидкость →  $Fe_2B$  (первичный) + FeV (немногие) + эвтектика ( $Fe_2B + \gamma-Fe$ )

трансформация ниже температуры эвтектоидного превращения

$\text{Fe}_2\text{B}$  (первичный) +  $\text{FeB}$  + эвтектика ( $\text{Fe}_2\text{B} + \gamma\text{-Fe}$ )  $\rightarrow$   $\text{Fe}_2\text{B}$  (первичный) +  $\text{FeB}$  (немногие) + эвтектика ( $\text{Fe}_2\text{B} + \alpha\text{-Fe}$ )

В четвертом разделе диссертационной работы представлены результаты исследования механических и триботехнических свойств материалов после плазменного оплавления борсодержащей смеси.

Микротвердость легированных покрытий измерялась методом Виккерса с использованием микротвердомера SHIMADZU HNV-2T, оснащенного системой автоматического считывания размеров отпечатков. Нагрузка на индентор составляла 490,3 мН (что соответствует HV0,05), а время выдержки под нагрузкой – 5 секунд. В процессе измерений распределение микротвердости оценивалось на поперечных шлифах образцов, начиная от поверхности покрытия и до основного металла. На основе полученных данных построили изменения микротвердости от поверхности в глубину легированных слоев (рис. 13).

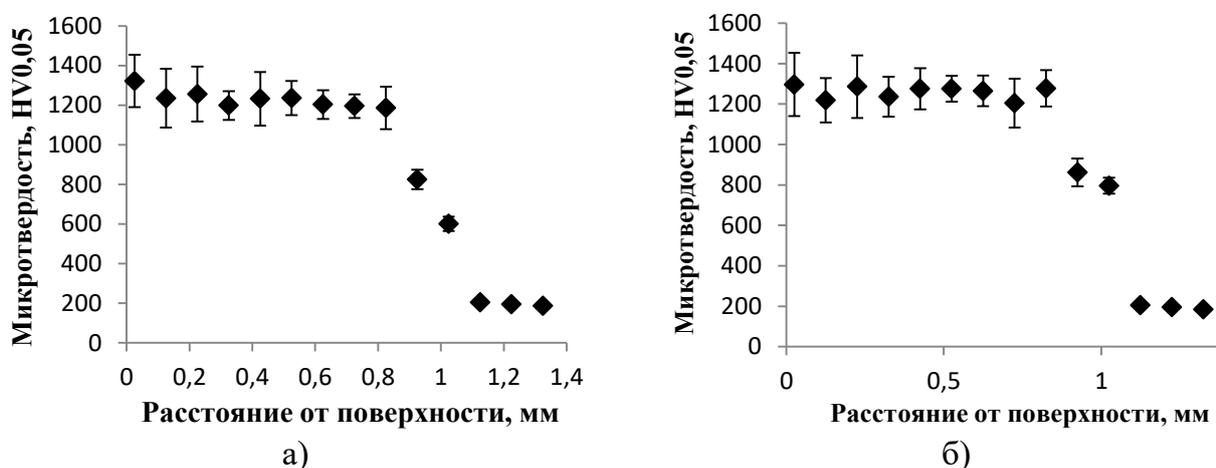


Рисунок 13 – Распределение микротвердости легированного слоя от поверхности к основному металлу с погонной энергией 525 кДж: а – 40В-10Fe; б – 40В4С-10Fe

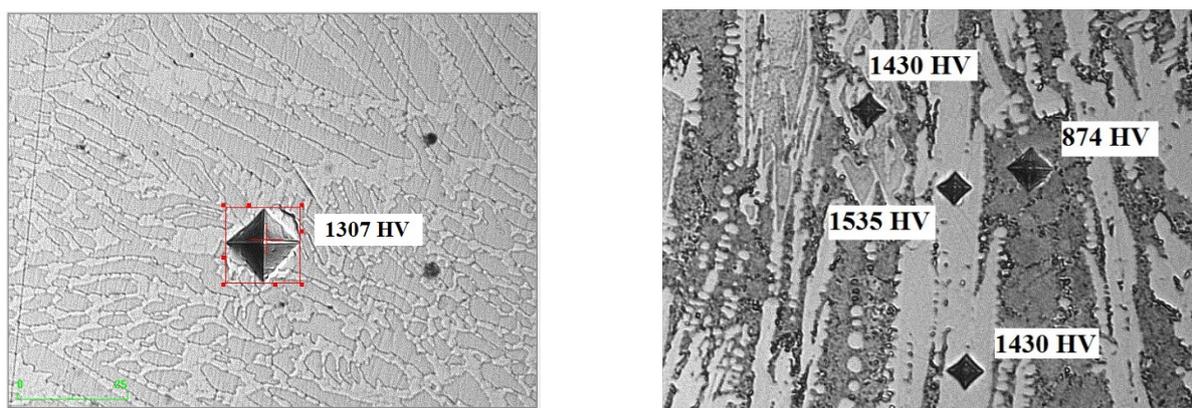


Рисунок 14 – Микротвердость отдельных структурных составляющих поверхностного слоя

По результатам измерений установлено, что борированные слои после плазменного оплавления смеси 40В-10Fe и 40В4С-10Fe с погонной энергией 525 кДж имеют наибольшие показатели микротвердости, значение которых составляет 1200...1450 HV. Отмечено, что в зависимости от размера и объемной доли первичных

боридов железа в поверхностном слое определяется уровень микротвердости. Эффективная глубина упрочнения  $\approx 1,1$  мм.

Повышение погонной энергии до 612 кДж микротвердость борированного слоя снижается до 800...1000 HV. Глубина проплавления возрастает до 1,4 мм. В зоне вблизи границы с основным металлом, структура которой обладает эвтектическим строением, микротвердость составляет 600...800 HV. Отмечено, что в этой переходной зоне происходит плавное снижение твердости от поверхности к основному металлу, что повышает адгезию боридного слоя с поверхностью основного материала. В процессе диффузионного борирования формируются очень твёрдые боридные фазы, твердость которых может значительно превышать твердость основной стали. Этот резкий переход в механических свойствах приводит к возникновению внутренних напряжений на границе раздела между покрытием и подложкой. Из-за этих напряжений покрытие становится склонным к отслаиванию или растрескиванию, особенно при воздействии внешних механических нагрузок.

Повышение погонной энергии до 700 кДж приводит к значительному изменению микротвердости легированного слоя. Микротвердость боридного слоя составляет 400...600 HV. Большое снижение микротвердости связано с изменением микроструктуры поверхностного слоя после плазменного оплавления. По результатам металлографического исследования поверхностный слой после обработки с током 160А имеет доэвтектический тип без первичных боридов железа, определяющих высокий уровень микротвердости упрочненного слоя. Глубина упрочнения составляет 2,2 мм. На рис. 14 представлены значения микротвердости отдельных структурных составляющих поверхностного слоя после плазменного оплавления. Отмечено, что микротвердость боридов железа составляет 1400...1500 HV, эвтектики между ними – 800...900 HV, а области дендритов – 600... 700 HV.

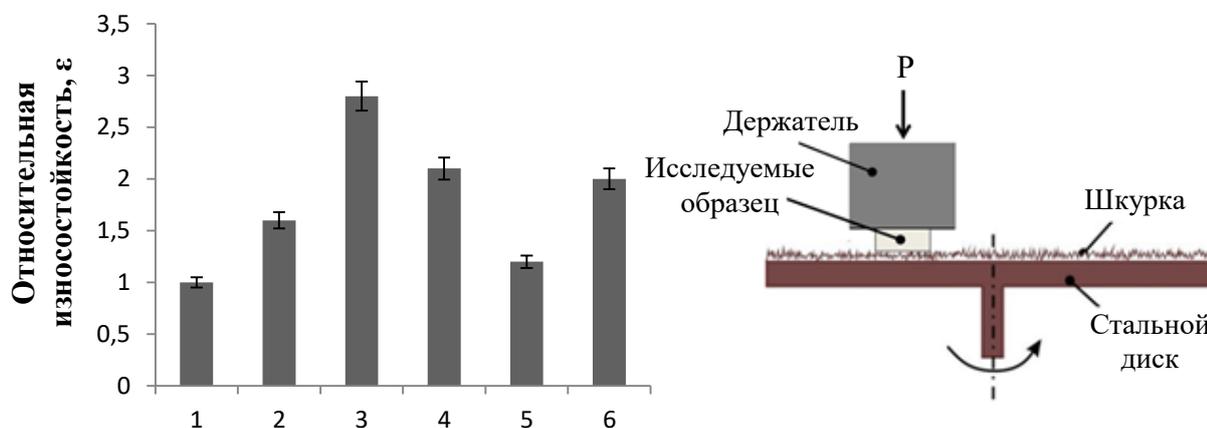


Рисунок 15 – Оценка износостойкости борированных слоев после плазменного оплавления: 1 – сталь 20 (цементация); 2 – сталь 20 (борирование); 3 – 40В4С-10Fe-525кДж; 4 – 40В4С-10Fe-612кДж; 5 – 40В4С-10Fe-700кДж; 6 – 25В4С-25Fe-525кДж

Результаты испытаний на износ в условиях абразивного изнашивания о закрепленные частицы представлены на рис. 15. По результатам измерений отмечено, что образцы после плазменного оплавления 40В4С-10Fe-525кДж показали наилучшую износостойкость. По сравнению с эталонным образцом из цементированной стали 20 было зафиксировано повышение износостойкости в 3 раза. Высокопрочные бориды железа, сформированные на поверхности, стали после

плазменного оплавления, эффективно повышают износостойкость материала под воздействием абразивных частиц, закрепленных на шкурке.

Износостойкость покрытий оценивали в условиях трения скольжения по схеме «блок по кольцу» (рис. 16). Перед испытаниями образцы шлифовали и полировали для достижения одинаковой шероховатости. В качестве контртела использовался диск из закаленной стали 45 диаметром 40 мм и шириной 10 мм. В ходе испытаний образцы прижимались к диску с постоянной нагрузкой 100 Н. Диск вращался со скоростью 500 об/мин, а общий путь трения для каждого образца составлял 12 500 м. Объем изношенного материала рассчитывали по результатам измерений длины лунки изнашивания с помощью лупы Бриелля.

$$V = \frac{R^2}{2} \left( \arccos \left( 1 - \frac{l^2}{2R^2} \right) - \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{l^2}{2R^2} \right)^2} \right) d$$

где  $R$  – радиус контртела, мм;  $l$  – длина лунки, мм;  $d$  – толщина диска (контртела), мм.

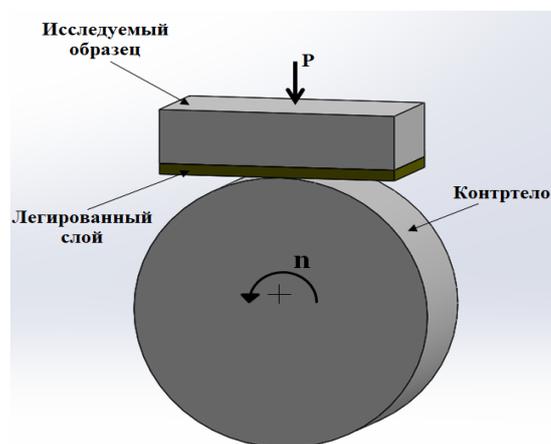
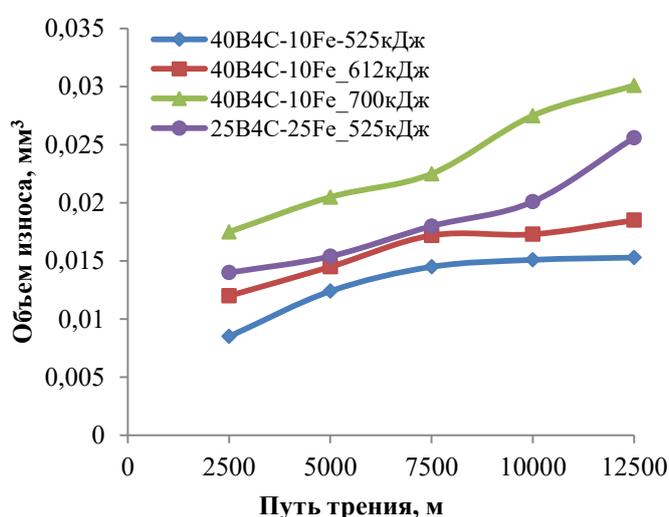


Рисунок 16 – Оценка износостойкости исследуемых образцов после плазменного оплавления в условии трения скольжения

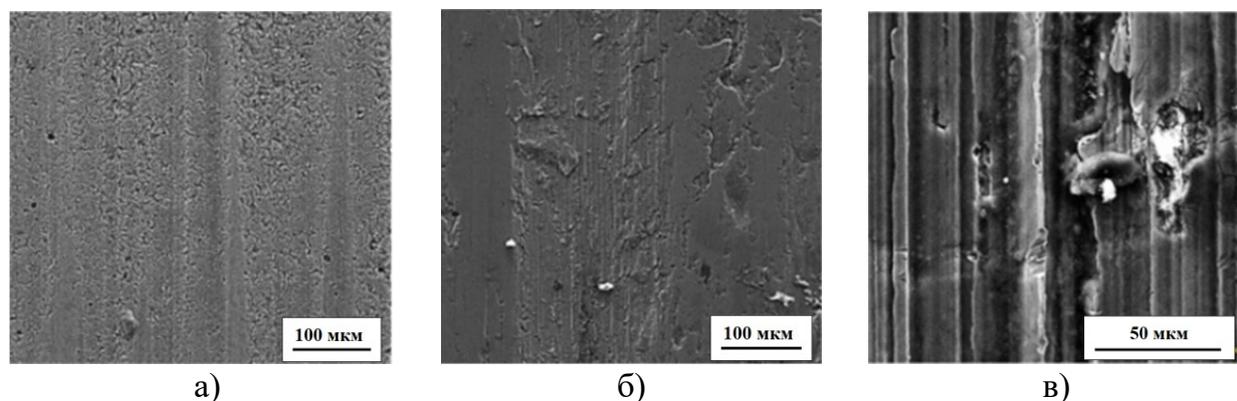


Рисунок 17 – Следы изнашивания поверхностных слоев после испытания:  
а – 40В4С-10Fe-525кДж; б – 40В4С-10Fe-612кДж; 40В4С-10Fe-700кДж

По результатам испытаний (рис. 16) показали, что поверхностное оплавление борсодержащей смеси 40В4С-10Fe с погонной энергией плазменной дуги 525 кДж

обладает наилучшей износостойкостью в условиях трения скольжения. Морфологическое состояние изношенных поверхностей канавок (рис. 17) показывает, что при скольжении жесткого диска по закаленной стали 45 неровности и абразивные частицы присутствующие на поверхности выталкивают поверхностный материал вперед в процессе, который включает значительную пластическую деформацию и царапание. Кроме того, во время скольжения материал отрывается от поверхности. Наличие твердых частиц боридов железа  $Fe_2B$  в микроструктуре действует как барьер для пластической деформации и царапин от стальных абразивов, что приводит к более высокой износостойкости.

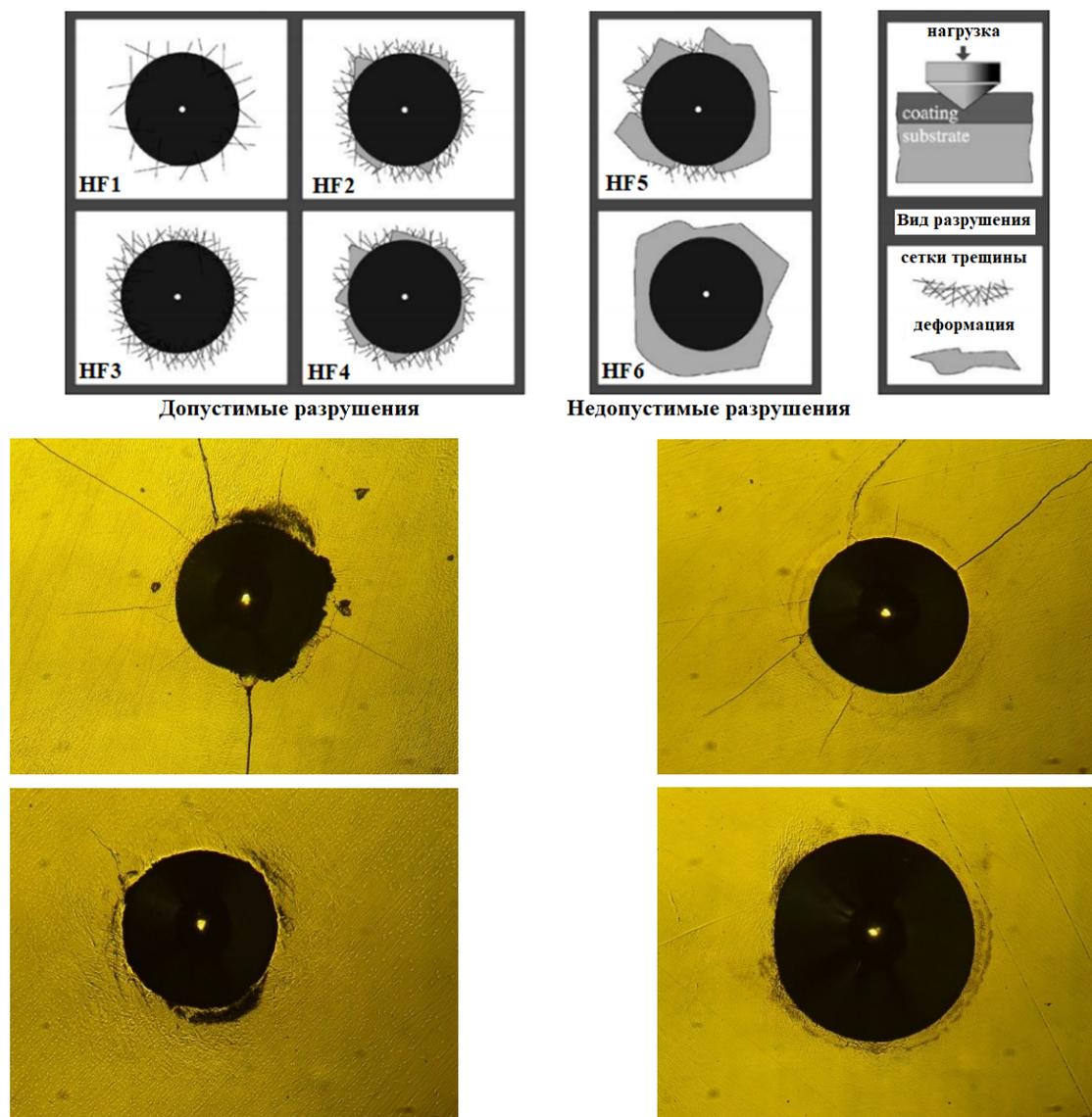


Рисунок 18 – Испытание на адгезию боридных покрытий к подложке

Испытание на адгезию по Роквеллу-С (рис.18) приводит к повреждению слоя, примыкающего к границе вмятины. Метод основан на создании вмятины в покрытии при помощи индентора с алмазным наконечником, применяемого для тестов по шкале Роквелла-С. При этом вокруг вмятины возникает зона повреждения, в которой покрытие подвергается сильным сдвиговым напряжениям. Эти напряжения особенно сильны на границе раздела покрытие/подложка, что позволяет судить о прочности сцепления между ними. Покрытия с хорошей адгезией способны выдерживать такие

экстремальные напряжения, не допуская значительного отслоения или разрушения в зоне вокруг вмятины. После проведения теста разрушение покрытия оценивается визуально, с использованием оптического микроскопа. Тип разрушений, их объем и характер (например, трещины или отслоение) позволяют оценить не только адгезию покрытия, но и его хрупкость. По результатам испытания на адгезию по Роквеллу-С отмечено, что боридные покрытий, полученных методом плазменного оплавления борсодержащей смеси, обладает хорошим сцеплением с основным металлом.

**В пятой главе диссертации** представлены результаты исследования, направленные на практическое применение полученных данных. На основе полученных экспериментальных данных были разработаны технологии поверхностного упрочнения деталей, таких как лемех и стрелчатая лапа культиватора, с целью повышения их износостойкости (рис.19).



Рисунок 19 – Применение технологии плазменного оплавления борсодержащей смеси

Серийные лемеха, изготовленные из стали 55Г, подвергнутые объемной закалке, показали наибольшие потери массы. При наработке 9,2 Га их потери составили 919,5 г, что на 25,2 % больше, чем у опытных лемехов, изготовленных из стали 20 с упрочненной режущей кромкой (688 г), и на 10,5 % больше, чем у серийных лемехов, подвергнутых наплавке Сормайтом (823 г).

По результатам испытаний и анализа относительной износостойкости различных технологий упрочнения лемехов, можно сделать вывод о том, что лемехи, изготовленные из стали марки 20 и упрочнённые по технологии плазменного оплавления борсодержащей смеси 40В4С-10Fe (опытные), показали наибольшую износостойкость (рис. 20). Относительная износостойкость этих лемехов превышает износостойкость серийных аналогов на 25% по сравнению с технологией закалки и на 15% по сравнению с наплавкой стали марки Сормайт.

Угол заточки лезвия является важным параметром, который влияет на износостойкость и производительность лемехов. В результате проведенных испытаний было установлено, что угол заточки лезвия для серийных лемехов, подвергнутых объемной закалке, составляет 30–33° после проведения испытаний. Для лемехов с наплавкой Сормайтом угол заточки был аналогичным. Для опытных лемехов, упрочненных плазменным оплавлением, угол заточки после испытаний составил 23–25°, что близко к начальному углу заточки 22–25°. Меньший угол заточки лезвия у оплавленных лемехов обеспечивает им лучшую режущую

способность, что может способствовать более эффективной работе при меньшем износе.

Таким образом, упрочненный лемех, изготовленный из стали 20 и обработанный по технологии плазменного оплавления борсодержащей смеси на рабочем органе лезвие, может сохранять свою остроту в процессе эксплуатации длительное время по сравнению с традиционными лемехами и тем самым поддерживать оптимальные эксплуатационные характеристики в процессе работы.

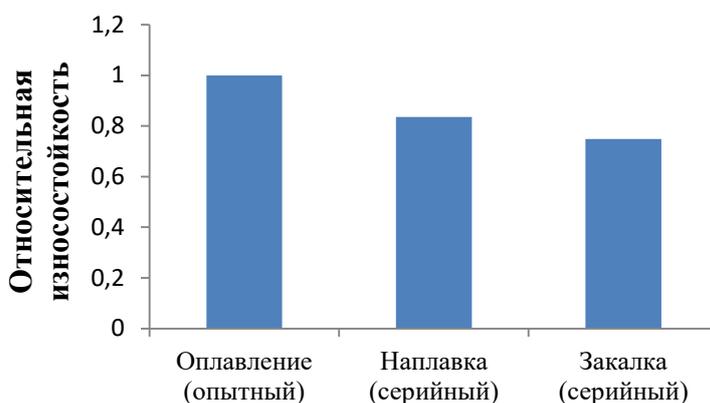


Рисунок 20 – Относительная износостойкость лемехов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований сформулированы следующие выводы по работе:

1. Установлено, что технология плазменного оплавления борсодержащей смеси позволяет формировать качественные (без трещин, отслоений пор и других дефектов) борированные слои на поверхностном слое низкоуглеродистой стали марки 20. Полученные борированные поверхностные слои характеризуются глубиной (более 1,7 мм), твердостью и износостойкостью.

2. Увеличение погонной энергии плазменной дуги с 525 кДж до 700кДж приводит к увеличению глубины упрочнения и изменению микроструктуры легированных слоёв. При погонной энергии 525 кДж на поверхностном слое стали 20 формируется заэвтектическая структура из первичных боридов железа ( $Fe_2B$ ), расположенных в эвтектической матрице. При увеличении погонной энергии до 700 кДж структура поверхностно-легированных слоёв стали 20 становится доэвтектической. В ней присутствуют дендриты  $\alpha$ -твёрдого раствора бора в железе, окружённые боридной эвтектикой, а также формируются неравновесные фазы.

3. Установлено, что содержания бора в борсодержащей смеси в диапазоне 25-40% смеси, менее 25% приводит к уменьшению количества первичных боридов железа в легированном слое, более 40% приводит к формированию неравновесных фаз типа  $FeB$ ,  $Fe_3(B,C)$  обладающих высокой твердостью и хрупкостью. Форма боридов железа может быть самой разнообразной: от овальной и пластинчатой до дендритной и каркасной. Это зависит от условий кристаллизации и содержания бора в расплаве.

4. Результаты компьютерного моделирования процесса плазменного оплавления, выполненного с использованием программного комплекса Simufact

Welding, продемонстрировали высокую степень соответствия с экспериментальными данными. Отклонение расчетных значений глубины упрочненного слоя с экспериментальных данных составило не более 11%. Проведенное моделирование позволило спрогнозировать распределение температурных полей в поверхностном слое металла, определить глубину и ширину зоны оплавления, а также подобрать режимы обработки для достижения требуемых характеристик легированных слоёв.

5. Комплексной технологической характеристикой технологии плазменного оплавления борсодержащей смеси является погонная энергия, регулирующая глубину борированного слоя, концентрацию и объёмную долю боридов железа. Показано, что максимальная микротвёрдость (до 1535 HV) достигается при плазменном оплавлении смеси 40В<sub>4</sub>С-10Fe с погонной энергией 525 кДж, глубина слоя составляет 1,5 мм. Увеличение погонной энергии плазменной дуги до 700 кДж и снижение содержания бора до 25% в смеси приводит к увеличению глубины легированного слоя 2,5мм, снижению микротвёрдости легированных слоёв до 600–900 HV. Изменение микротвёрдости связано с изменением микроструктуры легированных слоёв при высоких значениях погонной энергии и низком содержании бора уменьшается объёмная доля боридов железа, ответственных за высокую твёрдость, увеличивается объёмная доля основного металла в результате перемешивания.

6. Образцы, полученные путём плазменного оплавления смеси 40В<sub>4</sub>С-10Fe при погонной энергии 525 кДж, продемонстрировали высокую износостойкость в условиях абразивного изнашивания, которая в 3 раза превысила износостойкость эталонной цементированной стали 20. Образцы, прошедшие упрочнение при погонной энергии 700кДж имеет меньшую износостойкость, что связано с уменьшением объёмной доли боридов железа и образованием доэвтектической структуры с пониженной твёрдостью. Определено, что снижение содержания бора в оплаиваемой смеси до 25% также приводит к увеличению скорости износа материалов при трении.

7. В ходе испытаний на трение скольжения по схеме «блок по кольцу» было установлено, что образцы после плазменного оплавления смеси 40В<sub>4</sub>С-10Fe и имеющие заэвтектическая структуру из первичных боридов железа (Fe<sub>2</sub>B), расположенных в эвтектической матрице демонстрируют наилучшую износостойкостью. Интенсивность изнашивания борированных слоёв коррелирует с их структурой и микротвёрдостью. Слои с заэвтектической структурой и высокой микротвёрдостью изнашиваются меньше.

8. Испытания на адгезию по методу Роквелла-С подтвердили, что боридные слои, сформированные методом плазменного оплавления борсодержащей смеси, демонстрируют хорошую адгезию к основному металлу. Отсутствие недопустимых разрушений в зоне отпечатка от индентора по методу Роквелла-С, доказывая высоких уровень прочности сцепления поверхностного боридного слоя с основным металлом и его низкой хрупкости.

9. Результаты испытаний опытных лемехов, изготовленных из стали 20 с упрочненной режущей кромкой, в условиях эксплуатации по тяжелосуглинистой почве показали, что разработанные составы борсодержащих смесей, нанесенных на поверхность лезвий лемеха с последующим плазменным оплавлением, имеют стойкость в 1,5–1,7 раз выше, чем стойкость лезвий, наплавленных сплавом «Сормайт».

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

*Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Балановский, А. Е. Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки борсодержащей обмазки / А. Е. Балановский, **В. В. Нгуен**, Н. А. Астафьева, Р. Ю. Гусев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 93-103. (10 с./ 4 с.)
2. **Нгуен, В. В.** Микроструктура и свойства стали после плазменного легирования бором / В. В. Нгуен, Е. А. Балановский, Н. А. Астафьева // Глобальная энергия. – 2023. – Т. 24, № 4. – С. 97-106. (9 с./ 4 с.)
3. **Нгуен, В. В.** Структура и износостойкость боридных слоев, полученных методом поверхностного плазменного легирования / В. В. Нгуен, Е. А. Балановский, Н. А. Астафьева // Глобальная энергия. – 2023. – Т. 24, № 4. – С. 120-131. (11 с./ 6 с.)
4. **Нгуен, В. В.** Структура и свойства боридных слоев на низкоуглеродистой стали после плазменного легирования карбидом бора / В. В. Нгуен, Р. Ю. Гусев, И. К. Мухторова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2024. – Т. 20, № 1(229). – С. 36-40. (4 с./ 2 с.)
5. Нгуен, В. Ч. Особенности формирования поверхностных слоев при плазменном нагреве обмазки оловянной бронзы / В. Ч. Нгуен, А. Е. Балановский, **В. В. Нгуен** // Глобальная энергия. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 110-122. (12 с./ 3 с.)
6. Нгуен, В. Ч. Оценка абразивной износостойкости поверхностных слоев из плазменного оплавления оловянной бронзы и карбида хрома / В. Ч. Нгуен, А. Е. Балановский, **В. В. Нгуен** // Глобальная энергия. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 123-135. (12 с./ 3 с.)

*Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в систему SCOPUS:*

1. **Van Vinh, N.** Structure and properties of boride coatings obtained by the Plasma-Arc method / Van Vinh N., Van Trieu N., Balanovskiy A. E., Anatolievna A. N. // Tribology in Industry. – 2023. Vol. 45. – P. 387–395. (8 с./ 4 с.)
2. **Van Vinh, N.** Boriding of Low-Carbon Steel by plasma Method: microstructure and coating properties / Van Vinh N., Thuy N. T., Evgenievich B. A. // Tribology in Industry. – 2024. Vol. 46. – P. 476–485. (9 с./ 5 с.)
3. Balanovskiy, A. E. Characteristics and abrasive wear resistance of plasma alloyed layers based on tin bronze and chromium carbide / Balanovskiy A. E., Van Trieu N., **Van Vinh N.**, Anatolievna A. N. // Tribology in Industry. – 2022. Vol. 44. – P. 518–527. (9 с./ 3 с.)

*Статьи и материалы конференций:*

1. **Нгуен, В. В.** Структура и свойства боридного слоя, полученного на стали методом плазменного легирования / В. В. Нгуен, А. Е. Балановский, Э. О. Воронич // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) : Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Иркутск, 16 мая 2023 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 161-166. ( 5 с./ 3 с.)
2. **Нгуен, В. В.** Изучение свойств поверхностного слоя стали после лазерной обработки с учетом изменения скорости сканирования / В. В. Нгуен, А. Т. Ахматов, В.

В. Бугакин, В. А. Верхотуров // Жизненный цикл конструкционных материалов, Иркутск, 06 июня 2022 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – С. 26-33. (7 с./ 4 с.)

3. **Нгуен, В. В.** Исследование структуры выращенной стенки металла методом аддитивной дуговой сварки (WAAM) / В. В. Нгуен, А. Д. Клементьева, Е. А. Ямщикова // Жизненный цикл конструкционных материалов, Иркутск, 06 июня 2022 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – С. 48-54. (6 с./ 3 с.)

4. **Нгуен, В. В.** Оценка возможности программы SIMUFACT welding для изучения влияния скорости плазменной обработки на свойства поверхностного слоя стали / В. В. Нгуен, К. Ю. Кубасов, В. Е. Лоптев // Жизненный цикл конструкционных материалов, Иркутск, 06 июня 2022 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – С. 73-81. (8 с./ 4 с.)