

На правах рукописи



Кривеженко Дина Сергеевна

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ,  
СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ,  
СОДЕРЖАЩЕЙ КАРБИД БОРА**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном  
образовательном учреждении высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

- Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Никулина Аэлита Александровна
- Официальные оппоненты: Ишков Алексей Владимирович,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Алтайский государственный  
аграрный университет», профессор кафедры  
«Технологии конструкционных материалов и  
ремонта машин»
- Колесникова Ксения Александровна,  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики  
прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии  
наук, научный сотрудник лаборатории  
физической мезомеханики и неразрушающих  
методов контроля
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова»,  
г. Барнаул

Защита состоится «21» декабря 2016 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Новосибирского государственного технического университета,  
[http://www.nstu.ru/science/dissertation\\_sov/dissertations/view?id=15861](http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=15861)

Автореферат разослан «    » ноября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Тюрин Андрей Геннадиевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Длительность эксплуатации многих изделий, изготовленных из металлических материалов, в значительной степени определяется совокупностью свойств их поверхностных слоев. В этих слоях концентрируются механические напряжения, зарождаются трещины, развиваются процессы износа и коррозии. Применение износостойких легированных сталей для изготовления деталей с целью повышения срока их службы не всегда экономически и технологически рационально. В то же время повышение эксплуатационных характеристик и увеличение ресурса работы изделий возможно путем формирования на их поверхности слоев, обладающих высоким уровнем требуемых свойств – твердости, износостойкости и др.

В отечественных и зарубежных лабораториях разработаны различные способы поверхностной обработки металлических материалов. Один из наиболее эффективных подходов к проблеме поверхностного упрочнения металлических материалов основан на легировании заготовок методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей различного состава. Данная технология предполагает применение промышленных ускорителей электронов, важнейшая особенность которых заключается в выводе электронного пучка в воздушную атмосферу. Отмеченное обстоятельство объясняет возможность резкого сокращения продолжительности подготовительных операций по сравнению с установками, при использовании которых заготовки помещаются в вакуумные камеры, а, следовательно, неизбежны потери времени на откачку воздуха. Кроме того, обстоятельством, ограничивающим применение электронно-лучевого нагрева в вакууме для обработки изделий, являются габариты вакуумных камер.

В представленной работе для повышения эксплуатационных характеристик углеродистой стали предлагается использовать технологию вневакуумной электронно-лучевой наплавки бор- и титансодержащих порошковых материалов. Борированные слои характеризуются благоприятным сочетанием механических и триботехнических свойств. Твердость боридов сохраняется при нагреве материалов до высоких температур, что обеспечивает стойкость деталей, работающих в условиях термомеханических воздействий. Дополнительное легирование борированных слоев способствует формированию новых упрочняющих фаз в поверхностных слоях и приводит к повышению комплекса эксплуатационных свойств материалов. В промышленности широкое распространение получили методы диффузионного насыщения сплавов бором. Однако толщина борированных слоев, полученных с их применением, значительно меньше по сравнению с величиной износа многих реальных деталей. В некоторых случаях большие габариты заготовок не позволяют использовать традиционные методы химико-термической обработки. Подход, связанный с использованием выведенного в воздушную атмосферу электронного пучка, позволяет устранить отмеченные проблемы и обеспечить формирование высококачественных боридных слоев. В процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки происходит упрочнение стальных заготовок на глубину более двух миллиметров. Строение

наплавленных слоев можно определить как относительно пластичную матрицу с распределенными в ней высокопрочными частицами. Материал со структурой такого типа обладает более высоким запасом надежности по сравнению с компактными борированными слоями.

Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнялись в Новосибирском государственном техническом университете при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию № 2014/138 (проект № 257).

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблеме повышения стойкости железоуглеродистых сплавов в различных условиях изнашивания посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных специалистов. В технической литературе отмечается высокая эффективность процессов борирования. Исследования упрочненных слоев, полученных при насыщении железоуглеродистых сплавов бором с использованием различных методов, проводились в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН, Томском политехническом университете, Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова, Восточно-Сибирском государственном технологическом университете, Брянском государственном техническом университете, Московском государственном техническом университете им. Баумана, Новосибирском государственном техническом университете и других организациях. Подробно изучены особенности диффузионного насыщения сталей и чугунов бором. Предложены пути повышения пластичности компактных борированных слоев, один из которых основан на формировании композиционной структуры с использованием концентрированных источников энергии. В работах российских и зарубежных специалистов представлены результаты исследований борсодержащих поверхностных слоев, полученных с применением методов плазменной, лазерной, электродуговой и вакуумной электронно-лучевой обработки. В то же время лишь небольшое количество работ посвящено изучению влияния пучков релятивистских электронов на структурные особенности и эксплуатационные характеристики борированных слоев. Отмеченные обстоятельства свидетельствуют о целесообразности проведения глубоких структурных исследований, а также оценки уровня триботехнических свойств стальных заготовок, упрочненных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки борсодержащих порошковых материалов.

**Цель** диссертационной работы заключается в повышении износостойкости стальных заготовок методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки бор- и титансодержащих порошковых материалов.

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

1. Анализ изменения структуры и свойств поверхностных слоев сталей, сформированных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей « $B_4C-Fe$ » и « $B_4C-Ti-Fe$ ».

2. Исследование особенностей тонкого строения поверхностно-упрочненных слоев, сформированных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей « $B_4C-Fe$ » и « $B_4C-Ti-Fe$ » на толсто-

листовые стальные заготовки. Структурный анализ дисперсных частиц, выполняющих функцию упрочняющих фаз.

3. Определение триботехнических свойств полученных композиций при испытаниях по схеме трения скольжения, трения о закрепленные и нежестко закрепленные частицы абразива.

4. Анализ поведения поверхностно упрочненных материалов в условиях динамического воздействия. Фрактографические исследования динамически разрушенных образцов.

### **Научная новизна**

1. Методами структурного анализа выявлены особенности строения сплавов, сформированных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей « $B_4C-Fe$ » на стальные заготовки. Установлено, что высокопрочными фазами, возникшими в процессе кристаллизации, являются борид железа  $Fe_2B$  и бороцементит переменного состава  $Fe_3(B_xC_{1-x})$ . Характерной особенностью этой структуры является выделение бороцементита в виде оболочки вокруг первичных кристаллов борида железа. В свою очередь, эти высокопрочные образования надежно удерживаются окружающей их двухфазной эвтектической матрицей.

2. Установлено, что введение порошка титана в наплавочную смесь  $B_4C-Fe$  приводит к формированию более однородных по строению поверхностно легированных слоев. Высокая степень однородности структуры по глубине упрочненного слоя обеспечивает более стабильный уровень триботехнических свойств материала в длительных условиях изнашивания, что является важным для изделий, эксплуатация которых сопровождается значительными изменениями размеров и потерей массы.

3. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковой смеси  $B_4C-Ti-Fe$  приводит к формированию более сложной гетерофазной структуры по сравнению со сплавами, получаемыми при обработке смесей  $B_4C-Fe$ . Функцию упрочняющих частиц в сплавах, легированных титаном, выполняют кристаллы бороцементита, боридов железа  $Fe_2B$  и  $FeB$ , борида титана и карбида титана. Установлено, что пластины борида титана  $TiB_2$  возникают при введении в наплавочную смесь свыше 10 % карбида бора.

4. Экспериментально установлены составы наплавочных смесей, обеспечивающие наиболее высокие значения стойкости в различных условиях изнашивания. При трении скольжении со смазкой и в условиях воздействия нежестко закрепленных частиц абразива лучшие результаты достигнуты при наплавке смеси 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$ . Высокий уровень сопротивления износу сплава обеспечивают кристаллы борида железа, окруженные слоем бороцементита. Максимальной стойкостью в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц обладает материал, сформированный при наплавке порошковой смеси с 15 %  $B_4C$  – 10 %  $Ti$  – 25 %  $Fe$ . Относительная износостойкость полученного материала в 3 раза выше по сравнению с цементованной сталью 20.

5. Показано, что повышение толщины упрочненных слоев, имеющее место при увеличении тока электронного пучка, сопровождается снижением значений работы разрушения образцов с надрезами. Изменение содержания карби-

да бора и титана в наплавочной смеси заметного влияния на ударную вязкость материалов с упрочненными слоями не оказывает.

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

1. В ходе проведения экспериментальных исследований установлено, что материалы, сформированные по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, содержащих карбид бора, титан и железо, характеризуются высоким уровнем стойкости в различных условиях внешнего воздействия и могут эффективно применяться для изготовления деталей ответственного назначения, подверженных в процессе эксплуатации абразивному изнашиванию.

2. Выявленные особенности строения поверхностно легированных слоев, полученных по технологии электронно-лучевой наплавки бор- и титансодержащих порошковых смесей на стальные заготовки, расширяют представления о процессах структурных преобразований, происходящих при высокоэнергетическом воздействии. Полученные результаты могут быть применены при выборе модифицирующих компонентов для создания слоев с требуемым комплексом эксплуатационных свойств при использовании в качестве основного металла других типов сплавов.

3. На основании результатов проведенных исследований предложены технологические режимы обработки порошковых смесей электронным пучком, реализация которых обеспечивает двух- и трехкратное увеличение стойкости материалов при воздействии закрепленных и нежестко закрепленных абразивных частиц по сравнению с традиционными процессами химико-термической обработки сталей. Показано, что основным технологическим параметром, позволяющим надежно управлять глубиной наплавленного слоя и оказывающим существенное влияние на тип и объемную долю частиц упрочняющей фазы, является величина тока пучка электронов.

4. Предложенная в работе технология апробирована на примере поверхностного упрочнения буровой коронки, эксплуатация которой связана с интенсивным износом. После наплавки борсодержащей порошковой смеси стойкость изделия возрастает в 2,3 раза по сравнению с типовой технологией термической обработки. Результаты, полученные в диссертационной работе, применяются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке студентов по курсам «Высокоэнергетические методы обработки», «Прогрессивные материалы и технологии», «Износостойкие материалы и покрытия».

**Личный вклад автора** заключался в формулировании задач диссертационной работы, подготовке материалов для проведения экспериментов по наплавке, подготовке образцов и проведении структурных исследований, механических и триботехнических испытаний материалов, анализе и обобщении экспериментальных данных, сопоставлении результатов исследований с известными литературными данными и формулировании выводов по полученным результатам.

## **Методология и методы исследования**

Поверхностное легирование стальных заготовок методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки осуществляли в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН с применением промышленного ускорителя электронов типа ЭЛВ-6. Конструкция ускорителя позволяет производить наплавку материалов в атмосфере воздуха. Исследования полученных материалов были выполнены на современном аналитическом оборудовании, уровень которого соответствует передовым российским и зарубежным материаловедческим лабораториям. Исследования структурных преобразований материалов после высокоэнергетического воздействия изучали с применением оптического микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*, растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO 50XVP*, а также просвечивающего электронного микроскопа *FEI Tecnai 20 G2 TWIN*. Элементный состав микрообъемов наплавленных слоев был определен с помощью микрорентгеноспектрального анализатора *INCA Wave 700*. Анализ фазового состава исследуемых материалов проводили с применением рентгеновского дифрактометра *Thermoscientific ARL X'TRA*. Уровень микротвердости полученных материалов оценивали в процессе дюрометрических испытаний на микротвердомере *Wolpert Group 402MVD*, твердость наплавленных слоев определяли на твердомере *Wolpert Group 600MRD*. Характер поведения материалов в условиях динамического воздействия оценивали при разрушении образцов с надрезами на маятниковом копре *Metrocom*. Триботехнические испытания исследуемых материалов осуществляли в условиях абразивного изнашивания и трения скольжения на установках российского производства.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка на заготовки из углеродистых сталей бор- и титансодержащих порошковых материалов способствует формированию упрочненных слоев повышенной толщины со сложной гетерофазной структурой.

2. Практическое применение технологии наиболее рационально для поверхностного упрочнения крупногабаритных изделий, которые в процессе эксплуатации подвержены интенсивному воздействию абразивной среды.

3. Высокий уровень износостойкости материалов, полученных при электронно-лучевой наплавке борсодержащих порошков, обусловлен присутствием в композициях первичных кристаллов боридов железа, находящихся в оболочке менее прочного бороцементита.

4. Формирование упрочненных слоев приводит к снижению сопротивления основного материала разрушению в условиях динамического воздействия. С увеличением толщины упрочненных слоев работа разрушения образцов с надрезами снижается. Изменение содержания карбида бора и титана в наплавочной смеси влияния на ударную вязкость материалов с упрочненными слоями не оказывает.

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

Экспериментальные исследования проведены с применением современного аналитического оборудования. Определение уровня свойств полученных материалов проводилось с применением статистических методов оценки по-

грешности измерений. Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, соответствуют данным, представленным в работах российских и зарубежных исследователей.

Основные положения и результаты работы докладывались на всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», г. Новосибирск, 2012, 2013 г.; всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», г. Новосибирск, 2012, 2013 г.; всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2012, 2013 г.; международном форуме по стратегическим технологиям (*IFOST – 2013*), г. Улан-Батор, 2013 г.; международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс. Новые материалы и технологии», г. Новосибирск, 2013, 2014 г.; международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов – молодых ученых, г. Екатеринбург, 2013, 2014 г.; на международной конференции «*International Conference on Surface Engineering for Research and Industrial Applications (INTERFINISH – SERIA 2014)*», г. Новосибирск, 2014 г.; международной научной конференции молодых ученых «*Electrical Engineering. Energy. Mechanical Engineering (EEM–2014)*», г. Новосибирск, 2014 г.; международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении», г. Новосибирск, 2014, 2015 г.; международной научной студенческой конференции «Новые конструкционные материалы», г. Новосибирск, 2014 г.; международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», г. Томск, 2015 г.

По результатам исследований, проведенных в диссертационной работе, опубликовано 23 научных работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, в том числе 2 статьи в зарубежных журналах; 19 – в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем работы составляет 198 страниц и включает 69 рисунков, 6 таблиц, список используемой литературы, состоящий из 178 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, изложены основные направления проведенных исследований, сформулированы цель и задачи исследований.

**В первом разделе** представлен обзор литературных данных, посвященных особенностям формирования боридных покрытий на поверхности изделий, изготовленных из железоуглеродистых сплавов. Подробно рассмотрены традиционные способы борирования, а также представлены высокоэнергетические методы поверхностного упрочнения.

**Во втором разделе** диссертационной работы описаны материалы, используемые при проведении исследований, технологические процессы поверх-

ностного упрочнения исследуемых материалов, а также методы изучения их структуры и оценки уровня механических и триботехнических свойств.

Материалами для поверхностного упрочнения по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки являлись распространенные углеродистые стали: сталь 20 и сталь 40Х. В качестве легирующих материалов для формирования упрочненных слоев применяли порошки карбида бора, титана и железа. Для защиты порошковой смеси и расплавленного металла от окислительного воздействия атмосферы применяли флюс  $MgF_2$ . Поверхностное упрочнение исследуемых материалов проводилось с применением промышленного ускорителя электронов типа ЭЛВ-6 в Институте ядерной физики СО РАН. Энергия пучка электронов составляла 1,4 МэВ.

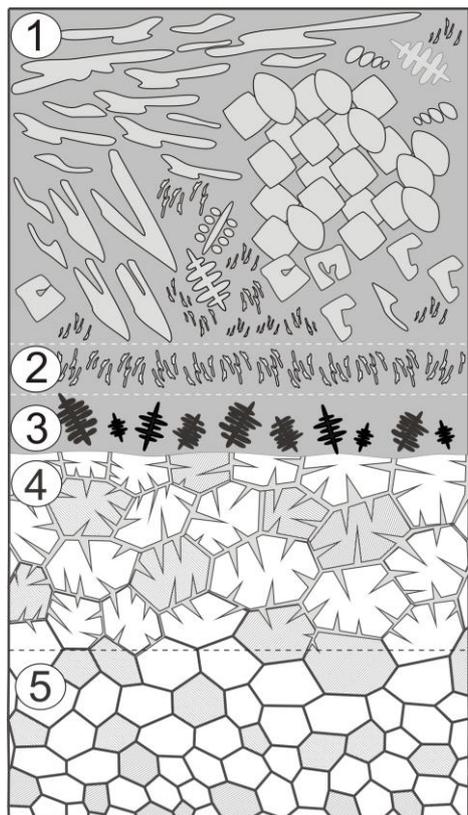


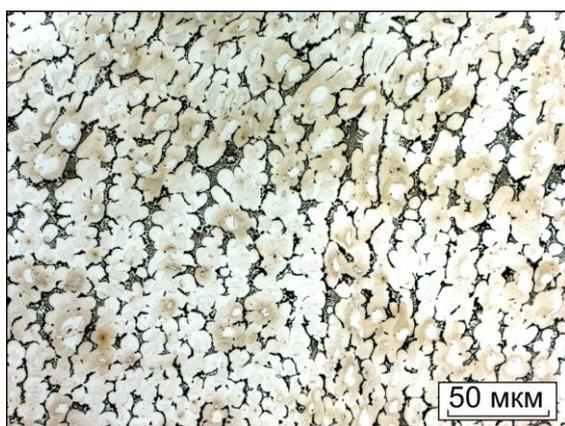
Рисунок 1 – Схема строения поперечного сечения наплавленного слоя: 1 – зона заэвтектического типа с боридами железа различной морфологии; 2 – зона эвтектического строения; 3 – зона доэвтектического типа; 4 – зона термического влияния; 5 – исходная структура основного металла

Анализ свойств материалов, упрочненных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки борсодержащих порошковых материалов, проводили в сравнении с материалами, полученными по технологиям диффузионного борирования и цементации.

Структурно-фазовые преобразования в поверхностно упрочненных материалах изучали с применением оптической металлографии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, а также методов рентгенофазового анализа. С целью оценки свойств полученных материалов проводились испытания на микротвердость, ударный изгиб, а также триботехнические испытания в условиях трения скольжения, трения о закрепленные и нежестко закрепленные абразивные частицы.

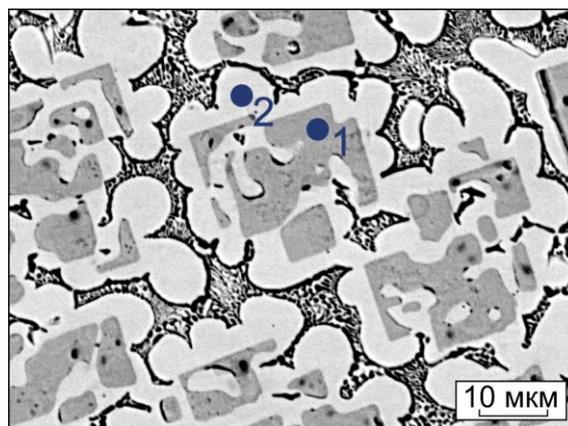
**В третьем разделе** диссертационной работы представлены результаты исследований структурных преобразований, происходящих в поверхностных слоях обработанных электронным пучком материалов, а также данные по уровню механических и триботехнических свойств сплавов после вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси «карбид бора – железо».

Экспериментально установлено, что реализация технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси, содержащей карбид бора, позволяет сформировать поверхностные слои без видимых отслоений и пор. На рисунке 1 представлена схема поперечного сечения поверхностно легированного слоя. При высокоэнергетическом воздействии глубина упрочненного слоя достигает 2...3 мм. В результате электронно-лучевой обработки в поверхностном слое заготовки формируется явно выраженная гетерофазная структура. В наплавленном материале наблюдается обра-



а

Рисунок 2 – Структура поверхностного слоя, сформированного при наплавке смеси 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  с током пучка 24 мА



б

Химический состав, ат. %			
	$Fe$	$B$	$C$
Спектр 1	68,1	31,9	–
Спектр 2	70,4	16,5	13,1

зование ряда характерных зон. В поверхностных слоях зафиксировано формирование структуры заэвтектического типа, для которой характерно выделение первичных кристаллов боридных фаз различной морфологии, распределенных в эвтектической матрице (рисунок 1, область 1).

При дальнейшем продвижении к основному металлу структура слоя представлена лишь колониями эвтектики (область 2). Область вблизи границы с основным металлом содержит наименьшее количество бора вследствие интенсивного разбавления материалом подложки, что приводит к формированию зоны доэвтектического строения (область 3). Ширина каждой из отмеченных областей определяется режимами наплавки, а также составом наплавочной смеси. Граница «упрочненный слой – основной металл» отчетливо выявляется в виде тонкой полосы. Структура основного металла характеризуется градиентным строением. Вблизи наплавленного слоя выделяется зона термического влияния, характеризующаяся огрублением структуры, связанным с нагревом до высоких температур. Быстрое охлаждение после электронно-лучевой наплавки приводит к выделению феррита видманштеттова типа (область 4). Толщина этой области составляет приблизительно 1000 мкм. Далее располагается исходная структура, не претерпевшая значительных изменений после электронно-лучевой обработки (область 5).

Параметром, варьируемым в процессе наплавки, являлась сила тока электронного пучка. Исследования поверхностных слоев, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  с током пучка 24 мА, показали, что материал состоит из плотных скоплений боридных кристаллов. В некоторых областях границы между ними практически не просматриваются (рисунок 2 а). Согласно результатам рентгенофазового анализа, основными фазами, выделяющимися в наплавленных слоях такого типа, являются альфа-железо, борид железа  $Fe_2B$  и бороцементит  $Fe_3(B,C)$ . Анализ результатов волнодисперсионного анализа свидетельствует о выделении бороцементита  $Fe_3(B,C)$  вокруг первичных кристаллов борида железа  $Fe_2B$ ,

ориентированных перпендикулярно плоскости шлифа (рисунок 2 б). Наблюдаемый бороцементит описывается формулами  $Fe_3B_{0,6}C_{0,4}$  и  $Fe_3B_{0,7}C_{0,3}$ .

С повышением значения тока пучка увеличивается глубина проплавления основного металла, что объясняет рост толщины упрочненного слоя. Большее разбавление наплавочной смеси материалом подложки приводит к увеличению объемной доли эвтектических колоний. На границе с основным металлом происходит формирование зоны доэвтектического типа, характеризующейся образованием дендритных построений. Уменьшение концентрации карбида бора в наплавочной смеси до 25 % приводит к снижению объемной доли бороида железа  $Fe_2B$  в структуре слоев, вплоть до полного устранения первичных кристаллов данной фазы с увеличением тока пучка до 28...30 мА.

При изучении тонкого строения упрочненных слоев установлено, что в состав эвтектических колоний, образующихся в межборидных промежутках, входит бороцементит (рисунок 3 а). Об этом свидетельствуют, в частности, картины микродифракции (рисунок 3 б). В бороцементитной матрице выделяются островки  $\alpha$ -железа, для которых характерна высокая плотность дислокаций (рисунок 3 в). Внутри ячеек дендритов, формирующихся в структуре доэвтектического типа, наблюдается фрагментирование цементитных пластин. Толщина пластин не превышает 100 нм (рисунок 3 г).

Наилучшие результаты в ходе испытаний на износостойкость при трении о закрепленные частицы абразива показали материалы, сформированные при наплавке смеси 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  с током 24 мА. По сравнению с образцами, полученными по технологии цементации, зафиксировано повышение стойкости материала в 2,5 раза. Для анализируемого материала характерен наибольший уровень микротвердости, значения которого составляют 12...14 ГПа. Каркас из высокопрочных частиц препятствует удалению материала при внедрении абразивных зерен.

Наименьшие значения потери массы в ходе испытаний в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц зафиксированы для слоев, упрочненных при наплавке порошковой смеси 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  с током пучка 26 мА (рисунок 4, линия 7). В результате металлографических исследований установлено, что в объеме таких слоев формируется гетерофазная структура из высокопрочных бороидов железа  $Fe_2B$  и механиче-

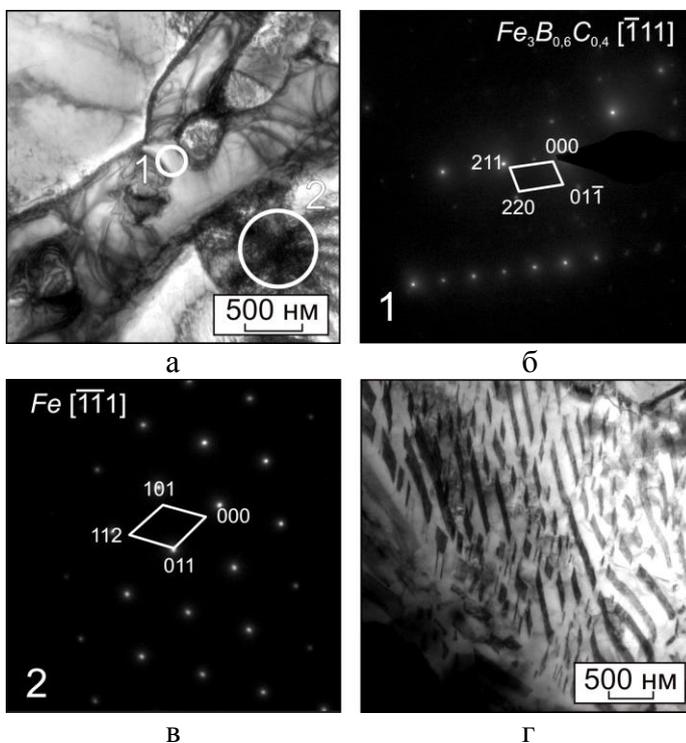


Рисунок 3 – Светлопольные изображения тонкого строения поверхностных слоев, сформированных при наплавке смеси «карбид бора – железо» (а, г) и картины микродифракции (б, в)

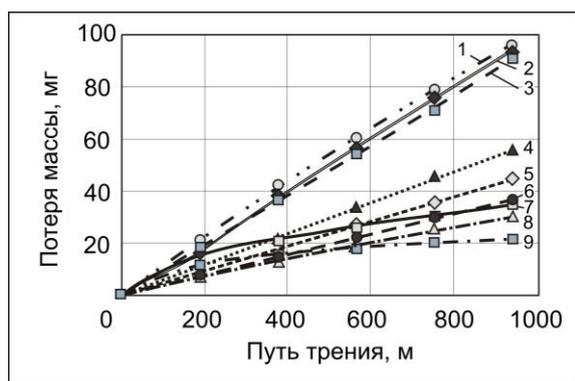


Рисунок 4 – Потеря массы образцов при испытаниях в условиях трения о нежестко закрепленные частицы абразива: 1 – 25 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$ ,  $I = 28$  мА; 2 – 25 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$ ,  $I = 30$  мА; 3 – сталь 20 (цементация); 4 – 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$ ,  $I = 30$  мА; 5 – 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$ ,  $I = 28$  мА; 6 – 25 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$ ,  $I = 26$  мА; 7 – 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$ ,  $I = 24$  мА; 8 – 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$ ,  $I = 26$  мА; 9 – сталь 20 (борирование)

Испытания материалов в условиях трения скольжения с граничной смазкой проводились по схеме «диск – плоскость». В качестве контртела применялся диск из закаленной стали 45 твердостью 60 HRC. Полученные результаты показали, что при воздействии врезающегося индентора наплавленный материал с наибольшим уровнем твердости не обладает лучшими показателями износостойкости. Интенсивность изнашивания материала, полученного при наплавке смеси 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  ( $I = 24$  мА), соизмерима со свойствами слоев, сформированных с применением порошковой смеси 25 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$  ( $I = 26$  мА) (рисунок 5). Поверхностное легирование стальных заготовок порошковой смесью 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  при токе пучка 26 мА обеспечивает повышение износостойкости сплава.

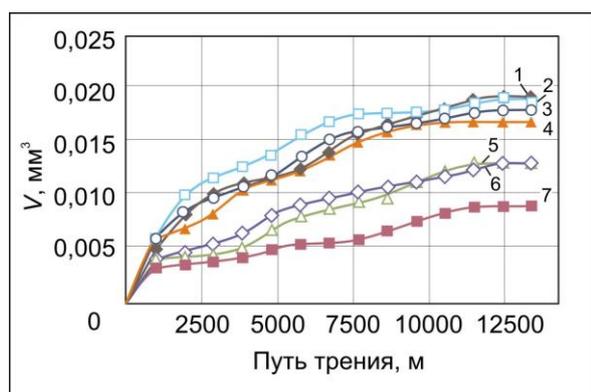


Рисунок 5 – Объемный износ материалов в условиях трения скольжения: 1 – 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  ( $I = 24$  мА); 2 – 25 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$  ( $I = 26$  мА); 3 – 25 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$  ( $I = 30$  мА); 4 – 25 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$  ( $I = 28$  мА); 5 – 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  ( $I = 30$  мА); 6 – 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  ( $I = 28$  мА); 7 – 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$  ( $I = 26$  мА)

ской смеси пластинчатого типа. Частицы боридов железа обеспечивают эффективное сопротивление износу поверхности, при этом эвтектическая составляющая слоя проявляет склонность к пластической деформации. Скорость изнашивания такого материала в три раза ниже, чем цементованных образцов.

Материал, упрочненный по технологии печного борирования, обладает высокой стойкостью в анализируемых условиях. Однако, принимая во внимание небольшую глубину упрочненного слоя, можно сделать вывод, что материал такого типа не способен оказывать длительное сопротивление абразивному изнашиванию.

Эвтектические колонии, присутствующие в сплаве, эффективно воспринимают пластическую деформацию, что препятствует возникновению трещин и последующему разрушению материала. В процессе испытаний установлено, что коэффициент трения исследуемых материалов составляет 0,08...0,09 и существенно не зависит от силы тока электронного пучка при наплавке и содержания карбида бора в порошковой смеси.

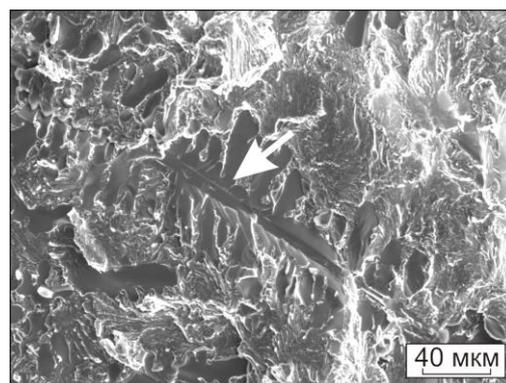
Испытания материалов в условиях динамического нагружения сви-

детельствуют о снижении работы разрушения основного металла в результате поверхностного упрочнения по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки. Анализ результатов фрактографических исследований позволяет сделать вывод о хрупком разрушении исследуемых материалов. Выкрашивания боридных кристаллов из окружающей их матрицы не происходит (рисунок 6 а). Для эвтектической составляющей характерно более развитое строение излома. Разрушение происходит с проявлением признаков транскристаллитного механизма. Отчетливо просматриваются границы между пластинками в эвтектических колониях (рисунок 6 б).

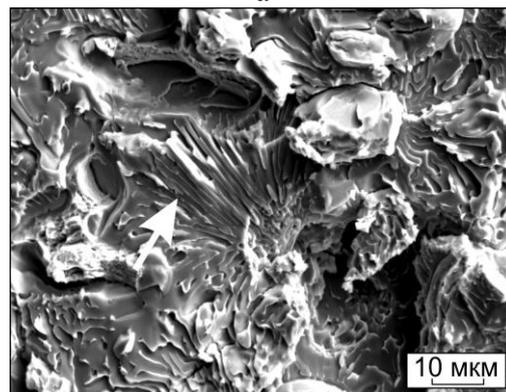
**Четвертый раздел** работы посвящен исследованиям структуры и свойств упрочненных слоев, сформированных при наплавке порошковых смесей  $B_4C-Ti-Fe$ . Концентрацию карбида бора в наплавочной смеси изменяли от 5 до 15 %. Наплавка порошковой смеси, содержащей 5 %  $B_4C$  – 10 %  $Ti$  – 35 %  $Fe$ , привела к формированию слоя, состоящего из карбидов титана и округлых областей твердого раствора бора в железе, распределенных в эвтектической матрице (рисунок 7 а). Карбиды титана представляют собой равномерно распределенные в объеме наплавленного слоя частицы размером не более 10 мкм. На их формирование расходуется углерод основного металла, а также углерод, полученный в результате распада карбида бора. Наряду с отдельными частицами карбидов присутствуют их скопления. В большей части наплавленного слоя материал однороден. Лишь вблизи границы «основной металл – наплавленный слой» явно выделяется структура доэвтектического типа.

Содержания 5 % карбида бора в наплавочной смеси не достаточно для образования первичных боридов железа. В слое, полученном при наплавке порошковой смеси с 10 % карбида бора, первичные кристаллы боридов железа  $Fe_2B$  присутствуют. Частицы этой фазы равномерно распределены в объеме слоя. Наблюдаются области с различным образом ориентированными боридами. Зафиксировано образование мелкодисперсных боридов, средний размер которых в поперечном сечении не превышает 10 мкм.

На снимках, полученных методом растровой электронной микроскопии, отчетливо просматриваются частицы игольчатой (пластинчатой) формы размерами 10...30 мкм (рисунок 7 б). Результаты рентгенофазового анализа свидетельствуют об образовании боридов титана  $TiB_2$ . Анализ микроструктуры сплава позволяет сделать вывод о том, что такие частицы выделяются небольшими скоплениями, неравномерно распределенными в объеме наплавленных слоев.

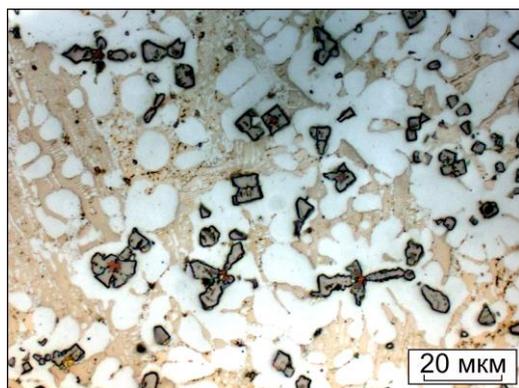


а

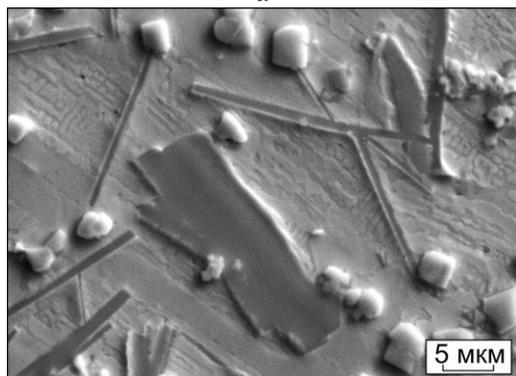


б

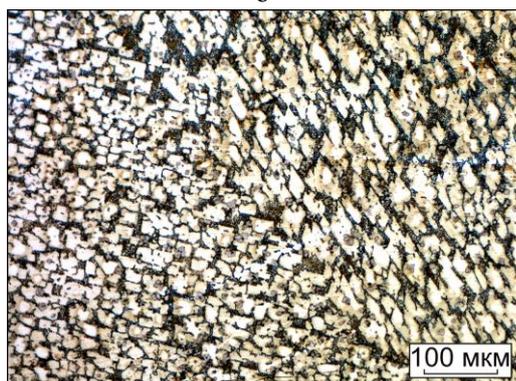
Рисунок 6 – Поверхность разрушения упрочненных слоев



а



б



в

Рисунок 7 – Структура поверхностных слоев, сформированных при наплавке порошковой смеси 5 %  $B_4C$  – 35 %  $Fe$  – 10 %  $Ti$  (а); 10 %  $B_4C$  – 30 %  $Fe$  – 10 %  $Ti$  (б); 15 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$  – 10 %  $Ti$  (в)

10 %  $Ti$  (рисунок 9). Эффект упрочнения поверхностных слоев данного типа обусловлен формированием в структуре материала плотного каркаса из частиц боридов железа  $FeB$ . Микротвердость эвтектической составляющей находится в пределах от 13 до 16 ГПа. Колебания значений твердости на графиках связаны с формированием в покрытиях как высокопрочных частиц, так и более пластичных структурных составляющих.

Стойкость исследуемых материалов в условиях абразивного изнашивания определяется в первую очередь фазовым составом и твердостью слоев, а также характером их напряженного состояния. В ходе триботехнических испытаний установлено, что наибольшее значение абразивной стойкости характерно для

Длина пластинок боридов титана, как правило, составляет 1...2 мкм. В то же время были обнаружены частицы толщиной более 5 мкм. Принимая во внимание, что атомный радиус углерода (0,91 Å) меньше, чем у бора (1,17 Å), а также большую скорость диффузии углерода в титане при температурах свыше 1000 °С, можно предположить, что атомы углерода первыми диффундируют в подрешетку титана, образуя карбиды  $TiC$ , после чего происходит формирование боридов титана.

Увеличение содержания карбида бора в наплавочной смеси до 15 % приводит к формированию слоя, состоящего из плотно расположенных частиц первичных боридов железа (рисунок 7 в). Между боридами наблюдается механическая смесь пластинчатого типа. Наряду с кристаллами кубической формы, наблюдаются округлые частицы, границы между которыми практически не просматриваются. Анализ фазового состава исследуемого материала свидетельствует о формировании боридов железа  $FeB$  (рисунок 8). Отмеченная фаза характеризуется высоким содержанием бора (16,23 вес. %) и повышенными значениями твердости (20 ГПа).

С повышением содержания карбида бора в наплавочной смеси  $B_4C-T-Fe$  значения микротвердости упрочненного слоя возрастают от 5 до 17 ГПа. Наибольший уровень микротвердости (15...17 ГПа) соответствует покрытиям, сформированным при наплавке смеси 15 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$  –

материалов, полученных при вневакуумной электронно-лучевой наплавке смеси 15 %  $B_4C$  – 10 %  $Ti$  – 25 %  $Fe$  (рисунок 10, линия 5). Потеря массы материала с упрочненным слоем в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц в 2,5 раза меньше по сравнению с цементованными образцами. Такое поведение обусловлено более высокой способностью полученных в работе материалов сопротивляться процессам микрорезания за счет формирования структуры из плотно расположенных боридов железа  $FeB$ , равномерно распределенных карбидов титана  $TiC$ , а также боридов титана  $TiB_2$ .

По сравнению с контрольным материалом стойкость анализируемого сплава в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц в 3 раза выше. Таким образом, увеличение износостойкости поверхностных слоев связано с повышением уровня твердости материала. Установлено, что коэффициент трения исследуемых материалов не зависит от концентрации легирующих элементов и составляет примерно 0,1. Согласно полученным результатам, наиболее высокий уровень стойкости в анализируемых условиях характерен для материала, полученного при наплавке 10 %  $B_4C$  – 10 %  $Ti$  – 30 %  $Fe$ .

**В пятом разделе** рассмотрены пути практического использования результатов, полученных в диссертационной работе. Основываясь на проведенных в работе исследованиях, было предложено применять технологию вневакуумной электронно-лучевой наплавки борсодержащей порошковой смеси для увеличения срока службы буровых коронок. Результаты промышленных испытаний в условиях бурения мягких грунтов свидетельствуют о повышении стойкости буровых коронок при использовании разработанной технологии в 2,3 раза по сравнению с технологией термической обработки. Результаты, полученные в

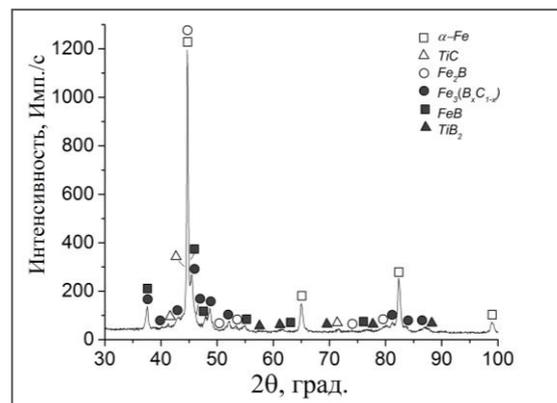


Рисунок 8 – Рентгенограмма поверхностного слоя, сформированного при наплавке порошковой смеси 15 %  $B_4C$  – 10 %  $Ti$  – 25 %  $Fe$

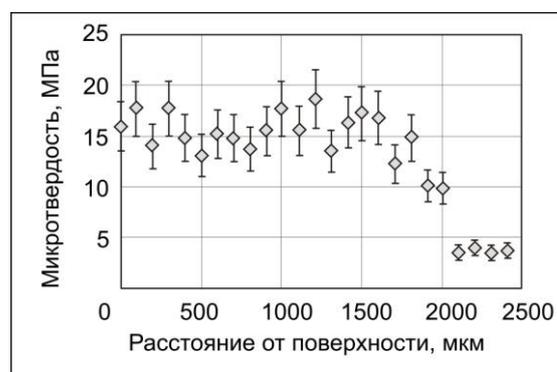


Рисунок 9 – Микротвердость поверхностных слоев материалов, сформированных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси 15 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$  – 10 %  $Ti$

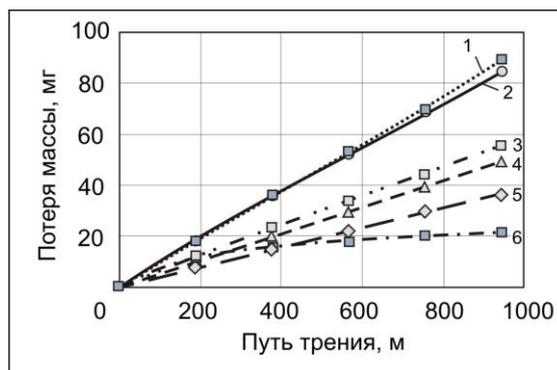


Рисунок 10 – Потеря массы образцов при воздействии нежестко закрепленных частиц абразива: 1 – сталь 20 (цементация); 2 – 5 %  $B_4C$  – 35 %  $Fe$  – 10 %  $Ti$ ; 3 – 7,5 %  $B_4C$  – 32,5 %  $Fe$  – 10 %  $Ti$ ; 4 – 10 %  $B_4C$  – 20 %  $Fe$  – 10 %  $Ti$ ; 5 – 15 %  $B_4C$  – 25 %  $Fe$  – 10 %  $Ti$ ; 6 – сталь 20 (печное борирование)

ходе выполнения диссертационной работы, применяются в учебном процессе при подготовке студентов по направлениям «Наноинженерия» и «Материаловедение и технологии новых материалов» в Новосибирском государственном техническом университете при чтении лекционных курсов, выполнении практических и лабораторных работ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Поверхностное легирование стальных заготовок по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки смесей, содержащих порошки карбида бора и титана, обеспечивает формирование упрочненных слоев глубиной до 3 мм с градиентной гетерофазной структурой. По мере уменьшения степени легирования расплавленного слоя в направлении от поверхности заготовки к основному металлу формируются зоны заэвтектического, эвтектического и доэвтектического типов с различным сочетанием структурных составляющих. Большая глубина наплавленных слоев, а также комплекс их механических свойств обеспечивают высокую износостойкость упрочняемых изделий и позволяют осуществлять их дополнительную механическую обработку. Применение данной технологии рационально в первую очередь для повышения износостойкости стальных изделий, эксплуатирующихся в условиях воздействия абразивной среды.

2. Технологическими параметрами, оказывающими наиболее существенное влияние на структуру упрочненного слоя, износостойкость и комплекс прочностных свойств композиций, являются величина тока электронного пучка, доля карбида бора, титана и железа в наплавочной порошковой смеси. Снижение содержания карбида бора наряду с повышением силы тока электронного пучка приводит к увеличению толщины упрочненных слоев и уменьшению объемной доли боридов железа в структуре слоев.

3. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых смесей «карбид бора – железо» на стальные заготовки сопровождается формированием сложной гетерофазной структуры, представляющей композицию боридов железа  $Fe_2B$ , бороцементита переменного состава  $Fe_3(B_xC_{1-x})$  и пластинчатой эвтектики. Характерной особенностью данной структуры является выделение бороцементита в виде оболочки вокруг первичных кристаллов боридов железа. В свою очередь, эти высокопрочные образования надежно удерживаются окружающей их двухфазной эвтектической матрицей.

4. Введение порошка титана в наплавочную смесь  $B_4C-Fe$  приводит к формированию более однородных по строению поверхностно легированных слоев. Лишь вблизи границы «основной металл – наплавленный слой» явно выделяется структура доэвтектического типа. Высокая степень однородности структуры по глубине упрочненного слоя обеспечивает более стабильный уровень триботехнических свойств материала в длительных условиях изнашивания, что является важным при эксплуатации изделий, сопровождающейся значительными изменениями размеров и потерей массы.

5. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковой смеси  $B_4C-Ti-Fe$  приводит к формированию более сложной гетерофазной структуры по сравнению со сплавами, получаемыми при обработке смесей  $B_4C-Fe$ . Функцию

упрочняющих частиц в сплавах, легированных титаном, выполняют кристаллы бороцементита, боридов железа  $Fe_2B$  и  $FeB$ , борида титана и карбида титана, характеризующиеся высокой твердостью. Одновременное присутствие в сплавах разнородных высокопрочных частиц, окруженных эвтектической матрицей, обеспечивает высокий уровень сопротивления материалов износу в условиях воздействия абразивных частиц.

6. Наиболее высокий уровень износостойкости сплавов при трении скольжении со смазкой и в условиях воздействия нежестко закрепленных частиц абразива обеспечивает наплавка смеси 40 %  $B_4C$  – 10 %  $Fe$ . Триботехнические свойства полученного при этом сплава обусловлены особенностями взаимного расположения структурных составляющих. Максимальный уровень сопротивления износу обеспечивают кристаллы боридов железа твердостью 17...19 ГПа, расположенные в обойме из бороцементита (11...14 ГПа), которая, в свою очередь, окружена менее хрупкой пластинчатой эвтектикой (7...9 ГПа).

7. Сочетание порошков карбида бора, титана и железа (15 %  $B_4C$  – 10%  $Ti$  – 25 %  $Fe$ ) более благоприятно для повышения стойкости изделий, эксплуатирующихся в условиях трения о закрепленные частицы абразива. Износостойкость полученных при этом сплавов существенно выше по сравнению с образцами, упрочненными стандартными методами цементации и борирования. Способность полученных в работе сплавов сопротивляться процессам микрорезания обусловлена формированием структуры из плотно расположенных боридов железа, равномерно распределенных карбидов титана  $TiC$ , а также частиц диборида титана  $TiB_2$ .

8. Формирование в процессе электронно-лучевой наплавки слоев, прочно связанных с основным металлом, сопровождается охрупчиванием поверхностно упрочненной стали. Ударная вязкость поверхностно легированных сплавов в 1,5...2 раза ниже по сравнению с основным металлом. Повышение толщины упрочненных слоев, имеющее место при увеличении тока электронного пучка, сопровождается снижением значений работы разрушения образцов с надрезами. Фрактографические исследования изломов свидетельствуют о высоком качестве сопряжения основного и поверхностно легированного металла, отсутствии пор и отслоений. Изменение содержания карбида бора и титана в наплавочной смеси существенного влияния на ударную вязкость материалов с упрочненными слоями не оказывает.

9. На основании результатов, полученных в диссертационной работе, разработана технология упрочнения рабочей поверхности буровой коронки. Интенсивность изнашивания изделий, упрочненных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки, в 2,3 раза ниже по сравнению с термически упрочненными коронками. Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, используются в лекционных курсах и при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Прогрессивные материалы и технологии», «Высокоэнергетические методы обработки», «Износостойкие материалы и покрытия» в Новосибирском государственном техническом университете.

## **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

### В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Структура и свойства боросодержащих покрытий, наплавленных электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу [Текст] / Е. А. Дробяз, Д. С. Кривеженко, И. А. Поляков, С. Ю. Нагавкин, В. В. Иванцовский // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4 (57). – С. 83–85.

2. Электронно-лучевая наплавка титан- и танталсодержащих порошковых смесей на образцы из стали 40Х [Текст] / Д. О. Муль, Н. С. Белоусова, Д. С. Кривеженко, Л. И. Шевцова, А. А. Лосинская // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2014. – № 2 (63). – С. 117-126.

3. *Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding* [Text] / I. A. Bataev, A. A. Bataev, M. G. Golkovski, D. S. Krivizhenko, A. A. Losinskaya, O. G. Lenivtseva // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481.

4. *Investigation of the Structure and Properties of Boron-containing Coatings Obtained by Electron-beam Treatment* [Text] / D. S. Krivezhenko, E. A. Drobyaz, I. A. Bataev, L. V. Chuchkova // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1683. – No. 020104.

### В прочих изданиях

5. *Structure and properties of coatings obtained by electron-beam cladding of Ti+C and Ti+B<sub>4</sub>C powder mixtures on steel specimens at air atmosphere* [Text] / D. O. Mul, D. S. Krivezhenko, D. V. Lazurenko, O. G. Lenivtseva, A. A. Chevakin-skaya // *Advanced Materials Research : High technology: research and application*. – 2014. – Vol. 1040 – P. 778-783.

6. *Electron-Beam Cladding of Boron Carbide on Low-alloyed Steel at the Air Atmosphere* [Text] / D. S. Krivezhenko, I. S. Laptev, T. A. Zimoglyadova // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 369-373.

7. *Surface hardening of steel by electron-beam cladding of Ti+C and Ti+B<sub>4</sub>C powder compositions at air atmosphere* [Text] / D. Mul, D. Krivezhenko, T. Zimoglyadova, A. Popelyukh, D. Lazurenko, L. Shevtsova // *Applied Mechanics and Materials : Actual Problems and Decisions in Machine Building*. - 2015. – Vol. 788. – P. 241-245.

8. Оценка эффективности применения вневакуумной электроннолучевой наплавки для повышения износостойкости низкоуглеродистой стали [Текст] / Д. С. Кривеженко, Е. А. Дробяз, И. А. Батаев, В. В. Базаркина // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 10-ой Всерос. науч.-практич. конф. – 2012. – С. 183-186.

9. Дробяз, Е. А. Влияние параметров вневакуумной электронно-лучевой обработки на механические свойства порошковых покрытий [Текст] / Е. А. Дробяз, Д. С. Кривеженко // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 10 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – Ч. 4. – С. 179-180.

10. Кривеженко, Д. С. Применение промышленного ускорителя электронов для формирования износостойких боридных покрытий [Текст] / Д. С. Кривеженко, В. В. Базаркина // Студент и научно-технический прогресс.

Новые материалы и технологии: материалы 51 междунар. науч. студ. конф., Новосибирск. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2013. – С. 34.

11. Формирование износостойких покрытий на низкоуглеродистых сталях с использованием высокоскоростной термической обработки [Текст] / Е. А. Дробяз, Д. С. Кривеженко, Е. Ю. Лапушкина, Н. Ю. Черкасова // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 11 Всерос. науч.-практ. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 339-341.

12. Зимоглядова, Т. А. Влияние режимов вневакуумной электронно-лучевой обработки на механические свойства боридных покрытий [Текст] / Т. А. Зимоглядова, Е. А. Дробяз, Д. С. Кривеженко // Труды 14 Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 100-летию со дня рождения А. И. Покрышкина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 200–202.

13. *Structure and properties of coatings produced by non-vacuum electron beam cladding of tantalum-reach powder on mild steel [Text] / D. S. Krivezhenko, D. O. Mul, V. A. Bataev, M. G. Golkovskii // Proceedings of IFOST-2013. The 8th International forum on strategic technology 2013 (IFOST 2013). – [Mongolia] : MUST, 2013. Vol. 1, P. 147-149.*

14. Кривеженко, Д. С. Формирование многослойных высокопрочных покрытий с использованием высокоскоростного нагрева [Текст] / Д. С. Кривеженко, Т. А. Зимоглядова // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 10 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – Ч. 4. – С. 149-151.

15. Кривеженко, Д. С. Структурные исследования боридных покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки [Текст] / Д. С. Кривеженко, Т. А. Зимоглядова, Е. Ю. Лапушкина // 14 Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых : сб. науч. тр. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – С. 304-305.

16. *Structure and properties of coatings obtained by electron-beam alloying at air atmosphere [Text] / D. O. Mul, D. S. Krivezhenko, M. G. Golkovski, I. A. Bataev, O. G. Lenivtseva, P. N. Komarov // Interfinish-Seria 2014: book abstr., intern. conf. on surface engineering for research and industrial applications. – Novosibirsk : NSTU Publ., 2014. – P. 53.*

17. Муль, Д. О. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка ванадия, титана и графита на стали [Текст] / Д. О. Муль, Д. С. Кривеженко, М. С. Королева // 15 Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых : сб. науч. тр. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – С. 370-373.

18. Кривеженко, Д. С. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка карбида бора на низкоуглеродистую сталь [Текст] / Д. С. Кривеженко, И. С. Лаптев, И. Н. Градусов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014) : сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 3. Секция «Машиностроение». – С. 218-221.

19. Кривеженко, Д. С. Особенности структурообразования боросодержащих покрытий, полученных в процессе высокоскоростной обработки [Текст] / Д. С. Кривеженко, Е. А. Дробяз, Т. А. Зимоглядова // Актуальные проблемы в машиностроении : материалы 1 междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 489-492.

20. Особенности формирования высокопрочных поверхностных слоев с использованием высокоскоростного нагрева [Текст] / Т. А. Зимоглядова, Д. С. Кривеженко, Д. Ю. Корнев, Е. В. Плехотко // Материалы 52 международной научной студенческой конференции (МНСК–2014). Новые конструкционные материалы. – Новосибирск : Изд-во НГУ, 2014. – С. 8.

21. Зимоглядова, Т. А. Формирование функциональных боридных покрытий на сталях при воздействии высококонцентрированных источников энергии [Текст] / Т. А. Зимоглядова, Д. С. Кривеженко, П. Н. Комаров // Современные техника и технологии : сб. докл. 20 междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. – Томск : ТПУ, 2014. – Т. 2. – С. 37-38.

22. Триботехнические свойства поверхностных слоев, упрочненных карбидами титана и ванадия методом вневакуумной электронно-лучевой обработки / Д. О. Муль, М. С. Королева, Д. С. Кривеженко, Р. И. Кузьмин, Н. Ю. Черкасова // Актуальные проблемы в машиностроении : материалы 2 междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – № 2. – С. 439-444.

23. Кривеженко, Д.С. Исследование структуры и свойств боросодержащих покрытий, полученных в процессе высокоскоростной обработки [Текст] / Д. С. Кривеженко, Е. А. Дробяз, И. С. Лаптев // Тезисы докладов Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций». – Томск : ИФПМ СО РАН, 2015. – С. 141-142.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Тел./факс: (383)346-08-57  
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.  
заказ № 1461 подписано в печать 18.10.2016 г.