

На правах рукописи

Теплых Александр Михайлович

**ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕВАКУУМНОЙ  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ  
БОРОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВ**

Специальность 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск - 2011

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Батаев Анатолий Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Околович Геннадий Андреевич

кандидат технических наук,  
Шляхова Галина Витальевна

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится «23» декабря 2011 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «    » ноября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Иванцовский В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Технологические процессы обработки многих деталей машин и элементов конструкций ответственного назначения предполагают не только их объемное, но также и поверхностное упрочнение. Особенно актуальна проблема поверхностного упрочнения при изготовлении изделий, подвергаемых интенсивному износу и контактно-усталостному нагружению. Такие условия эксплуатации характерны для многих видов горнодобывающей и строительной техники. Большое влияние на характер поведения образцов этой техники оказывает присутствие в зоне контакта трущихся деталей абразивных частиц, способствующих ускоренному изнашиванию поверхностных слоев материалов. Во многих случаях решение отмеченной проблемы не может быть основано на использовании технологических процессов, обеспечивающих формирование тонких поверхностных слоев, даже если они обладают повышенным уровнем твердости и износостойкости. Многие быстро изнашиваемые детали образцов горной и строительной техники должны быть упрочнены на глубину более 100...200 мкм.

Методы, обеспечивающие решение отмеченных проблем, во многих случаях основаны на использовании химико-термической обработки деталей. Среди них особо может быть выделен процесс борирования, обеспечивающий высокий уровень износостойкости материалов. К настоящему времени специалистами предложены десятки разновидностей борирования, характеризующиеся различными режимами реализации и структурой формируемых слоев. Для наиболее распространенных методов борирования характерны недостатки, ограничивающие их применение при поверхностном упрочнении быстроизнашиваемых деталей горных и строительных машин. Основными из них являются достаточно низкая производительность процессов борирования, малая толщина упрочненных слоев, сложность обработки крупногабаритных изделий.

Эффективным решением отмеченных проблем может быть использование процесса поверхностного упрочнения стальных заготовок с применением технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки. Важнейшим достоинством этой технологии является высокая производительность процесса, обусловленная выводом электронного пучка непосредственно в воздушную атмосферу и отсутствием длительного технологического этапа, связанного с откачкой воздуха. Эта же особенность процесса позволяет электронным лучом обрабатывать большинство крупногабаритных изделий, особенности эксплуатации которых требуют поверхностного упрочнения. Технологическими установками, обеспечивающими эффективную реализацию процесса вневакуумной электронно-лучевой обработки, являются промышленные ускорители электронов производства Института ядерной физики СО РАН. Тема диссертационной работы посвящена проблеме формирования поверхностных высокопрочных износостойких борсодержащих слоев повышенной толщины с использованием ускорителя электронов типа ЭЛВ-6. Для

современного материаловедения отмеченная проблема является актуальной. Ее решение имеет важное прикладное значение.

Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнялись в рамках аналитической ведомственной целевой программой "Развитие научного потенциала высшей школы на 2009-2011 гг.", а также федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы».

**Цель работы:** повышение износостойкости и контактно-усталостной выносливости поверхностных слоев низкоуглеродистой стали путем наплавки боросодержащих порошковых материалов с использованием электронного пучка высокой мощности, выведенного в воздушную атмосферу.

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

1. Проведение металлографических, электронно-микроскопических и рентгеноструктурных исследований борированных слоев, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки боросодержащих порошков на низкоуглеродистую сталь 20. Выявление особенностей строения наплавленных слоев и переходных зон.

2. Исследования эффективности формирования методом вневакуумной электронно-лучевой обработки одно-, двух- и трехслойных боросодержащих покрытий.

3. Исследование стойкости борированных слоев при изнашивании в условиях трения скольжения, трения о закрепленные и нежестко закрепленные частицы абразива, а также в условиях газоабразивного изнашивания.

4. Исследование контактно-усталостной выносливости поверхностных слоев, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки боросодержащих порошковых материалов.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты структурных исследований боридных покрытий, полученных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки на низкоуглеродистую сталь 20.

2. Сравнительные результаты исследований особенностей формирования боридных покрытий, полученных по технологии печного борирования в твердых засыпках и вневакуумной электронно-лучевой наплавки боросодержащих смесей.

3. Результаты исследования поведения композиции «боридное покрытие – сталь 20» в различных условиях изнашивания, динамического и контактно – усталостного нагружения.

4. Характерные особенности строения и свойства покрытий, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой обработки одно-, двух- и трехкратной наплавкой порошковой смеси на основе аморфного бора.

**Научная новизна**

1. Показано влияние технологических режимов электронно-лучевой наплавки на структуру, триботехнические свойства и контактно-усталостную выносливость стали 20. Наиболее высокий уровень износостойкости обеспечивает электронно-лучевая наплавка порошка карбида бора. Контактно-

усталостная выносливость наплавленных слоев в 2 раза превышает выносливость материалов, сформированных по технологии печного борирования.

2. Для повышения концентрации бора в поверхностных слоях упрочняемой стали предложена наплавка двух слоев боросодержащих порошков. Трехслойная наплавка сопровождается ростом внутренних напряжений и приводит к резкому охрупчиванию поверхностного слоя.

3. Показано, что величина силы тока электронного пучка определяет размер зон доэвтектического, эвтектического и заэвтектического состава. Микротвердость слоя в диапазоне  $HV$  10000...12000 МПа обеспечивает вневакуумная электронно-лучевая наплавка карбида бора при токах пучка в диапазоне от 5 мА до 18 мА. При таких параметрах наплавки глубина упрочненного слоя находится в пределах от 300 до 900 мкм.

4. При наплавке аморфного бора в поверхностном слое образуются бориды типа  $FeB$  и  $Fe_2B$ . Увеличение количества наплавленных слоев приводит к росту доли фазы  $FeB$ . В направлении от поверхности к основному металлу содержание боридов снижается. Интенсивность снижения доли кристаллов типа  $FeB$  выше, чем боридов  $Fe_2B$ .

5. Установлено, что в условиях ускоренного охлаждения наплавленного покрытия вместо равновесной фазы  $Fe_2B$  в эвтектике типа «борид железа –  $\alpha$ -Fe» возможно формирование метастабильных боридных фаз. Высокопрочная фаза, выделяющаяся в пластинчатой эвтектике при наплавке аморфного бора, по межплоскостному расстоянию соответствует соединению  $Fe_{23}B_6$ , а при наплавке карбида бора - соединениям типа  $Fe_{23}B_6$  и  $Fe_{23}B_3C_3$ . Показано, что в зоне доэвтектического типа, образующейся при вневакуумной электронно-лучевой наплавке аморфного бора, в процессе охлаждения  $\alpha$ -фазы выделяются карбиды пластинчатого типа. Толщина отдельных пластин в образующемся эвтектоиде составляет  $\sim 15$  нм, межпластинчатое расстояние – 100...150 нм.

#### **Практическая значимость и реализация результатов работы**

1. На основании результатов триботехнических исследований показано, что технологические процессы вневакуумной электронно-лучевой наплавки боросодержащих порошковых материалов целесообразно использовать для упрочнения быстроизнашиваемых элементов горношахтного оборудования, эксплуатирующихся в условиях сухого трения скольжения, трения о закрепленные и нежестко закрепленные частицы абразива. Испытания буровых лопаток, проведенные в ООО «ЭкспертНефтеГаз» в условиях бурения мягких грунтов, показали, что стойкость лопаток с разработанным покрытием в 1,9 раза выше стойкости лопаток, упрочненных по технологии печного борирования.

2. Результаты, полученные при структурных исследованиях, а также при триботехнических и механических испытаниях, используются в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении», а также бакалавров и магистров по направлению "Материаловедение и технологии материалов.

### **Достоверность результатов**

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены с применением современного аналитического и технологического оборудования, обеспечивающего подготовку образцов и позволяющего с высоким качеством проводить структурные исследования, а также определять механические и триботехнические свойства материалов, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки. Экспериментальные данные подвергались статистической обработке.

**Личный вклад автора** заключается в формулировании задач диссертационной работы, подготовке и проведении структурных исследований, определении механических и триботехнических свойств материалов, обработке полученных результатов и формулировании выводов.

### **Апробация работы**

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на Всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" г. Новосибирск, 2010 г., Всероссийской научно-технической конференции "Наука. Промышленность. Оборона" г. Новосибирск, 2011 г., международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов г. Томск, 2011г.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 6 печатных научных работ, из них: 2 в реферируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 3 - в сборниках научных трудов международных конференций и 1 статья в международном журнале.

### **Объём и структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст диссертационной работы изложен на 180 страницах и включает 66 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 141 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность и кратко описана сущность диссертационной работы, поставлена цель и задачи исследования, описаны основные направления научных исследований, проведенные в работе.

**В первом разделе** «Поверхностное упрочнение деталей машин и элементов конструкций, работающих в тяжелых условиях внешнего нагружения» представлен подробный обзор научной литературы по проблемам формирования высокопрочных боридных покрытий с использованием различных технологических процессов. Подробно описаны структура и свойства данных покрытий. Рассмотрены вопросы, касающиеся применения боридных покрытий для упрочнения тяжело нагруженных деталей машин и элементов конструкций, работающих в условиях интенсивного изнашивания. Обозначены наиболее важные проблемы, касающиеся формирования износостойких поверхностных боридных слоев.

**Второй раздел** «Материалы и методы исследования» посвящен описанию технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки боросодержащих порошков на низкоуглеродистую сталь, а так же технологии печного борирования в твердых насыщающих средах.

В качестве основного материала для формирования боридных покрытий в работе была использована низкоуглеродистая конструкционная сталь 20. Выбор данной стали обусловлен широким распространением феррито-перлитных сталей для изготовления деталей машин и элементов конструкций, ее малой стоимостью, а также применением для реализации различных видов химико-термической обработки с целью повышения износостойкости. Для формирования исходной равновесной феррито-перлитной структуры стальные заготовки отжигали при 900 °С.

В качестве упрочняющих материалов, предназначенных для формирования боридных слоев, в работе были использованы порошки аморфного бора ( $B_{ам.}$ ) марки А (ТУ 212-001-49534204-2003) и карбида бора (ТУ 95.960-82). Размер частиц порошков составлял 10...30 мкм.

Наплавка износостойких боридных покрытий осуществлялась на промышленном ускорителе электронов типа ЭЛВ-6, разработанном и изготовленном в Институте ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск). Обработка осуществлялась как в дорожном режиме (без развертки пучка), так и с применением электромагнитной развертки в поперечном направлении. Энергия электронного пучка  $E$  составляла 1,4 МэВ, скорость перемещения заготовок относительно луча  $V = 10$  мм/с, расстояние от выпускного окна до заготовки  $H = 90$  мм. Силу тока пучка электронов  $I$  изменяли в диапазоне от 5 мА до 24 мА.

Для проведения сравнительного анализа основных характеристик боридных покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой обработки, в работе была реализована технология диффузионного насыщения поверхности стали бором в твердой среде с использованием печного нагрева. Химико-термическая обработка проводилась в лабораторных электрических печах камерного типа (*SNOL 7.2/1100*). Насыщение стали бором осуществлялось в течение 6 ч при 900 °С. Длительность выдержки выбиралась исходя из требуемой толщины боридного слоя (~ 150 мкм).

Металлографические исследования были выполнены с использованием оптических микроскопов *AxioObserver A1m* и *AxioObserver Z1m (Carl Zeiss)*. Для проведения трансмиссионных электронно-микроскопических исследований в работе использовался прибор типа *Tecnai G2*. Исследования поверхностей после динамического разрушения композиции «боридное покрытие – основной металл», а также изучение поверхностей износа выполняли на растворяющем электронном микроскопе *Carl Zeiss EVO50 XVP*. Анализ фазового состава полученных композиций в диссертационной работе проводился по рентгенограммам, полученным на  $\theta$ - $\theta$  дифрактометре *ARL X'TRA*. Особенности разрушения упрочненных боридными слоями после различных видов изнашивания исследовали на комплексе по изучению топографии *Zygo New View*

7300. Микротвердость исследуемых в работе покрытий определяли на микротвердомере *Wolpert Group 402MVD*.

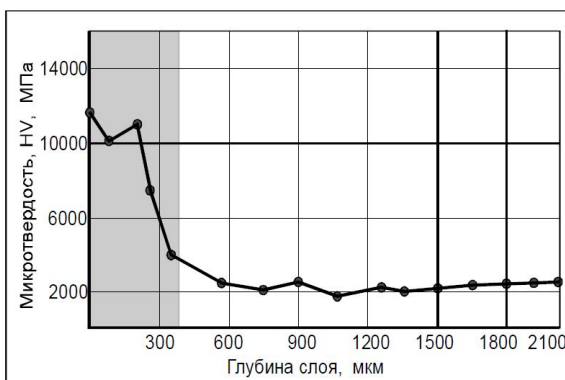
Триботехнические характеристики анализируемых в работе материалов определяли в условиях трения скольжения по схеме «диск - плоскость». Особое внимание уделяли исследованию материалов в различных условиях абразивного изнашивания. Проведены испытания на изнашивание в условиях трения материалов о закрепленные и нежестко незакрепленные частицы абразива, а также в условиях газоабразивного изнашивания. Исследовано поведение анализируемых материалов при их динамическом и контактно-усталостном нагружении.

**Третий раздел** «Структурные исследования боридных покрытий» посвящен исследованию структурных преобразований, происходящих при наплавке боросодержащих порошков на сталь 20. На всех сформированных при наплавке слоях оценивали значения микротвердости материала по глубине. Интерес представляют характер образующейся переходной зоны, величина градиента микротвердости, определяющая несущую способность переходной зоны, уровень возможных напряжений в ней. На рис.1 а-в представлена микротвердость боридных слоев, сформированных по технологии электронно-лучевой наплавки карбида бора. Технологическим параметром, который изменяли при проведении эксперимента, была величина тока пучка электронов ( $I = 5...24$  мА)

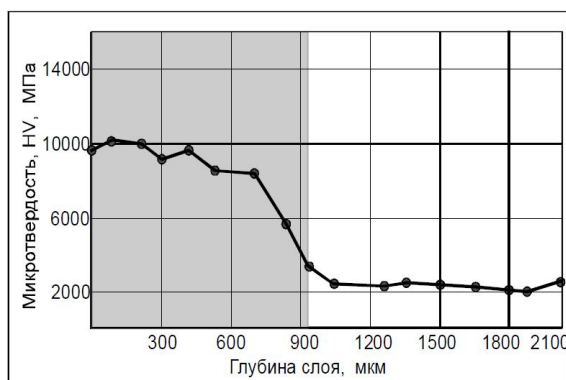
Анализ зависимостей, представленных на рис. 1, свидетельствует о том, что глубина упрочненного боридами слоя изменяется от  $\sim 400$  мкм (при токе 5 мА) до  $\sim 1900$  мкм (при токе 24 мА). Уменьшение максимального уровня микротвердости формируемого при вневакуумной электронно-лучевой обработке (ВЭЛО) поверхностного слоя является результатом снижения концентрации бора в наплавленном слое при увеличении тока электронного пучка. Величина силы тока определяет толщину зон доэвтектического, эвтектического и заэвтектического состава. При увеличении тока электронного пучка возрастает толщина зоны доэвтектического состава, а в заэвтектической зоне уменьшается объемная доля боридов.

Многие особенности строения борированных слоев были выявлены с использованием метода оптической металлографии. Контрольными являлись стальные образцы после печного борирования в твердых засыпках, выполненного по стандартным технологическим режимам. Анализ данных дюрOMETРИЧЕСКИХ и металлографических исследований свидетельствует о том, что толщина борированных слоев составляет 200...250 мкм. Химико-термическая обработка обеспечивает формирование характерных гетерофазных слоев, в которых могут быть выделены две зоны (рис. 2). Верхняя зона, расположенная в непосредственной близости от поверхности заготовки, содержит плотно расположенные бориды. Переходные зоны заняты крупными иглообразными боридами, оси которых направлены от поверхности вглубь заготовки.

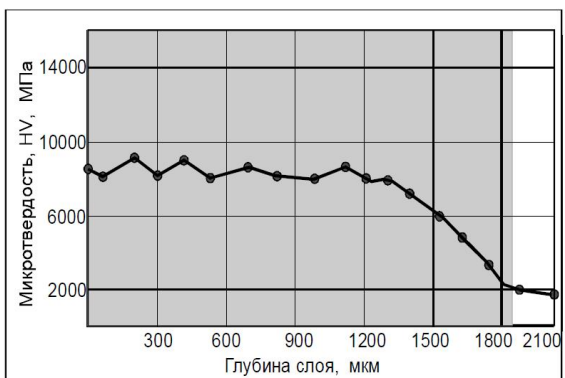




а



б



в

Рис. 1. Распределение микротвердости по глубине слоя, сформированного методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошка карбида бора на низкоуглеродистую сталь 20 при токе пучка 5 мА (а), 18 мА (б), 24 мА (в): скорость наплавки 10 мм/с; расстояние от выпускного окна до поверхности 90 мм; плотность насыпки 0,2 г/см<sup>2</sup>

После электронно-лучевой наплавки порошкового слоя аморфного бора формируется градиентный слой со сложной структурой гетерофазного типа. Его толщина составляет ~ 500...550 мкм. Основными структурными составляющими наплавленного слоя являются бориды, эвтектика пластинчатого типа и  $\alpha$ -фаза. В процессе металлографических исследований было установлено, что после однослойной наплавки в структуре материала наблюдается пятнистость. Зафиксированы участки с различной плотностью выделившихся боридов. С целью повышения степени однородности формируемой структуры были проведены эксперименты по наплавке двух и трех слоев порошка аморфного бора.

При многослойной наплавке аморфного бора в структуре поверхностного слоя возрастает объемная доля боридов. После наплавки трех слоев формируется зона сплошных боридов, в которой трудно идентифицировать отдельные кристаллы. Структура слоев, сформированных по технологии двукратной наплавки аморфного бора, является промежуточной. Для нее характерна повышенная доля боридов в верхних зонах упрочненного материала и, в то же время, монолитных боридных зон не зафиксировано.

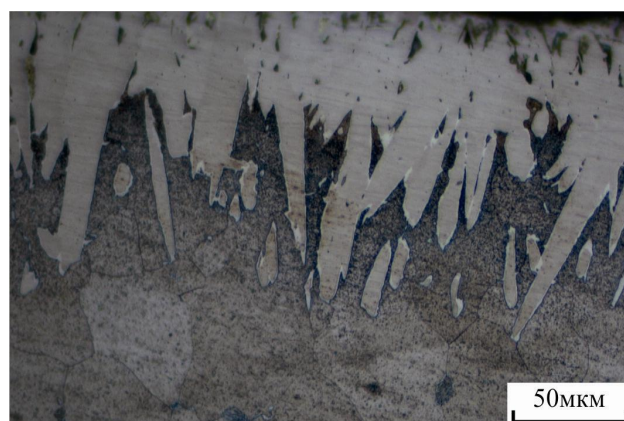


Рис. 2. Строение поверхностных слоев, сформированных по технологии печного борирования в твердой засыпке с аморфным бором

Образующиеся при наплавке аморфного бора бориды имеют различную форму. На рис. 3 представлен снимок поперечного сечения упрочненного слоя, на котором видны правильные кристаллы, имеющие формы параллелограмма, четко ориентированные в одном направлении.

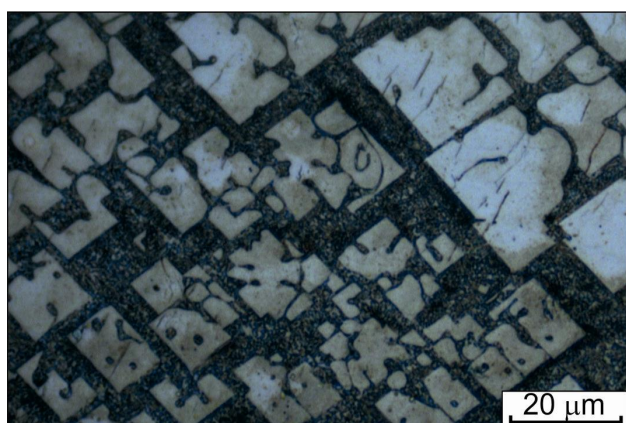
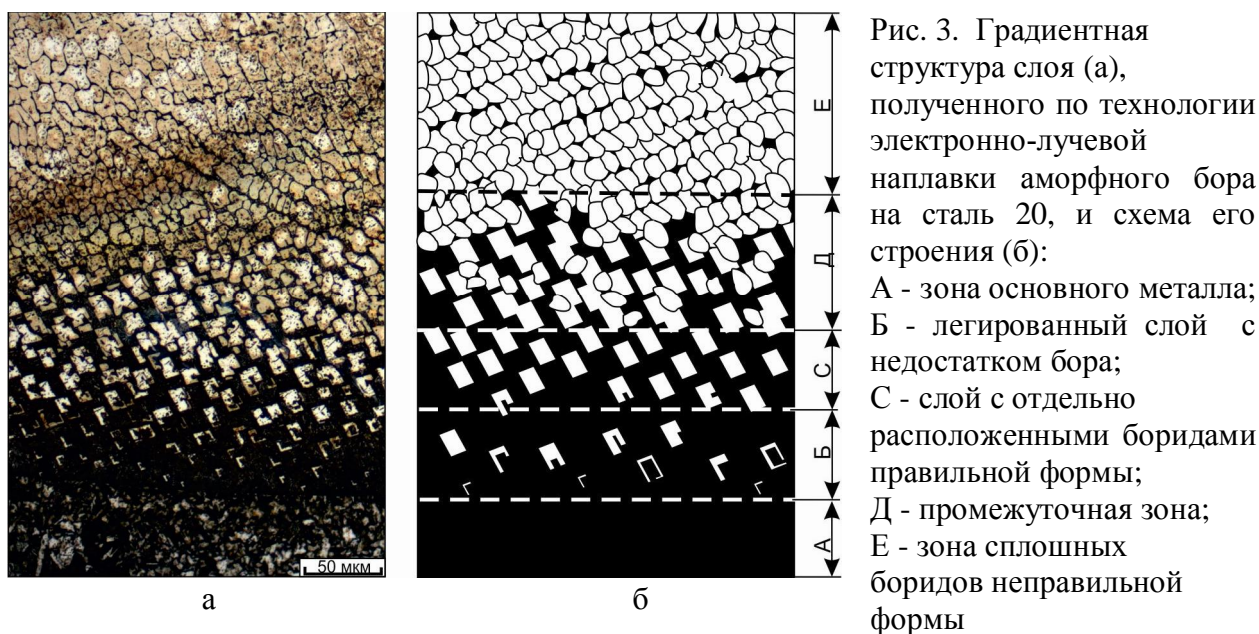


Рис. 4. Кристаллы боридов железа, выделившиеся в промежуточной зоне Д (рис. 3 б.)

и мешают друг другу. В этом случае формируются построения, форма которых носит случайный характер. Зона Д является промежуточной. В ней встречаются бориды правильной и случайной формы. Пример боридных кристаллов, характерных для этой зоны, приведен на рис. 4.

Наплавка порошка карбида бора осуществлялась за один проход. Результатом двухслойной наплавки карбида бора является резкое охрупчивание материала. Технологическим параметром, который изменяли при проведении экспериментальных исследований, была величина силы тока электронного пучка ( $I = 5, 8, 18, 22, 24$  мА). Все остальные параметры были такими же, как и при наплавке аморфного бора. Покрытия, сформированные методом электронно-лучевой наплавки карбида бора на сталь 20, имеют сложное гетерофазное строение (рис. 5 а. б.). Металлографически можно наблюдать

Следует подчеркнуть, что такого рода геометрическое построения имеет место в тех случаях, если кристаллы не мешают друг другу при своем росте. При приближении к облучаемой поверхности концентрация бора в покрытии возрастает. Результатом этого является повышение объемной доли боридов железа. Образующихся при наплавке кристаллов может быть так много, что в процессе их роста при кристаллизации поверхностного слоя они сталкиваются между собой



зоны доэвтектического (рис. 5а, указано стрелками), эвтектического и заэвтектического (рис. 5 б) состава. Изменение тока электронного пучка существенно отражается на строении наплавленных слоев. С ростом тока пучка глубина переплавленного слоя возрастает. Однако при этом в поверхностных зонах снижается объемная доля боридных кристаллов.

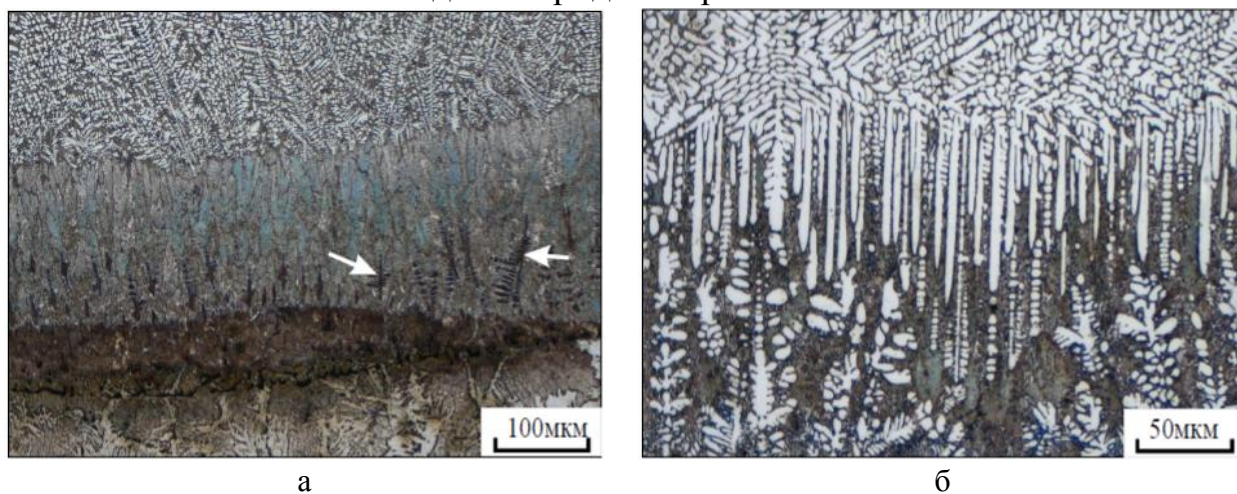
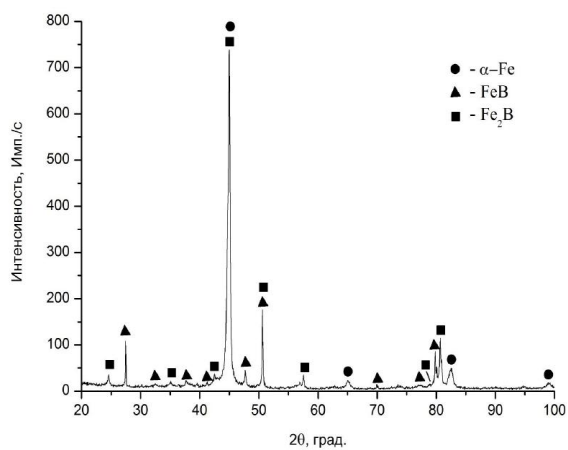


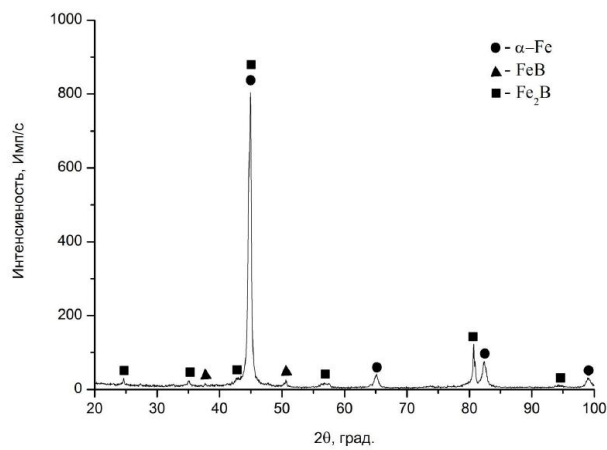
Рис. 5. Структура боридного слоя, сформированного методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошка карбида бора на сталь 20: ток пучка - 22 мА

Анализ результатов структурных исследований свидетельствует о том, что при реализации отмеченных выше технологических режимов рационально повышение тока электронного пучка от 5 до 18 мА. Этот интервал значений тока позволяет формировать структуру, с одной стороны обеспечивающую эффективное распределение локальных напряжений, с другой - характеризующуюся достаточно высоким уровнем микротвердости, необходимым для обеспечения износостойкости поверхностного слоя.

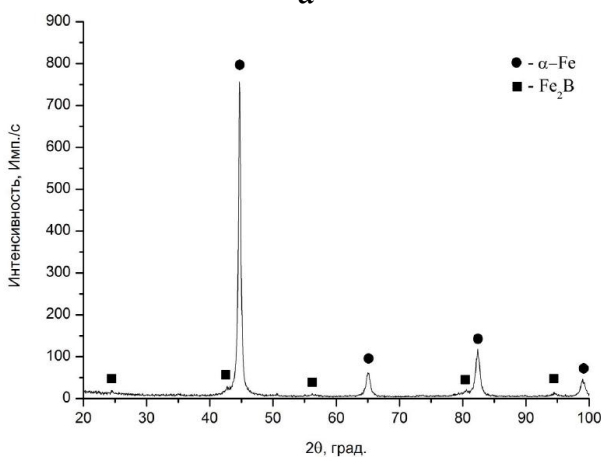
Учитывая характер возможных фазовых превращений, происходящих при борировании стали, при выполнении диссертационной работы особое внимание уделялось проведению рентгеноструктурных исследований. С целью изучения фазового состава по глубине наплавленных слоев осуществляли послойное сошлифовывание материала с шагом 100 мкм. На каждой глубине осуществлялась съемка дифракционных картин. В образцах, полученных, двухслойной наплавкой аморфного бора, на глубине 100 мкм от поверхности зафиксировано наличие боридов двух типов -  $FeB$  и  $Fe_2B$  (рис. 6). В направлении от поверхности к основному металлу содержание боридов снижается. Интенсивность снижения доли кристаллов типа  $FeB$  выше, чем боридов  $Fe_2B$ . При увеличении количества проходов электронного луча происходит рост интенсивности рефлексов, соответствующих боридам железа относительно отражений фазы  $\alpha$ -железа матричного материала.



а



б



в

Рис. 6. Дифракционные картины, снятые с поверхностного слоя, сформированного двукратной вневакуумной электронно-лучевой наплавкой аморфного бора: а - на глубине 100 мкм; б - на глубине 300 мкм; в - на глубине 600 мкм

Фотографии различных участков покрытия, сформированного методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки карбида бора на сталь 20, представлены на рис. 7 в, г. На снимках можно выделить две основные структурные составляющие. Первая из них представляет собой микрообъемы феррита округлой формы (рис. 7 в). Установлено, что внутри них могут выделяться карбиды пластинчатого типа (рис. 7в), толщиной  $\sim 15$  нм. Межпластинчатое расстояние в эвтектоиде составляет  $\sim 100\dots 150$  нм. Другая структурная составляющая, характерная для наплавки карбида бора, представляет собой пластинчатую эвтектику (рис. 7 г). Эвтектика предположительно состоит из вязкой ферритной составляющей и высокопрочных выделений  $Fe_2B$ . Тем не менее, проведенный в данной работе анализ картин дифракции не подтвердил присутствия в исследуемой системе боридов такого типа. Более того, тщательный анализ полученных электронограмм показал, что образующиеся выделения на основе бора не соответствуют по межплоскостным расстояниям ни одному типу боридов, представленных в базе *ICDD PDF 4+*. Наиболее близкие параметры решетки имеют бориды  $Fe_{23}B_6$  и  $Fe_{23}B_3C_3$ .

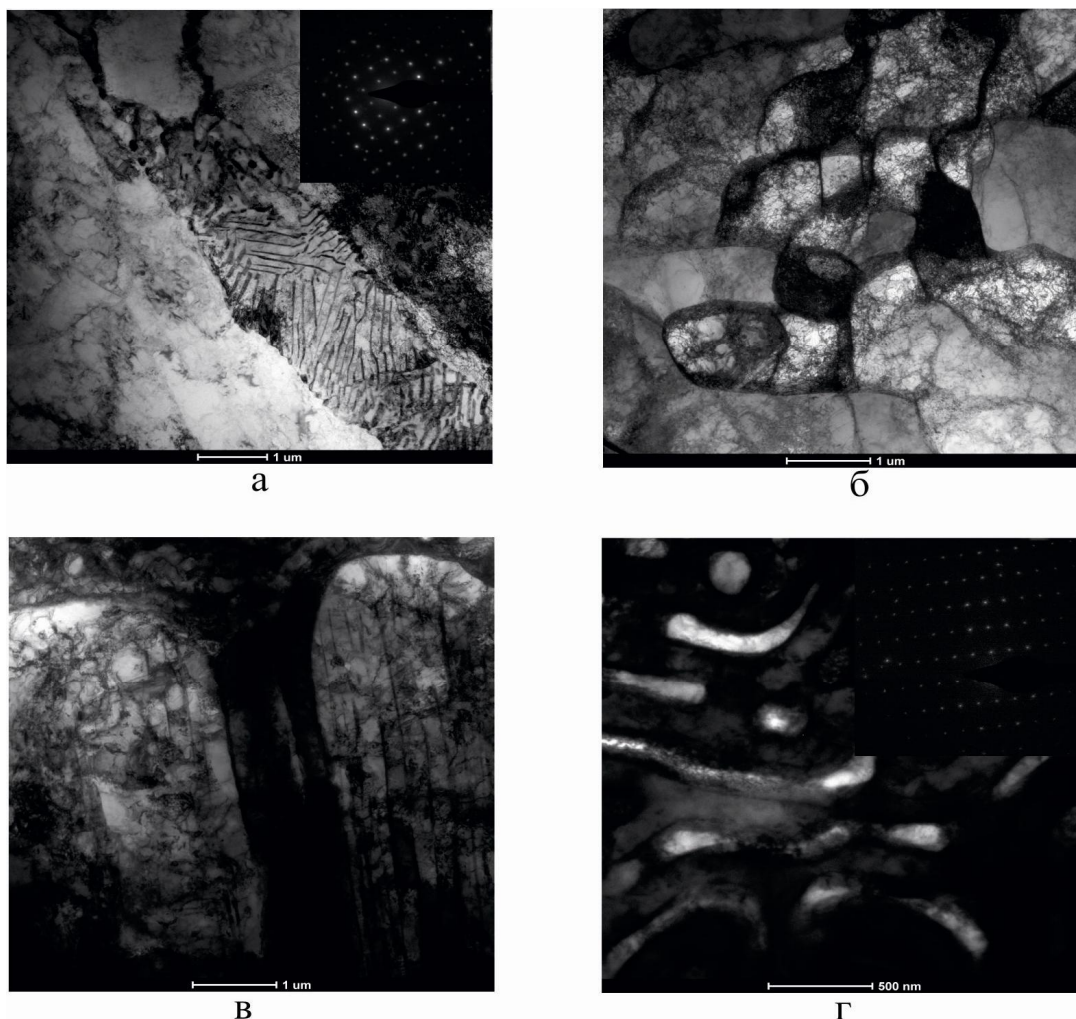


Рис. 7. Тонкое строение боридных покрытий, полученных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков аморфного бора (а, б) и карбида бора (в, г)

**В четвертом разделе** представлены результаты триботехнических испытаний, контактно-усталостной выносливости и ударной вязкости. Определение показателей износостойкости и антифрикционных свойств наплавленных слоев, полученных методом вневакуумной электроннолучевой обработки, проводилось на машине трения СМТ-1 по схеме «диск – плоскость». Определяли величину коэффициента трения и объема изношенного материала. Установлено, что лучшими показателями износостойкости и антифрикционными свойствами обладают боридные слои, сформированные при воздействии электронного луча с током пучка 5 мА

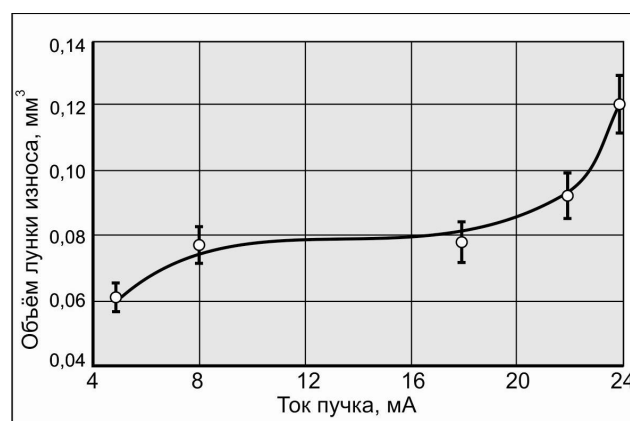


Рис. 8. Зависимость износостойкости поверхностных слоев, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки карбида бора на сталь 20, от величины тока пучка электронов

(рис. 8). Увеличение силы тока пучка сопровождается ростом коэффициента трения и снижением показателей износостойкости.

Сравнительный анализ свойств поверхностных слоев, сформированных с использованием различных боронасыщающих сред показывает, что наилучшими показателями износостойкости обладают материалы, полученные при наплавке порошка карбида бора (рис. 9). Результаты исследований свойств покрытий, полученных с использованием технологий борирования в порошковых средах аморфного бора и карбида бора и их сравнение со свойствами боридных слоев, полученных методом ВЭЛО свидетельствуют о том, что максимальной износостойкостью обладает боридный слой, полученный по технологии двукратной вневакуумной электронно-лучевой наплавки аморфного бора (рис. 10).

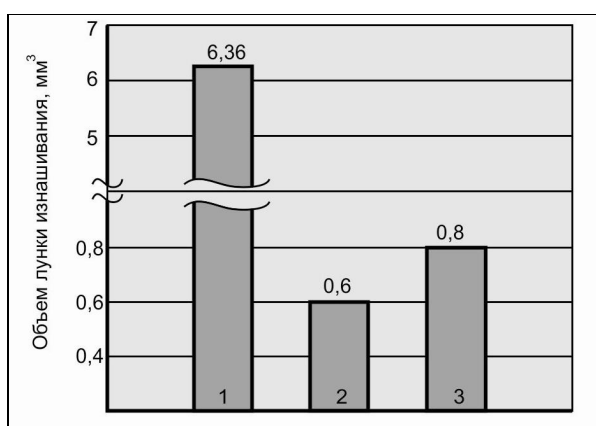


Рис. 9. Износостойкость стали 20 и боридных слоев, сформированных методом электронно-лучевой наплавки боросодержащих порошков: 1 - сталь 20; 2 - карбид бора, ток 5 мА, 1 проход; 3 - аморфный бор, ток 5 мА, 1 проход

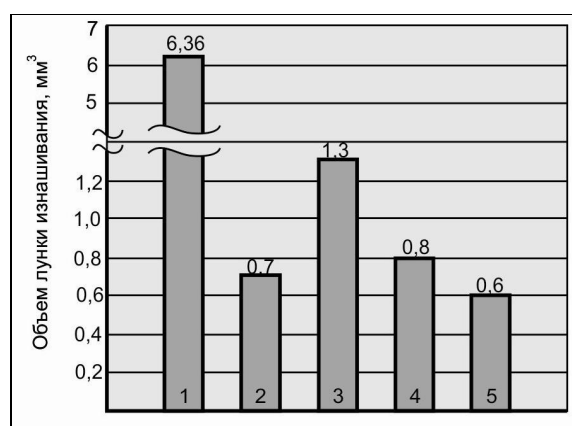


Рис. 10. Результаты изнашивания стали 20 и боридных слоев, сформированных различными методами: 1 - сталь 20; 2, 3 - печное борирование с использованием карбида бора и аморфного бора; 4, 5 - электронно-лучевая наплавка карбида бора и аморфного бора, I = 5 мА

Испытания на износостойкость покрытий при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы проводились по схеме «диск – плоскость». Наивысшие характеристики износостойкости зафиксированы у стали 20 после двукратной электронно-лучевой обработки (рис. 11).

Результаты испытаний материалов на изнашивание в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц представлены на рис. 12. Относительная износостойкость стали 20, борированной с использованием технологии печного нагрева, составляет 3,1. Наибольший уровень относительной износостойкости (~ 4,2...4,6) имеют стали с покрытиями, полученными по технологии вневакуумной электронно-лучевой обработки.

При выполнении настоящей работы испытания материалов в условиях газоабразивного изнашивания осуществлялись на установке типа "центробежный ускоритель". Результаты исследований показывают, что на характер износа в значительной степени влияет угол атаки газоабразивного потока (рис. 13 а,б).



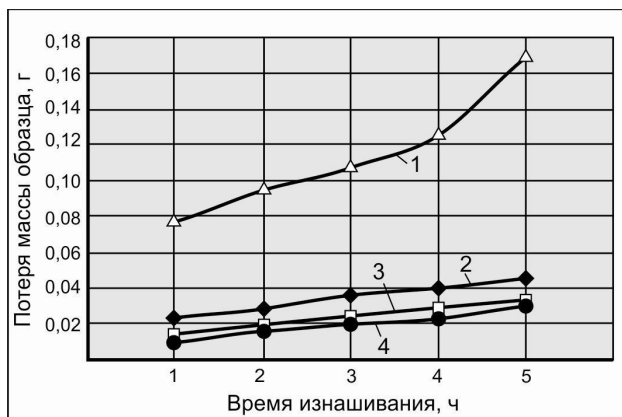


Рис. 11. Результаты изнашивания материалов в условиях трения о нежестко закрепленные частицы абразива: 1 - сталь 20; 2 - боридные слои, сформированные по технологии электронно-лучевой наплавки аморфного бора за один проход; 3 - за два прохода; 4 - за три прохода

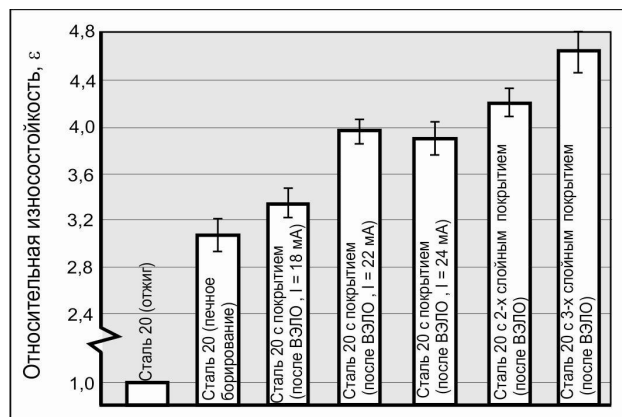
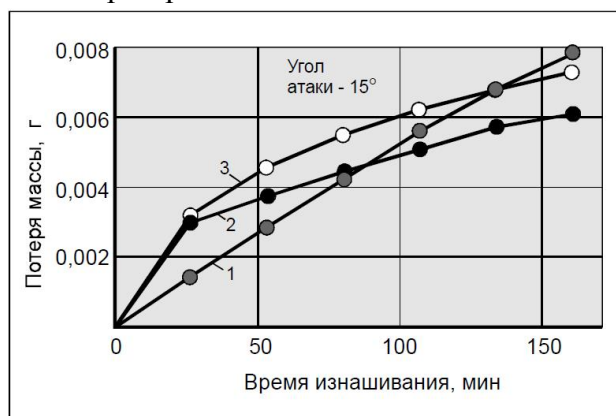
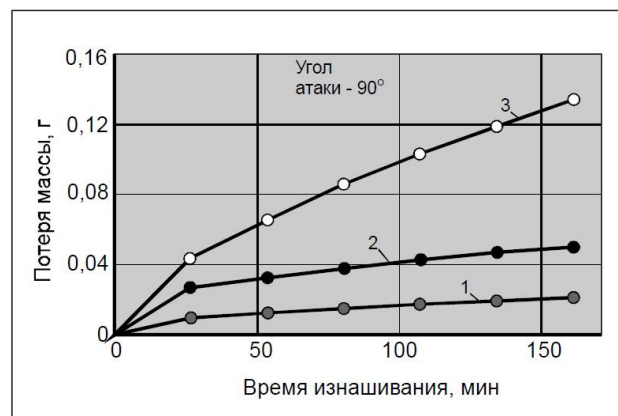


Рис. 12. Относительная износостойкость низкоуглеродистой стали 20 и боридных слоев, сформированных по технологии печного борирования и вневакуумной электронно-лучевой наплавки боросодержащих материалов



а



б

Рис. 13. Зависимости потери массы от времени испытаний по схеме газоабразивного изнашивания боридных покрытий, полученных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки одного (1), двух (2), трех (3) слоев порошка аморфного бора: угол атаки абразива  $15^{\circ}$  (а),  $90^{\circ}$  (б)

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что в условиях газоабразивного изнашивания более высокие результаты обеспечивают боридные слои, полученные по технологии ВЭЛО. Использование этой технологии целесообразно в тех случаях, когда угол атаки абразива составляет величину 15 градусов и менее.

С целью определения способности боридных покрытий выполнять защитные функции при воздействии локальных контактных нагрузок в работе проводились испытания на контактно-усталостную выносливость.

Наилучшими характеристиками сопротивления контактно-усталостному разрушению обладает покрытие, полученное по технологии ВЭЛО (рис. 14). Начало интенсивного выкрашивания по краям лунки у него начинается после прило-

жения более 8 миллионов циклов нагружения. При этом пятно контакта имеет меньший диаметр, чем на образцах стали 20 и после печного насыщения в твердых засыпках. На образцах после печного борирования образование питтингов начинается по достижении  $N_{ц} = 4,6 \cdot 10^6$ . Количество циклов до начала образования питтингов на стали 20 равно  $N_{ц} = 1,9 \cdot 10^6$  (рис. 15).

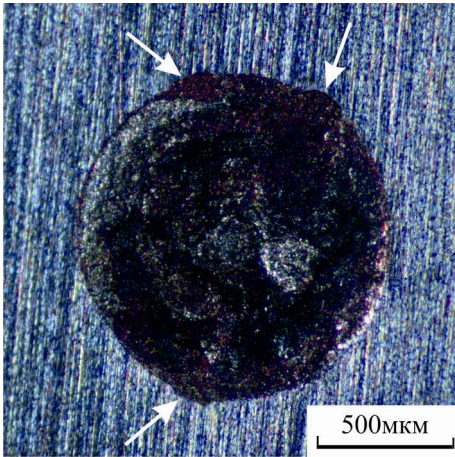


Рис. 14. Внешний вид отпечатка, полученного при испытаниях боридного покрытия, полученного по технологии ВЭЛО на контактно-усталостную выносливость. Стрелками показаны питтинги, возникающие по краям отпечатков

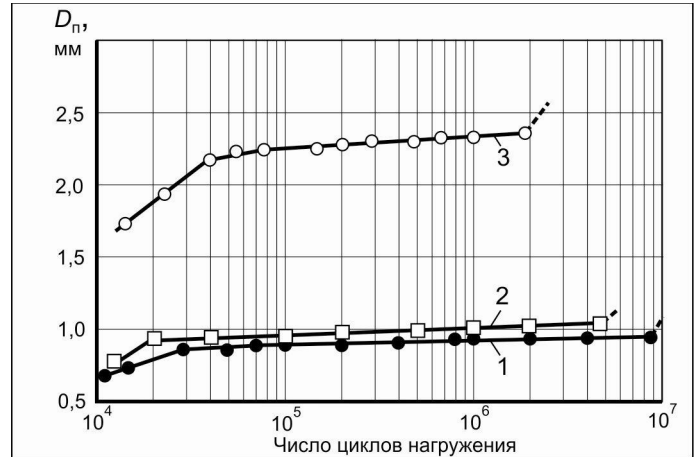


Рис. 15. Контактная-усталостная выносливость борированных слоев, полученных методами вневакуумной электронно-лучевой обработки (1) и печного борирования в твердых засыпках (2), а также основного металла (стали 20).  $D_{п}$  - диаметр пятна контакта

**В пятом разделе** «Технологические рекомендации и область применения результатов исследований» приведены результаты апробации полученных результатов, описаны перспективы их промышленного использования. Анализ экспериментальных данных, полученных при проведении механических и триботехнических свидетельствует о том, что технологические процессы вневакуумной электронно-лучевой наплавки боросодержащих порошковых материалов целесообразно использовать для упрочнения быстроизнашиваемых элементов горношахтного оборудования, эксплуатирующихся в условиях сухого трения скольжения, трения о закрепленные и нежестко закрепленные частицы абразива. Апробация результатов проведена в ООО «ЭкспертНефте-Газ» на примере упрочнения буровых лопаток. Показано, что в условиях бурения мягких грунтов стойкость лопаток с разработанным покрытием в 1,9 раза выше стойкости лопаток, упрочненных по технологии печного борирования.

Результаты, полученные при структурных исследованиях, а также при триботехнических и механических испытаниях, используются в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении», а также бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технологии материалов».



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Вневакуумная электронно-лучевая обработка представляет собой эффективный технологический процесс, позволяющий с высокой производительностью наплавлять боросодержащие порошки и формировать на низкоуглеродистой стали боридные слои повышенной толщины. Наиболее высокий уровень износостойкости обеспечивает электронно-лучевая наплавка порошка карбида бора. Применение в качестве насыщающего компонента порошка аморфного бора приводит к снижению характеристик износостойкости в 1,5 раза, что обусловлено формированием структуры преимущественно эвтектического типа и малым содержанием боридных кристаллов.

2. Наплавка боросодержащих порошков обеспечивает рост износостойкости стали в условиях трения о закрепленные частицы абразива. По сравнению со сталью 20 наибольший уровень относительной износостойкости (~4,2...4,6) имеют образцы с покрытиями, полученными по технологии двух- и трехкратной наплавки аморфного бора. Относительная износостойкость стали 20, борированной с использованием технологии печного нагрева, составляет 3,1.

3. Для повышения концентрации бора в поверхностных слоях упрочняемой стали целесообразна наплавка двух слоев боросодержащих порошков. Такой подход позволяет увеличить толщину боридного слоя почти в полтора раза. Трехслойная наплавка не только не увеличивает износостойкость борированного слоя, но и приводит к ее снижению по сравнению с наплавкой двух слоев, что обусловлено формированием на поверхности стали 20 плотного слоя кристаллов борида железа  $FeB$  с высоким уровнем внутренних напряжений, приводящих к выкрашиванию крупных объемов материала.

4. Технологическим параметром, позволяющим эффективно управлять глубиной переплавленного слоя, концентрацией в нем бора и объемной долей боридов железа, является сила тока электронного пучка. Величина этого параметра определяет толщину зон доэвтектического, эвтектического и заэвтектического состава. Показано, что микротвердость слоя в диапазоне  $HV$  10000...12000 МПа обеспечивает вневакуумная электронно-лучевая наплавка карбида бора при токах пучка в диапазоне от 5 мА до 18 мА. При таких параметрах наплавки толщина упрочненного слоя находится в пределах от 300 до 900 мкм.

5. Наплавленные электронным лучом боридные покрытия характеризуются высоким уровнем контактно-усталостной выносливости и, благодаря большой толщине, а также высокой твердости, могут быть использованы для изготовления деталей, работающих в условиях действия повышенных локальных нагрузок. Контактно-усталостная выносливость наплавленных боридных слоев в 2 раза превышает выносливость покрытий, сформированных по технологии печного борирования. Высокопрочные боридные слои, прочно связанные со сталью, способствуют охрупчиванию основного металла при проведении динамических испытаний на ударную вязкость. После электрон-

но-лучевой наплавки ударная вязкость стали 20 с боридными слоями почти в два раза ниже по сравнению с исходным неупрочненным состоянием.

6. При наплавке аморфного бора в поверхностном слое образуются бориды типа  $FeB$  и  $Fe_2B$ . Увеличение количества наплавленных слоев приводит к росту доли фазы  $FeB$ . В направлении от поверхности к основному металлу содержание боридов снижается. Интенсивность снижения доли кристаллов типа  $FeB$  выше, чем боридов  $Fe_2B$ .

7. Установлено, что в условиях ускоренного охлаждения наплавленного покрытия вместо равновесной фазы  $Fe_2B$  в эвтектике типа «борид железа –  $\alpha$ - $Fe$ » возможно формирование метастабильных боридных фаз. Высокопрочная фаза, выделяющаяся в пластинчатой эвтектике при наплавке аморфного бора, по межплоскостному расстоянию соответствует соединению  $Fe_{23}B_6$ , а при наплавке карбида бора - соединениям типа  $Fe_{23}B_6$  и  $Fe_{23}B_3C_3$ .

8. Установлено, что в зоне доэвтектического типа, образующейся при вневакуумной электронно-лучевой наплавке аморфного бора, в процессе охлаждения  $\alpha$ -фазы выделяются карбиды пластинчатого типа. Толщина отдельных пластин в образующемся эвтектоиде составляет  $\sim 15$  нм, межпластинчатое расстояние – 100...150 нм.

9. Испытания буровых лопаток, проведенные в ООО «ЭкспертНефтеГаз» в условиях бурения мягких грунтов, показали, что стойкость лопаток с разработанным покрытием в 1,9 раза выше стойкости лопаток, упрочненных по технологии печного борирования. Результаты, полученные при структурных исследованиях, а также при триботехнических и механических испытаниях, используются в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении», а также бакалавров и магистров по направлению "Материаловедение и технологии материалов".

#### **Основное содержание диссертации отражено в работах:**

1. Теплых А.М.. Использование электронно-лучевого нагрева для формирования на сталях износостойких поверхностных слоев // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. - 2011. - № 3(52). - С. 91-94.

2. Особенности влияния электронно-пучковой обработки на поверхность стали после электровзрывного боромеднения / Е. А. Будовских, В. Е. Громов, Е.А. Дробяз, Ю. Ф. Иванов, Е. С. Ващук, А.М. Теплых // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. - 2011. - № 3(52). - С. 69-72.

3. Boride Coatings Structure and Properties, Produced by Atmospheric Electron-Beam Cladding / А.М. Teplykh, М. G. Golkovskiy, I. A. Bataev, E. A. Droblyaz S. V. Veselov, E.D. Golovin, A. A. Bataev, A. A. Nikulina // Advanced Materials Research Vols. 287-290 (2011) pp. 26-31.

4. Борирование низкоуглеродистой стали с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой обработки / А.М. Теплых, М.Г. Голковский, А.А. Батаев, В.А. Батаев, Е.А. Дробяз, Е.Д. Головин, А.С. Гонтаренко // Труды международной конференции по физической мезомеханике, компью-

терному конструированию и разработке новых материалов, (Томск, 5-9 сентября 2011 г). Томск: ИФПМ СО РАН. - 2011.- С. 494-496.

5. Насыщение поверхностных слоев низкоуглеродистой стали бором с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой обработки / А.М. Теплых, М.Г. Голковский, Е.А. Дробяз, Д. С. Кривеженко // Труды XII Всероссийской научно-технической конференции "Наука. Промышленность. Оборона" (Новосибирск, 20-22 апреля 2011). Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. С. 608-609.

6. Формирование металлокерамических покрытий методом вневакуумной электронно-лучевой обработки / А.М. Теплых, Е.А. Дробяз, Д. С. Кривеженко // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (Новосибирск, 3-5 декабря 2010). Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. С. 182-183.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60 x 84/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ № 1156. Подписано в печать 21.11.2011 г.