

На правах рукописи



ШЕВЧУК ЕВГЕНИЯ ПЕТРОВНА

**ФОРМИРОВАНИЕ БОРИДНЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ С  
ОБШИРНОЙ ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНОЙ НА УГЛЕРОДИСТОЙ  
СТАЛИ**

Специальность 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Барнаул – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,  
кафедра общей и экспериментальной физики

**Научный руководитель:** **Плотников Владимир Александрович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Клопотов Анатолий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра прикладной механики и материаловедения, профессор

**Иванов Сергей Геннадиевич**, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», ведущий научный сотрудник научного управления

**Ведущая организация:** **ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»**

Защита состоится «20» июня 2023 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.269.03 при ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет» по адресу: 656049, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61, ауд. 416.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,  
[https://www.asu.ru/science/dissert/physic\\_diss/](https://www.asu.ru/science/dissert/physic_diss/)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Волков Николай Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Создание функционально-градиентных поверхностных слоев, обладающих уникальными физико-механическими свойствами, привлекают особое внимание, что делает актуальными исследования, направленные на создание таких поверхностей, особенно при поверхностной обработке сталей [1,2]. Решение этой проблемы требует совершенствования существующих и создания новых методов обработки металлов для повышения их эксплуатационной стойкости.

Одним из основных способов поверхностного упрочнения стальных деталей является химико-термическая обработка (ХТО) [1]. В данной работе поверхностное упрочнение стали 20 осуществлено путем термохимического диффузионного упрочнения – борированием [2].

Химико-термическая обработка вызывает существенные изменения структуры и напряженного состояния сталей. Фундаментальной основой формирования градиентных поверхностных слоев являются диффузионные процессы. В этой связи изучение диффузионных процессов, протекающих при перемещении мельчайших частиц вещества или их комплексов в крайне неравновесных условиях, кинетики превращений, происходящих в металле и факторов, влияющих на эту кинетику, а также сопутствующих явлений адсорбции и десорбции, растворение и кристаллизация, является актуальной задачей. Значение диффузионного упрочнения поверхности, в том числе и борированием, возрастает в связи с необходимостью создания специальных материалов для развивающихся областей техники [3].

При изучении процессов борирования основные усилия должны быть сосредоточены на изучении характера образования, роста и свойств образующейся диффузионной зоны, в которой распределен бор. Для реализации различных способов получения диффузных зон требуется комплексный подход. Во-первых, в ходе решения задач повышения эксплуатационных свойств материалов, необходим расчет новых составов обмазок, паст, шихт. Во-вторых, необходимо решать задачи активизации диффузионных процессов, требующие разработки новых и совершенствование уже имеющихся методов ХТО, особенно с позиции снижения времени термического воздействия. Существенным недостатком ХТО, осуществляемой традиционными методами, является значительная длительность процесса, а, значит, и большая себестоимость упрочнения.

Соединения системы Fe-B имеют большие перспективы практическое применение благодаря комплексу уникальных свойств, таких как тугоплавкость, высокая микротвердость, химическая устойчивость в различных агрессивных средах и другие. Благодаря такому комплексу свойств они могут найти применение, например, в атомной энергетике [4].

В данной работе основное внимание уделено разработке методов интенсификации ХТО, а также расчету составов бор содержащей шихты для упрочнения поверхностных слоев, в частности стали 20.

**Степень разработанности темы исследования.** Существует множество способов получения диффузных слоев боридов железа в ходе химико-

термической обработки сталей при в среде борсодержащих порошков, обмазок, паст и т. п. Борированием сталей с применением шихты, в состав которой входила борная кислота, занимались В.Н. Корнопольцев, А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, Л.В. Давидян, Ю.М. Домбровский, М.С. Степанов. Как правило, процесс борирования осуществлялся традиционно путем многочасовых выдержек при высокой температуре в печах. Борирование в условиях индукционного нагрева или при использовании метода микродугового нагрева осуществляли гораздо реже. В качестве борсодержащего компонента применяют: обезвоживаемую борную кислоту, восстанавливаемую до бора алюминием или магнием; карбид бора или бор аморфный; порошковую смесь борной кислоты, оловянистой бронзы  $\text{BrO}_{10}$ , а также оксида меди и окиси хрома (в качестве балластной добавки использовалась окись алюминия, в качестве активаторов – смесь  $\text{NaF}$  и  $\text{KBF}_4$ ). Также насыщение бором из твердой фазы осуществляется в порошках карбида бора, ферробора или аморфного бора. В качестве разбавителей используют оксид алюминия и карбид кремния, активаторами служат хлорид аммония, карбонат натрия, фторобораты аммония, калия или натрия. Однако время борирования даже при индукционном воздействии составляет 4-8 часов.

**Цели и задачи:** Исследование процессов формирования обширной диффузионной зоны в ходе борирования углеродистой стали, ее структурное состояние, разработка методов интенсификации диффузионных процессов в поверхностных слоях.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

1. Разработать составы борсодержащих насыщающих паст и шихты для борирования поверхностных слоев углеродистых сталей.
2. Разработать методы активизации диффузионных процессов в поверхностных слоях углеродистой стали 20 при борировании в ходе микродугового воздействия, в ходе индукционного воздействия и в ходе борирования в муфельной печи.
3. Исследовать механические свойства (распределение микротвердости по сечению), структуру, фазовый состав диффузионной зоны в стали 20.
4. Определить параметры диффузионных процессов при насыщении поверхностных слоев углеродистой стали 20 бором путем анализа макроскопически обширной диффузионной зоны.

**Научная новизна:**

1. Разработан метод интенсификации диффузионных процессов при борировании стали 20 путем обработки индукционными токами при температуре  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  обмазки из легкоразлагаемой борсодержащей шихты, обеспечивающий в течение 5, 10 и 15 минут формирование диффузионной зоны размером 660-1000 мкм, содержащей преимущественно соединения  $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$ , распределенных в  $\alpha$ -матрице.

2. Показано, что распределение боридов железа в упрочненном поверхностном слое при формировании обширной диффузионной зоны осуществляется по схеме:  $\text{FeB} \rightarrow \text{Fe}_2\text{B} \rightarrow (\alpha\text{-фаза} + \text{B}) \rightarrow \text{металл основы}$ .

3. При использовании шихты с добавкой жидкого стекла элементный анализ диффузионной зоны свидетельствует, что распределение бора имеет максимум в интервале 150-200 мкм, а максимум распределения кремния – около 600 мкм.

4. Установлено, что перенос бора в ходе формирования обширной диффузионной зоны при индукционном борировании обеспечивается аномальным диффузионным процессом, коэффициент диффузии бора составил  $1,35 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ , что на 2 порядка выше, чем при традиционном борировании.

5. Установлено, что наиболее оптимальный состав борсодержащей шихты содержит 25 % порошкового железа и 75 % борной кислоты ( $\text{Fe-25\%} + \text{H}_3\text{BO}_3\text{-75\%}$ ), малые добавки аммиака и жидкого стекла увеличивают возможность образования боридов железа.

6. Показано, что в условиях индукционного воздействия формируется структура диффузионной зоны, содержащая высокопрочный слой боридов  $\text{FeB}$  или  $\text{Fe}_2\text{B}$ , толщиной 30,46-65,43 мкм, и композиционного слоя, состоящего из высокопластичной  $\alpha$ -фазы матрицы, упрочненной боридными фазами.

7. Установлено, что введение в область микродугового воздействия борсодержащей шихты также сопровождается формированием обширной диффузионной зоны с преимущественным содержанием боридов  $\text{Fe}_3\text{B}$  с высокими механическими характеристиками. Микротвердость по сечению наплавка-матрица составила 3400-3700 МПа.

#### **Научная и практическая значимость работы:**

Установлено, что насыщение поверхностного слоя углеродистой стали при  $1000^\circ\text{C}$  из шихты, содержащей легкорастворимую борную кислоту, в индукционной печи или в ходе микродугового борирования осуществляется за счет аномально высокого диффузионного массопереноса бора в металлическую матрицу, обеспечивающие формирования обширной диффузионной зоны величиной 900-1000 мкм. Распределение бора в диффузионной зоне примерно совпадает с распределением микротвердости.

Практическое значение результатов работы заключается в разработке наиболее оптимального состава шихты, состоящей из 25%Fe, 75% $\text{H}_3\text{BO}_3$ , малые добавки аммиака, жидкого стекла и угля, позволяющей в течение 5 минут сформировать обширную диффузионную зону, насыщенную боридами железа.

#### **Методология и методы исследования:**

Исследование обширной диффузионной зоны осуществлялось с помощью современных методов и оборудования. Для исследования структуры и фазового состава применялся рентгеноструктурный и рентенофазовый анализ. Для исследования микротвердости использовалась методика ее определения при помощи микротвердомера. Кристаллографическое состояние исследовалось растровой электронной микроскопией. Элементный анализ диффузионной зоны осуществлялся энергодисперсионным микроанализом с помощью приставки, являющейся неотъемлемой частью растровой электронной микроскопии.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Твердофазные реакции на границе раздела борсодержащая среда – упрочняемая матрица из углеродистой стали 20.

2. Обширная диффузионная зона, формируемая индукционным и микродуговым воздействием на поверхностный слой стали 20 и борсодержащую шихту, диффузионные параметры, обеспечивающие аномально высокий массоперенос бора в матрицу.

3. Структурное состояние обширной диффузионной зоны в виде композиционного материала, образованного боридами железа пластичной  $\alpha$ -матрицей.

**Апробация работы.** Основные результаты работы представлены на следующих международных и всероссийских семинарах и конференциях: III Российско-Казахстанская молодежная научно-технической конференция «Новые материалы и технологии» (г. Барнаул, 2015 г.), Международная научная конференция «Актуальные научные исследования в современном мире» (г. Переяслав-Хмельницкий, Украина, 2017 г.), III Всероссийская конференция (с международным участием) «Горячие точки химии твердого тела: от новых идей к новым материалам» (г. Новосибирск, 1-5 октября 2019 г.), VIII Российско-Казахстанская молодежная научно-технической конференция «Новые материалы и технологии» (г. Барнаул, 2020 г.), VI International Conference “Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies” (November 21-24, 2022, Novosibirsk), XXIII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия – 2022» (23-25 ноября 2022, СибГИУ, г. Новокузнецк).

**Публикации.** Результаты работы опубликованы в 19 печатных работах, из них 10 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 статья в журнале, индексируемом наукометрическими базами Web of Science и Scopus, 1 патент на изобретение.

**Объем и структура диссертации.** Текст диссертации состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков, 28 таблиц, 37 формул и список литературы из 162 наименований.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Во введении** дано обоснование актуальности проводимых исследований, поставлена цель проведения данной работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, и представлена структура диссертации.

**В первой главе** приведен литературный обзор анализа диффузионных процессов в бинарных соединениях, механизмы и законы диффузии, кинетика диффузии и особенности образования боридов железа при ХТО, перспективы диффузного борирования. На основе литературных данных сформулированы цели и задачи исследования, произведен анализ диффузионных процессов в бинарных соединениях. Рассмотрены механизмы диффузии в  $\alpha$ -кристаллах, жидкой фазе, а также переход в ГЦК решетку.

**Во второй главе** описаны химико-термические процессы, материалы и образцы, оборудование, способы ХТО для борирования поверхностных слоев материалов, методики проведения экспериментов с применением: нагрева в индукционной печи, микродугового борирования, отжига в муфельной печи, а также методики исследований микротвердости, рентгеноструктурного анализа и микроструктуры поверхностных слоев исследуемых материалов.

В диссертации приведен расчет шихты и паст для борирования, рассмотрен выбор компонентов состава обмазок, произведен расчет количества составляющих, выявлены преимущества выбора обмазки. Паста для борирования в печах, помимо смеси порошков железа и бора (табл. 1) содержала: гидроксид аммония ( $\text{NH}_4\text{OH}$  – 1 мл), активированный уголь, с добавлением жидкого стекла ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (концентрат) 1 мл) или без него. Борирование поверхности осуществлялось при высоких температурах ( $\approx 1000$  °С) в течение 5, 10 и 15 минут в индукционной печи, в течение 5 минут в муфельной печи.

Жидкое стекло при смешивании со смесью порошков борной кислоты и железа (шихтой) образует гелеобразную массу, т. к. происходит химическая реакция, в результате которой образуется кремниевая кислота ( $\text{H}_2\text{SiO}_3$  – белый студенистый осадок, гель), которая, в свою очередь, под действием высокой температуры разлагается на диоксид кремния и воду ( $\text{H}_2\text{SiO}_3 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ). Диоксид кремния – это бесцветные кристаллы, обладающие высокой твердостью и плотностью, не позволяющий качественно нанести обмазку на поверхность образцов, что приводит к малой «сцепляемости» с обработанной поверхностью. Для устранения этого фактора в состав обмазывающей пасты были введены гидроксид аммония и углерод, которые выполняют роль активатора, и позволяют обеспечить надежную «сцепляемость» насыщающей шихты с упрочняемой поверхностью.

Состав шихты представлял собой смесь порошка железа и борной кислоты, смешанных в объемных пропорциях (см. табл. 1).

Таблица 1.

Состав шихты для борирования углеродистой стали 20.

№ состава	Процентное содержание компонентов шихты
1	Fe-75%+ $\text{H}_3\text{BO}_3$ -25%
2	Fe-50%+ $\text{H}_3\text{BO}_3$ -50%
3	Fe-25%+ $\text{H}_3\text{BO}_3$ -75%

Для изучения образования боридных слоев на поверхностях стальных образцов борирование проводилось тремя различными способами: в условиях объемного нагрева в муфельной печи, в условиях поверхностного нагрева в индукционной печи и в условиях микродугового воздействия в зоне электрической дуги.

Для осуществления качественного процесса борирования в нашей шихте при ее нагреве должны протекать следующие реакции: при температуре 50°С происходит разложение активатора  $\text{NH}_4\text{OH}$  на аммиак в виде газа и воды ( $\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow \text{NH}_3\uparrow + \text{H}_2\text{O}$ ,  $2\text{NH}_3\uparrow + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2\uparrow + 5\text{H}_2\uparrow + \text{O}_2\uparrow$ ); при 235°С

происходит разложение борной кислоты на оксид бора и воду ( $2\text{H}_3\text{BO}_3 \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ ); борный оксид вступает в реакцию с углем и образуется чистый бор и угарный газ ( $2\text{B}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{B} + 3\text{CO}_2$ ). В интервале температур от  $500^\circ\text{C}$  до  $1000^\circ\text{C}$  аммиак разлагается на азот и водород в виде газа и исполняет роль переносчика бора в поверхностный слой стали 20, образуя обширную диффузионную зону из боридов железа, распределенных в  $\alpha$ -матрице. Железный порошок в обматке частично окисляется кислородом, выделенным в процессе взаимодействия между собой компонентов обматки, и под действием высокой температуры образуется окалина. Часть железа обматки взаимодействует с бором в соответствии с реакцией  $2\text{H}_3\text{BO}_3 + 5\text{Fe} + 2\text{NH}_4\text{OH} + \text{C} \rightarrow \text{FeB} + \text{B} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{N}_2\uparrow + 8\text{H}_2\uparrow + \text{O}_2\uparrow + \text{CO}_2\uparrow + \text{Fe}$ , образуя в поверхностном слое образцов бориды железа. Выделившийся водород образует с бором соединение  $\text{V}_{10}\text{H}_{14}$ , исполняющее роль переносчика бора вглубь поверхностного слоя стали 20 [5]. Окисление оставшейся части железа обматки сопровождается формированием на его поверхности многослойной окалины, в состав которой может входить несколько оксидных фаз [6].

Известно, что процесс насыщения приповерхностного слоя боридами представляет собой три стадии [7]. Первая стадия происходит на границе «насыщающая среда-стальная матрица», где активные атомы бора поглощаются металлической поверхностью. При этом происходит внедрение атомов бора на вакантные места кристаллической решетки металла [8], на поверхности образуются бориды железа, то есть химические реакции на поверхности приводят к появлению в приповерхностном слое фазы  $\text{Fe}_2\text{B}$  [9].

Вторая стадия – стадия адсорбции – осуществляется совместно с атомарной диффузией бора по межзеренным границам и длится до 0,05 ч, а последующая за ней третья стадия диффузии бора вглубь металла с образованием борированного слоя продолжается до 0,1 ч [10,7]. То есть формируется барьерный слой  $\text{Fe}_2\text{B}$ , через который происходит последующая диффузия атомов бора вглубь матрицы, что приводит к росту боридного слоя и сдвигу его ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) в матрицу [9]. Таким образом, формирование обширной диффузионной зоны осуществляется за счет диффузии бора через слой боридов. В термодинамическом отношении бориды железа нестойки. Низший борид железа  $\text{Fe}_2\text{B}$  разлагается на железо и  $\text{FeB}$ :  $\text{FeB} \rightarrow \text{Fe}_2\text{B} \rightarrow (\alpha\text{-фаза} + \text{B}) \rightarrow \text{металл основы}$  [10; 427].

В экспериментах обширная диффузионная зона, содержащая бориды железа, получена в режиме борирования стальной детали цилиндрической формы ( $h = 35$  мм,  $\text{Ø} 15$  мм) в индукционной печи при температуре  $1000^\circ\text{C}$  в течение 5, 10 и 15 минут. Для нагрева в муфельной печи применялись стальные пластинки ( $35 \times 25 \times 4$  мм), и насыщение поверхностных слоев бором осуществлялось при температуре также  $1000^\circ\text{C}$  в течение 5 минут. Обмазывающие пасты готовились из шихты (см. табл. 1). В качестве активатора в шихту введены углерод и аммиак, в качестве инертной добавки –  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (жидкое стекло). Введение в шихту жидкого стекла совместно с аммиаком в виде гидроксида аммония и углеродом позволило обеспечить надежное сцепление обматки с упрочняемой поверхностью.

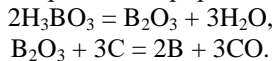


### *Борирование в индукционной печи*

Образцы с нанесенной обмазкой подсушивали и помещали в индуктор индукционной печи, в качестве которой использовали установку Agatron G (номинальное напряжение – 230 В/50 Гц, мощность – 4 кВт). Мощность, а, следовательно, и тепло, выделяемое вихревыми токами, которые наводятся и циркулируют в образце, зависят от частоты переменного магнитного поля. При промышленной частоте 50 Гц концентрация энергии, выделяемой вихревыми токами, незначительна [11] и не превышает несколько Ватт на 1 см<sup>2</sup> поверхности [12]. В цилиндрическом образце из стали 20, помещенном в переменное магнитное поле частотой 50 Гц, при постоянном токе в индукторе, в поверхностном слое выделяется наибольшая тепловая энергия [13].

### *Борирование в условиях микродуговой химико-термической обработки (МДХТО)*

Процесс МДХТО проводился сварочным инвертором «Кедр» при питающем напряжении 220 В и максимальном электрическом токе в цепи 250 А. Напряжение дугообразования - 9-10 В при токах 1-3 А, поэтому оплавления электрода не происходит. В каждом образце сделано 5 витков за 54,05 с. (время 1 витка – 10,81 с, то есть 1 мм пройден примерно за 7 с). Для осуществления замкнутой электрической цепи труба погружалась в угольный порошок, находящийся в поддоне. Глубина погружения трубы в угольный порошок, выполняющий функцию электропроводной среды в цепи электропитания, составляла 15 мм. Процесс МДХТО характеризуется возникновением микродуговых разрядов вокруг электрода, погруженного в шихту, поступающую из дозатора. Фактически микродуговые разряды возникали между частицами железного порошка и поверхностью образца, формируя разогретое пятно до 900-1250 °С [14]. Атомарный бор диффундирует вглубь стального изделия, обеспечивая протекание процесса борирования:



То есть суть процесса микродугового борирования состоит в возникновении расплавленных материалов борсодержащей шихты в поверхностный слой изделия [15].

### *Борирование в муфельной печи*

Лабораторная печь SNOL 30/1300 оснащена закрытыми нагревателями и осуществляет равномерный и быстрый нагрев с четырех сторон образца от 50 °С до 1300 °С. Работает печь при номинальной мощности – 4,6 кВт, напряжение питающей сети – 230 В, частота переменного тока – 50 Гц.

### *Структурные исследования*

Для исследования все образцы заливались в специальную форму с эпоксидной смолой ЭДП-2 и подвергались шлифованию, полированию и травлению электрохимическим методом и только затем проводили съемку рельефа поверхности образцов и микроанализ участков матрицы и частиц вторичных фаз. Химическое травление осуществляли при следующем составе: 2 части соляной кислоты (67%), и 1 часть воды (33%).

Измерения микротвердости образцов выполняли на микротвердомере ПМТ-3. Исследования тонкой структуры и микродифракционный фазовый анализ образцов проводились на просвечивающем растровом электронном микроскопе JEOLJSM – 6390LV с рентгеновским микроанализатором EOL JED-2300/JED-2300F в режиме вторичных и обратно рассеянных электронов при ускоряющем напряжении 25 кВ, а также на растровом электронном микроскопе «Quanta 3D 200i». Для определения структурно-фазового состояния сплава проведены рентгено-дифракционные исследования на дифрактометре X'pert PRO. Для изучения общего характера микроструктуры использовали оптический микроскоп «НЕОРНОТ-21».

**В третьей главе** представлены результаты исследований микротвердости, рентгено-структурного и рентгено-фазового анализов, микроструктуры поверхностных слоев, расчеты коэффициентов диффузии и размеров обширной диффузионной зоны, полученные борированием в условиях индукционного нагрева, нагрева в муфельной печи, микродугового борирования. сформулированы идеи обширной диффузионной зоны

**3.1. Борирование в индукционной печи.** Борирование поверхности стальных образцов осуществлялось с помощью нагрева в индукционной печи при 1000 °С в течение 5, 10 и 15 минут. Состав шихты для борирования (см. табл. 1) кроме основных компонентов содержал гидроксид аммония, активированный уголь и жидкое стекло [16].

Оптимальные результаты показали образцы с обмазкой (см. табл. 2), состоящей из смеси основных компонент (75%Н<sub>3</sub>ВO<sub>3</sub> и 25%Fe) и малых добавок гидроксида аммония, угля и жидкого стекла (см. табл. 2).

Таблица 2.

Состав пасты 75%Н<sub>3</sub>ВO<sub>3</sub> и 25%Fe.

№ образца	Время нагрева, мин	Состав добавки на 1,5 гр состава шихты
1	5 мин	1 мл гидроксида аммония, 0,32 гр угля и с добавлением 1 мл разбавленного водой жидкого стекла
2	5 мин	1 мл гидроксида аммония, 0,32 гр угля без добавления жидкого стекла
3	10 мин	1 мл гидроксида аммония, 0,32 гр угля без добавления жидкого стекла
4	15 мин	1 мл гидроксида аммония, 0,32 гр угля и с добавлением 1 мл разбавленного водой жидкого стекла

**3.2. Борирование в условиях микродуговой химико-термической обработки (процесс МДХТО).**

Процесс МДХТО осуществлялся при температуре изделия 900-1250 °С в местах контакта микродуг. Отметим, что нагрев борной кислоты в ходе МДХТО сопровождается образованием борного ангидрида, который затем восстанавливается до атомарного состояния бора. Во время борирования атомарный бор диффундирует вглубь стального изделия, обеспечивая протекание процесса борирования. Распределение микротвердости в области об-

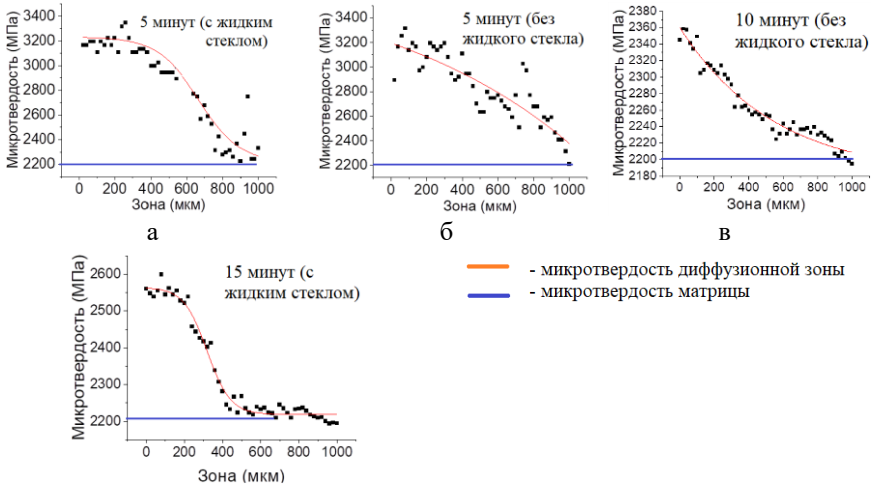
ширной диффузионной зоны связано с образованием и распределением фазы  $Fe_3B$  в ней. Распределение фазы  $Fe_3B$  и  $\alpha$ -фазы в диффузионной зоне свидетельствует о формировании композиционной структуры в поверхностном слое стали 20. Структура композита в диффузионной зоне свидетельствует о максимально возможной адгезионной прочности в системе обширная диффузионная зона- $\alpha$ -матрица. Граница раздела это всегда скачок свойств, что является основным дефектом при упрочнении поверхности. В нашем случае граница раздела как элемент структуры отсутствует.

**3.3 Борирование в муфельной печи.** Борирование стальных пластинок с обмазкой осуществлялось в муфельной печи при температуре  $\approx 1000$  °C в течение 5 минут. Состав шихты для борирования был идентичен, что и в случае борирования с индукционным нагревом. На поверхность образца 5, показавшего лучшие результаты при исследовании, нанесена паста – 50% Fe+50%  $H_3BO_3+NH_4OH+C+Na_2SiO_3$ .

**3.4 Исследование распределения микротвердости по диффузионной зоне.** Измерениями микротвердости была определена область в поверхностном слое образцов, которая получила название «обширная диффузионная зона». Если распределение микротвердости для боридных слоев будет иметь резкий переход к основному материалу образца, то, как правило, это приводит к самопроизвольному скалыванию более хрупкого борида  $FeB$  [17]. Этот принципиальный недостаток можно исключить, если борированный слой будет представлять собой обширную диффузионную зону.

*3.4.1 Диффузионная зона после борирования в индукционной печи.* Как показано на рис. 1 – распределение микротвердости по сечению образцов, полученных индукционным поверхностным нагревом при температуре 1000 °C (а, б) – в течение 5 минут; (в) – в течение 10 минут; (г) – в течение 15 минут, изображает плавный переход от насыщенной боридами поверхности к матрице из стали 20, представляющей собой  $\alpha$ -фазу железа.

Данные распределения микротвердости по сечению образцов показывают, что микротвердость поверхностного слоя при индукционном борировании повысилась примерно до 3350 МПа по сравнению с микротвердостью подложки и уменьшается примерно до 2600 МПа по мере увеличения времени борирования до 15 минут. Диффузионное распределение бора по диффузионной зоне монотонно снижается и после 900 мкм (образец 1) микротвердость достигает значения микротвердости отожженной  $\alpha$ -фазы железа – примерно 2207 МПа. Из данных рис. 1, величина диффузионной зоны в образце 1 – около 900 мкм, в образцах 2 и 3 – около 1000 мкм, в образце 4 – около 660 мкм, такой размер диффузионной зоны может свидетельствовать об аномально высоком массопереносе бора в матрицу.



Г

Рис. 1. Распределение микротвердости по сечению диффузионной зоны после термической обработки в индукционной печи: а – образца 1, б – образца 2, в – образца 3, г – образца 4 (состав обмазки см. табл. 2).

3.4.2 *Диффузионная зона после микродугового борирования.* Распределение микротвердости в диффузионной зоне при МДХТО представлено на рис. 2. Геометрия диффузионного пространства свидетельствует также об аномально высокой диффузионной подвижности бора, участвующего в формировании макроскопически обширной диффузионной зоны. Следует отметить, что формирование упрочненного валика длиной в 1 мм осуществлялось в течение 7 с.

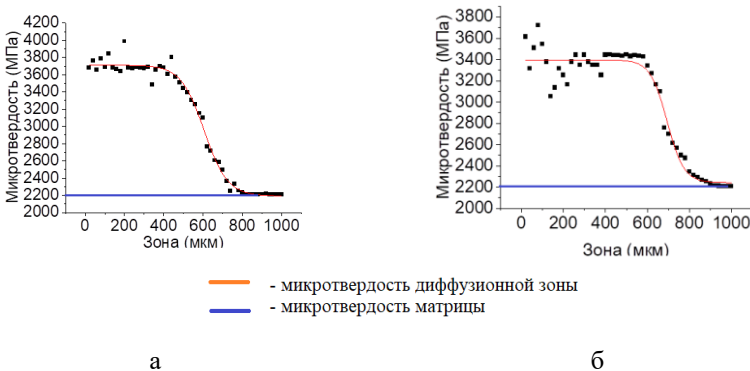


Рис. 2. Распределение микротвердости по сечению диффузионной зоны после МДХТО: а – образца 2; б – образца 3 (состав шихты: образец 2 – Fe-50%+H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>-50%; образец 3 – Fe-25%+H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>-75%).

Измерения микротвердости боридных фаз показали, что микротвердость зоны наплавки образца 2 в среднем составила около 3400 МПа, а образца 3 – 3700 МПа (рис. 2, б), что в 1,5 раза выше, чем микротвердость ис-

ходной стали – 2207 МПа. Анализ геометрии диффузионного пространства (рис. 2) показал, что размер диффузионной зоны образца 2 составил примерно 880 мкм, образца 3 около 960 мкм.

**3.4.3 Диффузионная зона после борирования в муфельной печи.** Распределение микротвердости в диффузионной зоне после отжига в муфельной печи приведено на рис. 3.

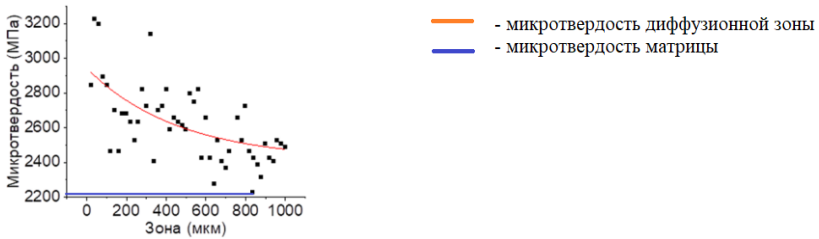


Рис. 3. Распределение микротвердости по сечению диффузионной зоны образца 5 после термической обработки в муфельной печи (состав обмазки: 50%Fe+50%Н<sub>3</sub>ВО+NH<sub>4</sub>ОН+С+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>).

Следует отметить, что микротвердость в диффузионной зоне имеет большой разброс значений. Это может характеризовать низкое качество борирования этим способом. Микротвердость образца 5 повысилась по сравнению с микротвердостью подложки, составляющей около 2,207 ГПа, примерно на 31%. Исходя из геометрии диффузионного пространства (рис. 3), размер диффузионной зоны образца 5 составил примерно 840 мкм.

### 3.5 Элементный анализ диффузионной зоны после борирования стали 20 в индукционной печи.

На рис. 4 приведены результаты анализа распределения бора в диффузионной зоне при борировании в индукционной печи. Элементный анализ позволил определить количественное содержание бора в диффузионном пространстве.

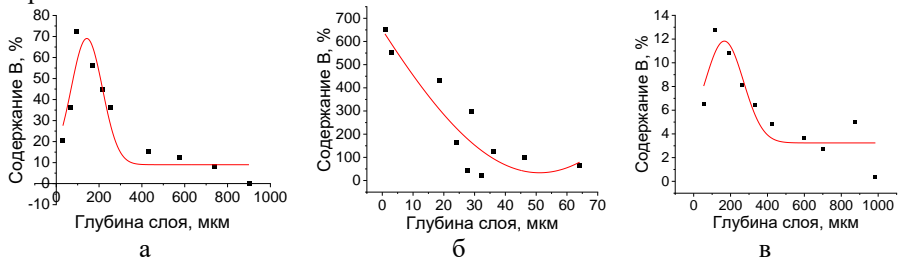


Рис. 4. Распределение бора в диффузионной зоне: а – образец 1 (5 минут); б – образец 3 (10 минут); в – образец 4 (15 минут)

Элементный анализ показал (рис. 5) присутствие кремния в диффузионной зоне образцов при использовании обмазки, содержащей жидкое стекло. В образце 1 кремний выявлен в диффузионной зоне от поверхности образца вглубь до 577,78 мкм (максимальное содержание кремния 9,33 мас. %), в образцах 8 и 9 – кремний выявлен почти по всей диффузионной зоне

(максимальное содержание кремния в образце 3 – 6,2 мас. %, в образце 4 – 0,57 мас. %).

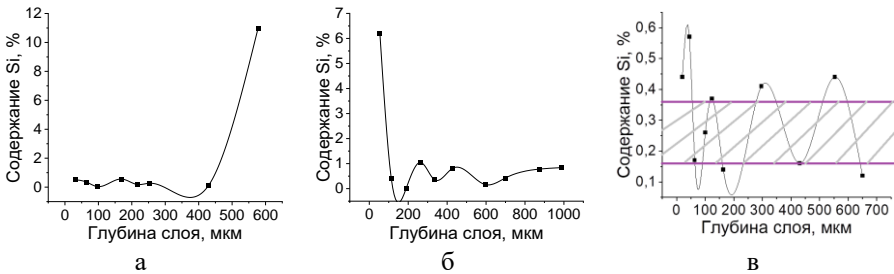


Рис. 5 – Распределение кремния в диффузионной зоне: а – образец 1; б – образец 3; в – образец 4 (заштрихованная часть – содержание кремния в Ст 20)

В табл. 3 приведены данные по геометрии диффузионной зоны и распределению бора и кремния в ней.

Таблица 3.

Сравнительный анализ результатов содержания бора и кремния в диффузионной зоне.

Время нагрева, мин	Величина диффузионной зоны		Положение максимума распределения, мкм		Параметры дисперсии распределения бора, мкм	Содержание, %	
	из элементного анализа, мкм	по распределению микротвердости, мкм	бор	кремний		бор	кремний
5	900	900	142,8 ± 9,5	600	145,8 ± 26,9	72,49	9,33
10	985	1000	51,1 ± 9,2	54,47	129,85 ± 406,14	12,77	6,2
15	650	660	166,3 ± 21,4	34,12	207,3 ± 56,1	64,11	0,57

Данные табл. 3 показывают, что при 5 минутном нагреве максимальное содержание элементов бора выявлено на глубине 96,3 мкм и составило 72,49 весовых %. В то же время при 10 минутах нагрева – максимальное количество бора составило всего 12,77 весовых % на глубине 64,44 мкм. Можно заметить, что наличие в обмазывающей пасте жидкого стекла позволило увеличить количество бора в составе диффузионной зоны.

Кремний образовался в ходе реакции  $4\text{H}_3\text{BO}_3 + \text{Na}_2\text{SiO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{SiO}_3 + \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 5\text{H}_2\text{O}$  под действием высокой температуры.

Известно, что при борировании кремний диффундирует из зоны боридов вглубь матрицы, обогащая борированный слой  $\alpha$ -фазы за счет вытеснения углерода из исходной  $\alpha$ -матрицы [18]. В процессе борирования происходит перераспределение легирующих элементов между боридным слоем и матрицей. Таким образом, можно предположить, что кремний обогащает борированный слой бором, вытесняя его из диффузионной зоны в слой боридов [19].

### 3.6 Коэффициент диффузии в ходе борирования стали 20.

Для вычисления коэффициента диффузии будем использовать формулу (1), которой описывают эмпирические зависимости коэффициента диффузии от размера диффузионной зоны и времени борирования [20]:

$$h^2 = 2D\tau, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина диффузионной зоны, м;  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\tau$  – продолжительность процесса, с.

*3.6.1 Коэффициент диффузии бора в стали 20 при нагреве образцов в индукционной печи и при микродуговом борировании.* В табл. 4 приведены вычисленные значения коэффициентов диффузии.

Таблица 4.

Значения коэффициентов диффузии бора через формирующийся слой боридов и  $\alpha$ -фазу железа.

№ образца	$D, \text{м}^2/\text{с}$ (индукционная печь)	№ образца	$D, \text{м}^2/\text{с}$ (МДХТО)	$D, \text{м}^2/\text{с}$ [20]
1	$1,35 \cdot 10^{-9}$	2	$7,16 \cdot 10^{-9}$	$1,82 \cdot 10^{-11}$
2	$1,6 \cdot 10^{-9}$			
3	$0,83 \cdot 10^{-9}$	3	$8,5 \cdot 10^{-9}$	
4	$0,242 \cdot 10^{-9}$			

Как показано в таблице, полученные значения коэффициентов диффузии бора при  $1000^\circ\text{C}$  на два порядка выше значений коэффициента диффузии бора, приведенного в литературе для классического варианта борирования (при  $950^\circ\text{C}$  коэффициент диффузии бора в углеродистой стали равен  $1,82 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$  [20]), что может свидетельствовать об аномально высоком массопереносе бора в диффузионной пространстве в ходе индукционного борирования при  $1000^\circ\text{C}$ .

Высокий уровень диффузионной подвижности бора можно объяснить действием нескольких факторов: температура ( $1000^\circ\text{C}$ ), диффузия бора по границам, газовый массоперенос за счет соединения водорода и бора (бороводород  $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$ ) через барьерный слой боридов, формирующийся в ходе борирования в поверхности матрицы [21].

Разумеется, коэффициент диффузии, определенный из анализа геометрии диффузионной зоны, является усредненной характеристикой процесса борирования и не характеризует диффузионный процесс на его разных стадиях.

*3.6.2 Коэффициенты диффузии бора в стали 20 при отжиге образцов в муфельной печи.* Коэффициент диффузии бора через формирующийся слой боридов возможно было посчитать только для образца 5. Его величина  $D = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ , что несколько меньше, чем коэффициенты диффузии при борировании в индукционной печи и в 6-7 раз меньше, чем при микродуговом борировании.

**3.7 Рентгеноструктурный анализ и анализ фазового состава диффузионной зоны.**

3.7.1. Рентгеноструктурный анализ данных после нагрева в индукционной и муфельной печи. Рассмотрим результаты рентгенофазового анализа диффузионной зоны (рис. 6).

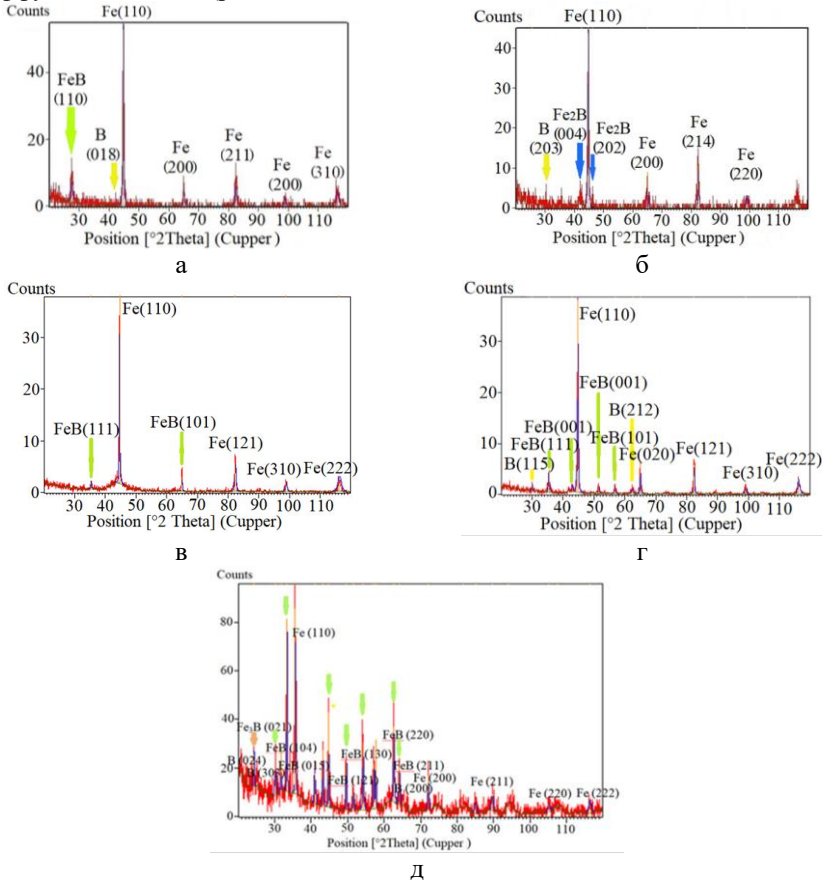


Рис. 6. Рентгеноструктурный анализ и фазовый состав боридных слоев стали 20. Образцы после термической обработки в индукционной печи: а – образца 1, б – образца 2, в – образца 3, г – образца 4; после термической обработки в муфельной печи: д - образец 5 (FeV – зеленые стрелочки, Fe<sub>2</sub>V – синие стрелочки, Fe<sub>3</sub>V – оранжевые стрелочки, В – желтые стрелочки), (нагрев образцов: 1, 2 и 5 – 5 минут, 3 – 10 минут, 4 – 15 минут).

Основными фазами боридных слоев, полученными в экспериментах, являются соединения железа с бором FeV, Fe<sub>2</sub>V и В (см. рис. 6, а, б). Эти фазы в образцах 1, 2 сформировали композиты с микротвердостью 3,395 и 2,837 ГПа соответственно. Как правило, боридные фазы имеют игольчатое строение, сформированное фазами ромбического бориды FeV и тетрагонального бориды Fe<sub>2</sub>V. Однако структура слоев, характер распределения фаз в слое и



распределение микротвердости во многом зависит от технологии получения – способа борирования и условий насыщения (температуры и времени) [7].

Таблица 5.

Расшифровка данных рентгеноструктурного анализа.

№ образца	Фаза	h k l	Кристаллическая решетка
1	FeB	110	Объемоцентрированная кубическая
	B	018	Объемоцентрированная кубическая
2	B	203	Объемоцентрированная кубическая
	Fe <sub>2</sub> B	004	Тетрагональная
	Fe <sub>2</sub> B	202	Тетрагональная
3	FeB	111	Объемоцентрированная кубическая
	FeB	101	Объемоцентрированная кубическая
4	B	115	Ромбоэдрическая
	FeB	111	Объемоцентрированная кубическая
	FeB	001	Объемоцентрированная кубическая
	FeB	001	Объемоцентрированная кубическая
	FeB	101	Объемоцентрированная кубическая
	B	212	Ромбоэдрическая

3.7.2 Рентгеноструктурный анализ диффузионной зоны после микродугового борирования. На рис. 7 представлены рентгенограммы диффузионной зоны образцов 2 и 3.

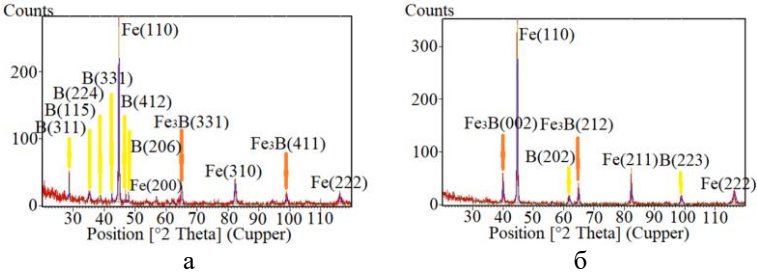


Рис. 7. Рентгеноструктурный анализ образцов: а – образца 2; б – образца 3.

Из анализа рентгенограмм следует, что при борировании шихтой, содержащей 50% борной кислоты и 50% порошка Fe (образец 2), и шихтой, содержащей 75% борной кислоты и 25% порошка Fe (образец 3), выявлена фаза боридов Fe<sub>3</sub>B, представляющая собой тройную фазу с большим содержанием бора, чем в FeB [20,22]. Бориды типа Fe<sub>3</sub>B в сталях существуют лишь в присутствии углерода. В этом случае Fe<sub>3</sub>B являются продуктом замещения углерода бором в карбиде железа Fe<sub>3</sub>C и фактически представляет химическое соединение Fe<sub>3</sub>(B,C). В соединении Fe<sub>3</sub>(B,C) бор может замещать более 40% атомов углерода, не изменяя его кристаллическую структуру. Полученная фаза образуется при высоких температурах (1150-1250 °C) [17].

Расшифровка данных рентгеноструктурного анализа.

№ образца	Фаза	h k l	Кристаллическая решетка
2	B	311	Ромбоэдрическая
	B	115	Ромбоэдрическая
	B	224	Ромбоэдрическая
	B	331	Ромбоэдрическая
	B	412	Ромбоэдрическая
	B	206	Ромбоэдрическая
	Fe <sub>3</sub> B	331	Объемоцентрированная кубическая
	Fe <sub>3</sub> B	411	Объемоцентрированная кубическая
3	Fe <sub>3</sub> B	002	Объемоцентрированная кубическая
	B	202	Ромбоэдрическая
	Fe <sub>3</sub> B	212	Объемоцентрированная кубическая
	B	223	Ромбоэдрическая

3.7.3 Рентгеноструктурный анализ диффузионной зоны после борирования в муфельной печи. Основными фазами боридов в диффузионной зоне образца 5 являются соединения железа с бором FeB, Fe<sub>3</sub>B и B (см. рис. 6, г), сформированные композитами с микротвердостью 2,919 ГПа.

Таблица 7.

Расшифровка данных рентгеноструктурного анализа

№ образца	Фаза	h k l	Кристаллическая решетка
5	B	024	Тетрагональная
	B	303	Ромбоэдрическая
	Fe <sub>3</sub> B	021	Объемоцентрированная кубическая
	FeB	104	Орторомбическая
	FeB	015	Орторомбическая
	FeB	130	Орторомбическая
	FeB	121	Орторомбическая
	FeB	220	Орторомбическая
	FeB	211	Орторомбическая
	B	200	Ромбоэдрическая

### 3.8 Анализ результатов оптической металлографии борированной поверхности стали 20.

Исследование микроструктуры борированных образцов показало, что композиционный материал диффузионной зоны состоит, по крайней мере, из двух фаз боридов и матрицы стали 20 (рис. 8). Характерно, что микроструктура исследуемых образцов окрашена: фаза FeB окрашивается в коричневый цвет, а Fe<sub>2</sub>B сохраняет желтые тона, кристаллы бора окрашены в белый цвет. Отметим, что за 5 минут нагрева до температуры 1000 °С на поверхности образца формируется пористая структура (см. рис. 9, а).

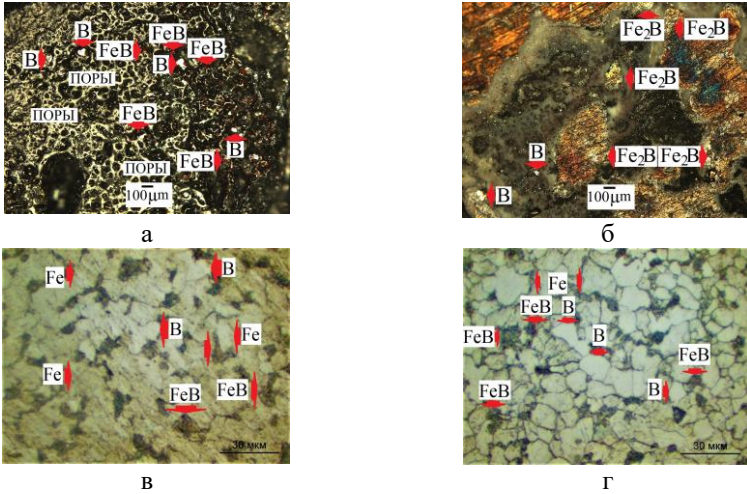


Рис. 8. Бориды в поверхностных слоях образцов стали 20, полученные борированием в индукционной печи (x100): а – образец 1, б – образец 2, в – образец 3, г – образец 4 (нагрев образцов: 1 и 2 – 5 минут, 3 – 10 минут, 4 – 15 минут).

Микроструктура диффузионных слоев образцов представлена включениями бора в железной матрице в виде белых «точек». Фаза (FeB) располагается отдельно от включений бора. Это хорошо видно по степени травления образцов. Кроме этого в приповерхностном слое наблюдались поры размером около 50 мкм (рис. 8, а). В остальных образцах поры отсутствуют. Анализ структуры показывает, что обширная диффузионная зона представляет собой композиционный материал, состоящий из высокопластичной  $\alpha$ -фазы и высокопрочных боридных фаз, содержание которых уменьшается от поверхности вглубь образца.

Появление пористой структуры поверхности связано с быстрой истощаемостью насыщающей смеси, что оптимально в условиях трения с использованием смазочного материала, так как полученная открытая пористость играет роль маслоудерживающих резервуаров.

### 3.9 Анализ результатов растровой электронной микроскопии диффузионной зоны.

Растровая электронная микроскопия позволяет исследовать количественные характеристики боридных структур (рис. 9, табл. 8).

На рис. 9, а и б наблюдается игольчатая структура кристаллов FeB в образце 1 и Fe<sub>2</sub>B в образце 2 согласно рентгеновским данным, направленных нормально поверхности образца. Ориентация кристаллов определена по их положениям в предполагаемой системе координат XY.

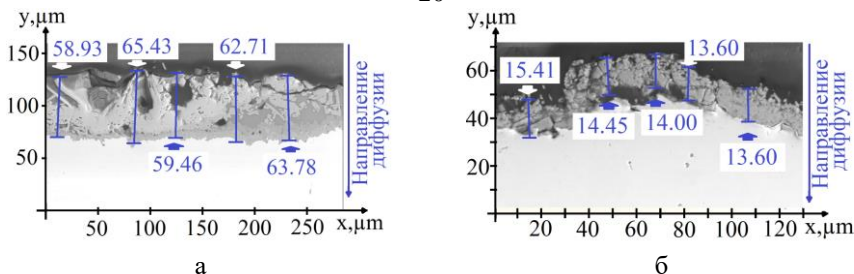


Рис. 9. Растровая электронная микроскопия диффузионных слоев после борирования в индукционной печи: а – образец 1 (обмазка с жидким стеклом); б – образец 2 (обмазка без жидкого стекла); (синим цветом обозначена толщина диффузионного слоя).

Таблица 8.

Величина зерен по осям.

№ образца	Толщина композиционного слоя, мкм	X, мкм	Y, мкм	Отношение X / Y
1	65,43	0,08 – 0,58	0,08 – 2,16	3,7
2	13,6	0,16 – 1,6	0,16 – 3,21	2

На площади исследования в  $3333,2 \text{ мкм}^2$  (рис. 9, б) выявлено 120 зерен, 112 из них в диффузионном слое расположены перпендикулярно слою подложки. Толщина диффузионного слоя в этом случае самая маленькая из исследуемых в данной работе. Размер зерен также невелик.

Из сопоставления данных табл. 8 следует, что толщина боридного слоя образца 2 снижается в 4 раза по сравнению с образцом 1, а размер боридных фаз, напротив, увеличивается в 2 раза. Отметим также, что в образце 1 игольчатая структура выражена значительней, чем в образце 2 (отношение X/Y в образце 1 больше в 1,85 раза, чем в образце 2). Очевидно, это влияние жидкого стекла. Как следует из полученных данных (рис. 9 и табл. 8) в образце 2 по мере роста боридной фазы  $\text{Fe}_2\text{B}$  в слое усложняется его строение – боридные иглы становятся закруженными, наблюдается их рост не только по нормали к поверхности, но и под некоторым углом, толщина боридных игл также увеличивается. Можно отметить, что в образце 1 по данным растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа иглы борида  $\text{FeB}$  кристаллографически ориентированы – предпочтительное направление роста этого борида параллельно кристаллографическому направлению [110].

### Заключение

Результаты исследований свидетельствуют, что наиболее оптимальные методы ХТО для формирования обширной диффузионной зоны на углеродистой стали 20 – это индукционное и микродуговое борирование с использованием шихты с содержанием борной кислоты не менее 50 мас. %. Использование дополнительных компонентов шихты влияет на образование обширной диффузионной зоны, меняет микротвердость и микроструктуру поверхностного слоя стали 20. Существенно, что в состав шихты для борирова-

ния входит борная кислота, а не борсодержащие вещества (например, порошок бора, ферробор, смесь карбида бора с натриевой солью борной кислоты). В соответствии с рентгенофазовым анализом увеличение в составе шихты количества борной кислоты приводит к увеличению образования фаз боридов железа в поверхностном слое образцов. Использование аммиака, жидкого стекла и древесного угля в специально рассчитанных пропорциях дает увеличение размера диффузионной зоны в поверхностном слое  $\alpha$ -железа, а также способствует образованию кристаллографически ориентированных боридных слоев. Индукционное борирование при 1000 °С позволяет существенно уменьшить время борирования до 5 минут и сформировать обширную диффузионную зону шириной до 1000 мкм, и получить микротвердость поверхности 3350 МПа. Электронно-микроскопическое и рентгенографическое исследования позволили выявить образование соединений FeB, Fe<sub>2</sub>B, а в диффузионной зоне при микродуговом борировании – Fe<sub>3</sub>B.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Для интенсификации диффузионных процессов при борировании стали 20 разработан метод химико-термической обработки индукционными токами, позволяющий осуществить борирование при температуре 1000 °С в течение 5 минут с использованием легко разлагаемой борной кислоты в присутствии аммиака.

2. Установлен оптимальный состав борсодержащей шихты, содержащей 25 % порошкового железа, 75 % борной кислоты и малых добавок аммиака и жидкого стекла, повышающих качество обширной диффузионной зоны.

3. При индукционном воздействии формирование обширной диффузионной зоны размером до 1000 мкм обеспечивается аномальным диффузионным процессом, коэффициент диффузии бора  $1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ , что на 2 порядка выше, чем при традиционном борировании.

4. Индукционное воздействие позволяет сформировать в структуре диффузионной зоны композиционный слой боридов толщиной 14,45-65,43 мкм, состоящий из кристаллографически ориентированной боридной фазы FeB.

5. Установлено, что композиционная структура диффузионной зоны представляет собой бориды железа, распределенные в высоко пластичной  $\alpha$ -матрице, и диоксид кремния с максимумом около 600 мкм.

6. При введении в область микродугового воздействия борсодержащей шихты сформирована обширная диффузионная зона величиной 840 мкм с высокими механическими характеристиками наплавленного слоя, величина которых на поверхности может достигать 3400-3700 МПа.

7. Сформулирована концепция обширной диффузионной зоны, базирующаяся на активации аномальных диффузионных процессов, за счет повышения температуры индукционного воздействия и использования шихты, содержащей легко разлагаемые соединения бора.

**ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в реферируемых журналах:*

1. **Шевчук Е.П.** Исследование боридных слоев стали 20 после химико-термической обработки в индукционной печи / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, Б.К. Ахметжанов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2018. – Т.15, – №3. – С. 386-391 (вклад автора – 0,3 п.л.);
2. **Шевчук Е.П.** Формирование обширной диффузионной зоны при борировании стали 20 / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, А.В. Джес // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2018. – Т.15, – №3. – С. 424-428 (вклад автора – 0,3 п.л.);
3. **Шевчук Е.П.** Рентгеноструктурный анализ диффузионного боридного слоя на углеродистой стали / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, Г.С. Бектасова // *Известия Алтайского государственного университета. Физика*. – 2018. – №4(102), С. 51-55 (вклад автора – 0,3 п.л.);
4. **Шевчук Е.П.,** Плотников В.А. Способ борирования поверхностных слоев углеродистой стали при помощи индукционного воздействия Патент РФ №2693416 от 02.07.2019 (вклад автора – 0,5 п.л.);
5. **Шевчук Е.П.** Структура слоев диффузионной зоны при борировании стали 20 / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, А.Б. Садибеков // *Известия Алтайского государственного университета. Физика*. – 2019. – №4. – С 61-66 (вклад автора – 0,3 п.л.);
6. **Shevchuk E.P.** Surface modification of steel 20 by the method of chemical-thermal treatment by annealing in a muffle furnace / E.P. Shevchuk, D.K. Nurumkanov, B.M. Muratbekov, B. Ahmetzhanov, V.A. Plotnikov // *Вестник Карагандинского государственного университета. Серия Физика*. – 2019. – №3(95). – С. 52-58 (вклад автора – 0,2 п.л.);
7. **Шевчук Е.П.** Влияние состава борлирующей пасты на микротвердость диффузионного боридного слоя стали 20 после отжига в муфельной печи / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, Г.С. Бектасова // *Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева*. – 2019. – №4. – С. 190-193 (вклад автора – 0,3 п.л.);
8. **Шевчук Е.П.** Диффузия бора в стали 20 / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, Г.С. Бектасова // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2020. - №1(111). – С. 58-62 (вклад автора – 0,3 п.л.);
9. **Шевчук Е.П.** Исследование диффузионных боридных слоев стали 20, полученных микродуговой наплавкой / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, Г.С. Бектасова // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2020. – №4(114). – С. 59-63 (вклад автора – 0,2 п.л.);
10. **Шевчук Е.П.** Диффузия бора при борировании углеродистой стали / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, Г.С. Бектасова // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2021. – №1(117). – С. 64-67 (вклад автора – 0,2 п.л.);
11. **Шевчук Е.П.** Особенности формирования диффузионной зоны, полученной на стали 20 борированием в индукционной печи / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, С.В. Макаров // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2022. Т.65. №2. С. 98-105 (вклад автора – 0,3 п.л.);

12. **Shevchuk E.P.** Features of Formation of a Diffusion Zone on Steel 20 Obtained by Boriding in an Induction Furnace / E.P. Shevchuk, V.A. Plotnikov & S.V. Makarov // *Steel Transl.* – 2022. – Vol. 52, P. 145–150. <https://doi.org/10.3103/S096709122202022X> (Scopus) (вклад автора – 0,3 п.л.);

*Другие публикации:*

13. **Шевчук Е.П.** Композиционные диффузные боридные покрытия при микродуговом упрочнении в порошковых средах // III Российско-Казахстанская молодежная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии»: сборник научных статей (Барнаул, 15 декабря 2015 г.). – Барнаул, 2015. – С. 48-53 (вклад автора – 0,5 п.л.);

14. **Шевчук Е.П.** Исследование слоев диффузионных боридных покрытий при воздействиях микродуговой сваркой в порошковых средах // Актуальные научные исследования в современном мире: сборник научных трудов международной конференции (Переяслав-Хмельницкий, июнь 2017 г.). – Переяслав-Хмельницкий, 2017. – Выпуск 6(26). – Часть 1. – С. 83-89 (вклад автора – 0,3 п.л.);

15. **Шевчук Е.П.** Исследование слоев композитных диффузионных боридных покрытий в порошковых средах при микродуговом упрочнении // V Российско-Казахстанская молодежная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии»: сборник статей (Барнаул, 2017 г.). – Барнаул, 2017. – С. 96-103 (вклад автора – 0,5 п.л.);

16. **Шевчук Е.П.** Формирование обширной диффузионной зоны при борировании углеродистой стали // III Всероссийская конференция «Горячие точки химии твердого тела: от новых идей к новым материалам»: материалы (Новосибирск, 1-5 октября 2019 г.). – Новосибирск, 2019. – С. 193 (вклад автора – 0,5 п.л.);

17. **Шевчук Е.П.** Структура диффузной зоны при борировании стали 20 методом индукционного нагрева // VIII Российско-Казахстанская молодежная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии»: сборник статей (Барнаул, 2020 г.). – Барнаул, 2020. – С. 98-103 (вклад автора – 0,5 п.л.);

18. **Shevchuk E.P.** Investigation of an extensive diffusive zone formed by boriding in an induction furnace // *Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies. The Book of Abstracts of the VI International Conference “Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies”*. November 21-24, 2022, Novosibirsk, Russia. – Novosibirsk: ISSCM SB RAS, 2022. – 175 p. (вклад автора – 0,03 п.л.);

19. **Шевчук Е.П.** Исследование обширной диффузионной зоны, сформированной на углеродистой стали химико-термической обработкой в индукционной печи // *Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXIII Международной научно-практической конференции*. В 2 частях. Часть 2 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2022. – 410 с.: ил. (вклад автора – 0,04 п.л.).

### Список цитируемой литературы:

1. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
2. Ворошнин Л.Г. Борирование стали / Л.Г. Ворошнин, Л.С. Ляхович. – М.: Металлургия, 1978. – 239 с.
3. Коррозионная сталь Вогон 304 с бором, предназначенная для изготовления контейнеров с перегородками для транспортировки и хранения отработанного ядерного топлива // Новости черной металлургии за рубежом: Экспресс-информация. – 1981, – в. 63-И. – С. 1-4.
4. Дергач Т.А. Влияние бора на микроструктуру и свойства труб из низкоуглеродистой аустенитной хромоникелевой стали // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (88). – 2005. – №5. – С. 80-85.
5. Екимов Е.А. Н<sub>14</sub> при высоких давлениях и температурах / Е.А. Екимов, И.П. Зибров, А.В. Зотеев // Неорганические материалы. – 2011. – Т.47, – №11. – С. 1311-1316.
6. Кубашевский О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гопкинс. – М.: Металлургия, 1965. – 428 с.
7. Крукович М.Г. Механизм формирования диффузионных слоев / М.Г. Крукович // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2012. – №15. – С. 69-76.
8. Все о металлургии: Распределение бора в поверхностном слое [Электронный ресурс] – Режим доступа – <http://metal-archive.ru/boridnye-pokrytiya/116-raspredelenie-bora-v-poverhnochnom-sloe.html> (Дата обращения: 17.10.2022).
9. Keddam M. A kinetic model for estimating the boron activation energies in the FeB and Fe<sub>2</sub>B layers during the gas-boriding of Armco iron: Effect of boride incubation times / M. Keddam, M. Kulka, N. Makuch, A. Pertek and L. Małdzinski // Appl. Surf. Sci. – 2014, Vol. 298. P. 155-163.
10. Шевчук Е.П. Формирование обширной диффузионной зоны при борировании стали 20 / Е.П. Шевчук, В.А. Плотников, А.В. Джес // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т.15. – №3. – С. 424-428.
11. Фарбман С.А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов: изд. доп. и перераб. / С.А. Фарбман, И.Ф. Колобнев. – М.: Металлургия, 1968. – 496 с.
12. Иванова Л.И. Индукционные тигельные печи: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Л.И. Иванова, Л.С. Грובהва, Б.А. Сокунов, С.Ф. Сапулов. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2002. – 87 с.
13. Индукционный нагрев ТВЧ: статьи: Поверхностный эффект, глубина проникновения тока [Электронный ресурс] – Режим доступа – <http://elisit.ru/materiali/?pid=114#p2-114> (Дата обращения: 17.10.2022).
14. Гурьев А.М. Новые материалы и технологии для литых штампов / А.М. Гурьев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 216 с., ил.



15. Наплавка металла: электродом и другие: Все о сварочных электродах. URL: <https://weldelec.com/info/kakpravilno-varit/naplavka/> (Дата обращения: 12.12.2021).

16. Патент РФ №2693416, 02.07.2019.

17. Крукович М.Г. Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов // ФИЗМАТЛИТ. – 2010. – 384 с.

18. Справочник металлиста [Текст]: учеб. пособие: в 3 т. / ред. совет Н.С. Ачеркан (пред.) [и др.], – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1965-1966. – 3 т.

19. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия / Б.А. Войнов. – М.: Машиностроение, 1980. – 120 с., ил.

20. Павлов П.В. Физика твердого тела / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. – Москва: Высшая школа, 2000. – 494 с.

21. Екимов Е.А. Получение микрокристаллов бора пиролизом декаборана  $B_{10}H_{14}$  при высоких давлениях и температурах / Е.А. Екимов, И.П. Зибров, А.В. Зотеев // Неорганические материалы. – 2011. – Т.47. – №11. – С. 1311-1316.

22. Лякишев Н.П. Борсодержащие стали и сплавы / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Лаппо. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.