

На правах рукописи



ИШМАМЕТОВ ДМИТРИЙ АМИРОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ОКСИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА
СТРУКТУРУ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ДИФФУЗИОННЫХ
СЛОЕВ СТАЛЕЙ ПРИ ЖИДКОСТНОМ БОРИРОВАНИИ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Помельникова Алла Сергеевна, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет), кафедра «Материаловедение»

Официальные оппоненты: Белашова Ирина Станиславовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии конструкционных материалов» ФГБОУ ВО «МАДИ»

Белов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий инженер научного проекта кафедры «Функциональных наносистем и высокотемпературных материалов» НИТУ МИСИС

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» (ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2025 г. в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.01 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5.

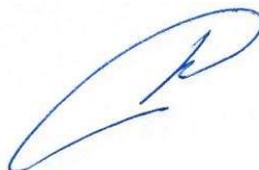
Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 267-66-33*36-28.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное материаловедение нацелено на разработку передовых технологий и материалов. Поскольку эксплуатационные нагрузки приходятся на поверхность изделий, химико-термическая обработка (ХТО), обеспечивающая формирование поверхностных слоев с особыми характеристиками, приобретает ключевое значение. Одним из широко распространенных процессов ХТО является борирование, которое формирует диффузионные слои с высокой твердостью и повышает износостойкость при различных условиях эксплуатации. Его основным недостатком является высокая хрупкость получаемых слоев, что ограничивает применение борирования в условиях динамических и ударных нагрузок.

В последние годы интерес к редкоземельным элементам (РЗЭ) значительно вырос. РЗЭ находят широкое применение в различных отраслях промышленности, в металлургии оксиды РЗЭ используются для модификации структуры сплавов, улучшения их свойств. Например, добавление оксидов лантана или церия в сталь способствует измельчению зерна, что повышает ее прочность и пластичность. Одним из направлений современных исследований по борированию является изучение влияния добавок РЗЭ на структуру и свойства борированных слоев.

Актуальные научные исследования направлены на снижение хрупкости борированных слоев. Однако, высокоэнергетические методы, такие как лазерная или электронно-лучевая обработка, хотя и изменяют морфологию слоев, остаются сложными и экономически неоправданными для массового применения. Комбинированные методы борирования, такие, как бороазотирование, бороцементация, бороалитирование и пр., позволяют добиться снижения хрупкости борированных слоев, но приводят к значительному снижению микротвердости.

В данной работе исследуется возможность снижения хрупкости борированных слоев через добавление оксидов РЗЭ в расплавы для борирования. Добавка оксидов РЗЭ (лантана, иттрия и скандия), способствует не только увеличению толщины борированных слоев, но и снижению их хрупкости, что

важно при решении задачи повышения эксплуатационных характеристик изделий, применяемых в машиностроительных отраслях.

Целью работы является разработка технологических процессов жидкостного борирования с добавками оксидов редкоземельных элементов для снижения хрупкости и увеличения износостойкости диффузионных слоев сталей.

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

1. Исследовать влияние оксидов РЗЭ (лантана, иттрия, скандия) при жидкостном борировании на микроструктуру, морфологию борированных слоев и перераспределение легирующих элементов в поверхностных слоях сталей.

2. Определить микротвердость и оценить микрохрупкость борированных слоев сталей, модифицированных оксидами РЗЭ, для выявления изменений механических свойств в зависимости от типа и концентрации добавок оксидов РЗЭ.

3. Провести анализ процессов диффузии бора и формирования боридных фаз в присутствии оксидов редкоземельных элементов с оценкой объемных и зернограничных коэффициентов диффузии и их вклада в формирование борированных слоев сталей и рассчитать вязкость расплавов с добавками оксидов РЗЭ.

4. На основе значений вязкости расплавов, полученных при численной обработке экспериментальных данных, разработать математические модели, характеризующие зависимость вязкости расплава от концентрации добавки оксида РЗЭ.

5. Оценить триботехнические свойства борированных слоев путем проведения испытаний на трение и износ в условиях сухого трения скольжения, с целью определения целесообразности применения борирования с добавками оксидов РЗЭ.

6. Разработать рекомендации по оптимизации технологических параметров процесса борирования с добавками оксидов РЗЭ для повышения функциональных и эксплуатационных характеристик, включая снижение хрупкости и увеличение износостойкости сталей.

Научная новизна работы:

1. Впервые экспериментально установлено влияние оксидов РЗЭ на кинетику формирования борированных слоев при жидкостном борировании сталей. Определены изменения коэффициентов объемной и зернограничной диффузии бора в стали в зависимости от типа и концентрации оксидов РЗЭ, рассчитаны значения вязкости расплавов с добавками оксидов РЗЭ.

2. Установлено влияние оксидов РЗЭ на толщину, структуру и фазовый состав борированных слоев. Добавка оксидов лантана, иттрия и скандия приводит к снижению микрохрупкости борированных слоев. Добавки оксида лантана и иттрия приводят к увеличению толщины борированных слоев и при концентрации выше 10 % масс. – к образованию однофазного борированного слоя. Добавка оксида скандия не изменяет или приводит к снижению толщины борированного слоя. При добавке оксида скандия более 5 % масс. образуются однофазные борированные слои, не имеющие характерного игольчатого строения.

3. Разработаны математические модели, характеризующие связь значений вязкости расплава для борирования с концентрацией добавки оксида РЗЭ. С помощью данных моделей можно прогнозировать толщину борированного слоя.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны рекомендации по использованию добавок оксидов РЗЭ при жидкостном борировании сталей ВКС-5, Х12МФ, 40Х. Для сталей ВКС-5, Х12МФ рекомендуется применять расплавы для борирования с добавкой оксида лантана или оксида иттрия в количестве 5-10 % масс. с целью создания двухфазного борированного слоя с увеличенной толщиной, и более 10 % масс. с целью создания однофазного борированного слоя. Оксид скандия рекомендуется применять в количестве 5-10 % масс. с целью создания однофазного борированного слоя с максимально пониженным значением микрохрупкости. Для стали 40Х рекомендуется применять расплав без добавок оксидов РЗЭ.

2. Значительное снижение микрохрупкости борированных слоев при сохранении высоких значений микротвердости улучшает эксплуатационные

характеристики изделий, что обеспечивает увеличение долговечности и надежности деталей, работающих в условиях высоких нагрузок.

3. Формирование плотной и компактной структуры борированных слоев позволит сохранить их высокие жаро- и коррозионностойкие свойства.

4. Результаты исследования могут быть интегрированы в цифровые базы данных для моделирования процессов борирования сталей ВКС-5, Х12МФ и 40Х. Это позволит существенно ускорить разработку новых технологических решений и повысить эффективность материаловедения за счет цифрового моделирования.

5. Практическая значимость диссертации подтверждена актом об использовании результатов кандидатской диссертационной работы в АО «Гиредмет».

Апробация работы.

Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях международного и российского уровня: Международная научно-техническая конференция Уральской школы металловедов-термистов. Екатеринбург, 2025; Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». Кременки, 2020-2024; Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России». Москва, 2022-2024; Конференция молодых специалистов по перспективам развития металлургических технологий. Москва, 2023; Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение» имени Сажина Н.П. Москва, 2022; Международный форум «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии». Москва, 2020, 2022; Международные научные чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». Москва, 2020.

Достоверность результатов.

Надежность экспериментальных данных обеспечена комплексным применением современных исследовательских методик, таких как оптическая и

сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, а также использованием сертифицированного оборудования для механических и трибологических испытаний.

Личный вклад соискателя охватывает все этапы диссертационного исследования: составление плана и задач научных исследований; поиск и обзор научно-технической литературы; разработку составов расплавов для борирования с добавками оксидов РЗЭ; проведение процессов борирования; проведение металлографического анализа; участие в получении экспериментальных данных методами электронной микроскопии, рентгенофазового анализа; расчет термодинамических характеристик процессов борирования; обработку, обобщение и интерпретацию результатов структурных исследований, а также механических и триботехнических испытаний материалов; подготовку и публикацию научных работ, а также выступления с докладами на научных симпозиумах и конференциях.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 научных статей в журналах перечня ВАК, 3 из которых включены в международную базу Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационное исследование изложено на 183 страницах (11,4 п.л.) и включает: введение, пять глав, заключение, библиографический список из 101 источника, приложение. Работа содержит 79 иллюстраций и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности исследования, формулировку его целей и задач, а также раскрытие научной новизны и практической ценности исследовательской работы.

Глава 1 посвящена анализу и систематизации существующих научных публикаций по исследуемой проблематике. Проведен анализ классических и современных методов поверхностного упрочнения материалов, включая различные виды ХТО. Особое внимание уделено борированию как одному из эффективных методов повышения эксплуатационных характеристик изделий. Подчеркивается, что, несмотря на преимущества борирования, его ключевым недостатком является высокая хрупкость диффузионных слоев.

Детально рассмотрена классификация борированных слоев и методы их получения. На основе анализа преимуществ и недостатков каждого метода, обоснован выбор жидкостного безэлектролизного метода как технологичного и гибкого, способного обеспечить стабильные результаты при минимизации затрат.

Проанализированы современные исследования, предлагающие различные методы интенсификации процесса борирования, включая использование ультразвукового воздействия, термоциклирования и высокоэнергетических финишных обработок, методы лазерного и электронно-лучевого воздействия. Рассмотрены работы по применению добавок металлических и оксидных РЗЭ для модификации борированных слоев.

По результатам обзора научно-технической литературы обоснована актуальность разработки технологических процессов жидкостного борирования с добавками оксидов РЗЭ для снижения хрупкости и увеличения износостойкости диффузионных слоев сталей.

Глава 2 содержит обоснование выбора объектов исследования, описание экспериментальной базы, применяемых методик и алгоритмов обработки полученных результатов.

Применение оксидов РЗЭ в данной работе опиралось на принципы их использования в черной металлургии, в частности при выплавке сталей и сплавов. РЗЭ, вводимые в сталь при выплавке, оказывают три основных воздействия: рафинирующее, модифицирующее и легирующее. Выбор таких элементов как лантан, иттрий и скандий связан с известной классификацией РЗЭ. Лантан рассматривается как представитель цериевой группы РЗЭ, а иттрий - иттриевой группы РЗЭ, скандий не относится к какой-либо группе и выделяется из классификации. Рассмотрение данных элементов позволит судить о возможности применения различных РЗЭ в качестве добавок в расплавы для борирования.

Выбор сталей ВКС-5, Х12МФ, 40Х обусловлен различным содержанием углерода и легирующих элементов, что позволяет комплексно оценить влияние этих факторов на процесс борирования.

Борирование проводилось жидкостным безэлектролизным методом в расплавах, содержащих добавки одного из оксидов РЗЭ – лантана, иттрия или скандия – в количестве 1, 5, 10 и 20 % масс. Основу расплавов для борирования составляли тетраборат натрия (60-70 % масс.) и карбид бора (20-30 % масс.). Составы расплавов приведены в тексте диссертации. Выбор концентраций оксидов РЗЭ обусловлен необходимостью изучения как начальных эффектов (1 % масс.), так и более выраженных изменений при увеличении содержания до 20 % масс.

Глава 3 посвящена исследованию борированных слоев, полученных на сталях ВКС-5, Х12МФ, 40Х.

Влияние оксида иттрия. Добавка оксида иттрия в расплав для борирования оказывает положительное влияние на толщину диффузионных слоев. Наибольшая толщина для сталей ВКС-5, Х12МФ (245 мкм для стали ВКС-5 и 130 мкм для стали Х12МФ) достигается при концентрации добавки 5 % масс., для стали 40Х (230 мкм) – при 10 % масс. При увеличении концентрации оксида иттрия до 20 % масс. наблюдается снижение толщины диффузионных слоев.

Анализ микроструктур борированных слоев, полученных на стали ВКС-5 (рис. 1), показал, что морфология борированных слоев представляет собой компактную игольчатую структуру.

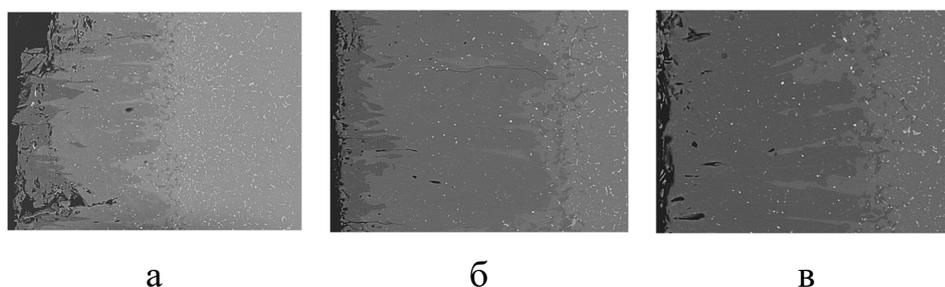


Рис. 1. Микроструктура борированных слоев стали ВКС-5: а - без добавления оксида иттрия, б – 10 % масс. оксида иттрия, в – 20 % масс. оксида иттрия, х500

Слои, полученные без добавления оксида иттрия в расплав, представлены классическими иглами двух боридных фаз FeB и Fe_2B . При добавлении оксида иттрия наблюдается постепенное уменьшение высокобористой фазы FeB . При

добавке оксида иттрия в количестве 20 % масс. эта фаза полностью пропадает (рис. 1 в).

Борированные слои, полученные на стали X12МФ, при добавке оксида иттрия до 10 % масс. являются двухфазными, при увеличении концентрации до 20 % масс. образуются однофазные борированные слои. В борированных слоях, полученных на стали 40Х, добавка оксида иттрия в количестве 1 % масс. приводит к сильному снижению высокобористой фазы FeВ, при содержании 10 % масс. наблюдаются незначительные следы данной фазы и при 20 % масс. образуются однофазные борированные слои.

Влияние оксида лантана. Добавка оксида лантана в расплав влияет на толщину диффузионных слоев аналогичным образом. Так, наибольшая толщина слоя достигается при 10 % оксида лантана (170 мкм для стали ВКС-5 и 275 мкм для стали 40Х). Для стали X12МФ максимальная толщина (145 мкм) наблюдается при добавке 5 % оксида лантана. При увеличении концентрации до 20 %, толщина борированных слоев уменьшается для всех сталей. Добавка оксида лантана приводит к изменению морфологии слоев. При добавке 10 % масс. оксида лантана высокобористая фаза FeВ на стали ВКС-5 становится более сплошной и ориентируется перпендикулярно к матрице, что свидетельствует об изменении активности расплава. Для стали X12МФ наблюдается увеличение дисперсности карбидов в переходном слое и снижение пор и трещин. Для стали 40Х при добавке 5 % масс. оксида лантана зафиксировано отсутствие высокобористой фазы FeВ, при большем содержании эта фаза появляется, но ее содержание значительно ниже, чем при борировании в расплаве без добавки оксида лантана или при добавке 1 % масс.

Влияние оксида скандия. Оксид скандия незначительно влияет на толщину борированных слоев для всех исследуемых сталей. На стали ВКС-5 добавка оксида скандия более 1 % масс. приводит к исчезновению высокобористой фазы FeВ. Наблюдается неполное формирование игл, а структура слоев остается компактной, без трещин, с незначительной пористостью. Отмечается повышение дисперсности переходного слоя на стали X12МФ при содержании добавки оксида скандия 5 %

масс. и более. При добавлении 20 % масс. оксида скандия на стали X12МФ не наблюдается классического строения боридных фаз, возможно образование карбоборидов. На стали 40Х добавка оксида скандия в количестве 5 % масс. приводит к образованию однофазных борированных слоев. При добавке 20 % масс. оксида скандия игольчатое строение переходного слоя менее выражено.

Проведенное исследование распределения микротвердости по толщине борированных слоев показало, что добавка **оксида иттрия** приводит к значительному снижению микротвердости борированных слоев по сравнению со стандартным расплавом. Для стали ВКС-5 микротвердость боридных фаз снизилась с 2050 $HV_{0.1}$ до 1600-1800 $HV_{0.1}$, для X12МФ – с 2100 $HV_{0.1}$ до 1500-1800 $HV_{0.1}$, для стали 40Х – с 1980 $HV_{0.1}$ до 1400-1650 $HV_{0.1}$. Наиболее плавное распределение микротвердости наблюдается при концентрации оксида иттрия 5–10 % масс., что положительно влияет на механические свойства диффузионных слоев за счет снижения градиента значений между боридными фазами и стальной матрицей.

Анализ распределения микротвердости для борированных слоев сталей ВКС-5, X12МФ и 40Х, полученных с **добавками оксида лантана**, показал также значительное снижение микротвердости. Так, для стали ВКС-5 микротвердость боридных фаз снизилась с 2050 $HV_{0.1}$ до 1400-1700 $HV_{0.1}$, для X12МФ – с 2100 $HV_{0.1}$ до 1300-1750 $HV_{0.1}$, а для стали 40Х – с 1980 $HV_{0.1}$ до 1300-1700 $HV_{0.1}$. Плавное распределение микротвердости достигается при добавлении оксида лантана в количестве 5-10 % масс., что, аналогично добавке оксида иттрия, позволяет снизить разницу значений микротвердости боридных фаз и стальной матрицы.

Кривые распределения микротвердости борированных слоев, полученных на сталях ВКС-5, X12МФ и 40Х с **добавками оксида скандия**, показали, что высокие значения микротвердости сохраняются даже при отсутствии фазы FeB, характерной для боридных слоев. Для стали ВКС-5 микротвердость поверхностного слоя достигала 1950-2050 $HV_{0.1}$, для стали X12МФ – 1760-2060 $HV_{0.1}$, а для стали 40Х – 1900-2000 $HV_{0.1}$. Микротвердость переходных слоев и сердцевины во всех случаях оставалась на уровне характерных значений.

Для оценки микрохрупкости использовалась известная методика, предложенная В.М. Глазовым и В.Н. Вигдоровичем, на образцах с добавлением 5 % масс. оксида иттрия, лантана, скандия, поскольку при этой концентрации достигаются оптимальные характеристики борированных слоев. Показано существенное снижение показателя микрохрупкости при добавлении оксидов РЗЭ. Оксид лантана оказывает наименьшее воздействие на снижение микрохрупкости. Оксид иттрия демонстрирует промежуточное влияние. Оксид скандия обеспечивает максимальный эффект, снижая показатель до минимальных значений. Так, на стали ВКС-5 удалось снизить показатель микрохрупкости с 19,5 до 3,4 (более 5 раз), на стали Х12МФ с 13,2 до 5,46 (в 2,5 раза), на стали 40Х с 14,96 до 7,36 (в 2 раза).

Для определения распределения легирующих элементов в процессе борирования проводился анализ химического состава микроструктур исследуемых образцов и строились карты распределения легирующих элементов. Проведенные исследования показали, что в процессе борирования происходит перераспределение легирующих элементов. В переходном слое выявлено сильное обеднение карбидообразующими легирующими элементами (Cr, V, W, Mo в 2-3 раза; Mn – в 1,5-2 раза) и значительное повышение концентрации некарбидообразующих элементов (Ni, Cu, Si – в 3-4 раза). Полученные результаты согласуются с литературными данными.

В **Главе 4** приведены расчеты коэффициентов объемной и зернограничной диффузии; рентгенофазовый анализ расплавов с добавлением оксидов РЗЭ в количестве 5 % масс. Приведены математические модели, описывающие зависимость вязкости расплава, которая, согласно закону Эйнштейна-Стокса, критически важна для диффузии, так как определяет подвижность атомов и скорость диффузионных процессов, от концентрации оксида РЗЭ с учетом влияния состава обрабатываемой стали.

Для определения фаз, образующихся в расплавах с добавками оксидов РЗЭ, проводился рентгенофазовый анализ. Установлено, что во всех исследуемых составах образуется фаза легкоплавкого бората (LaBO_3 , YBO_3 , ScBO_3), которая

способствует ускорению диффузии. Учитывая, что температура борирования составляет 1000 °С, что соответствует условию, при котором зернограничная диффузия доминирует над объемной ($T < 0,7T_{пл}$), можно предположить, что в процессе борирования происходит ускоренная диффузия бора по границам зерен, которая, в свою очередь, позволяет увеличить объемную диффузию, так как атомы бора, находясь в границах зерен, могут диффундировать в объем по всему периметру зерна.

Была сформулирована принципиальная физико-химическая модель влияния добавок оксидов РЗЭ на кинетику формирования борированных слоев. Данная модель состоит из 5 этапов:

1. образование легкоплавкой фазы бората РЗЭ;
2. отток бора по границам зерен;
3. диффузия бора по границам зерен;
4. объемная диффузия от границ зерен;
5. реакция образования боридов.

Процесс диффузии бора в сталь соответствует кинетической модели диффузии по Харрисону, смешанному режиму, при котором идет активная зернограничная диффузия с дальнейшим проникновением диффузанта в зерно. Используя адаптированную модель Фишера для зернограничной диффузии были рассчитаны коэффициенты объемной и зернограничной диффузии. Для оценки коэффициентов диффузии по микроструктуре борированных слоев определяли параметры, характеризующие путь проникновения бора, такие, как h , L_v , L_b (рис. 2).

Оценочные значения показали, что коэффициент объемной диффузии бора составляет порядка 10^{-12} м²/с, коэффициент зернограничной диффузии 10^{-7} - 10^{-9} м²/с, что соответствует литературным данным. Подробные расчеты приведены в тексте диссертации.

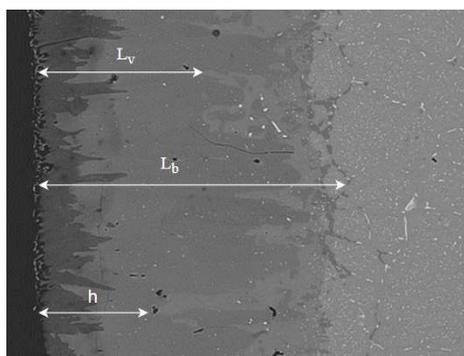


Рис. 2. Структура борированного слоя с отмеченными параметрами: L_v – путь диффузии по объему при насыщении объема зерен от границ зерен, как от источников атомов бора; L_b – путь диффузии по границам зерен; h – толщина борированного слоя, на котором доминирует объемная диффузия, $\times 500$

Используя рассчитанные коэффициенты диффузии и закон Стокса-Эйнштейна, была рассчитана вязкость расплавов для борирования. Вязкость расплавов с добавками оксида лантана составила от 26 до 182 Па·с, с добавками оксида иттрия от 66 до 292 Па·с, с добавками оксида скандия от 60 до 548 Па·с. Установлено снижение вязкости при достижении концентрации добавки оксида РЗЭ 5-10 % масс. При дальнейшем увеличении добавки оксида РЗЭ вязкость возрастала.

На основании оцененных значений вязкости с использованием программируемой математической среды MATLAB были предложены математические модели полиномов 2-го порядка, описывающие зависимость вязкости расплава от концентрации добавки оксида РЗЭ и учитывающие тип добавки и тип стали.

1. для добавки оксида лантана:

$$\eta = 0,42 \times C^2 - 10,44 \times C + 145,25 + 38,8 \times \Delta_1 - 58 \times \Delta_2, \quad (1)$$

2. для добавки оксида иттрия:

$$\eta = -0,62 \times C^2 + 6,47 \times C + 225,53 + 98,33 \times \Delta_1 - 244,59 \times \Delta_2, \quad (2)$$

3. для добавки оксида скандия:

$$\eta = 0,32 \times C^2 + 8,11 \times C + 173,04 + 97,4 \times \Delta_1 - 234,4 \times \Delta_2, \quad (3)$$

где:

η – вязкость, Па·с; C – концентрация добавки, % масс.; Δ_1, Δ_2 – категориальные переменные.

Данные модели позволяют рассчитать вязкость расплава в зависимости от концентрации оксида РЗЭ. Использование данных моделей позволяет прогнозировать толщину получаемых борированных слоев, в зависимости от концентрации добавки оксида РЗЭ.

В Главе 5 представлены результаты исследования триботехнических характеристик сталей ВКС-5, Х12МФ и 40Х после борирования в расплавах с добавками оксидов РЗЭ в количестве 5 % масс. Все испытания проводились в условиях сухого трения скольжения для пары трения сталь SS440 – исследуемая сталь.

Установлено, что добавка оксида иттрия приводит к максимальному снижению коэффициента трения для стали ВКС-5. Средние значения коэффициента трения стали ВКС-5 без обработки и после борирования без добавок оксидов РЗЭ одинаковы и составляют 0,51. Добавка оксида лантана позволяет снизить коэффициент трения до 0,41 (в 1,2 раза), оксида скандия – до 0,27 (в 1,8 раза), оксида иттрия – до 0,13 (в 3,9 раза). При этом износ снижается с $16 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м до $2,4 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м (в 6,6 раз) после борирования без добавок оксидов РЗЭ, с добавкой оксида лантана до $3,17 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м (в 5 раз), с добавкой оксида скандия до $3,8 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м (в 4,2 раза), с добавкой оксида иттрия до $4,5 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м (в 3,5 раза).

Для стали Х12МФ добавки оксидов РЗЭ позволили снизить коэффициент трения более чем в 3 раза, наилучший результат получен при добавке оксида лантана. Интенсивность изнашивания снизилась более чем в 1,6 раза. Для стали 40Х наилучший результат по коэффициенту трения и интенсивности изнашивания достигнут при борировании в стандартном расплаве. Это связано с отсутствием в структуре стали 40Х дисперсных упрочняющих частиц, которые сдерживают рост зерна и могут образовывать легированные бором соединения. Использование добавок оксидов РЗЭ для данной стали триботехнического назначения нецелесообразно.

Установлено, что после борирования на поверхности борированного слоя остаются включения оксидных соединений РЗЭ, что может приводить к снижению коэффициента трения для всех видов сталей, так как данные включения могут работать как твердый смазочный материал.

Основные выводы по работе

1. Установлено, что добавки оксидов редкоземельных элементов в расплавы для борирования позволяют получать как двухфазные, так и однофазные борированные слои. Добавка оксида скандия позволяет получать борированные слои без характерного игольчатого строения. Добавки оксидов лантана и иттрия приводят к увеличению толщины борированных слоев, в среднем, на 30 %. Исследование, проведенное с помощью энергодисперсионной спектроскопии показало, что в процессе борирования происходит диффузионное перераспределение легирующих элементов.

2. Показано, что добавки оксидов РЗЭ позволяют снизить микрохрупкость, сохранив высокие значения микротвердости. Так, значения микрохрупкости борированных слоев снизились более чем в 2 раза, а значения микротвердости составили порядка 1400-2000 HV_{0.1}, в зависимости от концентрации и вида добавки.

3. Анализ процессов диффузии бора показал, что оксиды РЗЭ приводят к образованию легкоплавкой фазы бората РЗЭ (LaBO₃, YBO₃, ScBO₃), которая ускоряет объемную и зернограничную диффузию. Предложена принципиальная физико-химическая модель влияния добавок оксидов РЗЭ на скорость диффузии бора в расплаве. Оксиды лантана и иттрия вызывают максимальное увеличение коэффициентов объемной и зернограничной диффузии. Коэффициент объемной диффузии бора составляет порядка 10⁻¹² м²/с, а коэффициент зернограничной диффузии порядка 10⁻⁸-10⁻⁹ м²/с. Вязкость расплавов с добавками оксида лантана составила от 26 до 182 Па·с, с добавками оксида иттрия от 66 до 292 Па·с, с добавками оксида скандия от 60 до 548 Па·с.

4. Разработаны математические модели, описывающие зависимость вязкости расплава от концентрации добавки оксидов РЗЭ для трех сталей.

Использование данных математических моделей позволяет прогнозировать толщину борированного слоя.

5. Показано, что использование добавок оксидов РЗЭ в расплавах для борирования повышает износостойкость сталей в условиях трения скольжения без смазочного материала. Наилучший результат по снижению коэффициента трения достигается для стали ВКС-5 при добавке оксида иттрия, для стали Х12МФ – при добавке оксида лантана, для стали 40Х – в расплаве без добавок оксидов РЗЭ. Добавка оксидов РЗЭ позволяет сохранить низкие значения износа на всех исследуемых сталях.

6. На основе проведенных исследований можно рекомендовать использование оксидов лантана и иттрия в концентрациях 5-10 % масс. для повышения функциональных свойств и увеличения толщины борированных слоев. Добавки оксидов лантана и иттрия рекомендуется применять с целью снижения времени борирования. Оксид скандия рекомендуется использовать для случаев, где необходима минимизация микрохрупкости и сохранение высокой твердости борированных слоев.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ishmametov D. A., Pomelnikova A. S., Fomina L. P., Karpukhin S. D. Investigation of the structure and properties of surface composite layers on multi-alloyed steels // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 413. P. 02015. (0.5 п.л. / 0.13 п.л.).
2. Ishmametov D. A., Pomelnikova A. S., Krasulya A. A. Investigation of the structure and properties of the surface composite layer on VKS-5 steel // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1990. P. 012003. (0.5 п.л. / 0.17 п.л.).
3. Ишмаматов Д. А., Помельникова А. С. Изучение структуры и свойств борированных слоев, полученных на разнолегированных сталях методом жидкостного безэлектролизного борирования в расплаве с добавкой оксида иттрия // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21, № 11. С. 511-520. (0.5 п.л. / 0.27 п.л.).
4. Ishmametov D. A., Pomelnikova A. S., Rummyantseva S. B. The Influence of Lanthanum Oxide on the Structure and Properties of Borided Layers on Low-Carbon,

Complex-Alloyed Steel // Russian Metallurgy (Metally). 2024. P. 1529-1535. (0.5 п.л. / 0.18 п.л.).

5. Ишмаметов Д. А., Помельникова А. С. К вопросу о влиянии РЗМ на микрохрупкость и микротвердость борированных слоев, полученных методом жидкостного безэлектролизного борирования, на разнолегированных сталях // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22, № 3. С. 135-138. (0.56 п.л. / 0.28 п.л.).

6. Ишмаметов Д. А., Помельникова А. С., Румянцева С. Б. Исследование влияния оксида лантана на кинетику, морфологию и свойства борированных слоев, полученных жидкостным методом на сталях с разным содержанием углерода // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20, № 4. С. 174-180. (0.5 п.л. / 0.17 п.л.).

7. Ишмаметов Д. А., Помельникова А. С. Исследование влияния процесса жидкостного безэлектролизного борирования на распределение легирующих элементов в борированном слое и матрице сталей с различным содержанием углерода // Будущее машиностроения России 2022: сборник докладов. XV Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием). Москва, 2023. С. 222-224. (0.18 п.л. / 0.11 п.л.).

8. Ишмаметов Д. А., Помельникова А. С. Влияние добавок РЗМ на морфологию и механические свойства борированных слоев, полученных жидкостным методом на разнолегированных сталях // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXX Международного симпозиума им. А. Г. Горшкова, Кремёнки, 20-24 мая 2024 года. Москва: ООО "ТРП", 2024. С. 30-32. (0.17 п.л. / 0.10 п.л.).

9. Ишмаметов Д. А., Помельникова А. С. Влияние добавок оксидов РЗЭ на функциональные свойства борированных слоев, полученных на стали ВКС-5 // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: Сборник статей XXVII Международной научно-технической Уральской школы металловедов-термистов, 03-07 февраля 2025 года. – Екатеринбург: Издательский Дом «Ажур», 2025. С. 92-97. (0.25 п.л. / 0.13 п.л.)