

УТВЕРЖДАЮ:
Директор ИФМ СО РАН
доктор физико-математических наук,
Нюмиев Андрей Валерьевич



« 6 » марта 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Нгуен Ван Винь **«Поверхностное упрочнение низкоуглеродистой стали методом поверхностного оплавления борсодержащей смеси порошков»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Актуальность темы выполненной работы

Современное машиностроение сталкивается с серьезной проблемой интенсивного износа деталей, работающих в условиях динамических нагрузок и воздействия абразивных частиц. Высокие концентрации напряжений в поверхностных слоях, подверженных ударным и циклическим нагрузкам, а также контактирующих с агрессивными химическими средами, способствуют развитию процессов трещинообразования, износа и коррозии, что в конечном итоге приводит к поломке оборудования и значительным экономическим потерям. Одним из наиболее эффективных способов решения данной проблемы является создание износостойких покрытий на поверхностях деталей, которые обладают улучшенными эксплуатационными характеристиками по сравнению с основным материалом. В условиях экстремальных воздействий такие покрытия позволяют значительно увеличить срок службы машин и механизмов, а также снизить затраты на ремонт и обслуживание оборудования.

Особое внимание заслуживает метод борирования, который благодаря формированию на поверхности материалов одно- или многофазных боридных слоев с уникальными физико-химическими свойствами обеспечивает

существенное повышение твёрдости и износостойкости стальных изделий. Однако, несмотря на значительные преимущества, традиционные методы борирования характеризуются такими недостатками, как повышенная хрупкость слоёв и длительная продолжительность процессов при высоких температурах. Использование высококонцентрированных источников энергии, таких как плазменная дуга, открывает новые возможности для совершенствования технологии упрочнения поверхностей. Плазменное оплавление борсодержащей смеси позволяет сократить время обработки, увеличить глубину упрочненного слоя и создать композиционные структуры, которые обеспечивают оптимальный баланс твёрдости и пластичности покрытия. Таким образом, разработка и внедрение технологии плазменного поверхностного оплавления борсодержащих смесей для упрочнения низкоуглеродистой стали представляет собой актуальную научно-техническую задачу, направленную на повышение надёжности и долговечности оборудования, работающего в условиях повышенного износа и агрессивных сред.

Новизна исследования и полученных результатов

В рамках диссертационной работы получены результаты, обладающие следующей научной новизной:

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

2. Установлено, что при плазменном оплавлении борсодержащей смеси с погонной энергией 525 кДж формируется борид железа Fe_2B , который является центром кристаллизации для ориентированного роста эвтектических колоний ($\text{Fe}_2\text{B} + \alpha\text{-Fe}$), создавая непрерывный каркас из упрочняющих равновесных фаз Fe_2B и $\alpha\text{-Fe}$. При плазменном оплавлении с погонной энергией 700 кДж формируются первичные бориды (FeB , Fe_2B), неравновесные фазы боридов железа (Fe_3B , $\text{Fe}_3(\text{B},\text{C})$) и $\alpha\text{-Fe}$. Бороцементитная фаза по стехиометрическому составу соотносится с фазой $\text{Fe}_3\text{B}_{0,6}\text{C}_{0,4}$.

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

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

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации

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

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

3. Полученные результаты расширяют научные представления о механизмах абразивного износа и трения скольжения в упрочненных

поверхностных боридных слоях низкоуглеродистых сталей, что важно для разработки новых материалов с повышенной стойкостью к износу.

4. Разработка технологических режимов плазменного оплавления борсодержащих смесей, нанесенных на поверхность металла, для формирования упрочненных поверхностных слоев в низкоуглеродистой стали. В ходе работы предложены режимы плазменного оплавления (сила тока, состав борсодержащей смеси), которые обеспечивают получение упрочненных слоев с высокими эксплуатационными свойствами – твердостью, износостойкостью и адгезией.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Результаты и выводы, приведенные в диссертации, могут быть использованы в промышленной практике при обработке деталей и машин, работающих в условиях высоких механических нагрузок и износа, такие как рабочие органы сельскохозяйственной техники (например, лемехи плугов).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Основные положения диссертационной работы подтверждены детальным анализом результатов, полученных с применением современных методов анализа и компьютерного моделирования. Выводы работы объективны, достоверны и соответствуют поставленным задачам. Практические рекомендации предлагают конкретные пути внедрения разработанной технологии поверхностного упрочнения низкоуглеродистых сталей методами поверхностного оплавления борсодержащей смеси порошков. Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждается значительным объемом экспериментальных данных.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность.

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

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

В первой главе представлен литературный обзор современных методов поверхностного упрочнения материалов, направленных на повышение износостойкости и долговечности стальных изделий. Основное внимание

уделено борированию — одному из эффективных химико-термических методов, обеспечивающему формирование на поверхности стали боридных слоёв с высокой твёрдостью, устойчивостью к износу и коррозии. Рассмотрены различные методы борирования, включая диффузионное насыщение, лазерное, электронно-лучевое и плазменное борирование, а также особенности формирования боридных слоёв в зависимости от химического состава стали-основы. Отдельное внимание уделено композиционным боридным слоям, которые благодаря наличию дополнительных фаз могут сочетать высокую твёрдость с улучшенной пластичностью и устойчивостью к ударным нагрузкам. Проанализированы механизмы образования боридных фаз, их влияние на эксплуатационные характеристики покрытий, а также перспективы применения различных высококонцентрированных источников энергии для оптимизации процесса борирования.

Во второй главе описаны используемые материалы, оборудования и методы исследования, применённых в ходе экспериментов по упрочнению низкоуглеродистой стали методом плазменного оплавления борсодержащих смесей. В качестве основного материала исследования выбрана низкоуглеродистая сталь 20, обладающая удовлетворительными механическими свойствами, приемлемым соотношением «цена-качество» и низким содержанием углерода, что снижает его влияние на формируемые защитные боридные слои. Для формирования покрытий использовались борсодержащие смеси, включающие аморфный бор, карбид бора и железо в качестве основных компонентов, а также связующее вещество БФ-2 для улучшения адгезии покрытия к поверхности стали. В процессе плазменного оплавления использовалась плазменная дуга с регулируемыми параметрами: напряжение дуги 24 В, скорость движения образца 4 мм/с и расстояние сопло-образец 5 мм.

В третьей главе рассмотрены результаты исследований структуры и свойств поверхностных слоёв, сформированных на низкоуглеродистой стали методом плазменного оплавления борсодержащих смесей. Основное внимание уделено анализу влияния технологических параметров плазменной обработки на микроструктуру, фазовый состав, микротвёрдость и износостойкость полученных покрытий. Проведено компьютерное моделирование процесса плазменного нагрева стали с использованием программы Simufact Welding. Это позволило спрогнозировать температурные поля, глубину и ширину зоны оплавления, а также напряжения и деформации в поверхностном слое металла. Было установлено, что при оптимальных условиях плазменного оплавления

формируются бориды железа Fe_2B и FeB , обеспечивающие высокую твёрдость и износостойкость покрытий. Введение дополнительных фаз, таких как $\alpha\text{-Fe}$, способствует увеличению пластичности покрытия и улучшению его адгезионных характеристик. Полученные результаты демонстрируют возможность использования плазменного оплавления борсодержащих смесей для формирования упрочнённых слоёв с высокими эксплуатационными свойствами, что подтверждает перспективность данного метода для применения в машиностроении и других отраслях промышленности.

В четвёртой главе были изучены свойства упрочнённых поверхностных слоёв, полученных методом плазменного оплавления борсодержащих смесей. Особое внимание было уделено таким характеристикам, как твёрдость, износостойкость, адгезия и устойчивость к сухому трению. Проведённые дюрOMETрические испытания показали, что микротвёрдость боридных слоёв варьируется от 800 до 1535 HV в зависимости от содержания бора в смеси и параметров плазменного оплавления. Исследования на абразивный износ показали, что борированные слои обладают высокой износостойкостью, которая в три раза превышает показатели цементованной стали 20. Оптимальные результаты были достигнуты при содержании бора 40% и погонной энергии 525 кДж. Покрытия прошли испытания на адгезию по методу Роквелла-С, показав высокую степень сцепления с основным материалом. Композиционная структура боридных слоёв способствовала снижению уровня остаточных напряжений, что улучшало устойчивость к растрескиванию при эксплуатационных нагрузках.

В пятой главе представлена апробация разработанной технологии плазменного оплавления борсодержащих смесей в реальных условиях, а также анализ возможностей её применения в различных отраслях промышленности. Разработанные упрочнённые покрытия могут быть использованы для повышения износостойкости изделий, работающих в условиях абразивного износа, ударных и циклических нагрузок. Особое внимание уделяется применению данной технологии для обработки рабочих органов сельскохозяйственной техники, таких как лемехи плугов.

Содержание глав диссертации подтверждает научно-обоснованный подход автора к решению поставленных задач в ходе диссертационного исследования. Работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения. Содержание данной работы приведено в логически последовательной форме. Диссертационная работа является завершённой,

выполнена на достаточном научном уровне и имеет несомненный интерес для специалистов в области упрочняющих технологий.

Замечания по диссертационной работе следующие:

1. В главе 2 в методах исследования структуры не указаны некоторые параметры съемки на растровом электронном микроскопе, такие как ускоряющее напряжение.

2. На рисунке 3.32 распределение углерода, бора и железа по площади не очевидно. Каким образом и при каких параметрах проводился качественный и количественный анализ легких элементов бора и углерода?

3. Имеются опечатки в тексте, например, на стр. 134 и 155 марка клея БФ-2 обозначена как BF-2.

4. В диссертационном исследовании не представлены графики изменения коэффициента трения в процессе испытаний на износ.

5. Качество приведенных снимков на рисунке 4.14 не позволяет однозначно соотнести отпечатки от индентора со шкалой, представленной на рисунке 4.13. При этом, дана информация о методике испытания на адгезию по Роквеллу-С, а само описание результатов представлено скудно.

6. Литературный обзор выполнен подробно, однако можно добавить больше современных источников, чтобы отразить актуальные тенденции в области борирования и поверхностного легирования бором электрофизическими методами.

Отмеченные замечания не оказывают существенного влияния на качество материала диссертации и не изменяют основных результатов исследования и выводов.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат написан аргументировано и логично, и соответствует основным положениям и выводам диссертационной работы.

Полнота изложения результатов диссертации в публикациях

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных статьях, из них 3 статьи в международной системе SCOPUS, 6 статей в журналах, внесенных в перечень ВАК. Анализ следующих публикаций показал соответствие требованиям Высшей аттестационной комиссии (ВАК):

1. Балановский, А. Е. Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки борсодержащей обмазки / А. Е. Балановский, **В. В. Нгуен**, Н. А. Астафьева, Р. Ю. Гусев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 93-103. (10 с./ 4 с.)

2. **Нгуен, В. В.** Микроструктура и свойства стали после плазменного легирования бором / В. В. Нгуен, Е. А. Балановский, Н. А. Астафьева // Глобальная энергия. – 2023. – Т. 24, № 4. – С. 97-106. (9 с./ 4 с.)

3. **Нгуен, В. В.** Структура и износостойкость боридных слоев, полученных методом поверхностного плазменного легирования / В. В. Нгуен, Е. А. Балановский, Н. А. Астафьева // Глобальная энергия. – 2023. – Т. 24, № 4. – С. 120-131. (11 с./ 6 с.)

4. **Нгуен, В. В.** Структура и свойства боридных слоев на низкоуглеродистой стали после плазменного легирования карбидом бора / В. В. Нгуен, Р. Ю. Гусев, И. К. Мухторова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2024. – Т. 20, № 1(229). – С. 36-40. (4 с./ 2 с.)

5. Нгуен, В. Ч. Особенности формирования поверхностных слоев при плазменном нагреве обмазки оловянной бронзы / В. Ч. Нгуен, А. Е. Балановский, **В. В. Нгуен** // Глобальная энергия. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 110-122. (12 с./ 3 с.)

6. Нгуен, В. Ч. Оценка абразивной износостойкости поверхностных слоев из плазменного оплавления оловянной бронзы и карбида хрома / В. Ч. Нгуен, А. Е. Балановский, **В. В. Нгуен** // Глобальная энергия. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 123-135. (12 с./ 3 с.)

Заключение

С учётом актуальности темы диссертации, научной обоснованности, оригинальности и новизны технологических разработок, можно сделать вывод о том, что диссертация Нгуен Ван Винь на тему «Поверхностное упрочнение низкоуглеродистой стали методом поверхностного оплавления борсодержащей смеси порошков» представляет собой самостоятельную, законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно на современном научно-техническом уровне.

Диссертационная работа Нгуен Ван Винь на тему «Поверхностное упрочнение низкоуглеродистой стали методом поверхностного оплавления борсодержащей смеси порошков» соответствует требованиям, установленным в пп. 9-11,13,14 Положения «О присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Нгуен Ван Винь, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Доклад соискателя Нгуен Ван Винь заслушан на семинаре ИФМ СО РАН 07.02.2025 г. и получил положительную оценку. Отзыв ведущей организации

рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории физического материаловедения, протокол от 06.03.2025 г. На заседании лаборатории присутствовало 10 человек. Результаты голосования: за - 10, против – 0, воздержавшихся – 0.

Составитель отзыва:

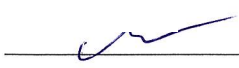
Заведующий лабораторией физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат технических наук по специальности 05.16.09. Материаловедение (в машиностроении)

Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович.

670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6,

телефон: 8 (3012) 434870,

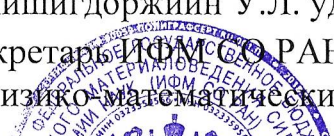
e-mail: undrakh@ipms.bscnet.ru

 У.Л. Мишигдоржийн

Подпись Мишигдоржийн У.Л. удостоверяю,

Ученый секретарь ИФМС СО РАН:

кандидат физико-математических наук





Батуева Елизавета Владимировна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6

Тел.: 8 (3012) 43-31-84, 41-68-00

e-mail: dir@ipms.bscnet.ru