

На правах рукописи



Бушуева Евдокия Геннадьевна

**ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ
АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н9Т МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ
«АМОРФНЫЙ БОР - Me (Cr, Fe, Ni)»**

Специальность: 2.6.17 – Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

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

Научный руководитель: **Батаев Владимир Андреевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Прибытков Геннадий Андреевич**,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики наноструктурированных функциональных материалов, главный научный сотрудник;

Быкова Татьяна Михайловна,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория микромеханики материалов, научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (г. Новокузнецк).

Защита диссертации состоится «30» июня 2022 года в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.03 созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета, а также на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Андрей Геннадиевич Тюрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. К числу стратегически важных отраслей производства в современной России относятся химическая, нефте- и газодобывающая промышленность, электроэнергетика, машиностроение. Для изготовления конструкций ответственного назначения в этих отраслях широко применяются хромоникелевые аустенитные стали, что обусловлено их высокой пластичностью, трещиностойкостью, коррозионной стойкостью, технологичностью. Однако одной из проблем, ограничивающих использование хромоникелевых аустенитных сталей в качестве материалов триботехнического назначения, является их низкая стойкость в условиях абразивного изнашивания. Кроме того, одним из специфических требований, предъявляемых к материалам для изготовления деталей, например, в нефтедобывающей промышленности, является обеспечение магнитной проницаемости (μ) на уровне менее 1,01. Рациональным решением, позволяющим в значительной степени улучшить указанные характеристики, является нанесение на изнашиваемые поверхности износостойких слоев, при этом сохранить или повысить другие важные эксплуатационные свойства, например, коррозионную стойкость.

Решение отмеченных проблем может быть основано на использовании новых эффективных методов поверхностного упрочнения хромоникелевых сталей. Одним из них является вневакуумная электронно-лучевая наплавка (ВЭЛН) порошковых борсодержащих смесей, позволяющая с высокой производительностью получать на поверхностях стальных заготовок упрочненные слои большой толщины (до 3 мм). В то же время формирование защитных слоев с использованием высококонцентрированного источника энергии, которым является электронный луч, выведенный в воздушную атмосферу, представляет собой сложный, малоизученный технологический процесс. Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о малом количестве экспериментальных данных по вневакуумной электронно-лучевой наплавке на хромоникелевые аустенитные стали порошковых смесей, в состав которых входит аморфный бор. Таким образом, анализируемые в работе проблемы являются актуальными. Их решение имеет значение как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения.

Для получения экспериментальных образцов в работе применялась уникальная по ряду параметров технология вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых материалов, разработанная в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Для вневакуумной электронно-лучевой наплавки использовали порошковые смеси аморфного бора и смачивающих компонентов, которыми являлись железо, хром и никель.

Важным критерием качества борированных материалов являлся уровень их стойкости в разных условиях абразивного изнашивания. В число наиболее важных задач, решаемых в работе, входило формирование структуры, обеспечивающей стойкость материалов при воздействии гидроабразивной среды, сохранении коррозионной стойкости и магнитной проницаемости $\mu \leq 1,01$.

Работа выполнена в соответствии с проектом «Разработка и создание линейки промышленного роботизированного оборудования на основе мультипуч-

ковой электронно-лучевой технологии для высокопроизводительного аддитивного производства крупноразмерных металлических и полиметаллических деталей, узлов и конструкций для ключевых отраслей РФ», (соглашение №14.610.21.0013, уникальный идентификатор проекта *RFMEFI61017X0013*); в рамках НИОКР НГТУ («Формирование многофункциональных борсодержащих покрытий на хромоникелевой стали методом вневакуумной электронно-лучевой обработки»), а также проекта РФФИ № 19-33-90201 по поддержке работ, выполняемых аспирантами «Исследование закономерностей формирования износостойких покрытий на поверхности хромоникелевой аустенитной стали, полученных методом наплавки аморфного бора с использованием электронно-лучевых технологий».

Степень разработанности темы исследования. Поверхностное упрочнение стальных заготовок боридами является технологическим процессом, широко востребованным в промышленном производстве в России и за рубежом. Интерес к этому процессу обусловлен свойствами получаемых материалов, к которым относятся высокие значения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости. С развитием высокоэнергетических методов обработки, основной фокус исследований сместился в область формирования защитных слоев, полученных с использованием электронно-лучевых технологий. К основным преимуществам электронно-лучевой обработки относится возможность электронного пучка проникать вглубь материала и формировать многофункциональные слои толщиной до нескольких миллиметров. Исследования упрочненных борированных слоев, полученных при насыщении сталей бором с использованием различных методов, проводились специалистами Института физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск), Новосибирского государственного технического университета, Университета науки и технологий (г. Поханг, Южная Корея) и др. В то же время мало работ посвящено изучению влияния вневакуумной электронно-лучевой наплавки борсодержащих порошковых смесей на структурные особенности и эксплуатационные свойства слоев, сформированных на хромоникелевых аустенитных сталях. Отмеченные обстоятельства свидетельствуют о целесообразности проведения дополнительных структурных исследований, а также оценки уровня механических, триботехнических, коррозионных, физических свойств стальных заготовок, упрочненных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошка «аморфного бора *B* и *Me* (*Cr, Fe, Ni*)».

Цель диссертационной работы заключается в обосновании рациональных составов порошковых смесей системы аморфный бор *B–Me* (*Cr, Fe, Ni*), при вневакуумной электронно-лучевой наплавке которых формируется структура, обеспечивающая рост триботехнических свойств поверхностных слоев хромоникелевой аустенитной стали 12X18H9T.

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

1. Изучить структурно-фазовые преобразования в процессе формирования износостойких слоев на заготовках из хромоникелевой аустенитной стали марки 12X18H9T с использованием технологии наплавки порошковых смесей

системы $B-Me$ (Cr, Fe, Ni) пучками электронов, выпущенными в воздушную атмосферу.

2. Изучить влияние концентрации смачивающего компонента Me (Cr, Fe, Ni) на структуру и фазовый состав поверхностно легированных слоёв.

3. Оценить стойкость борсодержащих слоев, наплавленных на заготовки из хромоникелевой аустенитной стали, в условиях абразивного и гидроабразивного воздействия.

4. Оценить влияние состава наплавочных смесей на коррозионную стойкость и магнитную проницаемость борсодержащих материалов, сформированных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей системы $B-Me$ (Cr, Fe, Ni).

5. Представить рекомендации по формированию на поверхности заготовок из аустенитной стали борсодержащих износостойких слоев с использованием пучков релятивистских электронов, выведенных в атмосферу.

Научная новизна:

1. Изучены структурно-фазовые преобразования, происходящие в поверхностных слоях стали 12X18H9T при вневакуумной электронно-лучевой наплавке порошка аморфного бора, а также смесей аморфного бора и смачивающих компонентов (Cr, Fe, Ni). Показано, что слои, сформированные в отсутствие в наплавочных смесях порошков железа, хрома и никеля, характеризуются малой толщиной (менее 1 мм), неоднородным строением и образованием дефектов в виде пор, трещин и расслоений.

2. Установлено, что введение в борсодержащие наплавочные смеси 5–10 мас. % смачивающих компонентов (Cr, Fe, Ni) приводит к формированию в поверхностно легированных слоях высокопрочных боридов Me_2B (бориды хрома и легированные хромом бориды железа), распределенных в эвтектике пластинчатого типа. Увеличение количества смачивающего компонента до 20 и 30 мас. % сопровождается разбавлением ванны расплава, снижением количества бора и формированием в поверхностных слоях структуры, характеризующейся преимущественно твердорастворным типом упрочнения. Зафиксировано, что содержание бора в наплавленных слоях не превышает 6 мас. %

3. Определен состав наплавочных смесей, обеспечивающий высокий комплекс свойств поверхностно легированных сплавов. Максимальной износостойкостью при воздействии закрепленных частиц абразива, в пять раз превышающей стойкость немодифицированной стали 12X18H9T, обладает материал, полученный при наплавке аморфного бора с 10 мас. % порошка хрома. В условиях гидроабразивного изнашивания при угле атаки 20 градусов уровень его стойкости в 2 раза выше по сравнению с аустенитной хромоникелевой сталью. Высокий уровень сопротивления изнашиванию наплавленного материала обеспечивают кристаллы боридов хрома и боридов хрома, легированных железом, распределенные в эвтектической матрице.

4. Экспериментально установлено, что увеличение содержания хрома в наплавочной смеси от 5 до 30 мас. % сопровождается двукратным повышением коррозионной стойкости поверхностных слоев в сравнении с исходной сталью 12X18H9T. Показано, что увеличение коррозионной стойкости обусловле-

но повышением в полученных сплавах доли хрома и формированием в модифицированных слоях химически стойких кристаллов боридов хрома Cr_2B .

5. Изучено влияние боридов типа Me_2B ($Me=Cr, Cr+Fe$) на магнитные свойства слоев, сформированных на поверхности заготовок из хромоникелевой аустенитной стали. Установлено, что уровень магнитной проницаемости μ всех материалов, полученных при использовании в качестве смачивающего компонента хрома, составил ≤ 1 . Полученные экспериментально результаты объясняются образованием парамагнитных боридов хрома Cr_2B .

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы определяется совокупностью данных, расширяющих представления о возможности улучшения комплекса свойств хромоникелевых аустенитных сталей при их поверхностном легировании в процессе наплавки борсодержащих порошковых смесей пучками электронов, выведенными в воздушную атмосферу. Установлено, что благоприятная роль боридов типа Me_2B ($Me=Cr, Fe +Cr$) проявляется при воздействии агрессивных сред, а также в условиях абразивного изнашивания поверхностно легированных сплавов. Полученные при выполнении диссертации результаты могут быть использованы при разработке новых технических решений, обеспечивающих улучшение структуры высоколегированных аустенитных сталей.

Практическая значимость диссертационной работы основана на возможности использования полученных результатов при решении задач, актуальных для ряда отраслей промышленного производства. Сформированные в процессе электронно-лучевой наплавки материалы могут быть рекомендованы для изделий, эксплуатируемых в условиях гидроабразивного изнашивания. Высокий уровень коррозионной стойкости, а также стойкости полученных в работе материалов в условиях абразивного изнашивания позволяют использовать их при производстве оборудования для нефтехимии и геологоразведки. Важная особенность, характерная для реализуемых в работе решений, заключается в повышении твердости и износостойкости поверхностно легированной стали при сохранении ею немагнитных свойств.

Полученные в работе результаты используются в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технология материалов». Технические решения по упрочнению корпусов клапанов телеметрической системы, применяемых в процессе бурения нефтяных скважин, переданы в ООО «ЭкспертНефтеГаз». Стойкость изделий, обработанных по предложенной технологии, в 2,5 раза выше по сравнению с используемыми в настоящее время материалами. Износостойкость литейных пресс-форм для литья под давлением, упрочненных по разработанной в диссертации технологии, в 2,2 раза выше по сравнению с изделиями, полученными по технологии, используемой в ООО «Центр технологии литья». Испытания разработанных материалов в АО НЗР «Оксид» свидетельствуют о двукратном повышении коррозионной стойкости материала гальванических ванн при использовании обоснованных в работе технических решений. Магнитная проницаемость μ модифицированного слоя, полученного при наплавке смеси аморфного бора и 10 мас. % хрома составила

менее 1,01, что соответствует требованиям, применяемым к гальваническому оборудованию.

Методология и методы исследования. Наплавку борсодержащих порошковых смесей осуществляли на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Для решения поставленных в работе задач был проведен анализ структуры, физических, механических, триботехнических и коррозионных свойств материалов, полученных путем наплавки порошковых смесей аморфного бора и смачивающих компонентов на хромоникелевую аустенитную сталь. Проведенные эксперименты наглядно демонстрируют влияние параметров наплавки на структуру и фазовый состав слоев, формирующихся в процессе высокоэнергетического воздействия на материалы. Варьирование режимов электронно-лучевой обработки позволило выявить влияние характера распределения боридных частиц в поверхностных слоях хромоникелевой аустенитной стали на уровень физических, прочностных свойств, износостойкости, коррозионной стойкости сплавов.

Аналитические исследования полученных в работе материалов выполнены на современном материаловедческом оборудовании центра коллективного пользования НГТУ. Металлографические исследования проведены на оптическом микроскопе *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*. Структуру наплавленных слоев, поверхностей разрушения после механических испытаний, а также особенности коррозионных повреждений образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе *Carl Zeiss EVO50 XVP*. Для определения химического состава полученных материалов использовали энергодисперсионный анализатор *X-Act (Oxford Instruments)* и метод потенциометрического титрования по ГОСТ 12360-82. Фазовый состав материалов анализировали на θ - θ -дифрактометре *ARL X'TRA* и циклическом ускорителе *PETRA III* (немецкий электронный синхротрон *DESY*). Характер изменения микротвердости по глубине наплавленных слоев оценивали на микротвердомере *Wolpert Group 402 MVD*. Для измерения ударной вязкости материалов применяли маятниковый копер *Metro com* при использовании образцов с V-образным надрезом. Износостойкость полученных сплавов определяли в условиях трения о закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 17367-71), трения о нежестко закрепленные частицы абразива (ГОСТ 23.208-79), а также в условиях газоабразивного (ГОСТ 23.201-78) и гидроабразивного воздействия. Коррозионные испытания полученных слоев проведены с использованием методов анодного травления в ингибированной серной кислоте и травления в азотной кислоте с определением потери массы образцов (ГОСТ 6032-2017). Магнитные свойства (магнитную проницаемость) поверхностно легированных сплавов оценивали по ГОСТ 12119.5-98 и международным стандартом *IEC 60404-15*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых материалов состава *B-Me (Cr, Fe, Ni)* приводит к формированию на заготовках из хромоникелевой аустенитной стали упрочненных слоев повышенной толщины, характеризующихся высоким качеством строения.

2. Структура наплавленного борсодержащего слоя, уровень его износостойкости и прочностных свойств определяются наличием в наплавочной порошковой смеси смачивающего компонента, его типом и содержанием. Введение смачивающего компонента позволяет увеличить толщину упрочненных соединениями бора с металлами слоя до 3 мм. Варьирование типом и концентрацией смачивающего компонента приводит к формированию боридов, различных по составу и морфологии, определяющих комплекс физико-механических и коррозионных свойств поверхностно легированных сплавов.

3. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковой смеси аморфного бора и 10 мас. % хрома позволяет сформировать в поверхностных слоях стальных заготовок первичные кристаллы боридов хрома и легированные бориды железа, прочно закрепленные в пластичной матрице. По сравнению с хромоникелевой аустенитной сталью структура этого типа обеспечивает двукратное повышение коррозионной стойкости, снижение уровня магнитной проницаемости μ до 0,99, повышение износостойкости в 2,5 раза в условиях гидроабразивного воздействия (при малых углах атаки 20°) и в 5 раз при воздействии закрепленных и нежестко закрепленных абразивных частиц.

4. Технология вневакуумной электронно-лучевой наплавки борсодержащих порошковых смесей рекомендуется для упрочнения изделий, используемых в нефтедобывающей промышленности, подверженных интенсивному воздействию абразивной и агрессивной среды, к которым предъявляются высокие требования по уровню магнитной проницаемости материала.

Степень достоверности и апробация результатов

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

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на международной конференции «*Innovations in mechanical engineering*» (г. Кемерово) в 2019 г.; международной конференции «*Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies*» (г. Новосибирск) в 2018 г.; международной конференции «Химические технологии функциональных материалов» (г. Новосибирск) в 2018 и 2019, 2020 гг.; всероссийской конференции «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск) в 2017, 2018, 2019, 2020 и 2021 гг.; международной конференции «*Progress through Innovations Proceedings International Academic and Research Conference of Graduate and Postgraduate Students*» (г. Новосибирск) в 2017 и 2018 гг.; XXIV Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (г. Магнитогорск) в 2018 г.; всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы современной науки» (г. Омск) в 2018 и 2019 гг.; всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы в машиностроении» (г. Новосибирск) в 2018 г.; международной конференции «Сварка в Рос-

сии» (г. Томск) в 2019 г; международной конференции «*Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures*» (г. Томск) в 2019 г.; междисциплинарном научном форуме с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии" (г. Москва) в 2018 г.

Личный вклад автора. Заключался в формулировании задач диссертационного исследования, подготовке образцов, наплавке поверхностно-упрочненных слоев, проведении структурных исследований и комплекса испытаний, анализе экспериментальных данных и сопоставлении полученных результатов с литературными данными, формулировании выводов по результатам исследований.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 16 публикаций, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК и 8 публикаций в изданиях, индексируемых в базах данных *Web of Science* и *Scopus*, 5 публикаций в сборниках трудов конференций.

Соответствие паспорту заявленной специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствует пунктам 1, 10 паспорта специальности 05.16.09. – Материаловедение (в машиностроении) (в соответствии с новой номенклатурой научных специальностей: 2.6.17 – Материаловедение).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, четырех приложений. Общий объем работы составляет 188 страниц и включает 84 рисунка, 8 таблиц, список литературы, состоящий из 176 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена область исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, представлены положения, выносимые на защиту, указана научная и практическая значимость, отражена апробация результатов работы.

В первой главе представлен обзор научной литературы по проблемам поверхностного упрочнения хромоникелевой аустенитной стали, формирования высокопрочных слоев на стали, влияния легирующих компонентов на структуру и свойства модифицированной нержавеющей стали. Особое внимание уделено процессу насыщения поверхности стальных заготовок бором. Обозначены наиболее важные проблемы, касающиеся формирования износостойких поверхностных боридных слоев.

Во второй главе изложено описание технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков аморфного бора и разных смачивающих компонентов (*Cr, Fe, Ni*) на стальные заготовки. Функцию основного материала выполняла хромоникелевая аустенитная сталь 12Х18Н9Т. В качестве материалов, предназначенных для формирования поверхностных слоев, были использованы порошки аморфного бора (*B*) марки А (ТУ 212-001-49534204-2003), хрома марки ПХ1С (ТУ 14-1-1474-75, *POLEMA*), никеля марки ПНЭ-1 и восстановленного железа марки Ч (ТУ 6-09-2227-81, ВЕКТОН).

Наплавка износостойких борсодержащих слоев осуществлялась на промышленном ускорителе электронов типа ЭЛВ-6, разработанном и изготовленном в Институте ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск). Энергия электронного пучка E составляла 1,4 МэВ, скорость перемещения заготовок относительно луча $V = 10$ мм/с, расстояние от выпускного окна до заготовки $H = 90$ мм. Силу тока пучка электронов I изменяли в диапазоне от 22 мА до 24 мА.

Исследования структуры поверхностно-упрочненных слоев проводили с применением методов световой, растровой электронной микроскопии, рентгенофазового анализа. Количественный анализ доли бора проводили методом потенциометрического титрования. Для оценки триботехнических свойств материалов использовали методы определения стойкости в условиях трения о закрепленные и нежестко закрепленные абразивные частицы, гидро-, газоабразивного воздействия. Микротвердость исследуемых в работе материалов определяли на микротвердомере *Wolpert Group 402MVD*. Исследовали поведение анализируемых слоев при их динамическом разрушении материалов на ударный изгиб на маятниковом копре *Metrocom*. Коррозионную стойкость полученных материалов оценивали методами анодного травления в ингибированной серной кислоте и травлением в азотной кислоте с определением потери массы. Магнитную проницаемость определяли в соответствии со стандартами, основанными на измерении индукции магнитного поля.

В третьей главе диссертационной работы проанализированы структурно-фазовые преобразования, происходящие при наплавке порошковой смеси «аморфный бор B - смачивающий компонент $Me (Cr, Fe, Ni)$ » на образцы из стали 12Х18Н9Т. В структуре модифицированных слоев отсутствуют дефекты в виде пор, газовых раковин, трещин, характерные для некоторых видов

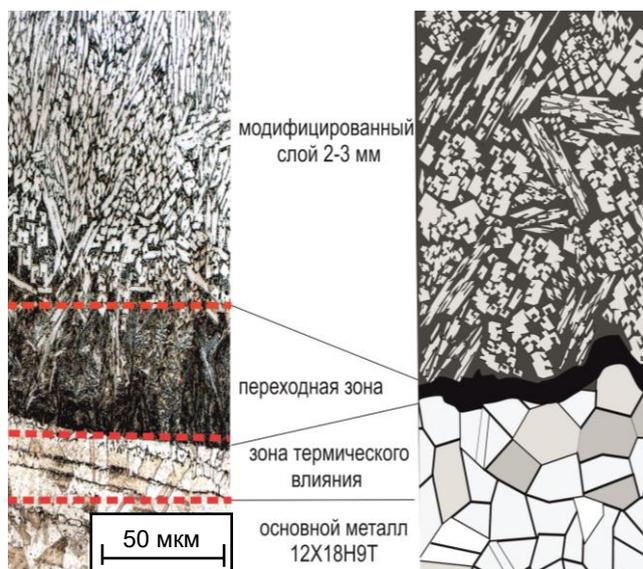


Рисунок 1 – Структура и схема строения поперечного сечения наплавленного слоя, сформированного с использованием смачивающего компонента

наплавки. В процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей на заготовки из стали 12Х18Н9Т формируется градиентная структура, в которой выделяются три слоя (рисунок 1). Верхний модифицированный слой характеризуется присутствием частиц упрочняющей фазы. Переходная зона, расположенная глубже, имеет эвтектическое строение. Третья зона – зона термического влияния и основного материала. Общая толщина модифицированного слоя достигает 3,0 мм. При исследовании фрактограмм изломов поверхностных слоев установлено, что расслоения в зонах сопряжения модифицированных слоев

с основным металлом не происходит. Плоские участки, наблюдаемые на фрактограммах, свидетельствуют о высокой хрупкости боридных фаз.

Практически на всех изломах слоев, содержащих смачивающие компоненты, зафиксированы признаки транскристаллитного разрушения материала (рисунок 2).

В структуре наплавленных слоев упрочняющей фазой являются бориды состава $(Fe, Cr)_2B$ (рисунок 3). Детальное исследование дифракционных картин свидетельствует о присутствии в поверхностных слоях боридов хрома (Cr_2B) и γ -твердого раствора на основе Fe и Ni . Экспериментально установлено, что независимо от смачивающего компонента (Fe, Ni, Cr), концентрация бора, участвующего в формировании модифицированного слоя, не превышает 6 мас. %. Следует отметить, что фазовый состав наплавленных слоев одинаков. Дополнительных фаз, согласно анализу дифракционных картин, не обнаруживается.

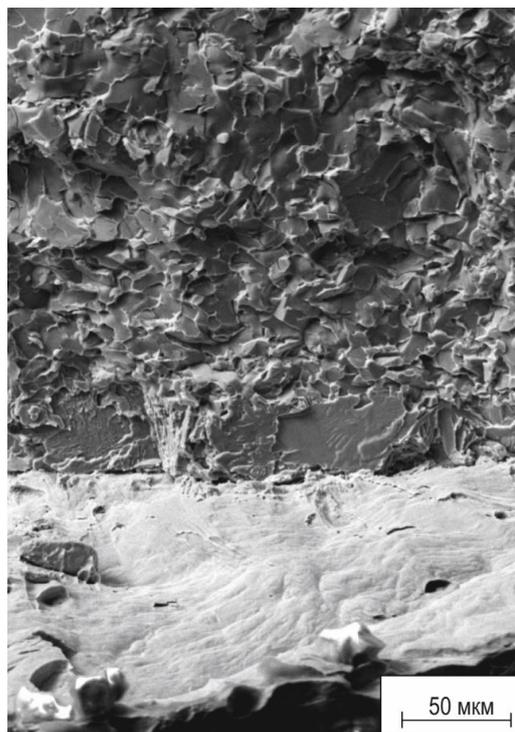


Рисунок 2 – Фрактограммы изломов поверхностных слоев, модифицированных методом ВЭЛН. Наплавка в присутствии железа при $I = 23$ мА

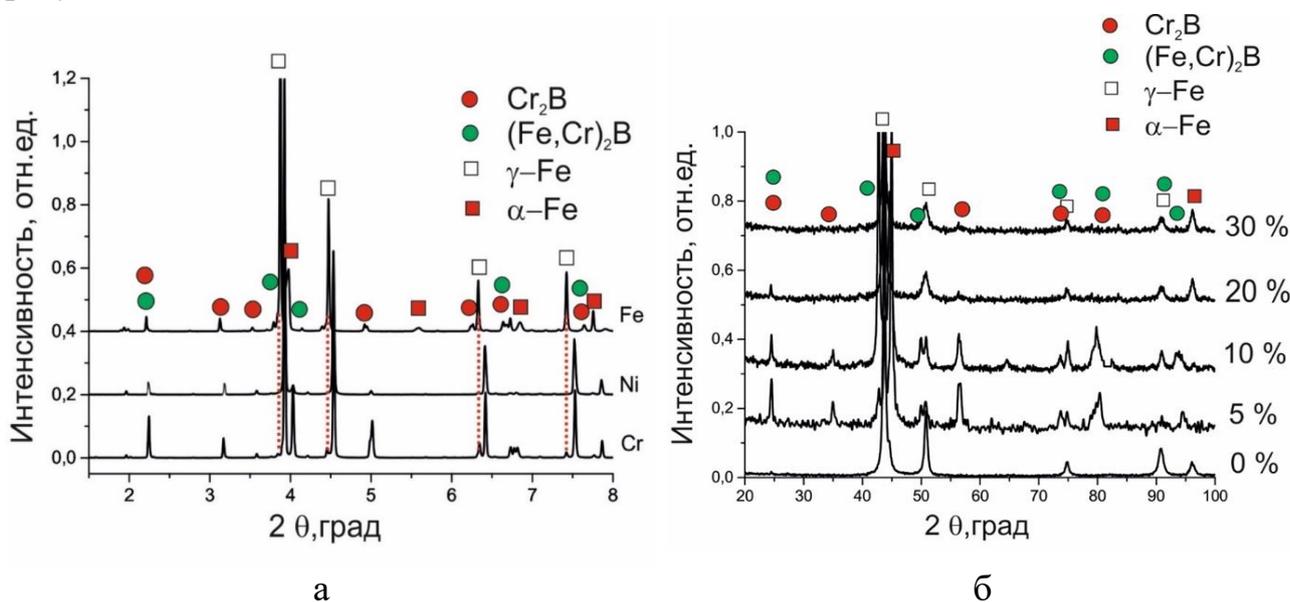


Рисунок 3 – Рентгенограммы материалов, сформированных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси аморфного бора с 10 мас. % различных смачивающих компонентов ($I = 23$ мА)

Тип смачивающего компонента оказывает существенное влияние на показатели микротвердости наплавленных материалов (рисунок 4). Введение в наплавочную смесь 10 мас. % никеля приводит к значительному (до 600–700 HV) снижению микротвердости наплавленного слоя. Полученный результат объясняется снижением объемной доли упрочняющей фазы, а также неограни-

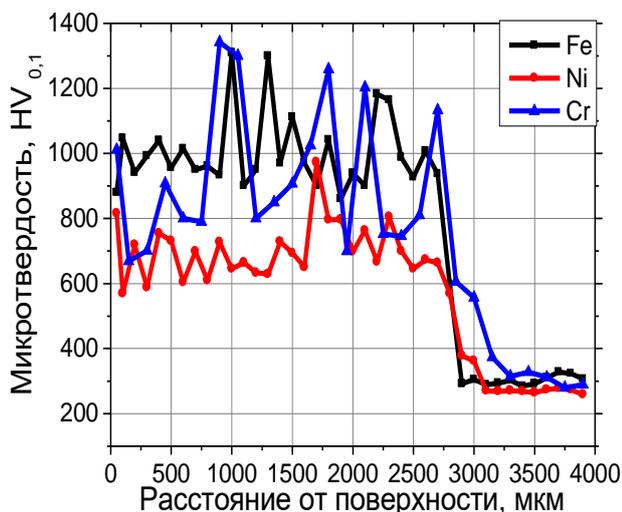


Рисунок 4 – Микротвердость слоев, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошка аморфного бора с различными смачивающими компонентами ($I = 23$ мА)

параметром являлась концентрация хрома в наплавочной смеси (5, 10, 20, 30 мас. % Cr). При низкой концентрации хрома (5 и 10 мас. %) основной упрочняющей фазой является борид хрома Cr_2B (рисунок 5 а). Наплавка порошковой смеси с 20 и 30 мас. % Cr сопровождается образованием доэвтектической структуры (рисунок 5 б, в). Увеличение содержания хрома приводит к формированию в сплавах боридов сложного состава $(Fe, Cr)_2B$ и снижению уровня твердости.

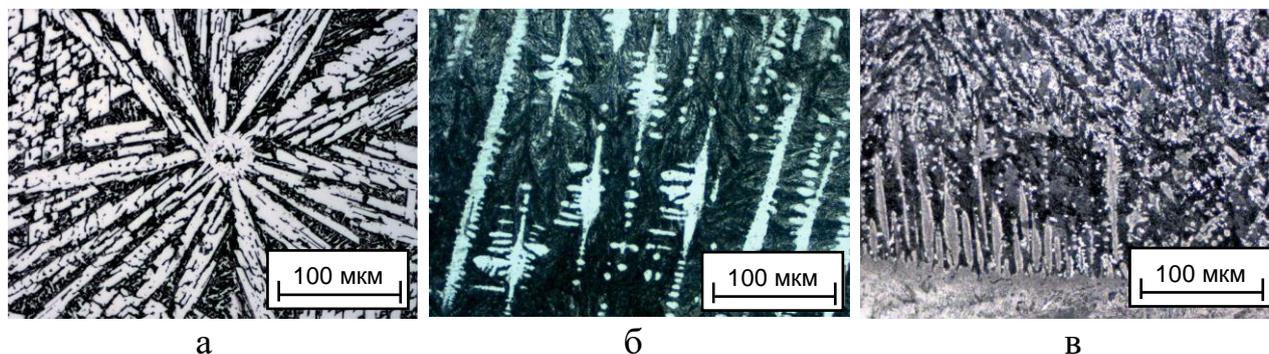


Рисунок 5 – Микроструктура модифицированного слоя, полученного методом ВЭЛН порошковой смеси бора с 10 (а); 20 (б); 30 (в) мас. % Cr, $I = 23$ мА

Наиболее низкие значения микротвердости (300–350 HV) соответствуют образцам, полученным при наплавке порошковых смесей, содержащих 30 мас. % Cr. Введение в наплавочную смесь 20 мас. % Cr сопровождается увеличением микротвердости до 400–500 HV. В процессе кристаллизации этих сплавов формируется структура эвтектического типа. Концентрации бора в составе наплавляемой порошковой смеси недостаточно для образования крупных высокопрочных кристаллов боридов. Большой объем хрома и железа, поступающего в расплав из основного материала, доводит содержание компонентов в поверхностно легированном слое до эвтектического состава. Максимальный уровень

растворимостью никеля в железе, поступающего из основного материала. Использование в качестве смачивающего компонента хрома приводит к формированию слоев, микротвердость которых (1000–1200 HV) соизмерима с микротвердостью слоев, полученных при смачивании бора железом. При продвижении вглубь наплавленного слоя по мере снижения количества бора появляются участки, обедненные кристаллами упрочняющей фазы, что соответствующим образом отражается на твердости материала.

Наплавка порошковой смеси B–Cr осуществлялась при силе тока $I = 23$ мА. Варьируемым технологическим

микротвердости (1500–1650 HV) соответствует наплавке порошковой смеси, в состав которой входит 5 мас. % хрома. Близкие значения (1400–1550 HV) зафиксированы при электронно-лучевой наплавке смеси с 10 мас. % Cr . Для этих сплавов характерно формирование структуры заэвтектического типа. Бориды хрома Cr_2B и $(Fe, Cr)_2B$ обладают более высокими прочностными свойствами по сравнению с эвтектикой, в состав которой входит низкопрочный пластичный γ -твердый раствор на основе Fe и Ni . Скачки микротвердости, достигающие 250–400 HV , обусловлены неоднородностью структуры наплавленных слоев.

Результаты металлографических исследований сплавов, полученных без использования смачивающего компонента, показали, что при реализации данного технологического процесса формируются упрочненные слои, максимальная толщина которых достигает $\sim 1,5$ мм. Кроме того, зафиксированы явно выраженные признаки неоднородности структуры наплавленных слоев, обусловленной особенностями перемешивания жидкости конвективными потоками, возникающими в процессе ускоренного нагрева материала.

Четвертая глава работы посвящена оценке комплекса эксплуатационных свойств поверхностно модифицированной стали 12X18H9T. Наиболее высокий уровень износостойкости наплавленных материалов при воздействии закрепленных и нежестко закрепленных частиц абразива, а также в условиях гидро- и газоабразивного изнашивания обеспечивает режим, основанный на электронно-лучевой наплавке смеси $B-10$ мас. % Cr при токе пучка электронов 23 мА. Стойкость наплавленных материалов при трении о закрепленные и нежестко закрепленные частицы абразива возросла в 5 раз (рисунок 6). По сравнению со сталью 12X18H9T износостойкость полученных в работе сплавов в условиях газо- и гидроабразивного воздействия при малых углах атаки (15, 20 градусов) увеличилась в 5 и 2 раза соответственно.

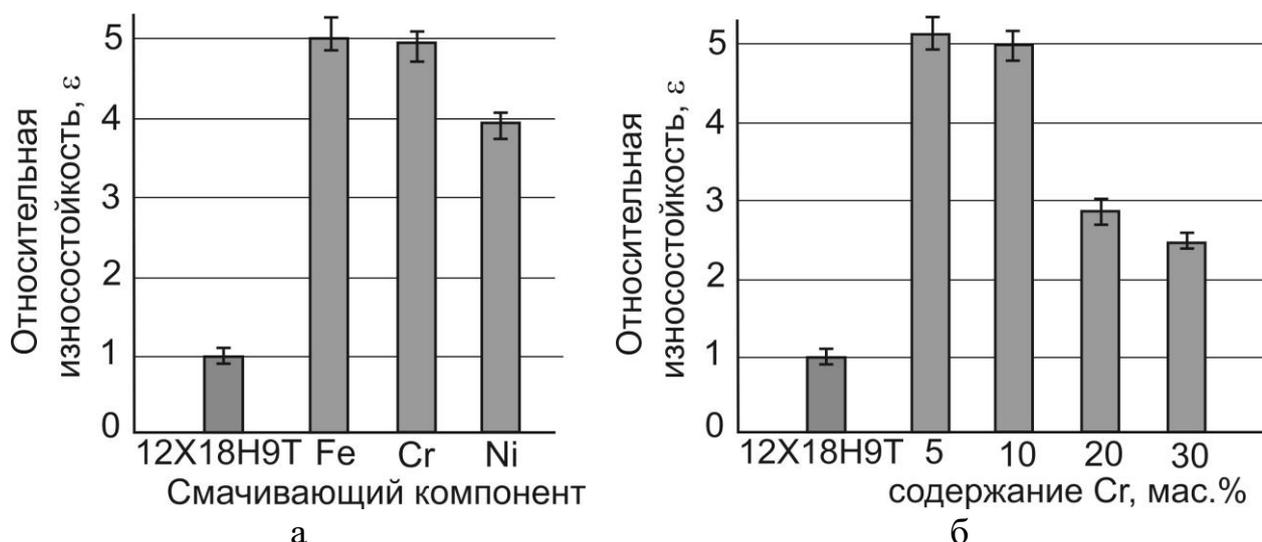


Рисунок 6 – Относительная износостойкость стали 12X18H9T (эталон) и слоев, полученных наплавкой смесей аморфного бора с различным содержанием хрома, в условиях воздействия закрепленных частиц абразива. Ток наплавки $I = 23$ мА

На рисунке 7 приведены значения относительной износостойкости сплавов в условиях гидроабразивного воздействия. Высокий комплекс триботехни-

ческих свойств наплавленных материалов обусловлен особенностями их тонкого строения. Максимальными значениями износостойкости характеризуются поверхностные слои, содержащие кристаллы боридов хрома Cr_2B и сложные бориды $(Fe, Cr)_2B$, распределенные в окружающей их пластичной матрице из твердого раствора.

Вневакуумная электронно-лучевая наплавка высокопрочных слоев на поверхности образцов из хромоникелевой стали сопровождается охрупчиванием материалов. По сравнению со сталью 12X18H9T уровень ударной вязкости поверхностно упрочненных материалов в 2 раза ниже. В процессе динамических испытаний расслоения в зонах сопряжения модифицированных слоев с основным металлом не происходит, что свидетельствует о высоких значениях адгезионных свойств наплавленных материалов (рисунок 2).

Величина магнитной проницаемости (μ) сплавов, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков аморфного бора в сочетании с 5–30 мас. % хрома, не превышает 1,01, что соответствует требованиям, предъявляемым к немагнитным материалам (рисунок 8). Введение в наплавочные смеси порошков железа и никеля является фактором, приводящим к увеличению магнитной проницаемости модифицированных сплавов. Слои, полученные методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси аморфного бора и хрома, могут быть рекомендованы в качестве парамагнитных покрытий для изделий, к которым предъявляются особые требования по уровню магнитных свойств.

Особое внимание в диссертационной работе уделяли оценке показателей коррозионной стойкости борсо-

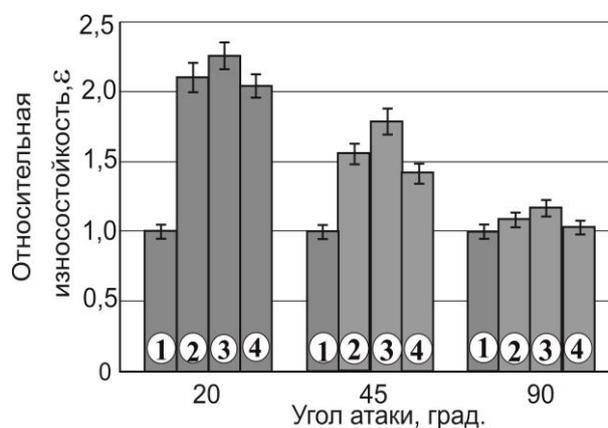


Рисунок 7 – Относительная износостойкость эталона (1) и наплавленных слоев ($I = 23$ мА), содержащих различные смачивающие компоненты, в условиях гидроабразивного изнашивания. 2 – 10 мас. % Fe; 3 – 10 мас. % Cr; 4 – 10 мас. % Ni

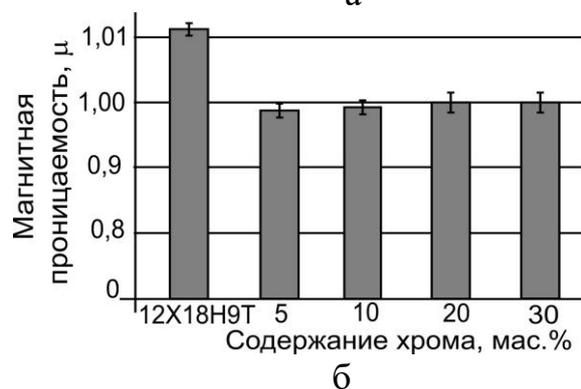
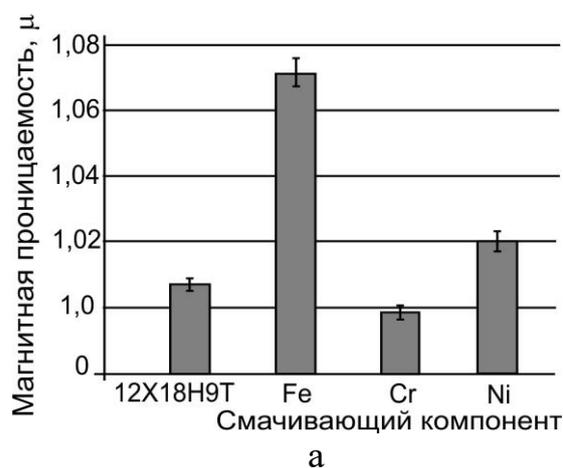


Рисунок 8 – Влияние типа смачивающего компонента (а) и содержания хрома (5–30 мас. %) (б) на магнитную проницаемость поверхностно легированных сплавов. Ток наплавки $I = 23$ мА

держущих слоев, сформированных на заготовках из хромоникелевой аустенитной стали 12X18H9T. Результаты анализа коррозионной стойкости представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Скорость коррозии исследуемых материалов в агрессивных средах

Материал	Скорость коррозии в серной кислоте, мм/год	Скорость коррозии в азотной кислоте, мм/год
12X18H9T (эталон)	1,40	0,05
<i>B+Fe</i> (10 мас. %), $I = 22$ мА	1,18	0,35
<i>B+Fe</i> (10 мас. %), $I = 23$ мА	1,07	0,10
<i>B+Fe</i> (10 мас. %), $I = 24$ мА	1,17	0,19
<i>B+Ni</i> (10 мас. %), $I = 23$ мА	0,99	0,05
<i>B+Cr</i> (5 мас. %), $I = 23$ мА	0,93	0,03
<i>B+Cr</i> (10 мас. %), $I = 23$ мА	0,81	0,02
<i>B+Cr</i> (20 мас. %), $I = 23$ мА	1,06	0,04
<i>B+Cr</i> (30 мас. %), $I = 23$ мА	1,07	0,05

Возрастание коррозионной стойкости анализируемых материалов объясняется благоприятным влиянием хрома и никеля, а также формированием в поверхностных слоях химически стойких боридов хрома и железа. Морфологию поверхностей образцов после коррозионных испытаний анализировали, используя метод растровой электронной микроскопии (рисунок 9).

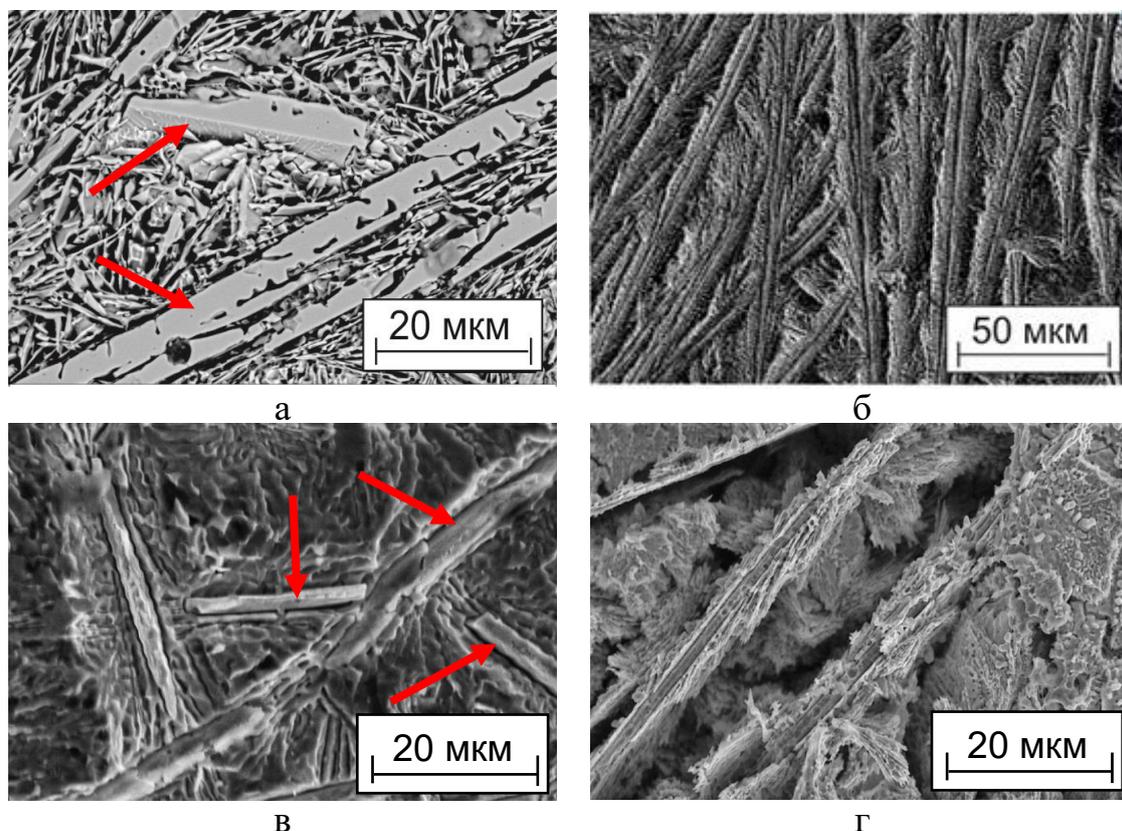


Рисунок 9 – Морфология поверхностных слоев, полученных методом ВЭЛН ($I = 23$ мА) после коррозионных испытаний в ингибированной серной (а, б) и азотной (в, г) кислотах. а, в – наплавка порошковой смеси с 10 мас. % Cr; б, г - наплавка порошковой смеси с 20 мас. % Cr. Стрелками указаны кристаллы крупных боридов

Создание методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки борсо-держакщих слоев на заготовках из хромоникелевой стали позволяет сохранить или повысить уровень коррозионной стойкости в кипящей концентрированной азотной кислоте и ингибированной серной кислоте. Наибольший положительный эффект зафиксирован при исследовании образцов, полученных в процессе электронно-лучевой наплавки порошковой смеси «аморфный бор – 10 мас. % хрома». Модифицированный таким образом слой в азотнокислом растворе корродирует со скоростью 0,02 мм/год (при скорости коррозии стали 12Х18Н9Т 0,05 мм/год). В серной кислоте скорость коррозии наплавленного материала составила 0,81 мм/год, что в 1,7 раза ниже по сравнению со сталью 12Х18Н9Т (1,4 мм/год). Разработанный материал может быть рекомендован в качестве защитного коррозионностойкого слоя для изделий из конструкционных хромоникелевых сталей.

В пятой главе предложены пути практического использования результатов диссертационной работы. Обоснованные в работе технические решения рекомендованы для использования в ООО «Центр технологий литья», «ООО ЭкспертНефтеГаз» и АО Новосибирский завод радиодеталей «Оксид». На примере пресс-формы, используемой для литья под давлением, показана возможность более чем двукратного повышения износостойкости по сравнению с изделиями, упрочненными по стандартной технологии (закалка с низким отпускком). Результатом поверхностного упрочнения элементов клапана телеметрической системы является повышение износостойкости материала в 2,5 раза по сравнению с аналогичными изделиями, упрочненными методом детонационного нанесения твёрдосплавных покрытий. В разделе отражены практические рекомендации по модифицированию внутренних поверхностей гальванических ванн, применяемых для химической и электрохимической обработки изделий.

Результаты проведенных исследований используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технологии новых материалов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов, полученных при выполнении диссертационной работы, позволяет сделать следующие выводы.

1. Технологическими параметрами, оказывающими наиболее существенное влияние на структуру, морфологию и качество упрочненного слоя, являются величина тока пучка электронов и доля смачивающего компонента, содержащегося в наплавочной порошковой смеси. Повышение силы тока пучка на 1 мА приводит к увеличению толщины модифицированного слоя примерно на 10 % и уменьшению объемной доли боридов железа и хрома в структуре слоев. Наиболее высоким комплексом свойств характеризуются слои, сформированные при токе наплавки 23 мА.

2. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошка аморфного бора в отсутствие смачивающего компонента на заготовки из хромоникелевых аустенитных сталей нецелесообразна, поскольку приводит к формированию неоднородных по строению дефектных поверхностных слоев толщиной ~ 1 мм, содержание бора в которых не превышает 2 мас. %. Наплавка порошковых смесей «аморфный бор – смачивающий компонент $Me (Cr, Fe, Ni)$ »

сопровождается формированием поверхностно легированных бездефектных слоев толщиной до 3 мм, содержащих ~ 6 мас. % бора.

3. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых смесей « $B - Me (Cr, Fe, Ni)$ » на заготовки из хромоникелевой аустенитной стали сопровождается формированием градиентной структуры, представляющей композицию боридов $(Fe, Cr)_2B$, Cr_2B и γ -твердого раствора на основе Fe и Ni . Микротвердость поверхностно-упрочненного материала, сформированного при реализации базового режима наплавки, составляет ~ 1300 HV .

4. При наплавке порошковых смесей, содержащих аморфный бор в сочетании с 5–10 мас. % хрома, формируется гетерофазная структура, основными составляющими которой являются кристаллы боридов дихрома и легированных боридов железа, распределенные в эвтектической матрице. В сплаве, полученном из порошковой смеси, содержащей 20 мас. % хрома, формируется структура дендритного типа с мелкими кристаллами борида хрома Cr_2B . Увеличение в наплавочной смеси количества порошка хрома до 30 мас. % сопровождается формированием поверхностно легированного сплава, основной структурной составляющей в котором является твёрдый раствор, характеризующийся низким уровнем прочностных свойств и высокой пластичностью.

5. Наиболее высокий уровень износостойкости поверхностно легированных материалов при воздействии закрепленных и нежестко закрепленных частиц абразива, а также в условиях гидро- и газоабразивного изнашивания обеспечивает режим, основанный на электронно-лучевой наплавке смеси аморфного бора и 10 мас. % хрома при токе пучка электронов 23 мА. Стойкость наплавочных материалов при трении о закрепленные и нежестко закрепленные частицы абразива возрастает в 5 раз. По сравнению со сталью 12Х18Н9Т износостойкость полученных в работе сплавов в условиях газоабразивного воздействия (при угле атаки 15 градусов) и гидроабразивного изнашивания (при угле атаки 20 градусов) увеличилась в 5 и 2 раза соответственно. Максимальными значениями износостойкости характеризуются поверхностные слои, содержащие кристаллы борида хрома Cr_2B и сложные бориды $(Fe, Cr)_2B$, распределенные в окружающей их пластичной матрице из твердого раствора.

6. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка борсодержащих материалов позволяет сохранить, а в ряде случаев повысить уровень коррозионной стойкости заготовок их хромоникелевой стали в кипящей концентрированной азотной и ингибированной серной кислотах. Лучшими свойствами обладает сплав, полученный в процессе электронно-лучевой наплавки порошковой смеси «аморфный бор – 10 мас. % хрома». Модифицированный таким образом материал в азотнокислом растворе корродирует со скоростью 0,02 мм/год (при скорости коррозии стали 12Х18Н9Т 0,05 мм/год). В серной кислоте скорость его коррозии составила 0,81 мм/год, что в 1,7 раза ниже по сравнению со сталью 12Х18Н9Т.

7. Величина магнитной проницаемости (μ) сплавов, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков аморфного бора и 5–30 мас. % хрома, не превышает 1,01, что соответствует требованиям, предъявляемым к немагнитным материалам. Добавление в наплавочные смеси порошков железа и никеля приводит к увеличению магнитной проницаемости поверхностно модифицированных материалов. Слои, полученные методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси аморфного бора и хрома, могут быть рекомендованы в качестве парамагнитных покрытий для изделий, к кото-

рым в связи с условиями эксплуатации предъявляются особые требования по уровню магнитных свойств.

8. Формирование в процессе электронно-лучевой наплавки слоев, прочно связанных с основным металлом, сопровождается охрупчиванием поверхностно упрочненной стали. Ударная вязкость модифицированного электронным пучком материала в 2 раза ниже по сравнению с заготовками из стали 12Х18Н9Т. Фрактографические исследования изломов свидетельствуют о высоком уровне адгезионных свойств поверхностно легированных слоев, отсутствии в сплавах пор и отслоений.

9. На основании результатов проведенных исследований разработана технология электронно-лучевого упрочнения рабочих поверхностей литейной пресс-формы. Промышленные испытания показали более чем двукратный рост износостойкости разработанного сплава по сравнению с материалом, упрочненным по типовой технологии (закалка в сочетании с низким отпускком). Результатом поверхностного упрочнения элементов клапана телеметрической системы по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки борсодержащих порошковых смесей является повышение износостойкости материала в 2,5 раза по сравнению с аналогичными изделиями, упрочненными методом детонационного нанесения твёрдосплавных покрытий. Промышленные испытания показали, что стойкость к коррозии стенок гальванической ванны, обработанной по предлагаемой технологии, в 2 раза выше по сравнению с ванной без дополнительной поверхностной защиты. Магнитная проницаемость наплавленного слоя, полученного по предлагаемой технологии, в 1,5 раза ниже, чем значение μ исходной хромоникелевой стали.

10. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при реализации образовательных программ бакалавриата и магистратуры по направлению «Материаловедение и технологии материалов».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Результаты исследований, представленных в диссертационной работе, позволяют рекомендовать полученные материалы для формирования многофункциональных защитных слоев на поверхностях деталей, работающих в коррозионных средах и/или при воздействии абразивных частиц. Эти слои могут быть использованы в качестве парамагнитных покрытий для изделий, к которым в связи с условиями эксплуатации предъявляются особые требования по уровню магнитных свойств. При дальнейшем развитии темы исследования следует обратить внимание на факторы, обеспечивающие равномерное распределение упрочняющих фаз по всей глубине наплавленных слоев. Одно из направлений дополнительных исследований может быть связано с оценкой влияния различных видов термической обработки на структуру и свойства наплавленных слоев. Предполагается, что дополнительное термическое воздействие на материал приведет к снижению уровня внутренних напряжений и повышению трещиностойкости материала.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК

1. Коррозионная стойкость материалов, полученных электронно-лучевой наплавкой порошковых Fe-Cr-Ni-Ti-смесей / Е. А. Дробяз, М. Г. Голковский, И. К. Чакин, Е. Г. Бушуева, Д. С. Волков // *Металловедение и терми-*

ческая обработка металлов. – 2021. – №12. – С. 48-53. (*Переводная версия представлена в Scopus и Web of Science*).

2. Повышение износостойкости хромоникелевой стали при гидроабразивном воздействии методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки бора / **Е. Г. Бушуева**, Б. Е. Гринберг, В. А. Батаев, Е. А. Дробяз // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2018. – №10. – С. 26-30. (*Переводная версия представлена в Scopus и Web of Science*).

3. Структурные особенности и износостойкость слоев, сформированных наплавкой самофлюсующегося никелевого сплава и бора электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу / Т. А. Зимоглядова, **Е. Г. Бушуева**, А. А. Штерцер, Б. Е. Гринберг, Н. Н. Соболева, Е. Коллманнсбергер, Д. Э. Сафарова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22. – № 2. – С. 89-103. (*Переводная версия представлена в Scopus и Web of Science*).

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science / Scopus

4. *Influence of chromium concentration on corrosion resistance of surface layers of stainless steel* / **E. G. Bushueva**, Y. M. Turlo, G. V. Khamgushkeeva // *MATEC Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 340. – P. 01022-01027.

5. *Structure and corrosion resistance of the layers formed on chromium-nickel steel by electron beam processing* / **E. G. Bushueva**, E. A. Mozgunova, E. M. Turlo, K. A. Elizaryev // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – V. 31. – P. 558-561.

6. *Wear Resistance Increasing of Austenitic Steel by the Surface Hardening with Titanium Carbide* / **E. G. Bushueva**; Ph. A. Kuzin; E. A. Drobyaz // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – V. 11. – P. 342-347.

7. *Structure and Properties of Austenitic Steel Surface-doped with NbC* / P.A. Ryabinkina, **E.G. Bushueva**, A.A. Nikulina // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – V. 11. – P. 436-440.

8. *Boron-doped coatings on stainless steel formed by the electron beam processing* / **E. G. Bushueva**; P. A. Ryabinkina, P. A. Gorovenko // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – V. 12. – P. 155-158.

9. *Structure and Property Observations for Ti-Al-Cr Intermetallic Coatings* / O. A. Matts, M. V. Rashkovets, L. V. Chuchkova, **E. G. Bushueva** // *Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures*. – 2019 AIP Conference Proceedings. – 2019. – V. 2167. – P. 020220-1-020220-4.

10. *Structure and Properties of the AISI 304 Steel Surface Layers after Alloying with Boron and Me (Cr, Ni, Fe) by Electron Beam Treatment* / **E. G. Bushueva**, P. A. Ryabinkina, V. A. Bataev // *Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019 AIP Conference Proceedings*. – 2019. – V. – 2167. – P. 020044-1-020044-4.

11. *Investigation of the surface-hardened layers obtained by electron-beam cladding of boron-containing powders at the air atmosphere* / D.S. Ovdina, I. A. Balaganskij, **E.G. Bushueva** // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – V. – 2051. – P. 020224-1-020224-6.

Научные результаты диссертации отражены также в других научных публикациях, материалах конференций и тд.:

12. Структура и коррозионностойкость слоев, сформированных на хромоникелевой стали методом электронно-лучевой обработки / **Е.Г Бушуева**, Мозгунова Е. А., Турло Е. М. // 6-я Международная Российско-Казахстанская научно-практическая конференция «Химические технологии функциональных материалов», Новосибирск, 27-29 апреля 2020 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. –2020. – С. 42-45.

13. Жаростойкость покрытий, сформированных на стали 12Х18Н9Т методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / Ильин Е. В., **Бушуева Е. Г.**, Батаев В. А. // Всероссийская конференция «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, 2-7 декабря 2019 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. –2019 г. – С. 206-209.

14. Структура и свойства борсодержащих покрытий / **Бушуева, Е. Г.**, Ильин, Е. В., Сапина, А. В., Рябинкина, П. А., Батаев, В. А. // VIII Региональной научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы современной науки», Омск, 27-29 апреля 2019 г. – Омск: Изд-во ОмГТУ. –2019. – С. 10-15.

15. Влияние смачивающего компонента на структуру и свойства покрытий, сформированных на стали 12Х18Н9Т методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / **Бушуева Е. Г.**, Ильин Е. В., Герасименко Т. А. // 5-я Международная Российско-Казахстанская научно-практическая конференция «Химические технологии функциональных материалов», - Новосибирск, 25-27 апреля 2019 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. –2019. – С. 353-355.

16. Изменение коррозионной стойкости покрытий, сформированных при высокоэнергетической обработке стали / Светлов Ф. В., Мозгунова Е. А., **Бушуева Е. Г.** // 5-я Международная Российско-Казахстанская научно-практическая конференция «Химические технологии функциональных материалов», Новосибирск, 25-27 апреля 2019 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2019. – С. 363-366.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Тел./факс: (383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16, объем 1,125 п. л., тираж 100 экз.

Заказ № 869 подписано в печать 5 апреля 2022 г.