

На правах рукописи



Зимоглядова Татьяна Алексеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕХНОЛОГИИ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ
НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ САМОФЛЮСУЮЩЕГОСЯ
НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА В СОЧЕТАНИИ С НИОБИЕМ И БОРОМ**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Батаев Анатолий Андреевич

Официальные оппоненты: Гнюсов Сергей Федорович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
отделение электронной инженерии, профессор
г. Томск

Соболева Наталья Николаевна,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
лаборатория конструкционного материаловедения, научный сотрудник
г. Екатеринбург

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

Защита состоится «19» декабря 2019 г. в 14⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета, а также на сайте
https://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=17662

Автореферат разослан « » ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Андрей Геннадиевич Тюрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Интенсивный износ тяжело нагруженных деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания, воздействия повышенных температур и агрессивных сред является одной из основных проблем современного машиностроения. Высокая концентрация напряжений в поверхностных слоях деталей при ударном и циклическом нагружении, а также в условиях контакта с абразивными частицами и химически агрессивной средой сопровождается развитием процессов трещинообразования, изнашиванием и коррозионным разрушением материалов.

Один из путей решения отмеченных проблем связан с формированием на поверхности деталей слоев, уровень эксплуатационных свойств которых значительно превышает свойства основного материала. Широкое применение в качестве материалов для формирования твердых слоев, стойких к абразивному изнашиванию, сухому трению скольжения и трению в условиях граничной смазки, нашли самофлюсующиеся сплавы на основе никеля. Одной из особенностей данных сплавов является наличие в их составе флюсующих компонентов, защищающих ванну расплава от развития окислительных процессов в ходе наплавки. Низкая температура плавления самофлюсующихся сплавов (950–1150 °С) и высокая смачиваемость являются основными факторами, обеспечивающими их высокую технологичность.

Для формирования покрытий из самофлюсующихся сплавов может быть использован широкий спектр оборудования. Одной из современных технологий, отличающихся высокой производительностью, является наплавка порошковых смесей пучком электронов, выведенным в воздушную атмосферу. Исследованием процессов, развивающихся при формировании покрытий различного функционального назначения с использованием технологии наплавки релятивистскими электронными пучками, занимаются сотрудники Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Университета науки и технологии г. Поханг (Южная Корея) и др.

Анализ результатов исследований, выполненных отечественными и зарубежными специалистами, свидетельствуют о том, что повышение эксплуатационных характеристик поверхностных слоев, получаемых наплавкой самофлюсующихся сплавов, возможно за счет введения в структуру материалов ряда дополнительных упрочняющих компонентов. Среди соединений, используемых в качестве упрочняющей фазы самофлюсующихся сплавов, наивысшим комплексом свойств отличаются дибориды переходных металлов (CrB_2 , TiB_2 , HfB_2 , NbB_2). Следует, однако, отметить, что объем данных о модифицировании самофлюсующихся сплавов диборидами тугоплавких металлов в современной литературе относительно мал. Практически не представлены данные о структурно-фазовых преобразованиях, происходящих в процессе формирования износостойких материалов с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси порошков самофлюсующегося сплава, ниобия и бора. Данная проблема является актуальной как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения. Ее решению посвящена представленная работа.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Разработка и создание линейки промышленного роботизированного оборудования на основе мультипучковой элек-

тронно-лучевой технологии для высокопроизводительного аддитивного производства крупноразмерных металлических и полиметаллических деталей, узлов и конструкций для ключевых отраслей РФ», (соглашение 14.610.21.0013, проект *RFMEFI61017X0013*); при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта *RFMEFI57417X0179*; при поддержке НГТУ (темы НИОКР «Исследование влияния состава наплавляемых порошковых композиций, легированных дисперсными частицами на основе *Nb*, на структуру и свойства покрытий, сформированных при высокотемпературном нагреве», «Формирование многофункциональных борсодержащих покрытий на хромоникелевой стали методом вневакуумной электронно-лучевой обработки»), а также в соответствии с проектом РФФИ «Выявление закономерностей влияния многократного воздействия релятивистских пучков электронов на структуру, твердость и износостойкость материалов с покрытиями, упрочненными керамическими частицами тугоплавких металлов» (19-43-543011).

Степень разработанности темы исследования

Самофлюсующиеся сплавы системы *Ni-Cr-Si-B* получили широкое распространение в качестве наплавочных материалов на рабочие поверхности деталей металлургического, горного, энергетического и других типов оборудования. Вклад советских и российских ученых в развитие анализируемых материалов и технологий отражен в работах А.Г. Григорьянца, А.Н. Сафонова, Л.И. Тушинского и др. В настоящее время работы проводятся в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Уральском федеральном университете им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институте машиноведения УрО РАН, Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институте инновационных материалов (*M2i*) (Делфт, Нидерланды) и многих других отечественных и зарубежных организациях.

Самофлюсующиеся никелевые сплавы широко применяют в качестве матричных материалов, составляющих основу композиционных покрытий. Большое число работ посвящено исследованию свойств поверхностных слоев на никелевой основе, упрочненных карбидами вольфрама, титана и хрома. Предложены различные пути получения композиционных слоев типа «*Ni-Cr-Si-B*-сплав + упрочняющие соединения» как добавкой уже сформированных соединений (*TiC*, *WC* и др.) (Н.Н. Соболева, А.Я. Ставертий, С. Guo, К. Van Acker, Q.Li и др. специалисты), так и элементов, вступающих в реакцию с матричным материалом и образующих упрочняющие соединения непосредственно в процессе наплавки (*Nb*, *Zr*, *V* и др.) (I. Hemmati, B. Cai и др.).

Относительно малое количество работ связано с изучением влияния электронно-лучевой наплавки самофлюсующихся сплавов на структуру и комплекс свойств полученных материалов. Структурно-фазовые преобразования, происходящие в процессе оплавления релятивистскими электронными пучками порошковых смесей на основе самофлюсующегося сплава в сочетании с такими элементами, как *Nb*, *Ti*, *Zr*, *Hf*, в научно-технической литературе практически не описаны.

Цель диссертационной работы заключается в повышении триботехнических свойств и стойкости к окислению низкоуглеродистых сталей путем создания на поверхности заготовок функциональных защитных слоев с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей самофлюсующегося никелевого сплава в сочетании с ниобием и бором.

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

1) выбор рациональных технологических параметров вневакуумной электронно-лучевой наплавки, обеспечивающих формирование равномерных по толщине малодефектных слоев самофлюсующегося никелевого сплава на стальных заготовках;

2) анализ структурно-фазовых преобразований, происходящих при наплавке пучками электронов, выведенными в воздушную атмосферу, порошковых композиций типа «самофлюсующийся никелевый сплав + ниобий + бор», взятых в различных весовых соотношениях;

3) исследование триботехнических свойств поверхностно-упрочненных материалов в различных условиях изнашивания; оценка влияния морфологии и распределения дисперсных частиц, выполняющих роль упрочняющей фазы, на износостойкость наплавленных слоев;

4) оценка стойкости к окислению упрочненных слоев, сформированных с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки; определение влияния фазового состава на стойкость наплавленных слоев в условиях воздействия повышенных температур.

Научная новизна

1. Методами структурного анализа выявлены особенности преобразований, происходящих в поверхностных слоях стальных заготовок в процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей на основе самофлюсующегося сплава. Железо, поступающее в ванну жидкого расплава из основного металла и разбавляющее таким образом наплавляемый материал, оказывает существенное влияние на параметры решетки твердого раствора и частиц карбида хрома. Установлено, что в процессе кристаллизации матричной γ -фазы (Ni, Fe) происходит упорядочение по типу $CuAuI$. Фактором, способствующим проявлению данного эффекта, является соотношение никеля и железа, близкое к эквиаtomному.

2. Установлено, что в процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей самофлюсующегося сплава, бора и ниобия образуются высокопрочные композиционные включения длиной до 20 мкм со строением типа «ядро - оболочка». Внутренняя часть включений представляет собой кристалл карбида ниобия NbC в форме дендрита (HV 15000). Полиэдрической оболочкой, окаймляющей карбид, является диборид ниобия NbB_2 твердостью 30000 HV .

3. Методами оценки стойкости материалов в условиях воздействия закрепленных и нежестко закрепленных абразивных частиц показано, что наиболее высокими показателями обладает поверхностный слой, полученный путем вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси, содержащей 65 вес. % самофлюсующегося сплава на никелевой основе, 28 вес. % ниобия и 7 вес. % бора. Объемная доля упрочняющих частиц в сплаве, характеризующемся максимальной износостойкостью, составляет 48 %.

4. Установлено, что для образования в наплавляемых электронным лучом слоях стальных заготовок соединения NbB_2 содержание ниобия и бора в наплавочной порошковой смеси должно превышать 15 вес. %. Содержащийся в меньших количествах ниобий участвует в образовании кристаллов NbC .

5. Установлено, что глубина проплавления поверхностно упрочненных стальных заготовок является более значимым фактором, оказывающим влияние на снижение ударной вязкости, по сравнению с объемной долей и фазовым составом упрочняющих включений, сформированных в процессе электронно-лучевой наплавки смеси самофлюсующегося никелевого сплава, ниобия и бора.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Результаты проведенных в работе структурных исследований расширяют представления о структурных преобразованиях, происходящих при наплавке многокомпонентных смесей на базе никелевых самофлюсующихся сплавов. На основе полученных в работе данных могут быть сформулированы задачи по выбору новых типов смесей для формирования поверхностно-упрочненных слоев по технологии наплавки порошков релятивистскими пучками электронов, выпущенных в воздушную атмосферу.

2. Экспериментально установлены технологические параметры вневакуумной электронно-лучевой обработки самофлюсующегося никелевого сплава, обеспечивающие формирование поверхностно-упрочненных слоев при минимально возможной степени разбавления их основным металлом. Выбранные на основании проведенных исследований соотношения компонентов наплавочных смесей и рациональные технологические режимы их обработки обеспечивают возможность формирования на заготовках из низкоуглеродистой стали защитных слоев повышенной толщины. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов поверхностного упрочнения углеродистых и низколегированных сталей иного химического состава.

3. Состав наплавочной порошковой смеси композиций ($Ni-Cr-Si-B$ -сплав + 35 % ($Nb - B$)), разработанный по результатам проведенных исследований, обеспечивает более чем двукратное увеличение стойкости материалов в условиях абразивного изнашивания. Полученные в работе материалы рационально использовать при производстве изделий ответственного назначения, подверженных интенсивному воздействию абразивной среды.

4. Результаты апробации разработанной технологии, выполненной на примере пресс-формы, свидетельствуют об эффективности проведенных исследований. Предложенные в работе технические решения позволили увеличить долговечность изделия в 2,2 раза. Результаты проведенных исследований применяются в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия».

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

Методология и методы исследования

Защитные слои на поверхности стальных заготовок наплавляли на экспериментальном стенде, основой которого является ускоритель электронов ЭЛВ-6 производства Института ядерной физики им. Будкера СО РАН (г. Новосибирск). Повышенная энергия электронов (~1,4 МэВ) позволяет осуществлять процесс в воздушной атмосфере, что снимает ограничения на габаритные размеры обрабатываемых заготовок.

Анализ литературных данных проводили с использованием отечественных и зарубежных баз данных по естественно-техническим дисциплинам (*Springer Materials, Nature, American Physical Society (APS), Nano, Science Direct, eLibrary.ru*) и других наукометрических систем (*Scopus, WoS, РИНЦ* и др.), баз нормативных стандартов и патентов (РОСПАТЕНТ, ГСНТИ и др.).

Исследования структуры и свойств полученных в работе материалов были проведены в НГТУ на современном аналитическом и испытательном оборудовании центра коллективного пользования «Структура, механические и физические свойства материалов». Уровень используемого оборудования соответствует передовым российским и зарубежным исследовательским лабораториям. С применением металлографического микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Z1m* и растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенного детектором для микро-рентгеноспектрального анализа *INCA X-ACT (Oxford instruments)*, была изучена структура, сформированная в процессе электронно-лучевой наплавки смесей «самофлюсующийся *Ni-Cr-Si-B*-сплав – *Nb – B*» на заготовки из низкоуглеродистой стали 20. Тонкое строение материалов изучали с использованием просвечивающих электронных микроскопов *FEI Tecnai 20 G2 TWIN* (Новосибирский государственный университет) и *Philips CM200* (Исследовательский институт в г. Гестрахт, Германия).

Фазовый состав наплавленных слоев определяли на дифрактометре *ARL X'TRA*. Первоначальная идентификация фаз выполнялась с использованием базы данных *ICDD PDF-4*. С применением томографа *GE Nanotom M* (Университет прикладных наук г. Ландсхут (Германия)) и программного пакета *VGStudio Max 2.2* была выполнена 3D-реконструкция поверхностно-упрочненных материалов. Микротвердость полученных материалов оценивали с использованием прибора *Wolpert Group 402 MVD*. Уровень ударной вязкости в условиях динамического воздействия определяли на маятниковом копре *Metrocom 06103300*. Оценка триботехнических свойств поверхностно-упрочненных материалов в различных условиях абразивного воздействия и сухого трения скольжения осуществляли на машинах трения СМТ-1, ИИ 5018 и других установках российского производства. Стойкость к окислению наплавленных слоев определяли с использованием системы синхронного термического анализа *NETZSCH Jupiter STA 449 C* с масс-спектрометром *QMS 403C Aeolos II (TG-QMS)*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых смесей (самофлюсующийся *Ni-Cr-B-Si*-сплав – *Nb – B*) при токе пучка 25 мА и скорости перемещения заготовки 15 мм/с является эффективным технологическим процессом, поз-

воляющим с высокой производительностью формировать качественные поверхностные слои толщиной до 2 мм, обладающие высокой стойкостью в условиях абразивного изнашивания.

2. Одним из основных структурных факторов, обеспечивающих высокий уровень твердости поверхностно-упрочненных материалов, полученных при наплавке смеси самофлюсующегося сплава ниобия и бора, является образование композиционных включений типа « $NbC - NbB_2$ », размером до 20 мкм. Ядром включения является карбид ниобия NbC дендритной морфологии, диборид ниобия выделяется по внешнему краю карбида NbC в виде полиэдрической оболочки.

3. Основными упрочняющими фазами, присутствующими в материалах, полученных наплавкой порошковых смесей ($Ni-Cr-B-Si$ -сплав – $Nb - B$), являются карбид хрома $Cr_{23}C_6$, сложный карбид $(Cr, Fe)_{23}C_6$, борид железа Fe_2B и карбид ниобия NbC . Диборид ниобия NbB_2 образуется в слоях, сформированных наплавкой самофлюсующегося никелевого сплава в сочетании с 15 – 40 вес. % смеси ($Nb - B$).

4. Разбавление наплавляемых материалов железом оказывает существенное влияние на параметры решетки твердого раствора и легированного карбида хрома. В матричной γ -фазе (Ni, Fe), образующейся при наплавке порошка самофлюсующегося сплава на заготовки из низкоуглеродистой стали происходит упорядочение по типу $CuAuI$. Фактором, способствующим упорядочению твердого раствора по данному типу, является соотношение никеля и железа, близкое к эквиатомному.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты исследования структуры и комплекса свойств разработанных материалов получены различными взаимодополняющими методами исследований с применением современного аналитического оборудования. Обработка экспериментальных материалов осуществлялась с применением статистических методов оценки погрешности измерений. Результаты диссертационной работы не противостоят представлениям российских и зарубежных исследователей о процессах формирования структуры композиционных наплавленных слоев.

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (Новосибирск, 2013 г., 2016 г.); международной уральской школе-семинаре металловедов – молодых ученых (Екатеринбург, 2014 г.); международной конференции «МНСК. Новые конструкционные материалы» (Новосибирск, 2014 г.); международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 2014 г.); международной научно-технической конференции «Высокие технологии в современной науке и технике» (Томск, 2015 г.); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (Новосибирск, 2015 г.), всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2016-2018 г.), международной научно-практической конференции «*Progress through Innovations*» (Новосибирск, 2017 г.), международной конференции «Современные технологии и материалы новых поколений» (Томск, 2017 г.); международной конференции «*Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies*» (Новосибирск, 2018 г.); международной конференции «Сварка в России 2019: Современное состояние и перспективы» (Томск, 2019 г.).

По результатам исследований опубликованы 33 печатные научные работы, из них: 8 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 5 – в зарубежных журналах, входящих в базы данных *Scopus* и *Web of Science*, 25 – в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка литературы, 4 приложений. Общий объем работы составляет 189 страниц и включает 64 рисунка, 8 таблиц, список литературы, состоящий из 165 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы диссертационной работы, описана степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования.

В первом разделе представлен обзор литературных данных, связанных с особенностями структурно-фазовых преобразований упрочненных слоев на основе самофлюсующихся никелевых сплавов. Проанализированы способы нанесения защитных *Ni-Cr-Si-B* покрытий, в том числе методы, основанные на высокоэнергетическом воздействии.

Во втором разделе диссертационной работы приведено описание исходных материалов, обоснован выбор режимов вневакуумной электронно-лучевой наплавки (ВЭЛН), описаны методики оценки структуры и свойств полученных материалов. В качестве основного материала в работе была использована низкоуглеродистая сталь 20. Базовым материалом для формирования износостойких защитных слоев являлся промышленный самофлюсующийся сплав ПН77Х15С3Р2 (ПН77) на никелевой основе производства ПАО «Тулачермет» (ТУ 147-1-3758-84) дисперсностью 80...150 мкм. Дополнительно в порошковую смесь вводили ниобий марки НБП-а и аморфный бор марки А (ТУ 2112-001-49534204) (исходя из условий образования диборида ниобия NbB_2). Доля порошковой насыпки ($Nb - B$) варьировалась в диапазоне от 5 до 40 %. Энергия пучка электронов составляла 1,4 МэВ. Для оценки технологических параметров вневакуумной электронно-лучевой наплавки были проведены две серии предварительных экспериментов. В экспериментах первой серии варьируемым параметром была скорость перемещения заготовки под пучком электронов (V , мм/с), во второй – сила тока пучка (I , мА). Для получения наплавленных слоев с минимальной степенью разбавления основным металлом была проведена дополнительная серия экспериментов по наплавке двух- и трехслойных образцов.

Исследования структуры поверхностно-упрочненных слоев проводили на различных масштабных уровнях с применением методов световой микроскопии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа. Для оценки триботехнических свойств полученных в работе материалов были использованы методы определения стойкости в условиях воздействия закрепленных и нежестко закрепленных абразивных частиц, а также в условиях сухого трения скольжения.

В третьем разделе диссертационной работы обоснован выбор рациональных технологических параметров вневакуумной электронно-лучевой наплавки, обеспечивающих условия для формирования равномерных по толщине упрочненных слоев с минимальной степенью разбавления основным металлом. Исходя из визуальной оценки поверхности наплавленных слоев и первичного анализа поперечных сечений упрочненных материалов, в качестве базовых технологических параметров были приняты значения $I = 25$ мА, $V = 15$ мм/с. Методом рентгенофазового анализа установлено, что основной структурной составляющей наплавленных слоев является γ -твердый раствор (Ni, Fe). Данная фаза характеризуется решеткой типа ГЦК с периодом $a = 0,35296$ нм и относится к группе симметрии $Fm\bar{3}m$. Кроме нее в структуре материалов зафиксировано наличие боридов железа Fe_2B (тетрагональная сингония, $I4/mcm$) и хрома CrB (ромбическая сингония, $Cmcm$). Уровень микротвердости материала, сформированного при реализации базового режима электронно-лучевой наплавки, составляет $\sim 4,5$ ГПа.

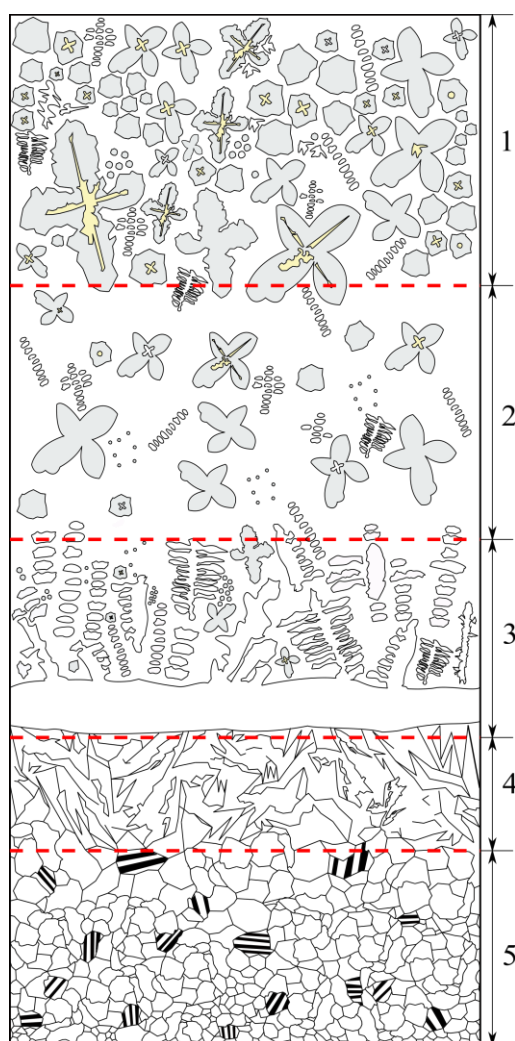


Рисунок 1 – Схема поперечного сечения слоя, сформированного на пластине из низкоуглеродистой стали наплавкой порошковой смеси самофлюсующегося никелевого сплава, ниобия и бора пучком электронов, выведенным в воздушную атмосферу

Уровень микротвердости материала, сформированного при реализации базового режима электронно-лучевой наплавки, составляет $\sim 4,5$ ГПа.

Четвертый раздел работы посвящен исследованию структурно-фазовых преобразований, происходящих в процессе наплавки релятивистским электронным пучком порошковых смесей самофлюсующегося никелевого сплава, ниобия и бора на заготовки из низкоуглеродистой стали. Анализ рентгенограмм поверхностных слоев показал, что основными фазами, присутствующими в материалах, являются γ -твердый раствор на основе никеля и железа, карбид ниобия NbC , борид железа Fe_2B , а также карбид хрома Cr_23C_6 . Диборид ниобия NbB_2 формируется при содержании в наплавочной смеси более 15 % смеси порошков ($Nb - B$).

Данные рентгеновской компьютерной томографии свидетельствует об отсутствии в материалах трещин, пор и отслоений. Упрочняющие частицы распределены равномерно. Толщина наплавленных слоев составляет 1100–1500 мкм.

На рисунке 1 приведена схема поперечного сечения стальной заготовки с поверхностно упрочненным слоем. В структуре наплавленных материалов можно условно выделить пять характерных зон. В верхней зоне (область 1), толщиной 300–500 мкм наблюдаются плотные скопления упрочняющих ча-

стиц. Морфология частиц варьируется от простых глобулей до построений в виде лепестков. Пространство между частицами заполнено эвтектикой. Во второй области толщиной 800–1100 мкм зафиксировано снижение доли упрочняющих частиц. Вблизи границы с основным металлом концентрация упрочняющих частиц резко снижается (область 3 на рисунке 1). Основной структурной составляющей в этой области толщиной ~ 50 мкм является твердый раствор никеля и железа в форме дендритных кристаллов.

Влияние добавок ниобия и бора на особенности строения наплавленных материалов отражено на рисунке 2. В поверхностных слоях, сформированных при наплавке самофлюсующегося никелевого сплава и 5 % смеси ($Nb - B$), зафиксированы дисперсные частицы сферической формы размером ~ 1 мкм. Повышение доли ниобия и бора в порошковой насыпке до 10 и 15 вес. % приводит к увеличению размеров частиц и изменению их морфологии. Наряду с частицами сферической формы формируются также включения размером 5–10 мкм, имеющие в поперечном сечении форму неправильных многогранников (рисунок 2 а).

В материалах, содержащих 30 и более вес. % ниобия и бора (рисунок 2 б) обнаружены сложные по строению частицы. Анализируя их методами световой и растровой электронной микроскопии, можно четко выделить зону ядра и окружающей его оболочки. Различная травимость этих зон позволяет сделать вывод о двухфазном строении полученных при наплавке структурных образований. Размер двухфазных частиц ($NbC + NbB_2$) составляет 5–20 мкм. Учитывая, что температура кристаллизации карбида и диборида ниобия составляет 3600 °С и 3000 °С соответственно, можно сделать вывод о том, что первым из расплава выделялся карбид ниобия. Процесс роста первичных карбидов продолжался до того момента, пока температура не снизилась до значений, при которых стало возможным выделение диборида ниобия NbB_2 на поверхности раздела « $NbC - \text{расплав}$ ». Диборид ниобия формируется в форме оболочки вокруг частиц NbC . На рисунке 3 схематически отображены стадии выделения упрочняющих соединений в процессе охлаждения наплаваемого слоя. Наряду со сложными по строению частицами формируются включения легированного карбида хрома и борида железа. Железониелевая матрица кристаллизуется в последнюю очередь.

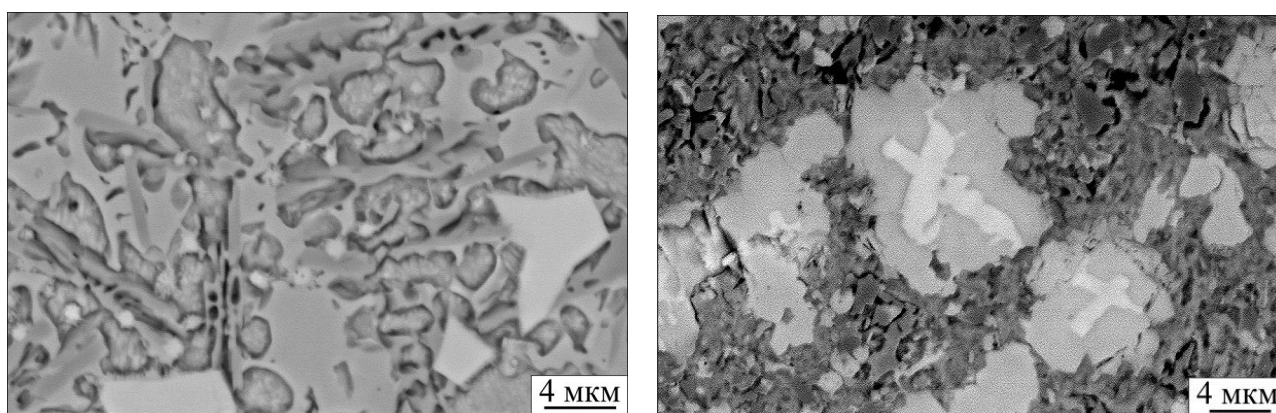


Рисунок 2 – Особенности строения поверхностно-упрочненных материалов, сформированных с использованием технологии ВЭЛН порошковых смесей самофлюсующегося сплава, ниобия и бора: а – «ПН77 + 15 % ($Nb - B$)», б – «ПН77 + 35 % ($Nb - B$)»

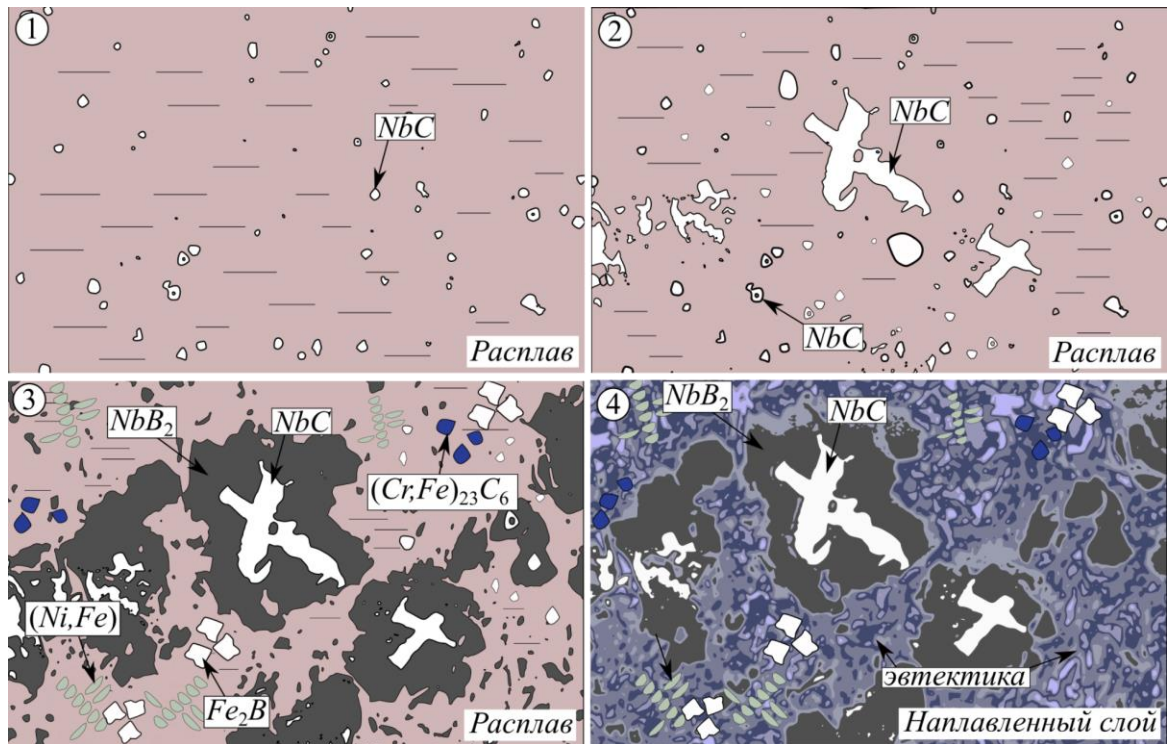
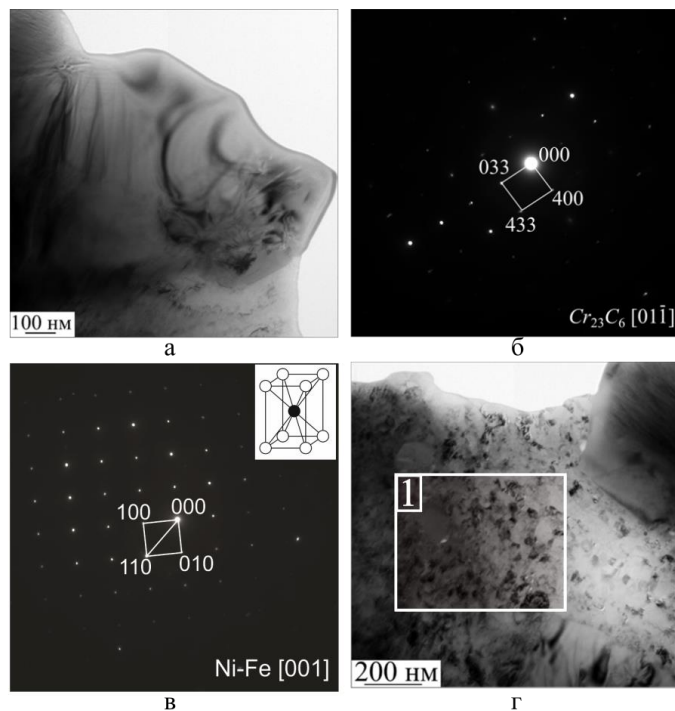


Рисунок 3 – Особенности кристаллизации слоев, сформированных наплавкой смеси порошков самофлюсующегося $Ni-Cr-Si-B$ -сплава, ниобия и бора



Химический состав, ат. %			
Fe	Cr	Ni	Nb
53,4	—	46,6	—

В таблице представлены результаты элементного анализа, подтверждающие близкий к эквиаtomному состав γ -фазы

Рисунок 4 – Светлопольные изображения карбида $Cr_{23}C_6$ (а), твердого раствора $Ni-Fe$ (г), и картины микродифракции (б, в) от указанных соединений

Анализ дифракционных картин, полученных от γ -фазы на основе никеля и железа, показал, что в матричной фазе развиваются процессы упорядочения по типу $CuAuI$. Фактором, способствующим проявлению данного эффекта, является соотношение никеля и железа, близкое к эквиаtomному. Структура такого типа характеризуется тетрагональной объемно-центрированной решеткой (ПГС 123 – $P4/mmm$) с уменьшенным относительно исходной ГЦК-фазы параметром a (соотношение $c/a = \sqrt{2}$). При подобном упорядочении в сплаве системы $Ni-Fe$ атомы одного элемента занимают позиции $1a$ (по углам ячейки), а другого – $1d$ (в центре ячейки). Кроме γ -фазы при исследованиях материалов с использованием ПЭМ были обнаружены и другие типы фаз – карбиды и бориды, зафиксированные ранее методом рентгеновской дифракции (рисунок 4 а, б).

В пятом разделе представлены результаты оценки комплекса механических и функциональных свойств материалов, сформированных наплавкой смеси самофлюсующегося никелевого сплава, ниобия и бора. Введение в сплав 5–10 вес. % смеси *Nb* и *B* не оказывает заметного влияния на микротвердость наплавленных слоев. Среднее значение микротвердости модифицированных таким образом сплавов не превышает 4,5 ГПа, что соответствует свойствам материалов, полученных наплавкой сплава ПН77Х15СЗР2 без упрочняющих добавок. Повышение доли ниобия и бора в наплавочной смеси до 15 вес. % приводит к увеличению уровня микротвердости до ~ 6 ГПа. Максимальная степень упрочнения достигнута на образцах «ПН77 + 35 % (*Nb* – *B*)» (рисунок 5). Микротвердость этого материала составила ~ 9 ГПа, что существенно выше по сравнению с основным металлом (~ 1,2 ГПа).

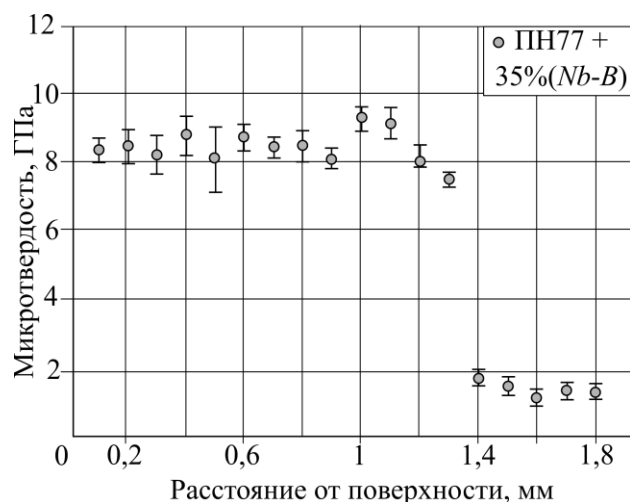


Рисунок 5 – Распределение микротвердости по глубине наплавленного слоя ПН77 + 35 % (*Nb* – *B*)

Формирование высокопрочных слоев на поверхности образцов из низкоуглеродистой стали по технологии ВЭЛН сопровождается снижением их ударной вязкости. Наибольшее влияние на показатели ударной вязкости оказывает не доля упрочняющих соединений в объеме наплавленных слоев, а толщина наплавленных слоев и переходных зон. Результаты исследования изломов упрочненных слоев позволяют сделать вывод о доминировании механизма хрупкого разрушения материалов. Для упрочняющих соединений, сформированных при наплавке *Ni-Cr-Si-B*-сплава в сочетании с порошками ниобия и бора, характерно смешанное транс- и интеркристаллитное разрушение. Выкрашивания *Nb*-содержащих упрочняющих частиц из материалов наплавленных слоев не происходит (рисунок 6).

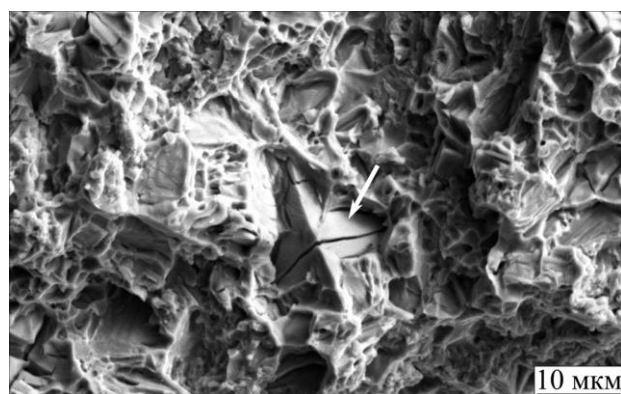


Рисунок 6 – Поверхности разрушения материалов, сформированных по технологии ВЭЛН порошковой смеси самофлюсующегося сплава, ниобия и бора: а – ПН77 + 30 % (*Nb* – *B*), б – ПН77 + 40 % (*Nb* – *B*)

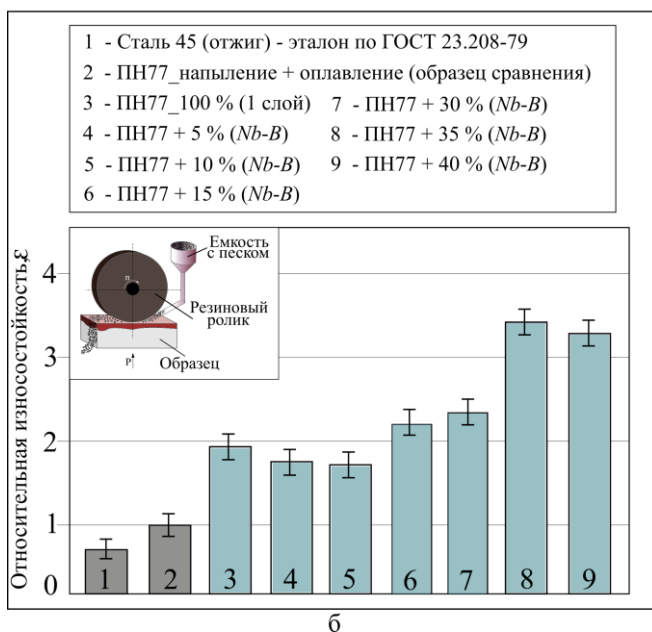
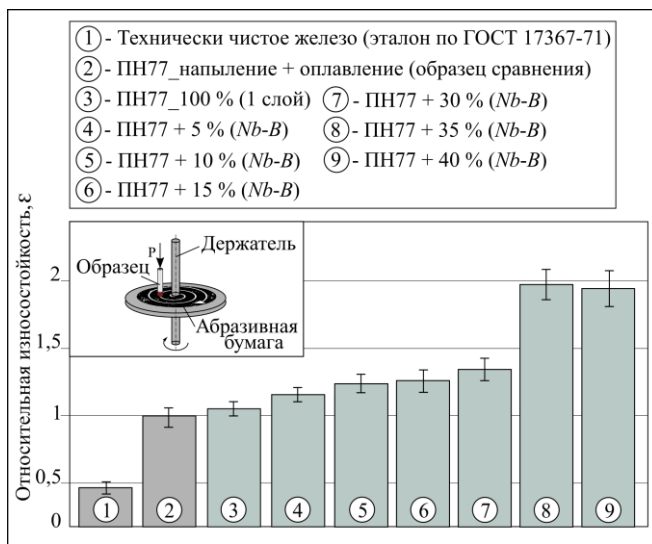


Рисунок 7 – Относительная износостойкость материалов, полученных по технологии ВЭЛН порошковых смесей самофлюсующегося никелевого сплава, ниобия и бора: а – в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц (ГОСТ 17367-71), б – в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц (ГОСТ 23.208-79)

Во-первых, добавка смеси «Nb – В» приводит к увеличению объемной доли упрочняющих фаз в составе наплавленных слоев. При этом возрастает длина границ, по которым может происходить окисление сплава. Во-вторых, введение ниобия в состав наплаваемой порошковой смеси приводит к перераспределению бора между формируемыми при кристаллизации фазами, что препятствует образованию оксида B_2O_3 , оказывающего благоприятное влияние на стойкость материалов к окислению.

Плотный каркас из высокопрочных двухфазных включений «NbC – NbB₂», сформированный в верхней части наплавленного слоя (область 1 на рисунке 1), эффективно препятствует внедрению абразивных частиц. При трении о закрепленные и нежестко закрепленные абразивные частицы износостойкость материала в 2 и 3,4 раза выше по сравнению с покрытием, сформированным по технологии плазменного напыления Ni-Cr-Si-B-сплава и последующего печного оплавления (рисунок 7). Оценка стойкости материалов в условиях сухого трения скольжения показала, что наибольший объем изношенного материала характерен для низкоуглеродистой стали 20. Материалы, полученные методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, обладают более высокой износостойкостью.

Максимальным сопротивлением окислению при повышенных температурах характеризуются поверхностные слои, полученные методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошка самофлюсующегося сплава ПН77Х15СЗР2 без каких-либо добавок. Более низкие значения стойкости к окислению материалов, сформированных по технологии ВЭЛН Ni-Cr-Si-B-сплава с добавками смеси «Nb – В», могут быть объяснены несколькими факторами.

В шестом разделе предложены пути практического использования результатов, полученных в диссертационной работе. Результаты проведенных исследований легли в основу технических решений по оптимизации предлагаемой технологии. На примере пресс-формы показана возможность более чем двукратного повышения износостойкости по сравнению с изделиями, упрочненными по стандартной технологии, включающей закалку и низкий отпуск. Результаты проведенных исследований используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии новых материалов» и «Наноинженерия».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационной работы были исследованы особенности структуры поверхностных слоев низкоуглеродистых сталей, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки многокомпонентных смесей на базе самофлюсующегося никелевого сплава в сочетании с ниобием и бором. Определены технологические параметры процесса наплавки, которые позволяют сформировать качественные слои повышенной толщины, характеризующиеся минимальной степенью разбавления основным металлом. Был выбран состав порошковых композиций, обеспечивающий высокий уровень механических и функциональных свойств наплавленных слоев. Подробно исследованы особенности структурно-фазовых преобразований, возникающих в ходе оплавления порошковых смесей, содержащих самофлюсующийся никелевый сплав, ниобий и бор, электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Применение технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей самофлюсующегося никелевого сплава, ниобия и бора на заготовки из низкоуглеродистой стали обеспечивает возможность получения поверхностно-упрочненных материалов с градиентным гетерофазным строением. Оценка полученных материалов методом рентгеновской томографии (3D-сканирования) свидетельствует о формировании малодефектных слоев толщиной до 2 мм. Матрица наплавленных слоев, упрочненных тугоплавкими соединениями на основе Nb (карбидами и боридами), представляет собой γ -твердый раствор (Ni, Fe). В направлении от поверхности наплавленного слоя к основному металлу наблюдается плавное снижение объемной доли и размеров высокопрочных частиц упрочняющих соединений. Применение данной технологии рационально для формирования защитных слоев на стальных деталях, работающих в условиях абразивного изнашивания, сухого трения и при воздействии повышенных температур.

2. Последовательная наплавка нескольких слоев самофлюсующегося никелевого сплава на заготовки из низкоуглеродистой стали нерациональна, поскольку сопровождается ростом уровня остаточных напряжений и отражается в склонности материала к разрушению на этапе его кристаллизации. Для практической реализации рекомендована однослойная наплавка Ni-Cr-Si-B-сплава релятивистскими электронными пучками при силе тока, равной 25 мА, и скорости перемещения заготовки относительно электронного луча – 15 мм/с. Основными структурными составляющими поверхностных слоев, сформированных наплавкой самофлюсующегося никелевого сплава на стальные заготовки по данному режиму, являются γ -

твёрдый раствор на основе Ni , Fe (матрица сплава), а также бориды Fe_2B и CrB (упрочняющие фазы). Микротвёрдость поверхностно-упрочнённого материала, сформированного при реализации базового режима наплавки, составляет $\sim 4,5$ ГПа.

3. Поверхностные слои, сформированные методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей типа « $Ni-Cr-Si-B$ -сплав + $Nb + B$ » на заготовках из низкоуглеродистых сталей, характеризуются градиентным строением. Наибольшая объёмная доля упрочняющих фаз, содержащих железо и/или хром (Fe_2B , CrB , $(Cr, Fe)_{23}C_6$), а также тугоплавких соединений на основе ниобия (NbC , NbB_2), сосредоточена в верхней части наплавленных слоев. В материалах, сформированных наплавкой самофлюсующегося никелевого сплава в сочетании с 30–40 вес. % смеси ($Nb-B$), образуются сложные по строению двухфазные включения типа «ядро – оболочка». Внутренняя часть включений, характеризующаяся дендритной морфологией, представлена соединением NbC . Диборид ниобия NbB_2 выделяется по внешнему краю карбида NbC в виде полиэдрической оболочки. С увеличением доли смеси « $Nb - B$ » (от 30 до 40 вес. %) в порошковой насыпке размер и объёмная доля композиционных включений возрастает.

4. Просвечивающая электронная микроскопия слоев, сформированных наплавкой порошковых смесей на основе самофлюсующегося никелевого сплава с добавками ниобия и бора, подтвердила наличие в наплавленных слоях карбидов и боридов, а также позволила установить, что в матричной γ -фазе (Ni, Fe) происходит упорядочение по типу $CuAuI$. Такому типу упорядочения способствует достижение близкого к эквиаtomному соотношению никеля и железа.

5. Полученные в работе сплавы характеризуются высоким комплексом триботехнических свойств. Максимальный уровень износостойкости зафиксирован при испытаниях материала, сформированного в процессе наплавки самофлюсующегося сплава и 35 вес. % смеси $Nb - B$. При трении о закреплённые и нежестко закреплённые абразивные частицы его износостойкость в 2 и 3,4 раза выше по сравнению с контрольным поверхностно-упрочнённым материалом, полученным по технологии плазменного напыления и последующего печного оплавления $Ni-Cr-Si-B$ -сплава. Высокий уровень триботехнических свойств легированного ниобием и бором сплава в условиях абразивного изнашивания обусловлен образованием в нём множества высокопрочных двухфазных включений типа « $NbC - NbB_2$ ».

6. Формирование методом ВЭЛН на поверхности заготовок из низкоуглеродистой стали высокопрочных слоев толщиной до 2 мм сопровождается снижением уровня ударной вязкости материалов. Толщина упрочнённого слоя оказывает более существенное влияние на величину работы разрушения по сравнению с объёмной долей упрочняющих частиц. При ударном нагружении образцы из поверхностно-упрочнённых материалов не расслаиваются, что косвенно свидетельствует о высоких значениях адгезионных свойств наплавленных электронным лучом слоев.

7. Максимальной стойкостью к окислению при $900\text{ }^\circ\text{C}$ обладает материал, полученный вневакуумной электронно-лучевой наплавкой промышленного самофлюсующегося сплава ПН77Х15С3Р2. Введение в порошковые смеси ниобия в сочетании с бором, сопровождающееся увеличением объёмной доли упрочняющих фаз, приводит к незначительному снижению жаростойкости поверхностно-упрочнённых материалов. Сочетание высокой износостойкости в условиях сухого трения

скольжения и абразивного изнашивания, а также стойкости к окислению наплавленного электронным лучом материала «Ni-Cr-Si-B-сплав + 35 % (Nb – B)» позволяет рекомендовать его для изготовления изделий, эксплуатирующихся в условиях воздействия абразивных частиц и повышенных температур.

8. 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). С учетом полученных в диссертационной работе экспериментальных данных обоснованы технические решения по улучшению комплекса свойств буровых коронок и стрелчатых лап культиватора.

9. Полученные в работе результаты применяются в учебном процессе при подготовке студентов механико-технологического факультета НГТУ по направлениям «Наноинженерия», «Материаловедение и технологии новых материалов». Материалы исследований используются в лекционных курсах, а также при выполнении лабораторных и расчетно-графических работ по дисциплинам «Высокоэнергетические методы обработки», «Прогрессивные материалы и технологии», «Триботехнические материалы».

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Структура и свойства слоев функциональных самофлюсующихся никель-содержащих покрытий, полученных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки / Т. А. Зимоглядова, Х. Сааге, В. А. Пасичник, А. С. Егорова, О. Э. Матц // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2018. – № 10 (760). – С. 18–25.

2. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка углеродсодержащих порошковых смесей на заготовки из титана VT1-0 / О. Г. Ленивцева, И. А. Батаев, В. В. Иванцовский, Н. С. Белоусова, Е. Д. Головин, Т. А. Зимоглядова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 4. – С. 49–57.

3. Структура и свойства слоев *TiB-TiC-Ti*, полученных на поверхности сплава VT1-0 методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / О. Г. Ленивцева, Е. А. Дробяз, А. С. Гонтаренко, Т. А. Зимоглядова, Л. В. Чучкова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 4. – С. 63–74.

4. *Mul D. Electron beam cladding of vanadium and carbon powders on carbon steel in the air atmosphere / D. Mul, D. B. Lazurenko, T. A. Zimoglyadova // Applied Mechanics and Materials*. – *Trans Tech Publications*. – 2014. – Vol. 682. – P. 138–142.

5. *Structure and properties of Ti-CB coatings produced by non-vacuum electron beam cladding / O. G. Lenivtseva, N. S. Belousova, E. A. Lozhkina, T. A. Zimoglyadova, V. V. Samoilenko, L. V. Chuchkova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – *IOP Publishing*. – 2016. – Vol. – 156, № 1. – P. 012021.

6. *Additional heat treatment of non-porous coatings obtained on medium carbon steel substrates by electron beam cladding of a Ti-Mo-C powder composition / D. O. Mul, E. A. Drobyaz, T. A. Zimoglyadova, V. A. Bataev, D. V. Lazurenko, L. I. Shevtsova // IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2016. – Vol. 124. – iss. 1. – P. 12–13.

7. *Investigation of Ni-Cr-Si-Fe-B coatings produced by the electron beam cladding technique* / T. A. Zimogliadova, E. A. Drobyaz, M. G. Golkovskii, V. A. Bataev, V. G. Durakov, N. Y. Cherkasova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing. – 2016. – Vol. 156, iss. 1. – P. 012–017.

8. *Structure and mechanical properties of NiCrSiB coatings, reinforced by hard Nb-based particles, cladded by electron beam, revealed in the air* / T. Zimoglyadova, E. Drobyaz, D. Mul, A. Egorova // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 12. – P. 177–181.

В прочих изданиях

9. Влияние доли ниобия в самофлюсующейся порошковой смеси на структуру покрытий, полученных наплавкой электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу / А. С. Егорова, Т. А. Зимоглядова, В. С. Гусева, Е. А. Дробяз // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов Всерос. науч. конф. молодых ученых в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 3. – С. 168–172.

10. *Structure and properties of nickel-based self-fluxing coatings, reinforced by hard refractory particles with high Nb content* / T. A. Zimogliadova, A. A. Bataev, H. Saage, E. A. Drobyaz // *Fundamental bases of mechanochemical technologies: The Book of Abstracts of the V International Conference*, Новосибирск, 25-28 июня. – Новосибирск: Изд-во Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2018. – P.106.

11. Структура и свойства антифрикционного беспористого покрытия, полученного при наплавке электронным лучом в воздушной атмосфере медьсодержащих порошковых смесей на сталь / Т. А. Зимоглядова, Н. В. Степанова, К. И. Эмурлаев, Г. И. Алферова // *Современные технологии и материалы новых поколений: сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи*, г. Томск, 9-13 октября. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – С. 172–173.

12. *Pasichnik V. A. Research into the structure and properties of Ni-Cr-Si-B coating system alloyed by refractory particles* / V. A. Pasichnik, T. A. Zimoglyadova; research adviser E. A. Drobyaz, language adviser G. V. Toropchin // *Progress through Innovations: тез. междунар. науч.-практ. конф.*, г. Новосибирск, 30 марта 2017 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 170-171.

13. Пасичник В.А. Исследование структуры и свойств покрытий системы Ni-Cr-Si-B легированных тугоплавкими частицами / В. А. Пасичник, А. С. Егорова, Т. А. Зимоглядова; науч. рук. Е.А. Дробяз // *Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч.*, Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 3. – С. 171–172.

14. Зимоглядова Т. А. Влияние наноразмерных частиц меди на механические и антифрикционные свойства стали / Т. А. Зимоглядова, Н. В. Степанова, А. А. Разумаков; [науч. рук. А. А. Батаев] // *Первая ежегодная Российская национальная конференция с международным участием по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике*, Новосибирск, 26-29 июня 2016. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 138–140.

15. Особенности наплавки порошковых покрытий системы *Ni-Cr-Si-B* / Т. А. Зимоглядова, Е. А. Дробяз, Д. О. Муль, Д. С. Кривеженко // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2016. – №. 3. – С. 161–165.

16. Структурные особенности антифрикционного беспористого покрытия, полученного электронно-лучевой наплавкой меди и алюминия на сталь 10 / Т. А. Зимоглядова, Н. В. Степанова, Г. И. Алферова // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 17 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 20–22 апр. 2016 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 3. – С. 15-19.

17. Исследование структурно-фазового состояния покрытий на основе самофлюсующихся порошков, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой обработки / Т. А. Зимоглядова, Е. А. Дробяз, А. В. Иванова, Т. Д. Бекмурзин, В. А. Пасичник, А. С. Егорова; [науч. рук. Е.А. Дробяз] // 1 ежегодная Российская национальная конференция с международным участием по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике, Новосибирск, 26-29 июня 2016. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 134–137.

18. Структура и свойства молибденсодержащих покрытий, полученных на стали методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / Д. О. Муль, Т. А. Зимоглядова, М. С. Королева, Р. И. Кузьмин; рук. А.А. Батаев // Уральская школа молодых металлургов: сб. материалов и докл. 16 междунар. науч.-техн. Уральской шк.-семинара металлургов – молодых ученых. В 2 ч.– Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015. – Ч. 1. – С. 309–312.

19. *Krivezhenko D.S. Electron-Beam Cladding of Boron Carbide on Low-alloyed Steel at the Air Atmosphere / D. S. Krivezhenko, I. S. Laptev, T. A. Zimoglyadova // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 369–373.*

20. Зимоглядова Т. А. Формирование многофункциональных покрытий с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки / Т. А. Зимоглядова, А. В. Иванова, Е. Д. Зыкова; науч. рук. Е. А. Дробяз // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 1–5 дек. 2015 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 3. – С. 109-111.

21. *Surface Hardening of Steel by Electron-Beam Cladding of Ti + C and Ti + B₄C Powder Compositions at Air Atmosphere / D. Mul, D. Krivezhenko, T. Zimoglyadova, A. Popelyukh, D. Lazurenko, L. Shevtsova // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 241-245.*

22. *Cladding of Ni-Cr-Si-B Powder Coatings by an Electron Beam Injected into the Atmosphere / T. Zimoglyadova, E. Drobyaz, V. Bataev, E. Kornienko, D. Mul, I. Ivanchik // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 123–128.*

23. Наплавка никельсодержащих порошковых покрытий электронным пучком, выведенным в воздушную атмосферу / Е. А. Дробяз, Т. А. Зимоглядова, Л. И. Шевцова, Л.В. Чучкова, В. А. Пасичник // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2015): сб. науч. тр. 4 междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 21–24 апр. 2015 г. – Томск: ТПУ, 2015. – С. 44–47.

24. *Drobyaz E. Electron-Beam Surfacing Wear-Resistant Coatings, Reinforced Refractory Metal's Borides / E. Drobyaz, T. Zimoglyadova, V. Gromov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 419–423.*

25. Зимоглядова Т. А. Формирование высокопрочных самофлюсующихся борсодержащих покрытий методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / Т. А. Зимоглядова, Е. А. Дробяз, В. Е. Громов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 3. Секция «Машиностроение». – С. 205-208.

26. Зимоглядова Т. А. Формирование функциональных боридных покрытий на сталях при воздействии высококонцентрированных источников энергии / Т. А. Зимоглядова, Д. С. Кривеженко, П. Н. Комаров // Современная техника и технологии : сб. докл. 20 междунар. науч.-практ. конф. Томск, 14-18 апр. 2014 г. В 3 т. – Томск: ТПУ, 2014. – Т. 2. – С. 37-38.

27. Муль Д. О. Поверхностное электронно-лучевое легирование среднеуглеродистой стали ванадием и графитом / Д. О. Муль, Д. В. Лазуренко, Т. А. Зимоглядова // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. тр. 5 междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 22–23 мая 2014 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 424-427.

28. Особенности формирования высокопрочных поверхностных слоев с использованием высокоскоростного нагрева / Т. А. Зимоглядова, Д. С. Кривеженко, Д. Ю. Корнев, Е. В. Плехотко; науч. рук. Е. А. Дробяз // Материалы 52 международной научной студенческой конференции (МНСК–2014). Новые конструкционные материалы. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. – С. 8.

29. Кривеженко Д. С. Особенности структурообразования боросодержащих покрытий, полученных в процессе высокоскоростной обработки / Д. С. Кривеженко, Е. А. Дробяз, Т. А. Зимоглядова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 489–492.

30. Кривеженко Д. С. Структурные исследования боридных покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / Д. С. Кривеженко, Т. А. Зимоглядова, Е. Ю. Лапушкина // XIV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов–молодых ученых, Екатеринбург, 11–15 нояб. 2013 г. – Екатеринбург, 2013. – С. 301–302.

31. Кривеженко Д. С. Формирование многослойных высокопрочных покрытий с использованием высокоскоростного нагрева / Д. С. Кривеженко, Т. А. Зимоглядова; науч. рук. А. А. Батаев // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 21–24 нояб. 2013 г.: в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – Ч. 4. – С. 149–151.

32. Зимоглядова Т. А. Влияние режимов вневакуумной электронно-лучевой обработки на механические свойства боридных покрытий / Т. А. Зимоглядова, Е. А. Дробяз, Д. С. Кривеженко // Труды 14 Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 100-летию со дня рождения А. И. Покрышкина (24–26 апр. 2013 г.). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 200–202.

33. Зимоглядова Т. А. Исследование структуры и свойств самофлюсующихся композиционных покрытий, сформированных по технологии наплавки релятивистскими электронными пучками / Т. А. Зимоглядова, А. С. Егорова, В. С. Гусева // Сварка в России 2019: Современное состояние и перспективы – 3-7 сентября 2019 г. – С. 161-162.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Марска, 20,
Тел./факс: (383)346-08-57
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
заказ № 1419 подписано в печать 17.10.2019