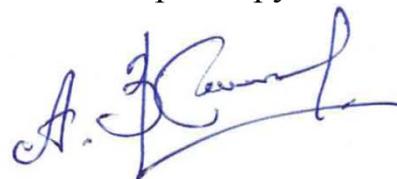


На правах рукописи



Атеняев Александр Валерьевич

РАЗРАБОТКА ШЛАКОВОЙ ОСНОВЫ ЛЕГИРУЮЩИХ ФЛЮСОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
РЕГИОНА

Специальность 05.16.09– Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (КнАГУ)

Научный руководитель **Макиенко Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортно-технологические комплексы» ДВГУПС.

Официальные оппоненты **Гордиенко Павел Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий лабораторией защитных покрытий и морских коррозий, Федерального государственного бюджетного учреждения науки, Института химии ДВО РАН.

Комаров Олег Николаевич, кандидат технических наук, доцент, временно исполняющий обязанности директора Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ), г. Владивосток

Защита состоится «18» марта 2021 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») по адресу 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201 корпус 3. Факс: (4217) 536150; e-mail: diss.material@yandex.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного университета и на официальном сайте организации по адресу: https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/150

Автореферат разослан «_____» _____ 20 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Проценко
Евгеньевич

Александр

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одним из направлений развития промышленности является получение новых материалов, обладающих высокими механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами. В настоящее время для создания электродов, порошковых проволок, флюсов и других материалов используют дорогостоящее сырье в виде оксидов различных металлов, фтористых и хлористых соединения, а также других веществ, не содержащих кислород. Поэтому в условиях жёсткой конкуренции предприятия вынуждены искать пути снижения себестоимости продукции. Одним из направлений уменьшения затрат на изготовление материалов для сварочного производства является использование минерального сырья и отходов горнорудного производства без глубокой технологической переработки.

В Дальневосточном федеральном округе имеются значительные запасы полезных ископаемых и как следствие отходов горнорудного производства, содержащих компоненты (марганец, вольфрам, титан, цирконий, бор, и другие элементы), пригодные для получения различных материалов. Однако данное сырье многокомпонентное, что затрудняет выбор шлаковой основы материалов. Поэтому появляется необходимость проведения научных исследований, а также поиска технологий и методик разработки материалов, которые обеспечат требуемые технические характеристики.

Результаты комплексного использования минерального сырья приведены в работах Г.В. Самсонова, Н.П. Лякишева, Ю.В. Цветкова, Ри Хосена, В.А. Резниченко, А.Д. Верхотурова, И.А. Подчерняевой, Э.Г. Бабенко, С.Н. Химухина, С.В. Николенко, В.М. Макиенко и других ученых.

Данная работа посвящена разработке новых плавлено-керамических флюсов с использованием минерального сырья Дальневосточного региона для наплавки изношенных поверхностей деталей. Флюс при наплавке выполняет важные функции: обеспечение устойчивости электротермического процесса; хорошее формирование наплавленного металла; защита от доступа воздуха; предупреждение образования в наплавленном слое дефектов; управление химическим составом наплавленного металла; обеспечение требуемых механических и эксплуатационных свойств восстанавливаемых деталей; обеспечение легкой отделимости шлаковой корки с поверхности металла.

Это подтверждает актуальность получения экономичных и экологически чистых наплавочных флюсов, обеспечивающих высокие свойства и качество формируемых покрытий.

Работа выполнена в соответствии с концепцией социального и экономического развития Хабаровского края до 2025 года № 308 от 15.04.2014 года «О приоритетном направлении развития минерально-сырьевой базы региона».

Цель работы. Исследование и разработка плавленно-керамических флюсов, обеспечивающих требуемые механические и эксплуатационные свойства формируемых покрытий с использованием минерального сырья Дальневосточного региона.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- выполнить анализ минерального сырья;
- выполнить термодинамический расчет в целях определения возможных химических реакций и восстановления легирующих компонентов при электротермических процессах;

– на основе расчета оксидного состава, основности и активности флюса, а также экспериментальных исследований разработать новую шлаковую основу ильменито-флюоритного (солеоксидного) типа с использованием Дальневосточного минерального сырья, обеспечивающую требуемые технологические свойства и качество формируемых покрытий;

– выполнить экспериментальные исследования по разработке флюсов на базе полученной шлаковой основы и установить зависимости влияния состава шихты на требуемые свойства формируемых покрытий;

– исследовать состав, структуру и свойства формируемых покрытий, полученных с использованием разработанных флюсов;

– провести опытно-сравнительные испытания полученных флюсов в условиях эксплуатации;

– определить экономическую эффективность применения разработанных материалов.

Научная новизна работы.

1. Дано научное обоснование результатам разработки рационального состава флюсов путём термодинамического анализа окислительно-восстановительных реакций в исследуемом флюсе-шлаке, определены основность и химическая активность шлака, обеспечивающего требуемые технологические характеристики и качество наплавленного покрытия.

2. Экспериментальными исследованиями установлены связи между входными параметрами – шлакообразующими (флюоритом, мрамором, гранодиоритом – X1), стабилизирующим (титаномагнетитом – X2) и легирующими (шеелитом, браунитом – X3) и выходными параметрами – пористостью (П) и зернистостью (З), по результатам которых были составлены математические зависимости, получены диаграммы влияния соотношения массовых долей входных параметров на пористость и зернистость, наплавленного материала, выбран рациональный состав шлаковой основы, масс. %: 40 – шлакообразующего вещества (27,35 – флюорита, 42,38 – гранодиорита, 30,27 – мрамора), 44 – стабилизирующего (100 – титаномагнетит), 16 – легирующие (62,5 – шеелит, 37,5 – браунит), обеспечивающий требуемые качество и технологические свойства покрытий.

3. Для повышения требуемых механических и эксплуатационных свойств разработанную шлаковую основу дополнительно легировали Cr, Mn, Zr и другими элементами:

– методом математического планирования экспериментов исследовано влияние легирующих компонентов (феррохрома, ферромарганца, циркониевого концентрата и графита) на твёрдость и износостойкость, а так же на составы наплавленных материалов; получены математические уравнения и построены диаграммы, позволяющие определить рациональные составы входных параметров системы в зависимости от требуемых свойств наплавленного металла (масс. %: 5,8 – гранодиорит; 3,7 – флюорит; 4,1 – мрамор; 4,9 – циркониевый концентрат (бадделейт); 19,6 – ферромарганец; 3,7 – титаномагнетит; 1,2 – браунит; 5,5 – графит; 28,9 – феррохром; АН22 или АН348А – 20,6%);

– микрорентгеноспектральным анализом формируемого слоя металла установлено, что составы разработанных флюсов АН22ПК-ДМС и АН348АПК-ДМС способствуют восстановлению хрома, марганца, вольфрама и других элементов (в металле, наплавленном под флюсом АН22ПК-ДМС, максимальное содержание хрома достигает 15 атом %, марганца 6 атом % и вольфрама 0,4 атом %, а в металле,

наплавленном под флюсом АН348АПК-ДМС, максимальное содержание хрома достигает 7,4 атом %, марганца 3,98 атом % и вольфрама 21,34 атом %);

– результатами исследований фазового состава подтверждена возможность образования в наплавленном слоях карбидов хрома Cr_7C_3 и железа Fe_3C при использовании флюса АН22ПК-ДМС и АН348АПК-ДМС.

4. Установлено, что наплавленный металл по химическому составу с использованием флюсов АН22ПК-ДМС и АН348АПК-ДМС соответствует заэвтектоидной стали и имеет твердость 47-50 HRC, высокую износостойкость относительно стали 20 Кі 8,5-10, ударную вязкость КСУ 36-39 Дж/см², что значительно превышает требования технических условий эксплуатации железнодорожного подвижного состава:

– под флюсом АН22ПК-ДМС, масс %: 1,4-1,7 С; 0,894 – Al; 2,129 – Si; 1,282 – Ni; 0,251 – Ti; 8,326 – Mn; 9,374 – Cr; 0,390 – Zr; 0,087 – W;

– под флюсом АН348АПК-ДМС, масс %: 1,4-1,7 С; 0,026 – Al; 0,248 – Si; 1,288 – Ni; 0,025 – Ti; 4,488 – Mn; 7,992 – Cr; 0,09 – Zr; 1,746 – W.

Практическая значимость работы.

1. Разработана шлаковая основа ильменито-флюоритного типа с использованием Дальневосточного минерального сырья, обеспечивающая требуемые технологические характеристики и качество покрытия за счет рационального сочетания компонентов в составе шлака: флюорит - 9%; гранодиорит - 14%; мрамор - 10%; титаномагнетит - 9%; шеелит - 5%; браунит - 3%; стандартный флюс (АН22, АН348А) - 50%.

2. Получены плавлено-керамические (солеоксидные) флюсы ильменито-флюоритного типа с использованием многокомпонентного минерального сырья Дальневосточного региона для восстановления деталей строительно-дорожных машин и подвижного состава следующих марок:

–АН22ПК-ДМС – основной флюс, обеспечивающий твердость наплавленного металла 47 HRC, коэффициент износостойкости - 8,5, ударную вязкость 39 Дж/см². Состав флюса: АН22-20,6%; гранодиорит-5,8%; флюорит-3,7%; мрамор-4,1%; титаномагнетит-3,7%; браунит-1,2%; шеелит-2,1%; циркониевый концентрат-4,9%; ферромарганец-19,6%; графит-5,5%; феррохром-28,9%;

– АН348АПК-ДМС – нейтральный флюс, обеспечивающий твердость наплавленного металла 50 HRC, коэффициент износостойкости 10, ударную вязкость 36 Дж/см². Состав флюса: АН348А-20,6%; гранодиорит-5,8%; флюорит-3,7%; мрамор-4,1%; титаномагнетит-3,7%; браунит-1,2%; шеелит-2,1%; циркониевый концентрат - 4,9%; ферромарганец-19,6%; графит-5,5%; феррохром-28,9%.

3. Разработана программа ЭВМ (Свидетельство № 2016618684 от 05.08.2016) для расчета математических зависимостей и построения диаграмм влияния состава шихты на свойства формируемых покрытий. Программа значительно сокращает время обработки полученных результатов при проведении экспериментальных исследований.

4. Проведенные опытно сравнительные испытания созданных флюсов в условиях эксплуатации (Амурская механизированная дистанция инфраструктуры – филиал открытого акционерного общества «Российские железные дороги») подтвердили высокие свойства формируемых покрытий (Приложение 4).

5. Техничко-экономическим расчетом установлено, что разработанные флюсы не уступают аналогам по технологическим свойствам, при этом их стоимость на 40-50 % ниже стандартных.

Методология и методы исследования

Для изготовления флюсов, как правило, используют теоретический метод, который основывается на исследовании взаимосвязи «состав-структура-свойство» между металлом и шлаком. В этой работе применена методика, заключающая в изучении термодинамических свойств шлаков и экспериментальных исследований, позволяющих получать материалы с требуемыми технологическими, механическими и эксплуатационными свойствами. Кроме того, данная методика позволяет значительно сократить время разработки новых материалов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная шлаковая основа флюсов ильменито-флюоритного типа с использованием минерального сырья Дальневосточного региона и стандартных флюсов, обеспечивающая требуемые технологические свойства и качество формируемых покрытий.

2. Разработанные наплавочные флюсы основного и нейтрального типов, обеспечивающие требуемые механические и эксплуатационные свойства наплавленного металла.

3. Результаты исследований структуры, микрорентгеноспектрального анализа, механических свойств, а также элементного и фазового составов наплавленных слоев металла.

Достоверность полученных результатов обеспечивается теоретическими расчетами и экспериментальными исследованиями, с использованием сертифицированного оборудования, применением математических способов обработки экспериментальных данных, современных методов определения состава, структуры и свойств материала, а также положительными результатами стендовых и опытно-сравнительных испытаний.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены: 25-26 апреля 2019 года в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, 24-26 октября 2019 года на международной научной конференции «Инновационные технологии развития транспортной отрасли»; на заседаниях кафедр: «Транспортно-технологические комплексы» ДВГУПС (г. Хабаровск, 2020 г.); «Литейного производства и технологии металлов» ТОГУ (г. Хабаровск, 2020 г.); «Материаловедение и технология новых материалов» КнАГУ (г. Комсомольск-на-Амуре, 2020 г.).

Публикации по теме диссертации. Основное содержание диссертации опубликовано в 9 научных работах, в числе которых 3 статьи в периодических журналах перечня ВАК, 3 статьи в периодических журналах перечня Scopus. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Подана заявка для оформления патента (№ 2020133582 от 12.10.2020 г.).

Личный вклад автора заключается в самостоятельном выполнении теоретических расчетов и экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных результатов, написании диссертационной работы. Экспериментальные исследования проводились в лабораториях Дальневосточного государственного университета путей сообщения, Тихоокеанского государственного университета, Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН, Института химии ДВО РАН, Института тектоники и геофизики ДВО РАН, Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержит 112 страниц основного текста, включая 60 таблиц, 44 рисунков и список литературы из 133 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и определены задачи работы, приведена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, даны основные положения, выносимые на защиту и предмет исследований.

В первой главе представлен обзор научных работ в области создания новых флюсов, дано описание металлургических процессов, а также возможных реакций исследуемых компонентов при электротермических процессах, приведен анализ минерального сырья Дальневосточного региона.

Анализ литературы показал, что флюсы оказывают большое влияние на формирование поверхности наплавленного слоя, защиты от атмосферного воздуха, устойчивость электротермических процессов и получения заданных свойств формируемых покрытий. Поэтому совершенствование состава флюсов является одним из направлений развития материаловедения и повышения качества формируемых покрытий.

Разработка флюсов для электротермических процессов началось в 1930-х годах. Большой вклад в получении флюсов внесли ученые ИЭС им. Е. О. Патона – И. И. Фрумин, К. К. Хренов, Д. М. Рабкин, В. В. Подгаецкий, Б. И. Медовар, С. М. Гуревич, Е. И. Лейначук и другие. Работы по разработке флюсов проводились в МВТУ им. Н. Э. Баумана под руководством Н. А. Ольшанского, в «ЦНИИТМАШ» под руководством К. В. Любавского и других институтах. Исследования ученых привели к созданию оксидных и солеоксидных флюсов, предназначенных для электродуговой и электрошлаковой сварки углеродистых и легированных сталей. Способам изготовления флюсов уделялось значительное внимание в США, Франции, Чехословакии, Китае, Польше, Болгарии и других странах.

Для получения флюсов преимущественно используют теоретический метод, основанный на исследовании взаимосвязи «состав-структура-свойства-технология» между шлаком и металлом. В данной работе применена комплексная методика, заключающая в предварительном расчете компонентов шлаковой основы ильменито-флюоритного типа, определении основности и химической активности шлака, термодинамическом анализе возможных химических реакций, а также экспериментальных исследований позволяющих определить рациональный состав компонентов шлака в целях получения формируемых покрытий с требуемыми механическими и эксплуатационными свойствами. Кроме того, данная методика позволяет значительно сократить время разработки новых материалов.

При разработке флюсов применяют сырье в виде оксидов, фторидов, хлоридов и других компонентов. Наиболее широкое распространение получили следующие виды флюсов: марганцево-силикатный ($\text{MnO} + \text{SiO}_2$); кальциево-силикатный ($\text{CaO} + \text{MnO} + \text{SiO}_2$); глиноземно-рутиловый ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$); глиноземно-основный ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MnO}$); фторидо-основный ($\text{CaO} + \text{MnO} + \text{MnO} + \text{CaF}_2$).

В данной работе проводились исследования по разработке плавлено-керамических флюсов ильменито-флюоритного типа ($\text{FeTiO}_3\text{-CaF}_2\text{-MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$). При этом использовались стандартные флюсы и минеральное сырье Дальневосточного региона (Буреинский, Сихотэ-Алиньский, Хингано-

Баджалский, Верхне-Амгунский и другие), а также отходы горнорудного производства.

Дальневосточное минеральное сырье содержит оксиды вольфрама, циркония, титана, бора, хрома, марганца и других элементов, выполняющих функцию легирования наплавленного металла, в целях повышения механических и эксплуатационных свойств. Кроме того многокомпонентное сырье имеет в своем составе элементы, необходимые для защиты и металлургической обработки расплавленного электродного металла, поэтому оно может быть комплексно использовано в качестве шлаковой основы флюсов.

Использование местного минерального сырья позволит значительно уменьшить стоимость, а также создавать новые материалы, обеспечивающие высокие свойства и качество формируемых покрытий. Кроме того, применение данного сырья обеспечит рост экономики Дальнего Востока, создаст новые рабочие места и обеспечит импортозамещение продукции.

Во второй главе приведена методика исследований, дано описание оборудования и материалов, используемых при разработке флюсов.

Исследования проводились в целях получения шлаковой основы и получение на её базе наплавочных флюсов. Для этого была разработана блок-схема (рис. 1), согласно которой весь цикл включает этапы, начиная от выбора минерального сырья, до получения материала.

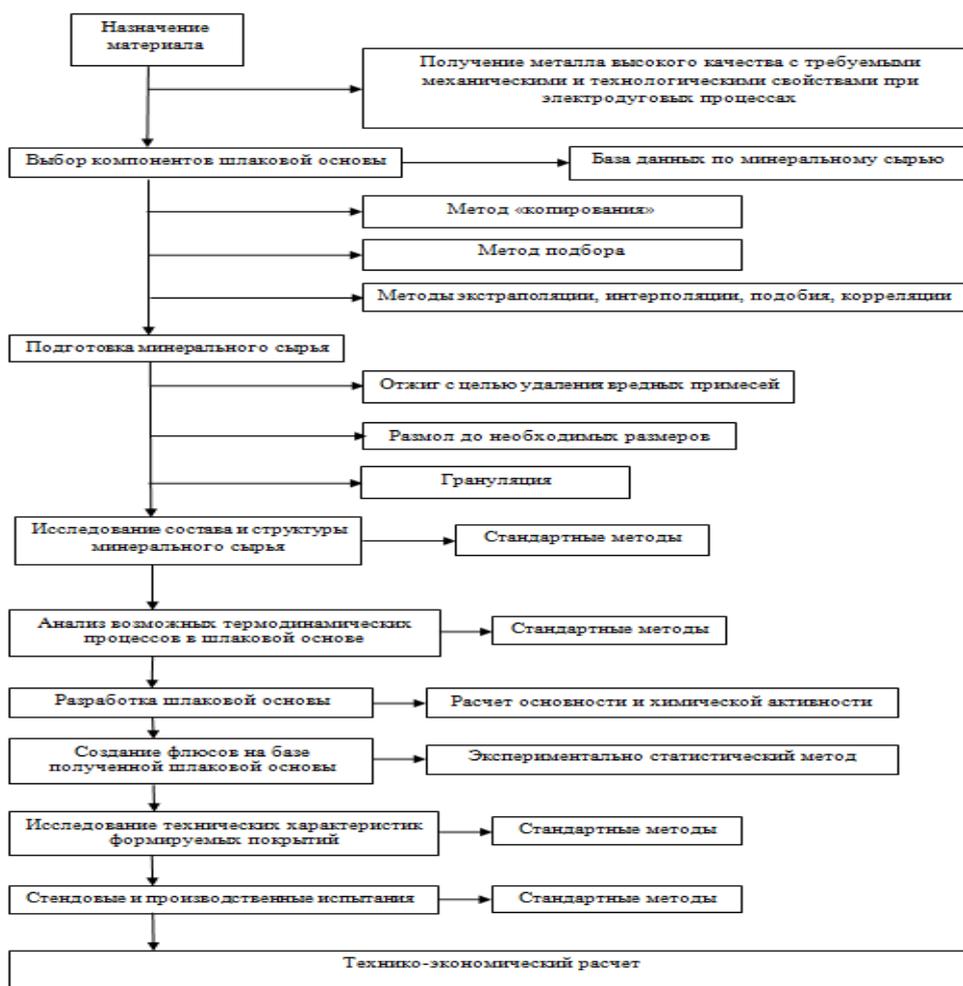


Рисунок 1 – Блок схема получения наплавочных флюсов

Выбор компонентов шлаковой основы проводился с использованием методов, основанных на подобию свойств и технических характеристик. Исследование состава и структуры минерального сырья проводилось по стандартным методикам с использованием аттестованного оборудования.

Анализ возможных термодинамических процессов в шлаковой системе выполнялся на основе расчетов энергии Гиббса, используя уравнение:

$$\Delta G_{x.p}^0 = \Delta H_{x.p}^0 - T\Delta S_{x.p}^0 - \Delta C_{px.p}^0 M_0 T \quad (1)$$

Для расчета основности шлака использовалась формула, принятая Международным Институтом сварки (МИС):

$$B = \frac{CaO + MgO + BaO + Na_2O + K_2O + Li_2O + CaF_2 + 0,5(MnO + FeO)}{SiO_2 + 0,5(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad (2)$$

Расчет химической активности флюсов выполнялся по формуле:

$$A_\phi = \frac{(SiO_2) + 0,5(TiO_2) + 0,4(Al_2O_3 + ZrO_2) + 0,42B^2(MnO)}{100B} \quad (3)$$

Для расчета содержания компонентов в шихте использовалась формула:

$$Q_k = Q_o * 100 / q_o \quad (4)$$

где Q_k – содержание компонента в шихте, %; Q_o – расчетное количество основного соединения компонента в шихте, %; q_o – концентрация основного соединения в компоненте, %.

Для получения рационального состава компонентов флюса, проводились экспериментальные исследования, основанные на построении расчетных моделей и диаграмм, влияния состава флюса-шлака на качество и свойства формируемых покрытий. При этом устанавливались зависимости между входными (состав шихты) и выходными (показатели качества и свойств) параметрами. Данная задача решалась с помощью экспериментально-статистических методов. В этом случае схема объекта исследования (электротермический процесс) представлена в виде схемы (рис. 2).

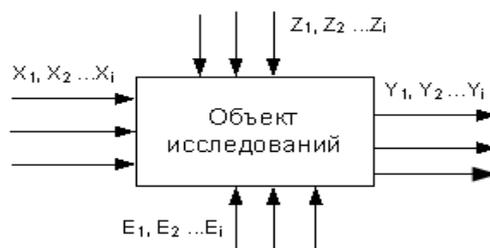


Рисунок 2 – Схема объекта исследований

Входными параметрами (X_1, X_2, X_i), являются компоненты шихты, а выходными (Y_1, Y_2, Y_i) – показатели качества и свойств. На объект исследования также могут оказывать влияние управляемые (Z_1, Z_2, Z_i) и неуправляемые (E_1, E_2, E_i) внешние факторы.

При решении задач по созданию новых материалов с использованием минерального сырья при электродуговых процессах шлаковые системы наиболее полно описываются приведенным полиномом четвертого порядка:

$$y = 1x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 12x_1x_2 + 13x_1x_3 + 23x_2x_3 + 12x_1x_2(x_1 - x_2) + 13x_1x_3(x_1 - x_3) + 23x_2x_3(x_2 - x_3) + 12x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 13x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 23x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + 1123x_1^2x_2x_3 + 1223x_1x_2^2x_3 + 1233x_1x_2x_3^2, \quad (5)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – содержание компонентов смеси ($x_i = 1$), а y_1, y_2, y_3, y_{123} и т.д. – значения откликов системы в узлах симплексной решётки, которые определяются опытным путем. По результатам полученных значений откликов получали математические зависимости, строили диаграммы влияния состава шихты на свойства формируемых покрытий.

Третья глава посвящена разработке шлаковой основы флюсов ильменито-флюоритного типа. Обоснован выбор компонентов, выполнен термодинамический расчет в целях установления возможного протекания химических реакций на границе раздела фаз шлак-металл и их влияние на металлургические процессы при электротермических процессах, проведены расчеты процентного соотношения компонентов, а также основности и химической активности флюса-шлака. Выполнены экспериментальные исследования, в результате которых были получены уравнения и построена диаграмма, позволяющая определить рациональный состав компонентов шихты, обеспечивающий высокие технологические свойства и качество формируемых покрытий.

Шлаковая основа флюсов разрабатывалась на базе минерального сырья Дальневосточного региона и стандартных флюсов АН22, АН348А. Для получения шлаковой основы были выбраны следующие компоненты: шлакообразующие (флюорит, гранодиорит, мрамор); стабилизирующие (титаномagnetит); легирующие (шеелит, браунит); связующие (жидкое стекло).

Термодинамический расчет выполнялся для многокомпонентного минерального сырья, содержащего оксиды вольфрама (WO_3), титана (TiO_2), циркония (ZrO_2), хрома (CrO_2), марганца (MnO) и т.д. Результаты некоторых расчетов приведены на рис. 3-4.

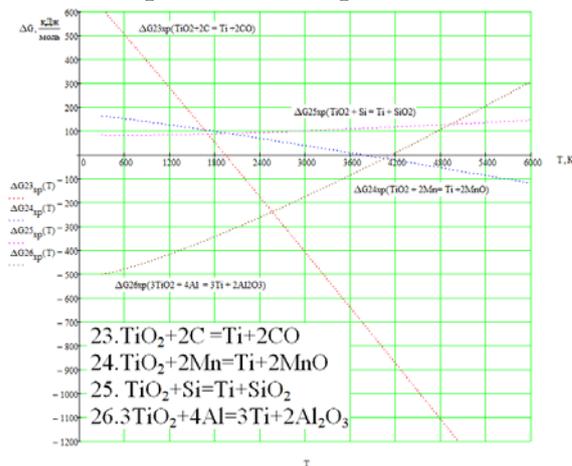


Рисунок 3 – Изменение свободной энергии Гиббса ($\Delta G_{x,p}^0$) от температуры для восстановительных реакций

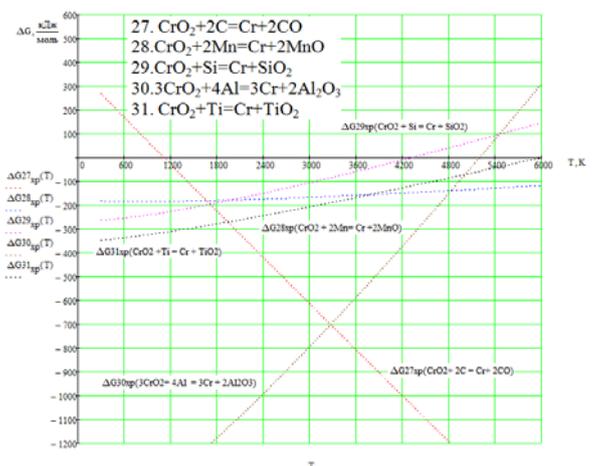


Рисунок 4 – Изменение свободной энергии Гиббса ($\Delta G_{x,p}^0$) от температуры для восстановительных реакций

Расчет энергии Гиббса показал, что окислительно-восстановительные процессы элементов шлаковой основы будут происходить при температуре от 3500 К до 7000 К. Однако при взаимодействии оксидов с углеродом восстановление элементов идет при более низких температурах (например для CrO_2 – 1200 К, для TiO_2 – 1800 К). Результаты расчета подтверждены экспериментальными исследованиями. При наплавке под шеелитовым концентратом в металле

восстановилось 3,962% вольфрама, при использовании титаномагнетита – 3,216% титана, браунита – 0,459% марганца.

На следующем этапе был проведен расчет процентного соотношения компонентов шихты (табл. 1), основности и химической активности шлака, состоящего из 50% компонентов минерального сырья и 50% стандартного флюса АН22, уравнения 6 и 7

Таблица 1 – Результаты расчета компонентов шихты

Компонент	Содержание оксидов в компоненте, %		Содержание оксида в шихте, масс. %	Содержание, компонента в шихте, масс. %
Гранодиорит	63,00	SiO ₂	8,82	14
	16,00	Al ₂ O ₃	2,24	
	5,49	Fe ₂ O ₃	0,70	
	5,10	CaO	0,70	
	4,28	K ₂ O	0,56	
	3,30	Na ₂ O	0,42	
Флюорит	92,00	CaF ₂	8,28	9
	2,50	SiO ₂	0,27	
	2,50	CaO	0,27	
Мрамор	98,00	CaCO ₃	9,80	10
	0,15	SiO ₂	0,00	
	0,63	MgO	0,10	
	0,07	Fe ₂ O ₃	0,00	
Браунит	21,55	MnO	0,66	3
	25,45	SiO ₂	0,75	
	0,50	TiO ₂	0,03	
	5,62	Al ₂ O ₃	0,18	
	9,02	FeO	0,27	
	15,47	CaCO ₃	0,45	
	4,34	MgO	0,12	
	0,85	K ₂ O	0,03	
Шеелит	2,90	SiO ₂	0,15	5
	26,80	CaO	1,35	
	59,50	WO ₃	3,00	
	3,80	Fe ₂ O ₃	0,20	
	1,60	MgO	0,10	
Титаномагнетит	10,42	SiO ₂	0,90	9
	12,56	TiO ₂	1,17	
	19,73	FeO	1,80	
	45,80	Fe ₂ O ₃	4,14	
	3,60	Al ₂ O ₃	0,36	
	0,58	MnO	0,09	
	2,65	MgO	0,27	
2,32	CaO	0,18		
Флюс АН-22	22	SiO ₂	11,00	50
	9	MnO	4,50	
	15	CaO	7,50	
	15	MgO	7,50	
	25	CaF ₂	12,50	
	23	Al ₂ O ₃	11,50	
	1	FeO	0,50	

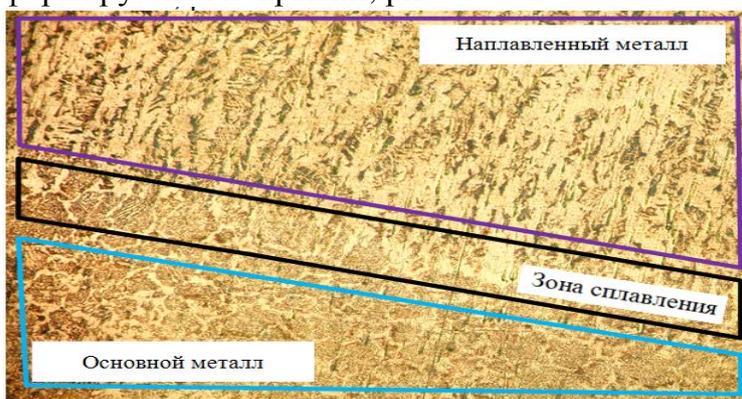
$$B = \frac{10 + 8,09 + 0,42 + 0,59 + 20,78 + 0,5(5,25 + 2,57)}{21,89 + 0,5(14,28 + 1,20)} = 1,46 \quad (6)$$

$$A = \frac{(21,89) + 0,5(1,20) + 0,4(14,28) + 0,42 \cdot 1,46^2 (5,25)}{100 \cdot 1,46} = 0,22 \quad (7)$$

Результаты расчета показали, что флюс, состоящий из 50% компонентов минерального сырья Дальневосточного региона и 50% стандартного флюса АН22 является основным ($B=1,46$) и малоактивным ($A = 0,22$). Данный флюс не оказывает окислительного воздействия на металл, снижает температуру плавления шлака и улучшает качество формирования шва. Кроме того установлено, что исследуемый шлак обладает высокими технологическими свойствами и будет использован как основа для выбора рационального состава флюса, обеспечивающего требуемое качество формируемых покрытий. В этих целях были проведены исследования, в соответствии со схемой (рис. 4), в которой входными (переменными) параметрами являлись: шлакообразующие (флюорит, гранодиорит, мрамор, браунит), X1; стабилизирующие (титаномагнетит), X2; легирующие и раскисляющие (шеелит), X3. Флюс АН22 являлся постоянным входным (сопутствующим) параметром. В качестве выходных критериев были приняты общая пористость (П) и зернистость (З).

По результатам экспериментальных исследований были составлены математические зависимости и диаграммы влияния компонентов шихты на критерии работоспособности флюса при электродуговом процессе. Анализ диаграмм позволил установить рациональный состав компонентов минерального сырья, обеспечивающий рациональные значения пористости и зернистости: X1 (40 % шлакообразующие – флюорит 27,35%; гранодиорит 42,38%; мрамор 30,27%); X2 (44 % стабилизирующие – титаномагнетит 100%); X3 (16 % легирующие – шеелит 62,50; браунит 37,50).

На следующем этапе, используя данный состав, были выполнены опытные наплавки и проведены исследования в целях определения структуры и качества формируемых покрытий, рис.5.



Из рисунка 5 видно, что структура наплавленного металла феррито-перлитная, кристаллы имеют дендритное строение, что соответствует структуре металла при термических процессах. В зоне сплавления и в наплавленном металле дефекты отсутствуют

Рисунок 5 – Фотография микроструктуры наплавленного металла

Разработанный состав шлаковой основы обеспечивает высокое качество наплавленного металла и требуемые технологические свойства (отделяемость шлака, формирование наплавленного слоя, склонность к образованию дефектов и другие) однако в целях получения высокой твердости и износостойкости формируемых покрытий в шихту необходимо вводить легирующие элементы.

В четвертой главе рассмотрен процесс разработки плавлено-керамических флюсов на базе полученной шлаковой основы, дан анализ работоспособности деталей подвижного состава, обоснован выбор легирующих элементов и приведены результаты экспериментальных исследований.

Плавлено-керамических флюсы разрабатывались для восстановления изношенных поверхностей деталей, обеспечивающих твердость наплавляемого металла в широком диапазоне (250-500НВ), ударную вязкость не менее 30 Дж/см² и высокую износостойкость. Поставленная задача решалась в соответствии со схемой (рис. 2). В качестве входных параметров были приняты шлаковая основа, графит, ферромарганец, феррохром, циркониевый концентрат, выходными характеристиками являлись твердость, коэффициент износостойкости. По результатам эксперимента рассчитывались коэффициенты и строились уравнения для выходных параметров исследуемой системы. На основании полученных в результате экспериментов откликов системы, рассчитывались коэффициенты полинома для каждого выходного параметра и строились уравнения регрессии:

– для определения твердости (HRC):

$$y_{(T_6)} = 46,9x_1 + 25,8x_2 + 29,9x_3 + 27,8x_1x_2 + 22,4x_1x_3 + 31,8x_2x_3 - 163,46x_1x_2(x_1-x_2) + 1062,93x_1x_3(x_1-x_3) - 1354,93x_2x_3(x_2-x_3) + 30,13x_1x_2(x_1-x_2)^2 - 45,33x_1x_3(x_1-x_3)^2 + 19,46x_2x_3(x_2-x_3)^2 - 12x_1^2x_2x_3 - 29,86x_1x_2^2x_3 - 47,2x_1x_2x_3^2;$$

– для определения коэффициента износостойкости (Ki):

$$y_{(K_i)} = 9,91x_1 + 3,06x_2 + 3,54x_3 - 7,66x_1x_2 + 19,62x_1x_3 + 13,35x_2x_3 + 65,29x_1x_2(x_1-x_2) - 26,17x_1x_3(x_1-x_3) + 27,68x_2x_3(x_2-x_3) + 8,36x_1x_2(x_1-x_2)^2 - 7,2x_1x_3(x_1-x_3)^2 - 7,55x_2x_3(x_2-x_3)^2 + 21,72x_1x_2x_3 + 27,23x_1x_2x_3 - 16,05x_2x_3^2.$$

По результатам расчета строилась совмещенная диаграмма влияния соотношения массовых долей входных параметров на свойства наплавленного металла (рис. 6).

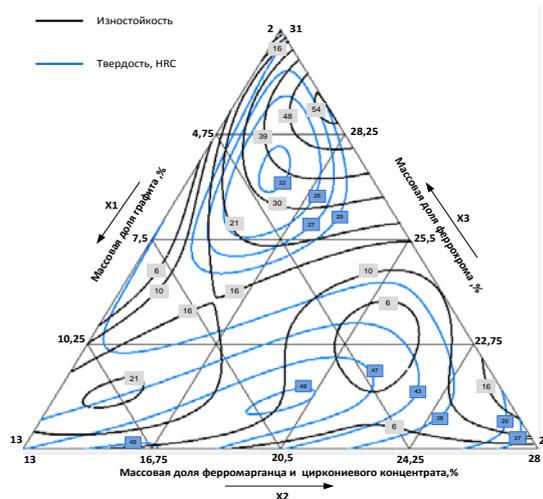


Рисунок 6 – Совмещенная диаграмма влияния соотношения компонентов флюса на критерии работоспособности (HRC, Ki).

По совмещенной диаграмме был выбран рациональный состав компонентов флюса в зависимости от требуемых свойств наплавленного металла и присвоена марка (АН22ПК-ДМС). Состав плавлено-керамического флюса обеспечивающего твердость наплавленного металла 47HRC, (масс. %): АН-22 – 20,6; гранодиорит – 5,8; флюорит – 3,7; мрамор – 4,1; титаномагнетит – 3,7; браунит – 1,2; шеелит – 2,1; циркониевый концентрат – 4,9; ферромарганец – 19,6; графит – 5,5; феррохром – 28,9.

В пятой главе приведены результаты исследований структуры и механических свойств, микрорентгеноспектрального анализа, а также элементного и фазового составов наплавленных слоев металла.

В целях оценки возможного использования разработанного состава плавлено-керамического флюса для основных, и кислых шлаков, опытные

наплавки проводились с использованием стандартных флюсов АН22 и АН348А. После наплавки выполнялись исследования в целях определения элементного и фазового составов, структуры и механических свойства формируемых покрытий. В качестве подложки использовалась сталь обыкновенного качества Ст3, электродная проволока – Св-08 диаметром 3 мм. Результаты исследования с использованием флюсов АН22 и АН348А приведены в табл. 2 и 3, а также рис. 7-10.

Таблица 2 – Элементный состав металла, наплавленного опытными флюсами

АН22ПК-ДМС								
Концентрация элементов, %								
С	Al	Si	Ni	Ti	Cr	Mn	Zr	W
1,4-1,7	0,894	2,129	1,282	0,251	9,374	8,326	0,390	0,087
АН348АПК-ДМС								
Концентрация элементов, %								
С	Al	Si	Ni	Ti	Cr	Mn	Zr	W
1,4-1,7	0,026	0,248	1,288	0,025	7,992	4,488	0,090	1,746

По химическому составу наплавленный металл с использованием флюсов АН22ПК-ДМС и АН348АПК-ДМС соответствует заэвтектоидной стали, легированной хромом, марганцем, вольфрамом и другими элементами. Содержание углерода в наплавленном слое более 1,4%, хрома от 7,992% до 9,374%, марганца от 4,488% до 8,326%, вольфрама от 0,087 до 1,746, что свидетельствует о возможном образовании карбидов, легированного цементита и других веществ в наплавленном слое.

Таблица 3 – Механические и эксплуатационные свойства наплавленного металла

АН22ПК-ДМС Твердость, HRC	47
Коэффициент износостойкости относительно стали 20, (Ki)	8,5
Ударная вязкость KCU, Дж/см ² (при температуре 20°C)	39
АН348АПК-ДМС Твердость, HRC	50
Коэффициент износостойкости относительно стали 20, (Ki)	10
Ударная вязкость KCU, Дж/см ² (при температуре 20°C)	36

Наплавленный металл имеет твердость 47-50 HRC, высокую износостойкость относительно стали 20 Ki 8,5-10 (табл. 3). При этом значение ударной вязкости равно KCU 36-39 Дж/см², что соответствует требованиям технических условий эксплуатации железнодорожного подвижного состава. Высокая твердость наплавленного слоя обусловлена образованием карбидов, легированного цементита и других соединений, что подтверждено металлографическими исследованиями.

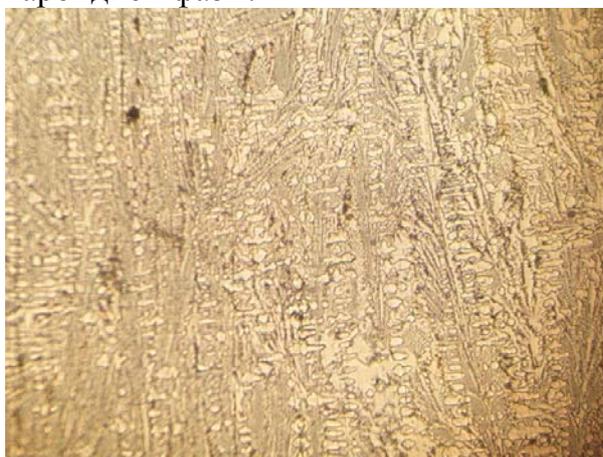
На рис. 7 и 8 приведена микроструктура металла, наплавленного под флюсами АН22ПК-ДМС и АН348АПК-ДМС. Основной металл имеет феррито-перлитную структуру (содержание перлитной составляющей 20...25%). Зона сплавления (шириной 55 мкм), имеет структуру сорбита с микротвердостью 230 HV. От зоны сплавления в наплавленный металл на глубину 15-20 мкм проникают дендриты, состоящие из сорбита.

Наплавленный слой имеет ячеисто-дендритную структуру, характерную для внутрикристаллического строения покрытий сплавов эвтектоидного типа (рис 7-а и 8-а). Из рисунков видно, что ячейки появляются не от самой границы сплавления зерен околосшовной зоны, а на некотором расстоянии от нее. На более поздней стадии затвердевания образуются дендриты.

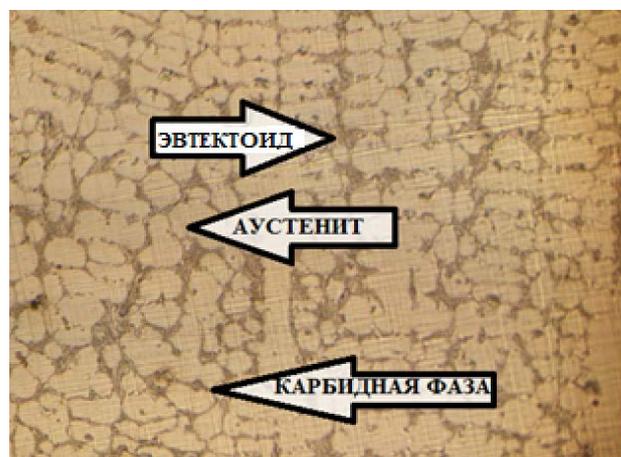
Структура слоя наплавленного флюсом АН22ПК-ДМС состоит из трёх фаз. Одна из фаз формирует округлые области (зерна) выстроенные в направлении роста дендритов (рис. 7 б). Структура данной фазы состоит из аустенита (атлас нормальных микроструктур металлов и сплавов), имеющего микротвердость 250-

300 HV. Другая фаза соответствует механической смеси (эвтектоид), состоящей из легированного цементита и аустенита (400-450 HV). В межзеренном пространстве расположена карбидная фаза (легированный цементит, 550-620 HV). По результатам исследования можно сделать вывод о том, что микроструктура слоя наплавленного флюсом АН22ПК-ДМС состоит из аустенита, эвтектоида и карбидной фазы.

Структура слоя наплавленного флюсом АН348АПК-ДМС состоит так же из трёх фаз. Одна из фаз формирует округлые области (зерна) выстроенные в направлении роста дендритов (рис. 8 б). Структура данной фазы состоит из аустенита (атлас нормальных микроструктур металлов и сплавов), имеющего микротвердость 250-300 HV. Вторая фаза соответствует механической смеси (эвтектоид), легированный цементит и бейнит (400-450 HV). А в межзеренном пространстве расположена карбидная фаза (легированный цементит, 550-650 HV). По результатам исследования можно сделать вывод о том, что микроструктура слоя наплавленного флюсом АН348АПК-ДМС состоит из аустенита, эвтектоида и карбидной фазы.

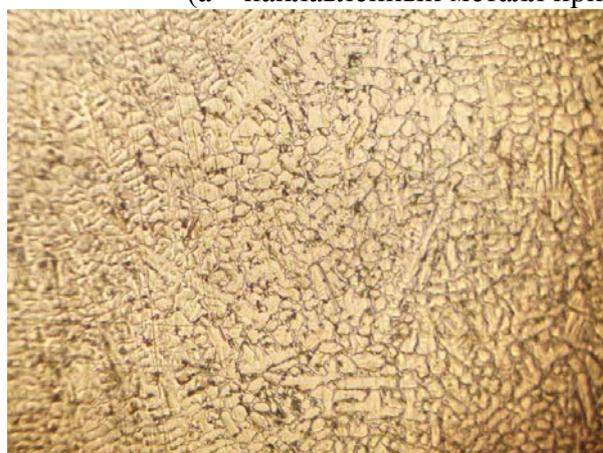


(a)

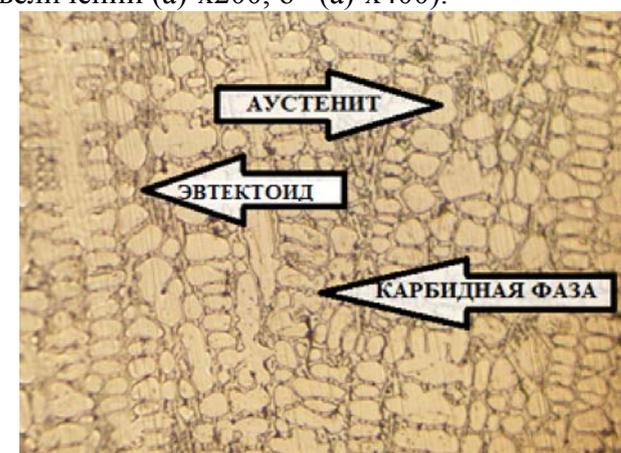


(б)

Рисунок 7 – Микроструктура металла, наплавленного под флюсом АН22ПК-ДМС (а – наплавленный металл при увеличении (а)-x200, б –(а)-x400).



(a)



(б)

Рисунок 8 – Микроструктура металла, наплавленного под флюсом АН348АПК-ДМС (а – наплавленный металл при увеличении (а)-x200, б –(а)-x400).

Микротвердость металла, наплавленного с использованием разработанных флюсов в отдельных точках равна 600-650HV, что свидетельствует о возможном образовании твердых структурных составляющих (рис. 9 и 10). При этом основной металл (сталь Ст3) имеет микротвердость 140-170 HV.

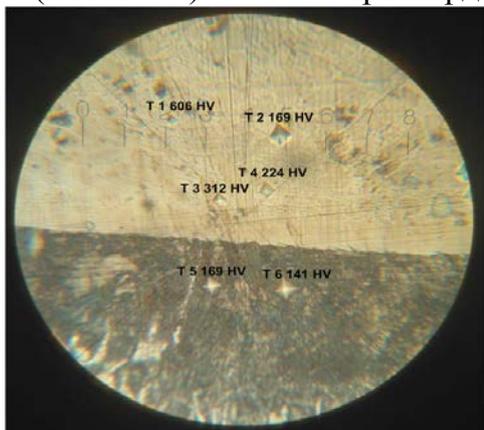


Рисунок 9 – Микротвердость наплавленного металла под флюсом АН22ПК-ДМС

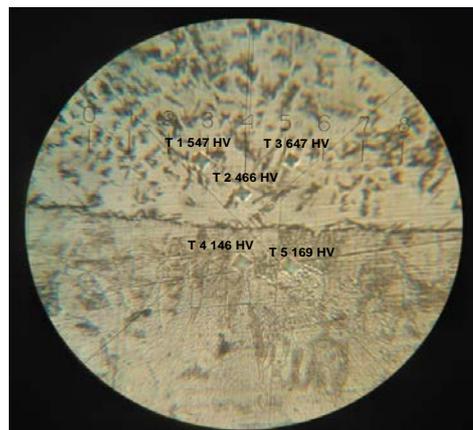


Рисунок 10 – Микротвердость наплавленного металла под флюсом АН348АПК-ДМС

Микрорентгеноспектральный анализ проводился в целях установления закономерности распределения легирующих элементов в наплавленном металле.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа металла, наплавленного под флюсом АН22ПК-ДМС, приведены на рис. 11 и в табл. 4.

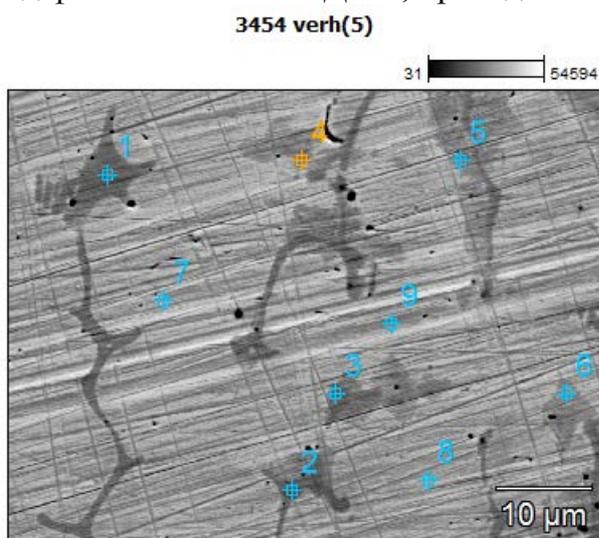


Рисунок 11 – Макроструктура наплавленного слоя

Таблица 4 – Элементный состав наплавленного металла, atom %

Точка	C	Si	Cr	Mn	Fe
1	17,42	0,52	15,56	6,27	60,14
2	16,65	0,67	12,30	6,31	64,06
3	19,02	0,55	14,83	6,06	59,54
4	16,08	1,65	6,03	5,19	71,05
5	12,66	1,47	4,16	3,95	77,76
6	10,13	1,36	3,90	3,53	81,08
7	6,29	1,18	4,09	4,05	84,39
8	7,46	1,31	3,89	3,59	83,76
9	14,23	1,40	3,76	3,92	76,70

Микрорентгеноспектральный анализ наплавленного металла проводился послойно (верхний и средний слои, а также граница сплавления). В верхнем слое (рис. 11 и табл. 4) максимальное содержание хрома 12-15 атом % и марганца 6 атом % распределено в точках 1, 2 и 3, что свидетельствует о возможном образовании карбидов данных элементов. В точках 4-9 содержание хрома и марганца находится в пределах 3-6 атом %. Результаты исследования микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют о том, что состав флюса АН22ПК-ДМС способствует восстановлению хрома и марганца в наплавленном металле.

Далее в рамках проведения микрорентгеноспектрального анализа для определения концентрации элементов в наплавленном слое были выполнены 16

исследования по линии распределения элементов в сечении. Результаты исследования приведены на рисунках 12-14.

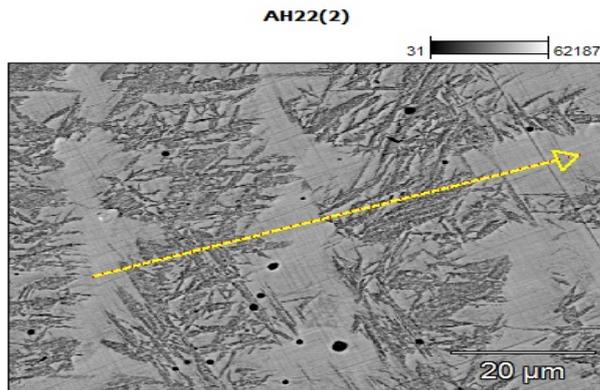


Рисунок 12 – Распределение элементов по линии

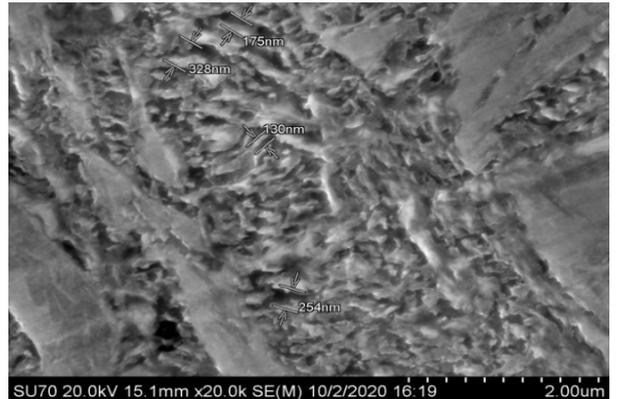


Рисунок 13 – Микроструктура наплавленного слоя с указанием межплоскостного расстояния

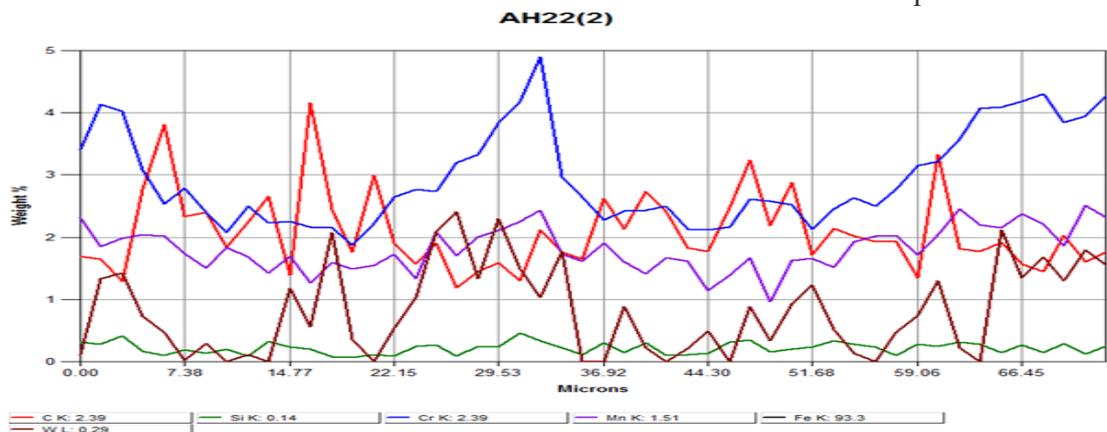


Рисунок 14 – Концентрация элементов по линии распределения

Исследования показали, что легирующие элементы (Cr, Mn, W) распределены по всему объему наплавленного металла. В некоторых точках наблюдаются пики по содержанию углерода, хрома, марганца, что свидетельствует о возможном образовании карбидов (рис. 14).

Далее был выполнен стехиометрический расчет (для верхнего слоя) в целях определения фазового состава и структуры наплавленного слоя. Результаты приведены в таблице 5

Таблица 5 – Состав наплавленного металла

Точка	Структура	Микротвёрдость, HV	Содержание элементов, atom %					Стехиометрия карбидных фаз
			C	Si	Cr	Mn	Fe	
1	Карбидная фаза	550-620	17,42	0,52	15,56	6,27	60,14	$\text{Fe}_{61,27}\text{C}_{17,70}=\text{Fe}_{3,46}\text{C}$ $(\text{Fe,Cr})_{75,5}\text{C}_{17,7}=(\text{Fe,Cr})_{4,27}\text{C}$
2			16,65	0,67	12,30	6,31	64,06	
3			19,02	0,55	14,83	6,06	59,54	
Ср. значение			17,70	0,58	14,23	6,21	61,27	
4	Эвтектоид плюс карбид	400-450	16,08	1,65	6,03	5,19	71,05	$\text{Fe}_{76,64}\text{C}_{12,96}=\text{Fe}_{5,91}\text{C}$ $(\text{Fe,Cr})_{81,34}\text{C}_{12,96}=(\text{Fe,Cr})_{6,27}\text{C}$
5			12,66	1,47	4,16	3,95	77,76	
6			10,13	1,36	3,90	3,53	81,08	
Ср. значение			12,96	1,49	4,70	4,22	76,63	

Окончание таблицы 5

7	Легированный аустенит	250-300	6,29	1,18	4,09	4,05	84,39
8			7,46	1,31	3,89	3,59	83,76
9			7,23	1,40	3,76	3,92	76,70
Ср. значение			6,99	1,29	3,96	3,82	84,10

Стехиометрический расчет установил наличие карбидных фаз ($\text{Fe}_{3,46}\text{C}$, $\text{Fe}_{5,91}\text{C}$, $\text{Fe}_{12,03}\text{C}$) и легированного цементита ($(\text{Fe,Cr})_{4,27}\text{C}$, $(\text{Fe,Cr})_{6,27}\text{C}$, $(\text{Fe,Cr})_{12,59}\text{C}$) (рис. 11 и табл. 5). При этом структура наплавленного слоя состоит из карбидной фазы, эвтектоида (легированный цементит плюс аустенит) и легированный аустенит.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа металла, наплавленного под флюсом АН348АПК-ДМС, приведены на рис. 15 и табл. В 6.

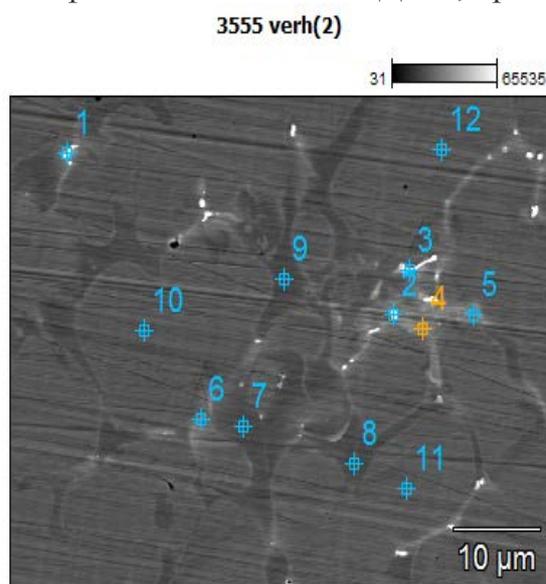


Таблица 6 – Элементный состав наплавленного металла, atom %

Точка	C	W	Cr	Mn	Fe
1	12,61	10,27	8,50	4,74	63,87
2	26,71	16,30	6,38	3,49	47,11
3	20,74	21,34	7,29	3,98	46,65
4	16,10	2,50	6,69	4,97	65,03
5	9,22	1,35	3,09	3,78	81,73
6	13,87	2,30	10,99	5,87	66,43
7	17,27	1,32	15,23	5,39	60,78
8	17,58	1,15	14,69	5,34	61,24
9	17,31	1,25	15,51	5,40	60,54
10	5,70	0,36	4,24	3,15	86,55
11	5,87	0,21	4,31	3,67	85,94
12	6,15	0,35	4,09	3,44	85,97

Рисунок 15 – Макроструктура наплавленного слоя

Микрорентгеноспектральный анализ металла, наплавленный под флюсом АН348АПК-ДМС, показал, что в максимальное содержание легирующих элементов восстановилось в верхнем слое (рис. 15 и табл. 6). Так в точке 3 содержание вольфрама 21,34 атом. %, хрома 7,29 атом. %, марганца 3,98 атом. %. Микрорентгеноспектральный анализ наплавленного слоя, свидетельствуют о том, что данный состав флюса способствуют восстановлению вольфрама, хрома и марганца, что свидетельствует о возможном образовании карбидов и легированного цементита.

Далее в рамках проведения микрорентгеноспектрального анализа для определения концентрации элементов в наплавленном слое были 18 выполнены исследования по линии распределения элементов в сечении. Результаты исследования приведены на рисунках 16-18.

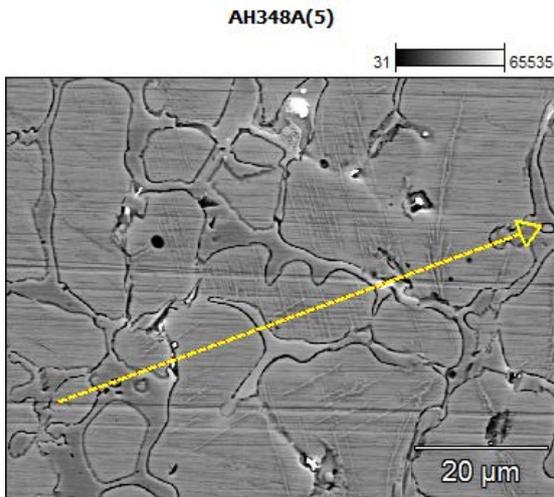


Рисунок 16 – Распределение элементов по линии

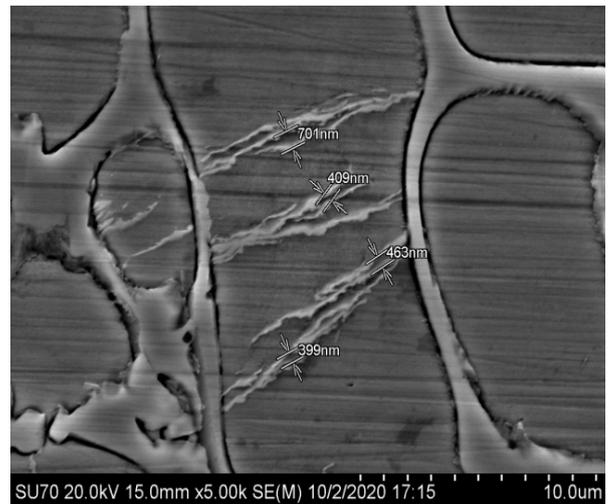


Рисунок 17 – Микроструктура наплавленного слоя с указанием межплоскостного расстояния

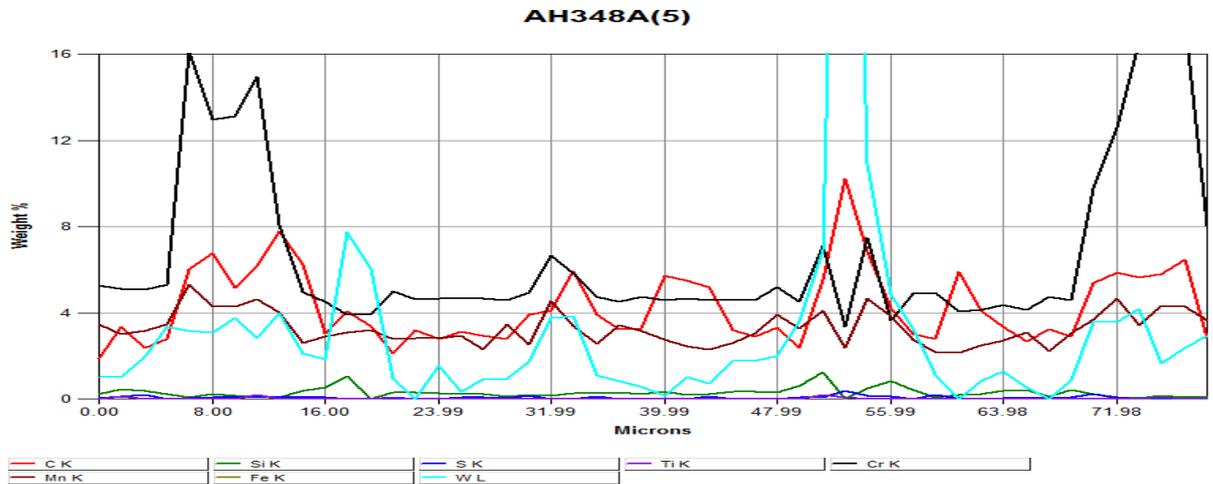


Рисунок 18 – Концентрация элементов по линии распределения

Исследования показали, что легирующие элементы (Cr, Mn, W) распределены по всему объему наплавленного металла. В некоторых точках наблюдаются пики по содержанию углерода, хрома, марганца и вольфрама что свидетельствует о возможном образовании карбидов (рис. 18)

Далее был выполнен стехиометрический расчет (для верхнего слоя) в целях определения фазового состава и структуры наплавленного слоя. Результаты приведены в таблице 7

Таблица 7 – Состав наплавленного металла

Точка	Структура	Микротвёрдость, HV	Содержание элементов, atom %					Стехиометрия карбидных фаз
			C	W	Cr	Mn	Fe	
1	Карбидная фаза	550-650	22,61	10,27	8,50	4,74	63,87	$Fe_{52,55}C_{23,35}=Fe_{2,25}C$ $(Fe,Cr,W)_{75,91}C_{23,35}$ $= (Fe,Cr,W)_{3,25}C$
2			26,71	16,30	6,38	3,49	47,11	
3			20,74	21,34	7,29	3,98	46,65	
Ср. значение			23,35	15,97	7,39	4,07	52,55	

Окончание таблицы 7

4	Эвтектоид плюс карбид	400-450	16,10	2,50	6,69	4,97	65,03	$\text{Fe}_{66,86}\text{C}_{15,22}=\text{Fe}_{4,39}\text{C}$ $(\text{Fe,Cr,W})_{79,53}\text{C}_{15,22}$ $=(\text{Fe,Cr,W})_{5,22}\text{C}$
5			9,22	1,35	3,09	3,78	81,73	
6			13,87	2,30	10,99	5,87	66,43	
7			17,27	1,32	15,23	5,39	60,78	
8			17,58	1,15	14,69	5,34	61,24	
9			17,31	1,25	15,51	5,40	65,95	
Ср. значение			15,22	1,64	11,03	5,12	66,86	
10	Легированный аустенит	250-300	5,70	0,36	4,24	3,15	86,55	
11			5,87	0,21	4,31	3,67	85,94	
12			6,15	0,35	4,09	3,44	85,97	
Ср. значение					5,91	0,31	4,21	

Стехиометрический расчет установил наличие карбидных фаз ($\text{Fe}_{2,25}\text{C}$, $\text{Fe}_{5,44}\text{C}$, $\text{Fe}_{3,49}\text{C}$, $\text{Fe}_{13,05}\text{C}$) и легированного цементита ($(\text{Fe,Cr,W})_{3,25}\text{C}$, $(\text{Fe,Cr,W})_{5,22}\text{C}$, $(\text{Fe,Cr,W})_{4,44}\text{C}$, $(\text{Fe,Cr,W})_{13,15}\text{C}$) (рис. 15 и табл. 7).

При этом структура наплавленного слоя состоит из карбидной фазы, эвтектоида (легированный цементит плюс беинит) и легированного аустенита.

Далее были проведены исследования фазового состава наплавленного металла. Результаты исследования приведены на рис. 19, 20.

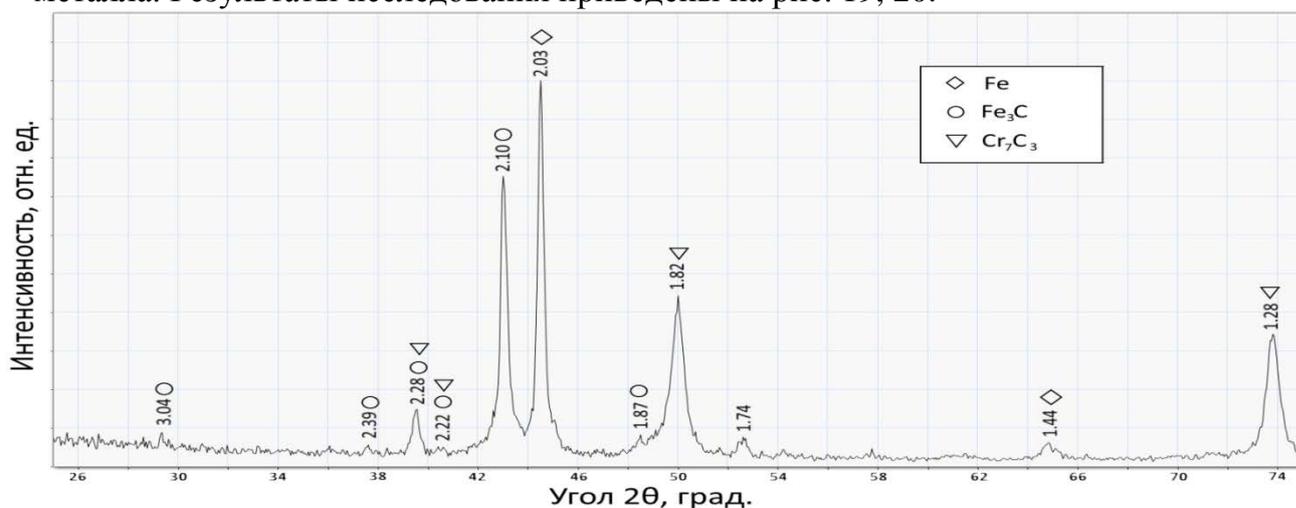


Рисунок 19 – Дифрактограмма наплавленного слоя (АН22ПК-ДМС)

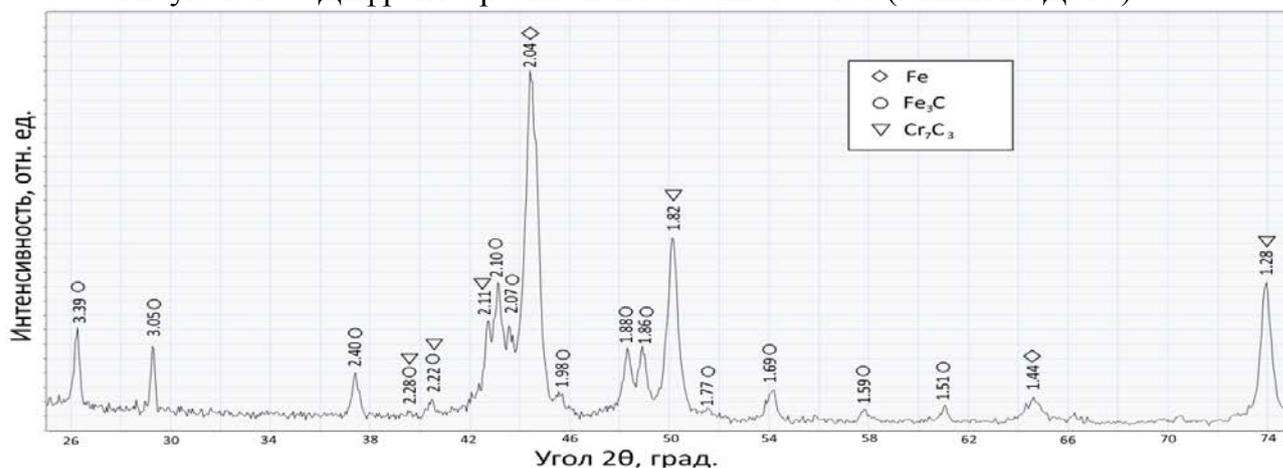


Рисунок 20 – Дифрактограмма наплавленного слоя (АН348АПК-ДМС)

Результаты исследований подтвердили возможность образования в наплавленном слое карбидов хрома Cr_7C_3 и железа Fe_3C при использовании флюса АН22ПК-ДМС (рис. 19), а при использовании флюса АН348АПК-ДМС – (рис. 20) карбидов хрома Cr_7C_3 и железа Fe_3C . Это обеспечило высокую твердость и износостойкость формируемых покрытий.

В приложении приведены результаты предварительных экспериментов и рассмотрены вопросы экономической эффективности и результаты испытания разработанных флюсов в условиях эксплуатации.

Расчет экономической эффективности показал, что цена реализации разработанных флюсов составляет 43002,43 руб., за тонну. Экономическая эффективность применения флюсов рассчитывалась для условий Амурской механизированной дистанции инфраструктуры ОАО «РЖД» составила 1264328,55 рублей в год.

Разработанные флюсы проверялись в условиях эксплуатации путем формирования покрытия на изношенных поверхностях деталей строительно-дорожных машин. Опытно-сравнительные испытания показали, что твердость и износостойкость деталей, а также качество металла, наплавленного опытными образцами флюсов, соответствуют нормативной документации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа минерально-сырьевой базы установлено, что в Дальневосточном регионе имеются большие запасы минерального сырья (шеелит, циркониевый концентрат, титаномагнетит, браунит), пригодного для создания флюсов и других материалов. Однако Дальневосточное минеральное сырье неоднородно, что требует поиска новых методов и технологий получения новых материалов. Например, браунит является многокомпонентным веществом, содержащим оксиды марганца, кремния, алюминия, кальция и другие элементы, используемые для производства материалов (21,55-MnO; 25,45-SiO₂; 0,5- TiO₂; 5,62-Al₂O₃; 9,02-FeO; 15,47-CaCO₃; 4,34-MgO; 0,85-K₂O; 0,05-SO₃; 0,06 – P₂O₅).

2. Разработана методика получения флюсов, заключающаяся в предварительном расчете компонентов шлаковой основы ильменито-флюоритного типа, определении основности и химической активности шлака, термодинамическом анализе возможных химических реакций, а также экспериментальных исследований позволяющих определить рациональный состав компонентов шлака.

3. На основе разработанных уравнений и диаграмм, выбран рациональный состав шлаковой основы – 40% шлакообразующие вещества (флюорит 27,35%, гранодиорит 42,38%, мрамор 30,27%), 44 % стабилизирующие (титаномагнетит 100%), 16% легирующие (шеелит 62,50%, браунит 37,50%), обеспечивающий высокое качество формируемых покрытий и требуемые технологические свойства.

4. На базе полученной шлаковой основы разработаны плавлено-керамические флюсы (АН22ПК-ДМС, АН348АПК-ДМС), обеспечивающие требуемые технологические, механические и эксплуатационные свойства формируемых покрытий, которые обеспечиваются за счет восстановления легирующих элементов и образования карбидов и других веществ. Состав флюсов:

– АН22ПК-ДМС (гранодиорит – 5,8%, флюорит – 3,7%, мрамор – 4,1%, циркониевый концентрат – 4,9%, ферромарганец – 19,6%, титаномагнетит – 3,7%, браунит – 1,2%, шеелит – 2,1%, графит – 5,5%, феррохром – 28,9%, АН22 – 20,6%);

– АН348АПК-ДМС (гранодиорит – 5,8%, флюорит – 3,7%, мрамор – 4,1%, циркониевый концентрат – 4,9%, ферромарганец – 19,6%, титаномагнетит – 3,7%, браунит – 1,2%, шеелит – 2,1%, графит – 5,5%, феррохром – 28,9%, АН348А – 20,6%).

5. В результате металлографических исследований металла, наплавленного под флюсами АН22ПК-ДМС и АН348АПК-ДМС установлено:

– по химическому составу наплавленный слой соответствует заэвтектоидной стали, легированной хромом, марганцем, вольфрамом и другими элементами. Содержание углерода в металле более от 1,4% до 1,7%, хрома от 7,992% до 9,374%, марганца от 4,488% до 8,326%, вольфрама от 0,087 до 1,746;

– наплавленный металл имеет твердость 47-50 HRC, высокую износостойкость относительно стали 20 Кі 8,5-10. При этом значение ударной вязкости равно KCU 36-39 Дж/см², что соответствует требованиям технических условий эксплуатации железнодорожного подвижного состава;

– основной металл имеет феррито-перлитную структуру (содержание перлитной составляющей 20...25%). Зона сплавления (шириной 55 мкм), имеет структуру сорбита с микротвёрдостью 230 HV. От зоны сплавления в наплавленный металл на глубину 15-20 мкм проникают дендриты, состоящие из сорбита. Наплавленный слой имеет ячеисто-дендритную структуру, характерную для внутрикристаллического строения покрытий сплавов эвтектоидного типа. Из рисунков видно, что ячейки появляются не от самой границы сплавления зерен околосшовной зоны, а на некотором расстоянии от нее. На более поздней стадии затвердевания образуются дендриты. Структура слоя наплавленного флюсом АН22ПК-ДМС состоит из трёх фаз. Одна из фаз формирует округлые области (зерна) выстроенные в направлении роста дендритов. Структура данной фазы состоит из аустенита (атлас нормальных микроструктур металлов и сплавов), имеющего микротвёрдость 250-300 HV. Другая фаза соответствует механической смеси (эвтектоид), состоящей из легированного цементита и аустенита (400-450 HV). В межзеренном пространстве расположена карбидная фаза (легированный цементит, 550-620 HV). По результатам исследования можно сделать вывод о том, что микроструктура слоя наплавленного флюсом АН22ПК-ДМС состоит из аустенита, эвтектоида и карбидной фазы. Структура слоя наплавленного флюсом АН348АПК-ДМС состоит так же из трёх фаз. Одна из фаз формирует округлые области (зерна) выстроенные в направлении роста дендритов. Структура данной фазы состоит из аустенита (атлас нормальных микроструктур металлов и сплавов), имеющего микротвёрдость 250-300 HV. Вторая фаза соответствует механической смеси (эвтектоид), легированный цементит и бейнит (400-450 HV). А в межзеренном пространстве расположена карбидная фаза (легированный цементит, 550-650 HV). По результатам исследования можно сделать вывод о том, что микроструктура слоя наплавленного флюсом АН348АПК-ДМС состоит из аустенита, эвтектоида и карбидной фазы;

– микрорентгеноспектральным анализом установлено, что разработанные составы флюсов способствуют восстановлению хрома и марганца, вольфрама и других элементов. Так, в металле, наплавленном под флюсом АН22ПК-ДМС, максимальное содержание хрома достигает 15 атом %, а марганца 6 атом %. При

этом содержание вольфрама в исследуемом металле незначительное (до 0.4 атом %). В наплавленном слое с использованием флюса АН348АПК-ДМС максимальное содержание хрома достигает 7,4 атом %, марганца 3,98 атом %, вольфрама 21,34 атом %;

–стехиометрический расчет фазового состава наплавленного слоя свидетельствуют о возможном образовании карбидов, легированного цементита и других соединений. Так при использовании флюса АН22ПК-ДМС (в различных точках наплавленного металла) содержится $Fe_{61,27}C_{17,70} = Fe_{3,46}C$, $(Fe,Cr)_{75,5}C_{17,7} = (Fe,Cr)_{4,27}C$, $Fe_{76,64}C_{12,96} = Fe_{5,91}C$, $(Fe,Cr)_{81,34}C_{12,96} = (Fe,Cr)_{6,27}C$, $Fe_{84,10}C_{6,99} = Fe_{12,03}C$, $(Fe,Cr)_{88,06}C_{6,99} = (Fe,Cr)_{12,59}C$, а при наплавке под флюсом АН348АПК-ДМС соответственно содержится $Fe_{52,55}C_{23,35} = Fe_{2,25}C$, $(Fe,Cr,W)_{75,91}C_{23,35} = (Fe,Cr,W)_{3,25}C$, $Fe_{71,06}C_{13,06} = Fe_{5,44}C$, $(Fe,Cr,W)_{80,03}C_{13,06} = (Fe,Cr,W)_{6,12}C$, $Fe_{60,85}C_{17,39} = Fe_{3,49}C$, $(Fe,Cr,W)_{77,23}C_{17,39} = (Fe,Cr,W)_{4,44}C$, $Fe_{77,15}C_{5,91} = Fe_{13,05}C$, $(Fe,Cr,W)_{77,77}C_{5,91} = (Fe,Cr,W)_{13,15}C$;

–исследованием фазового состава подтверждена возможность образования в наплавленном слое карбидов хрома Cr_7C_3 и железа Fe_3C при использовании флюса АН22ПК-ДМС, а при использовании флюса АН348АПК-ДМС – карбидов хрома Cr_7C_3 и железа Fe_3C . Это обеспечило высокую твердость и износостойкость формируемых покрытий.

6. Проверка в условиях эксплуатации показала, что твердость и износостойкость деталей строительно-дорожных машин, наплавленных опытными образцами флюсов, соответствуют нормативной документации, что подтверждено актом о проведении опытно-сравнительных испытаний.

7. Расчет экономической эффективности показал, что стоимость разработанных флюсов ниже типовых на 40-50% и составляет 44052,43 за тонну.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах:

1. Макиенко В.М., Соколов П.В., Лукьянчук А.В., Атеняев А.В. Разработка сварочно-наплавочных флюсов на основе минерального сырья ДВ региона [Текст] // Упрочняющие технологии и покрытия.- 2019.- №15.- С. 442-448.
2. Макиенко В.М., Атеняев А.В. Разработка шлаковой основы флюсов ильменито-флюоритного типа с использованием минерального сырья Дальневосточного региона [Текст] // Ползуновский вестник.- 2020.- №1.- С. 130-139.
3. Макиенко В.М., Атеняев А.В., Белоус Т.В. Создание флюсов для формирования покрытий на основе минерального сырья Дальневосточного региона [Текст] // Перспективные материалы.- 2020.- №11.- С. 69-82.
4. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г., Атеняев А.В. Research into special technological effects for formation of wear resistant coatings using mineral raw materials of the far eastern region [Текст] // E3S Web Conf. Volume 56, 2018 VII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources”(PCDG2018).C7_14DOI:https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185603027
5. Макиенко В.М., Соколов П.В., Леонтьев Л.Б., Атеняев А.В. Development of Flux Cored Wire Using Concentrates and Mining Industry Waste Products in the Far East [Текст] // «Materials Science Forum», издательства Trans Tech Publications Ltd. FarEastCon - Materials and Construction.ISBN-13: 978-3-0357-1292-6; Vol.945.C. 1024-1300. 2019
6. Макиенко В.М., Соколов П.В., Романов И.О., Атеняев А.В. System for material selection on the price and quality [Текст] // XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 403 (2019) 012207 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/403/1/012207

Патентные документы:

7. Атеняев А.В., Соколов П.В., Даниленко П.В. Программа для расчета регрессионных зависимостей и автоматизированного построения диаграмм распределения свойств в зависимости от состава трехкомпонентной смеси на симплексной решетке четвертого порядка. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016618684 от 05 августа 2016 г.

Статьи и материалы конференций:

8. Атеняев А.В. Разработка сварочно-наплавочных флюсов на основе минерального сырья Дальневосточного региона [Текст] // материал семинара, посвященный памяти Анатолия Демьяновича Верхотурова, Хабаровск, 25-26 апреля 2019 года в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.
9. Атеняев А.В. Разработка сварочно-наплавочных флюсов на основе минерального сырья Дальневосточного региона для восстановления деталей подвижного состава [Текст] // материал Международной научной конференции «Инновационные технологии развития транспортной отрасли, Хабаровск, 24-26 октября 2019 года в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Дальневосточный государственный университет путей сообщения.

Атеняев Александр Валерьевич

**РАЗРАБОТКА ШЛАКОВОЙ ОСНОВЫ ЛЕГИРУЮЩИХ ФЛЮСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать _____ г. Формат 60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman».

Уч.-изд. л. 1,5. Усл. печ. л. 1,4. Зак. 189. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Издательстве ДВГУПС. 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47.