

На правах рукописи

Сердюк Никита Александрович



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ
ДИФФУЗИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА
СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ В РАСПЛАВАХ
ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЗАЩИТНЫХ ФЛЮСОВ**

***Специальность 05.16.09 – Материаловедение
(Машиностроение)***

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Пряхин Евгений Иванович

Официальные оппоненты:

Скотникова Маргарита Александровна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшая школа машиностроения, профессор;

Бобкова Татьяна Игоревна

кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», лаборатория «Конструкционные наноматериалы и покрытия», начальник лаборатории.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 23 декабря 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 октября 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современное развитие нефтехимической отрасли напрямую зависит от наличия материалов и технологий, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость используемого оборудования. Таким оборудованием, в частности, является трубопроводная арматура, детали которой непосредственно контактируют с различными транспортируемыми средами.

Для обеспечения высокой работоспособности в агрессивных средах их изготавливают из высоколегированных дорогостоящих сталей и сплавов. Вместо этого, детали арматуры можно изготавливать из углеродистых сталей, при условии нанесения на их поверхность коррозионностойких диффузионных покрытий, в частности, в расплавах легкоплавких металлов. При таком варианте возможно решение проблемы импорта запасных частей нефтехимического оборудования путем замены их на детали отечественного производства.

На сегодняшний день, технология получения диффузионных покрытий в расплавах легкоплавких металлов не нашла широкого применения, так как предполагает использование вакуумного оборудования и защитных газовых сред. Однако, такие диффузионные покрытия можно, в принципе, получать с использованием электропечей с воздушной средой, при обеспечении защиты поверхности деталей и транспортного расплава от высокотемпературного окисления с использованием флюсов.

Степень разработанности темы исследования

Решением вопроса получения диффузионных покрытий занимались Артемьев В.П., Соколов А.Г., Шатинский В.Ф., Никитин В.И., Максимович Г.Г., Чаевский М.И., Ананьевский В.А., Збожная О.М., Мансиа С., Carter G.F., Lemcke C.H., Leavitt A.L. и др. В своих работах авторы исследовали вопросы нанесения покрытий в расплавах легкоплавких металлов с использованием модернизированных вакуумных установок. При использовании электропечей с воздушной средой вместо модернизированных вакуумных установок требуется защита поверхности деталей и транспортного расплава от высокотемпературного окисления,

которая возможна с применением защитных флюсов, также как в сварочных процессах флюсы используют для защиты жидкой ванны свариваемого металла от окисления. Однако, такой процесс до сих пор не нашел своего применения из-за ограниченного количества теоретических разработок и экспериментальных исследований.

Цель работы – разработка научных положений и технологии диффузионной металлизации стальных изделий в расплавах легкоплавких металлов с использованием электропечей с воздушной средой и защитных флюсов для получения коррозионностойких покрытий.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ и обобщение теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.

2. Разработка научных положений и технологии формирования диффузионных металлических покрытий на стальных изделиях в расплавах легкоплавких металлов на стальных изделиях с использованием электропечи с воздушной средой и защитных флюсов.

3. Выполнение термодинамического расчета изобарно-изотермического потенциала химических реакций взаимодействия компонентов исследуемых флюсов с оксидами, образующимися при осуществлении высокотемпературной диффузионной металлизации на поверхности стальных изделий и транспортного расплава.

4. Определение технологических параметров процесса диффузионной металлизации, обеспечивающей получение качественных покрытий в расплавах легкоплавких металлов с использованием электропечи с воздушной средой и защитных флюсов.

5. Проведение экспериментальных исследований по разработанным научным положениям и предложенной технологии формирования диффузионных металлических покрытий на стальных изделиях в расплавах легкоплавких металлов с использованием электропечи с воздушной средой и защитных флюсов.

6. Оценка качества получаемых диффузионных покрытий и их эксплуатационных характеристик.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является разработка технологии формирования диффузионных металлических покрытий на стальных изделиях в расплавах легкоплавких металлов с использованием защитных флюсов.

Идея работы состоит в научном и практическом обосновании возможности применения флюсов для получения диффузионных металлических покрытий с целью защиты поверхности стальных изделий и транспортного расплава от высокотемпературного окисления.

Научная новизна работы:

1. Научно обоснована и экспериментально доказана возможность получения диффузионных покрытий на стальных изделиях в расплавах легкоплавких металлов в электропечах с воздушной средой при использовании защитных флюсов.

2. Определение состава защитного флюса, путем термодинамического расчета изобарно-изотермического потенциала химических реакций взаимодействия компонентов исследуемых флюсов с оксидами, обеспечивающего получение качественных коррозионностойких диффузионных никелевых покрытий.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны научные положения по обеспечению защиты поверхности стальных изделий и транспортного расплава от высокотемпературного окисления при осуществлении диффузионной металлизации в воздушной среде электропечи с использованием защитных флюсов.

2. На основании термодинамического расчета изобарно-изотермического потенциала химических реакций разработаны принципы оценки использования защитных флюсов, компоненты которых взаимодействуют с оксидами, образующимися на поверхности стальных изделий и транспортного расплава, при осуществлении высокотемпературной диффузионной металлизации.

3. Определено, что при использовании флюса $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ обеспечивается получение качественных

диффузионных покрытий, состоящих из твердых растворов никеля с железом переменной концентрации с фазами Fe_3Ni и FeNi .

4. Установлено, что разработанная технология формирования диффузионных металлических покрытий подходит для нанесения никелевых покрытий, защищающих детали нефтехимического оборудования от коррозионного воздействия агрессивной среды.

Методология и методы исследования. Для реализации поставленной цели и решения задач использовались лаборатории кафедры Материаловедения и технологии художественных изделий и Центра коллективного пользования на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования; выполнен анализ отечественной и зарубежной литературы по вопросу получения диффузионных покрытий в расплавах легкоплавких металлов с применением модернизированных вакуумных установок; изучены существующие составы защитных флюсов, применяемых для различных технологических задач при термической обработке изделий; проведен патентный поиск.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что компоненты исследуемых защитных флюсов обеспечивают удаление оксидных пленок с поверхности стальных изделий и транспортного расплава при осуществлении процесса высокотемпературной диффузионной металлизации в воздушной среде электропечи.

2. Установлено, что флюс $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ обеспечивает получение однородных, беспористых, точно воспроизводящих форму насыщаемых изделий, диффузионных коррозионностойких никелевых покрытий в электропечи с воздушной средой.

Степень достоверность результатов исследования подтверждается высокой сходимостью результатов теоретических, лабораторных и экспериментальных исследований, а также основывается на применении стандартизированных методов определения качества покрытий, определения их микротвердости,

коррозионной стойкости и применение тонких методов изучения структуры и фазового состава покрытий.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертации представлялись и обсуждались на следующих конкурсах и конференциях: XVII Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2019 г.); VI Международном семинаре «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); 13 Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler (TU Bergakademie Freiberg, г. Фрайберг, Германия, 2019 г.); III Международном молодежном научно-практическом форуме «Нефтяная столица» (г. Нижневартовск, 2020 г.); VII Международном семинаре «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); XV Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); VIII Международном семинаре «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Личный вклад автора состоит в анализе отечественных и зарубежных литературных источников, непосредственном участии в экспериментах по получению диффузионных никелевых покрытий, определению их микроструктуры, химического анализа, микротвердости, стойкости к коррозии. Сформулированы цель, идея, задачи, основные защищаемые положения и выводы; разработаны практические рекомендации по получению диффузионных никелевых покрытий с использованием электропечей с воздушной средой и защитных флюсов.

Публикации по работе. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 1 статье – в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в

которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье – в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка, включающего 117 наименований. Изложена на 101 странице машинописного текста и содержит 21 рисунок и 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе установлено, что из числа различных методов химико-термической обработки, диффузионная металлизация в расплавах легкоплавких металлов является наиболее эффективной для нанесения покрытий на изделия сложной конфигурации одновременно как на внутренние, так и на наружные поверхности.

Отмечено, что диффузионная металлизация в легкоплавких металлических расплавах при изотермических условиях позволяет получать качественные покрытия, точно воспроизводящие форму насыщаемых деталей.

Показано, что существующие технологии получения диффузионных покрытий в жидкометаллических расплавах не нашли широкого применения, так как предполагают использование вакуумного оборудования и защитных газовых сред.

Заявлено, что необходима корректировка технологического процесса диффузионной металлизации в расплавах легкоплавких металлов при использовании электрод печей с воздушной средой.

Предложено использование защитных флюсов при осуществлении технологии получения диффузионных покрытий в жидкометаллических расплавах с использованием электрод печей с

воздушной средой, также как в сварочных процессах флюсы используют для защиты жидкой ванны свариваемого металла от окисления.

Сформулированы необходимые требования к защитным флюсам при их использовании в диффузионной металлизации в расплавах легкоплавких металлов.

Определено, что для выбора эффективного флюса необходимо произвести термодинамический расчет изобарно-изотермического потенциала химических реакций взаимодействия компонентов исследуемых флюсов с оксидами, образующимися при осуществлении высокотемпературной диффузионной металлизации на поверхности стальных изделий и транспортного расплава.

Во второй главе приведены химические составы, механические и физические свойства используемых материалов в данном исследовании. Объектами исследования являлись цилиндрические образцы из стали 45. Основой легкоплавкого транспортного расплава являлся свинец марки С0. В качестве диффузионного элемента применялся никель марки НП1. Для защиты поверхности образцов и транспортного расплава от высокотемпературного окисления применялись флюсы следующих составов: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$; $\text{NaCl-Na}_2\text{CO}_3$; $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$.

Приведен перечень необходимого оборудования для проведения диффузионной металлизации в расплавах легкоплавких металлов, металлографического анализа полученных покрытий, определения их микротвердости, химического состава и коррозионной стойкости. Для осуществления проведения высокотемпературной диффузионной металлизации была использована модернизированная печь СШОЛ-10/11. Толщину, структуру и строение диффузионных покрытий определяли и исследовали на металлографическом микроскопе Axio Observer A1m. Содержание и распределение химических элементов по сечению диффузионного покрытия и прилегающей зоне исследовали на энергодисперсионном безазотном спектрометре Inca X-Act. Измерение микротвёрдости диффузионных покрытий осуществляли на микротвердомере ПМТ-3. Взвешивание образцов до и после

испытаний на коррозионную стойкость осуществлялось на электронных аналитических весах WA-33.

Определение структуры, микротвердости и коррозионных свойств диффузионных покрытий осуществлялось по стандартным методикам.

На всех этапах исследований проведена тщательная технологическая и метрологическая подготовка эксперимента, количественная оценка получаемых результатов измерений выполнена с использованием метода статистической обработки.

Приведено описание разработанной технологии формирования диффузионных металлических покрытий в расплавах легкоплавких металлов, включающей в себя три этапа.

Подготовительный этап предполагает плавление компонентов транспортного расплава в стальном тигле в электропечи и последующее его остывание на воздухе, плавление исследуемого флюса и его разлив на остывшую поверхность транспортного расплава. Затвердевший транспортный расплав со слоем защитного флюса нагревается в печи и выдерживается для насыщения диффузионным элементом при заданной температуре. Механически обработанный до шероховатости Ra 2,5 стальной образец обезжиривается бензином и помещается в отверстие цилиндрического штока загрузочного устройства.

В период основного этапа шток с закрепленным цилиндрическим образцом опускается через слой расплавленного флюса в расплавленный транспортный расплав. Далее осуществляется диффузионное насыщение образца в течение заданного времени при необходимой температуре.

На заключительном этапе по истечению времени, отведенного для насыщения, шток с закрепленным образцом извлекается из пространства электропечи. Затем образец охлаждается на воздухе до температуры окружающей среды.

В третьей главе представлено теоретическое обоснование выбора состава транспортного расплава, технологических параметров процесса диффузионной металлизации, защитных флюсов.

Предварительный выбор состава транспортного расплава и технологических параметров процесса жидкофазной диффузионной металлизации производился на основании анализа литературных данных по аналогичным исследованиям. Окончательный выбор был произведен с помощью разработанной компьютерной программы, определяющей состав транспортного расплава и продолжительность процесса диффузионной металлизации.

В данной работе для осуществления процесса диффузионной металлизации с использованием $\text{NaCl-Na}_2\text{CO}_3$ применялся температурный режим изотермической выдержки при 800°C в течении 4,5 ч., с использованием $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ при 950°C в течении 4 ч.

Для оценки возможности защиты поверхности образца и транспортного расплава от высокотемпературного окисления в воздушной среде электропечи проведен термодинамический расчет взаимодействия компонентов исследуемых флюсов и оксидов на поверхности изделия и транспортного расплава путем расчета изобарно-изотермического потенциала данных реакций. Согласно результатам расчета, используемые флюсы способны удалить эти оксиды.

Для получения никелевого покрытия толщиной 30 мкм на стали 45 при температурах 800°C и 950°C в электропечи с воздушной средой были определены необходимые технологические параметры диффузионной металлизации, полученные с помощью разработанной компьютерной программы.

В четвертой главе, первоначально, для возможности сравнительной оценки эффективности защитного действия используемых флюсов, изучали структуру поверхностного слоя образцов, прошедших весь цикл диффузионного насыщения никелем в расплаве свинца, но без защиты флюсом. При анализе микроструктур отчетливо видна нарушенная геометрия поверхности образцов вследствие высокотемпературного коррозионного поражения, ненасыщенные диффузионным элементом участки, небольшие участки с фрагментами никеля на поверхности (рисунок 1).

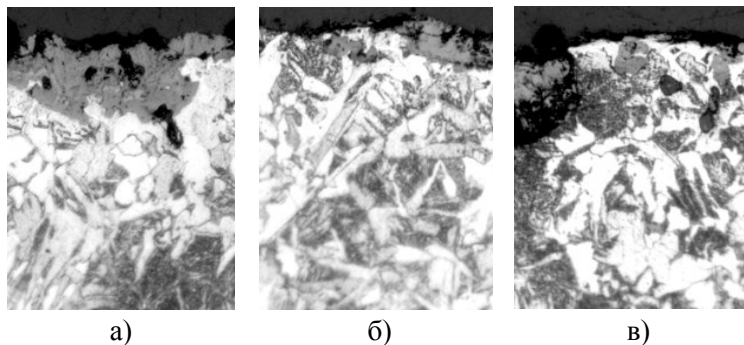


Рисунок 1 – Микроструктуры стали 45 без использования флюса ($950\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 ч) $\times 200$: а) коррозионное поражение поверхности; б) ненасыщенные никелем участки; в) незначительные области покрытия с фрагментами никеля на поверхности

Использование буры в качестве защитного флюса обеспечивает получение никелевого покрытия, средняя толщина которых составила 9–10 мкм. Однако, из-за недостаточной газонепроницаемости флюса, покрытия получились пористыми, что приводит к получению некачественного покрытия (рисунок 2).



Рисунок 2 – Микроструктура никелевого покрытия при использовании $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ($950\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 ч) $\times 200$

Процесс диффузионного никелирования при использовании смеси солей $\text{NaCl-Na}_2\text{CO}_3$ в качестве защитного флюса сопровождался активным парением. При исследовании

микроструктуры было выявлено, что данный флюс не удаляет в полной мере оксидные пленки с поверхности образца и транспортного расплава (рисунок 3).

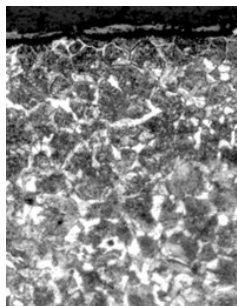


Рисунок 3 – Микроструктура стали 45 при использовании $\text{NaCl-Na}_2\text{CO}_3$ (800 °C, 4,5 ч) $\times 200$

При использовании флюса $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ получено однослойное, однородное, беспористое, равномерно распределенное по всей поверхности образца покрытие. Средняя толщина никелевого покрытия составила 20–22 мкм (рисунок 4).



Рисунок 4 – Микроструктура никелевого покрытия при использовании $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ (950 °C, 4 ч) $\times 200$

Дальнейшие исследования химического состава, микротвердости, коррозионной стойкости изучались на трех

образцах с покрытиями, полученными при использовании флюса $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$.

По данным спектрального анализа, полученные покрытия содержат до 42 % никеля на поверхности. При таком содержании насыщаемого элемента основу покрытия составляют твердые растворы никеля в железе с фазами Fe_3Ni и FeNi (рисунок 5).

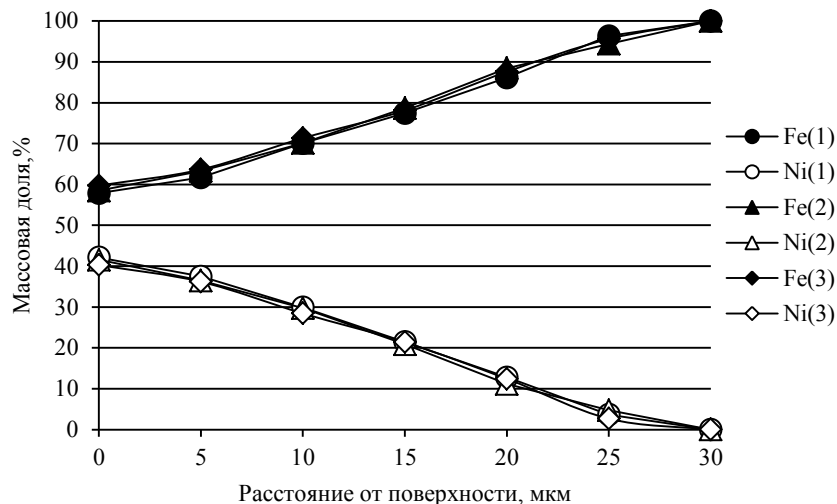


Рисунок 5 – Распределение Fe и Ni по глубине диффузионной зоны на образцах стали 45

Плавное изменение свойств покрытия от поверхности вглубь основного металла выявлено у покрытий со структурой твердого раствора. Микротвердость верхней части поверхностного слоя соответствует микротвердости упорядоченного твердого раствора FeNi , содержащего до 42 % никеля. Микротвердость средней части увеличена за счет образования упорядоченного твердого раствора Fe_3Ni , содержащего до 21 % никеля. На рисунке 6 приведен график распределения микротвердости по глубине диффузионного покрытия.

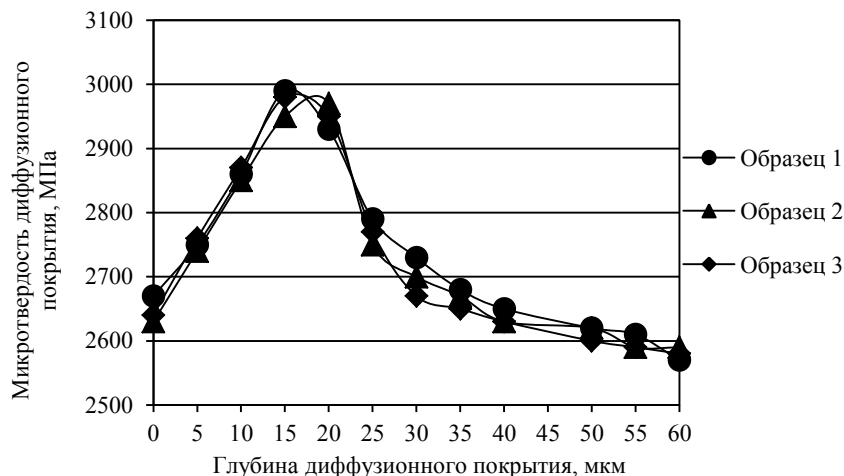


Рисунок 6 – Распределение микротвердости никелевого покрытия на стали 45 от поверхности вглубь образца

По изменению микротвердости определена толщина диффузионного слоя, равная в среднем 30–33 мкм. Металлографический анализ показал меньшую толщину видимого слоя покрытия.

Согласно результатам проведенного исследования распределения микротвердости по глубине никелевого покрытия, полученного при использовании флюса $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$, определено, что максимальная величина микротвердости составила 2980 МПа.

Определено, что под видимой границей покрытия располагается диффузионная зона толщиной 10–11 мкм, микротвердость которой постепенно убывает до значений, характерных для основного металла.

На основании проведенной статистической обработки полученных результатов показано, что приведенные значения измерений микротвердости укладываются в среднестатистический разброс.

Оценивалась коррозионная стойкость исследуемых образцов в 10 и 40 % водных растворах КОН при температуре 20 °С в течение 2016 ч. Также были проведены исследования на коррозионную стойкость сталей с никелевыми покрытиями и без покрытий в 10 %

водном растворе NaCl и в 5 % водных растворах HCl и H₂SO₄ при температуре 20 °С в течение 720 ч. Результаты испытаний на коррозионную стойкость представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коррозионная стойкость стали 45 без покрытия и с никелевым покрытием

Тип образца	Скорость коррозии в среде испытания				
	10 % KOH	40 % KOH	10 % NaCl	5 % HCl	5 % H ₂ SO ₄
	мм/год	мм/год	мм/год	мм/год	мм/год
без покрытия	0,0173	0,0317	0,0483	6,9713	5,0471
Группа стойкости	Стойкая	Стойкая	Стойкая	Малостойкая	Малостойкая
–					
с покрытием	0,0003	0,0029	0,0183	0,4496	0,4833
Группа стойкости	Совершенно стойкое	Весьма стойкая	Стойкая	Пониженно стойкая	Пониженно стойкая

Установлено, что нанесение никелевого покрытия увеличивает коррозионную стойкость углеродистой стали в 10 % водном растворе KOH в 5 раз; в 40 % водном растворе KOH в 10 раз; в 10 % в водном растворе NaCl в 2 раза; в 5 % водном растворе HCl в 15 раз; в 5 % водном растворе H₂SO₄ в 10 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая решает актуальную задачу разработки технологии формирования диффузионных металлических покрытий на стальных изделиях в расплавах легкоплавких металлов с использованием защитных флюсов.

Основные научные результаты и практические рекомендации отражены в следующих выводах:

1. Разработаны научные положения и технология формирования диффузионных покрытий на стальных изделиях в расплавах легкоплавких металлов с использованием электропечи с воздушной средой и защитных флюсов.

2. Выполнен термодинамический расчет изобарно-изотермического потенциала химических реакций взаимодействия компонентов исследуемых флюсов с оксидами, образующимися при осуществлении высокотемпературной диффузионной металлзации на поверхности стальных изделий и транспортного расплава.

3. Определены технологические параметры процесса диффузионной металлзации, обеспечивающие получение качественных покрытий в расплавах легкоплавких металлов с использованием электропечи с воздушной средой и защитных флюсов.

4. Проведены экспериментальные исследования по разработанным научным положениям и предложенной технологии формирования диффузионных металлических покрытий на стальных изделиях в расплавах легкоплавких металлов с использованием электропечи с воздушной средой и защитных флюсов.

5. Определено, что при использовании флюса $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ обеспечивается получение качественного диффузионного покрытия, состоящего из твердых растворов никеля с железом переменной концентрации с фазами Fe_3Ni и FeNi , содержащие до 42 % никеля на поверхности.

6. Проведена оценка качества получаемых диффузионных покрытий и их эксплуатационных характеристик. Установлено, что полученное однослойное, однородное, беспористое, диффузионное никелевое покрытие, точно воспроизводящее форму покрываемого образца, характеризующееся равномерной толщиной 20–22 мкм.

Определено, что, максимальная величина микротвердости покрытия составила 2980 МПа.

7. Установлено, что нанесение диффузионных никелевых покрытий увеличивает коррозионную стойкость углеродистых сталей в 10 % водном растворе КОН в 5 раз; в 40 % водном растворе КОН в 10 раз; в 10 % в водном растворе NaCl в 2 раза; в 5 % водном растворе HCl в 15 раз; в 5 % водном растворе H₂SO₄ в 10 раз.

8. Разработанный процесс и технология диффузионной металлизации предлагаются для широкого применения в машиностроении с целью повышения эксплуатационных характеристик деталей нефтехимического оборудования, работающих в условиях воздействия коррозионных сред.

9. Требуется оформить необходимую техническую и технологическую документацию для возможности применения разработанного технологического процесса получения коррозионностойких покрытий на стальных изделиях.

Полученные результаты при разработке технологии диффузионной металлизации в расплавах легкоплавких металлов с использованием защитных флюсов в дальнейшем позволяют грамотно осуществлять процесс получения коррозионностойких покрытий при изготовлении ответственных деталей нефтехимического оборудования.

Перспективным направлением исследования в этой области является разработка технологий нанесения многокомпонентных диффузионных металлических покрытий, обладающих комплексом специальных свойств. Такие покрытия могут быть использованы в крайне сложных условиях эксплуатации трубопроводных систем в случаях, когда необходимо, например, обеспечение высокой износостойкости в сочетании с коррозионной и кавитационной стойкостью. Предлагаемая технология позволяет получать градиентные покрытия различного состава и толщины. Результаты проведенного исследования позволяют расширить научные представления о возможностях получения защитных покрытий с использованием не только вакуумных установок, но и в самых распространенных нагревательных печах машиностроительных производств.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Сердюк, Н.А.** Разработка экспериментальной установки поверхностного легирования из среды легкоплавких металлов металлических расплавов / А.В. Михайлов, А.В. Сивенков, Н.А. Сердюк, Е.И. Пряхин // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 5 (107). – С. 9 – 14.

Публикации в изданиях, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

2. **Serdiuk, N.A.** Creating a model of diffusion deposition of metal coatings from melts of low-melting metals / A.V. Sivenkov, V.O. Nikitina, N.A. Serdiuk, D.A. Konchus, E.I. Pryakhin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019, 560(1), 012188.

Публикации в прочих изданиях:

3. **Сердюк, Н.А.** Актуальность применения метода поверхностного легирования из легкоплавких расплавов / Н.А. Сердюк, А.В. Михайлов, Г.Р. Шарафутдинова, Е.И. Пряхин, А.В. Сивенков // VII Международная научно – техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME 2020». – 2020. – С. 253–255.

4. **Сердюк, Н.А.** Использование флюсов в технологии нанесения защитных покрытий из легкоплавких расплавов / Н.А. Сердюк, А.В. Сивенков, Е.И. Пряхин, А.В. Михайлов // II Всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований». – 2019. – С. 177–179.

5. **Сердюк, Н.А.** Применение расплавов солей в технологии нанесения покрытий из жидкометаллических расплавов / Г.Р. Шарафутдинова, Н.А. Сердюк, Д.А. Кончус // VI Международная научно – техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019». – 2019. – С. 614–617.

6. **Сердюк, Н.А.** Применение флюсов в технологии осаждения металлических покрытий из расплавов легкоплавких металлов / XVII Всероссийская конференция – конкурс студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля. – 2019. – С. 213–214.

7. **Сердюк, Н.А.** Применение флюсов в химико-термической обработке из легкоплавких расплавов / Н.А. Сердюк, А.В. Михайлов, Д.А. Кончус // III Международный молодежный научно-практический форум «Нефтяная столица». – 2020. – С. 274–278.

8. **Сердюк, Н.А.** Промышленные флюсы в технологии нанесения защитных покрытий из легкоплавких расплавом / Н.А. Сердюк, Д.А. Кончус // VI Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019». – 2019. – С. 515–518.

9. **Serdiuk, N.A.** Surface alloying from the fusible metal melts / A.V. Mikhailov, N.A. Serdiuk, A.V. Sivenkov, E.I. Pryakhin // XII Russian-German Raw Material Forum: Youth Day. – 2019. – P. 101–102.

10. **Serdiuk, N.A.** The use of fluxes in technology of application protective coatings of low – melting melts / N.A. Serdiuk, A.V. Sivenkov, E.I. Pryakhin // Science Reports on Resource Issues. - Volume 1. – 2019. – P. 284–287.

Свидетельство:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617557 Российская Федерация. Программа для определения технологических параметров ХТО углеродистых сталей для нанесения никелевого покрытия из среды легкоплавких металлов : №2021617557 : заявл. 29.04.2021 : опубл. 17.05.2021 / А.В. Сивенков, Е.И. Пряхин, **Н.А. Сердюк**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».