

На правах рукописи

Михайлов Андрей Владимирович



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО
ЛЕГИРОВАНИЯ ХРОМОНИКЕЛЕВЫМИ
КОМПЛЕКСАМИ ИЗ СРЕДЫ ЛЕГКОПЛАВКИХ
МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕЧЕЙ С
ЗАЩИТНОЙ АТМОСФЕРОЙ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

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

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Пряхин Евгений Иванович

Официальные оппоненты:

Атрошенко Светлана Алексеевна

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, лаборатория физики разрушения, ведущий научный сотрудник.

Дураков Василий Григорьевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Научно производственная компания Томские электронные технологии», заместитель генерального директора по новым технологиям.

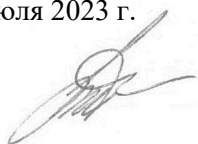
Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.

Защита диссертации состоится **21 сентября 2023 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

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

Автореферат разослан 21 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Многие детали машин и механизмов, применяемые в ведущих отраслях промышленности - химической, нефтехимической, атомной, пищевой, авиационной и др. часто эксплуатируются в условиях воздействия агрессивных сред, повышенных и пониженных температур, истирающих нагрузок. В большинстве случаев, именно коррозия и износ при воздействии на рабочие поверхности таких деталей приводят к выходу из строя указанного оборудования. Одним из наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения является технология поверхностного легирования стальных изделий из среды расплавов легкоплавких металлов, позволяющая формировать на их поверхности стойкие комплекснолегированные диффузионные слои, позволяющие одновременно повышать коррозионную стойкость и износостойкость изделий. Причиной ограниченного использования данной технологии в реальных производствах является необходимость применения специального вакуумного оборудования, обеспечивающего защиту от высокотемпературного окисления поверхности обрабатываемого изделия и жидкометаллической транспортной среды. В определенной степени эта проблема может быть решена за счет применения защитных флюсов, что позволяет рекомендовать применение данной технологии с использованием открытых термических печей, распространенных в термических цехах машиностроительных производств. Повысить эффективность защиты от окислительных процессов при реализации технологического перехода от вакуумного оборудования к более простым и доступным техническим решениям, возможно при концепции одновременного продува нагревательной камеры печи инертным газом и защиты транспортного расплава флюсом. При этом практически гарантируется полное исключение высокотемпературного окисления, что позволит получать качественные, равномерные и бездефектные поверхностнолегированные слои из легирующих комплексов, повышающих стойкость к коррозии и износу.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиями в области методов химико-термической обработки, основанных на диффузионной металлзации из жидкометаллической среды, занимались Шатинский В.Ф., Максимович Г.Г., Соколов А.Г., Сивенков А.В., Чаевский М.И., Бичуя А.Л., Гойхманн М.С., Збожная О.М., Картер Г.Ф., Лахтин Ю.М., Рихштад А.Г., Смирнов М.А., Счастливец В.М., Журавлев Л.Г., Никифоров В.М. и другие ученые.

Идеи, приведенные в их работах, имеют широкую теоретическую и практическую значимость в области технологий, основанных на эффекте направленного массопереноса из жидкометаллической транспортной среды. Несмотря на широкую теоретическую и практическую значимость проведенных исследований и разработок, технология не получила широкого внедрения в производство по ряду причин. Основной причиной является необходимость борьбы с высокотемпературным окислением поверхности обрабатываемого изделия и жидкометаллической транспортной среды. Применение для защиты от окисления одновременного продува реакционной камеры печи инертным газом и защиты транспортного расплава флюсом вместо процесса вакуумирования пространства печи, позволит адаптировать процесс для его реализации в обычных термических печах. Решение этих вопросов требует проведения более углубленных теоретических и экспериментальных исследований.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение** по п. 10. «Разработка способов повышения коррозионной стойкости металлических, неметаллических и композиционных материалов в различных условиях эксплуатации», п. 11. «Разработка функциональных покрытий различного назначения и методов управления их свойствами и качеством» и п. 12. «Разработка физико-химических процессов получения функциональных покрытий на основе новых металлических, неметаллических и композиционных материалов. Установление закономерностей влияния состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и других факторов на свойства функциональных покрытий».

Объект исследования. Поверхностное легирование из среды легкоплавких металлов для повышения стойкости к коррозии и износу.

Предмет исследования. Cr-Ni легирующие комплексы, применяемые в технологии поверхностного легирования из среды легкоплавких металлов.

Цель работы – Разработка технологии, обеспечивающей формирование комплекснолегированного диффузионного слоя на поверхности стальных изделий путем массопереноса из среды расплавов легкоплавких металлов в открытых термических печах с использованием для защиты от окисления высокотемпературных флюсов и защитной газовой атмосферы.

Идея работы заключается в получении коррозионностойкого и износостойкого хромоникелевого диффузионного слоя на поверхности стальных изделий путем массопереноса из среды легкоплавких металлов в открытых термических печах с использованием для защиты от окисления высокотемпературных флюсов и защитной газовой атмосферы.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается решением нижеуказанных **задач**:

1. Анализ и обобщение существующих методов химико-термической обработки, направленных на повышение стойкости к коррозии и износу;

2. Исследование влияния легирующих элементов и их комплексов на эксплуатационные характеристики металлоизделий, с определением наиболее эффективных комплексов для одновременного повышения стойкости к коррозии и износу;

3. Разработка основ технологии диффузионной металлизации Cr-Ni комплексами из среды расплавов легкоплавких металлов при использовании открытых термических печей с защитной от окисления высокотемпературными флюсами и инертным газом;

4. Разработка и изготовление экспериментального стенда;

5. Определение технологических параметров процесса поверхностного легирования Cr-Ni комплексами из легкоплавкой жидкометаллической среды, обеспечивающих получение равномерных, бездефектных слоев на стальных изделиях из среды

расплавов легкоплавких металлов в открытых печах с одновременным применением высокотемпературного флюса и инертного газа для защиты от окисления;

6. Проведение экспериментальных исследований по предлагаемой технологии;

7. Оценка качества получаемых поверхностнолегированных хромоникелевых слоев и их эксплуатационных характеристик.

Научная новизна работы:

1. Впервые, для защиты от высокотемпературного окисления, вместо вакуумирования, реализовано применение процесса одновременного продува рабочего пространства открытой термической печи инертным газом и защиты транспортного расплава флюсом при получении диффузионных комплекснолегированных слоев из среды расплавов легкоплавких металлов;

2. Научно обосновано и экспериментально доказано, что полученные по технологии поверхностного легирования из жидкометаллической среды диффузионные слои на основе Cr-Ni комплексов обеспечивают одновременный прирост стойкости поверхности стальных изделий к коррозии и износу.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны научные положения, обеспечивающие получение в обычных термических печах бездефектных, сплошных комплекснолегированных диффузионных слоев на поверхности стальных изделий при осуществлении технологического процесса направленного массопереноса легирующих элементов из жидкометаллической среды с одновременным использованием для защиты от окисления высокотемпературных флюсов и инертных газов.

2. Определено, что совместное применение защитной инертной газовой среды в рабочем пространстве открытой термической печи и высокотемпературных флюсов позволяет исключить окисление обрабатываемых изделий, транспортной среды и технологического оборудования, тем самым обеспечивая

получение качественных комплекснолегированных диффузионных слоев на поверхности обрабатываемых изделий.

3. Установлено, что формирование диффузионного Cr-Ni слоя на поверхности изделий из конструкционных сталей по разработанной технологии поверхностного легирования из жидкометаллической среды позволяет одновременно повысить их стойкость к коррозии и износу. Для стали 20 скорость коррозии в кислотных средах уменьшилась в 15 раз, в щелочных – в 10 раз, по сравнению со значениями исходного материала, износостойкость увеличилась в 2 раза.

4. Разработанный и изготовленный в ходе проведения диссертационной работы экспериментальный стенд (Защищенный патентами РФ № 2711701 и № 2792992) позволяет проводить углубленные исследования в области поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов, в частности апробацию различных легирующих элементов и их комплексов, а также исследовать влияние режимов термообработки.

5. Материалы диссертационной работы приняты к внедрению в ООО «Первое Проектное Бюро», г. Санкт-Петербург, рекомендации по оценке качества покрытий и поверхностнолегированных слоев металлических изделий будут использованы в работе лаборатории неразрушающего контроля, а также, предлагаемая технология будет рекомендоваться при проектировании изделий, работающих в условиях повышенного износа и коррозии. Акт о внедрении от 20.12.2022 г., утвержденный генеральным директором ООО «Первое Проектное Бюро» Павловым А.В.

Методология и методы исследования.

Работа выполнена на основании теоретических и экспериментальных методов исследования; проведен анализ отечественных и зарубежных источников по теме технологии поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов; проведен патентный поиск; изучено влияние легирующих элементов и их комплексов на совместное повышение стойкости к

коррозии и износу; разработан, изготовлен и апробирован экспериментальный стенд для формирования диффузионных покрытий по предлагаемой технологии.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Совместное применение высокотемпературного флюса и защитного инертного газа при осуществлении технологического процесса поверхностного легирования стальных изделий из среды расплавов легкоплавких металлов, позволяет получать качественные диффузионные слои на поверхности стальных изделий.

2. Диффузионные покрытия на основе Cr-Ni комплексов, полученные по технологии поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов путем изотермической выдержки в обычных термических печах с эффективной защитой от окисления флюсом и инертным газом, обеспечивают одновременное повышение стойкости к коррозии и износу.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена сходимостью результатов теоретических, лабораторных и экспериментальных изысканий, а также базируется на стандартизированных методах определения качества покрытий, определения параметров микротвердости, стойкости к коррозии.

Апробация результатов. Основные результаты и положения диссертации представлялись и обсуждались на следующих конкурсах и конференциях: XVI International forum-contest of students and young researchers «Topical issues of rational use of natural resources» breakout session «Innovations and Prospects for the developments of mining mechanical engineering» (г. Санкт-Петербург, 2020); XVIII Всероссийской конференции-конкурсе "Актуальные проблемы недропользования" (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); Международной выставке Hi-Tech в рамках Петербургской технической ярмарки (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); Научной конференции студентов и молодых

ученых «Полезные ископаемые России и использование» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); XVIII Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); XXV Московском салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед 2022» (г. Москва, 2022 г.).

Личный вклад автора состоит в анализе отечественных и зарубежных литературных источников, патентном поиске по теме исследования; проектировании, разработке, изготовлении и апробации экспериментального стенда; непосредственном участии в проведении экспериментов по формированию поверхностнолегированных Cr-Ni слоев на поверхности стальных образцов, исследовании их микроструктуры, микротвердости, стойкости к коррозии и износу. Автором сформулированы цель, идея, задачи исследования, основные защищаемые положения и выводы по работе; разработаны практические рекомендации по осуществлению технологии поверхностного легирования стальных изделий Cr-Ni комплексами из среды расплавов легкоплавких металлов в открытых термических печах с совместной защитой флюсом и инертным газом от процессов высокотемпературного окисления.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в девяти печатных работах, в том числе в двух статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в двух статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено два патента на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка, включающего 126 наименований. Изложена на 121 странице машинописного текста и содержит 25 рисунков, 21 таблицу и 3 приложения на 4 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы и степень ее разработанности, указаны цель, задачи, идея и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, личный вклад соискателя и данные о публикациях.

В первой главе приведен обзор состояния изученности рассматриваемой темы исследования. Выполнен анализ научно-технической литературы, посвященной применяемым в современной промышленности технологиям химико-термической обработки (ХТО), основанным на эффекте направленного массопереноса из жидкометаллической среды, направленным на повышение эксплуатационных характеристик металлоизделий, работающих в условиях коррозии и износа. Заявлено, что технология поверхностного легирования в среде расплавов легкоплавких металлов является одним из наиболее эффективных методов ХТО для повышения вышеуказанных характеристик. По результатам выполненного анализа сформулированы цель и задачи исследования, составлены выводы по главе.

Во второй главе приведено описание используемых в работе материалов, оборудования и методов исследований. Приведены химические составы, механические и физические свойства материалов, применяемых в экспериментальной части исследования. Представлено устройство и конструкция экспериментального стенда для осуществления процесса поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов с совместной защитой специальным флюсом и продувом нагревательной камеры инертным газом (Патент РФ №2792992). Приведено описание технологии формирования диффузионных слоев из жидкометаллической среды с помощью разработанного устройства.

В третьей главе представлено обоснование выбора легирующих комплексов, транспортной жидкометаллической среды, методов защиты от высокотемпературного окисления и

технологических параметров поверхностного легирования стальных изделий из расплавов легкоплавких металлов. На основании полученных результатов предложены рекомендации по корректировке существующего технологического процесса.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований микроструктуры и свойств образцов из конструкционной стали, после их насыщения легирующими элементами в условиях разработанного экспериментального стенда с газовой защитой. Выполнен анализ полученных результатов.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Совместное применение высокотемпературного флюса и защитного инертного газа при осуществлении технологического процесса поверхностного легирования стальных изделий из среды расплавов легкоплавких металлов, позволяет получать качественные диффузионные слои на поверхности стальных изделий.

Технология поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких основана на эффекте направленного изотермического массопереноса металлов (диффузантов) из среды расплавов легкоплавких металлов к поверхности обрабатываемого изделия, с последующим взаимным проникновением диффузанта в материал изделия и образованием нового поверхностного слоя.

Применение вакуумного оборудования в существующих методах осуществления технологии поверхностного легирования из жидкометаллической среды обусловлено наличием процессов высокотемпературного окисления, неизбежно протекающих при температурах в интервале от 900 до 1100 °С. Так, осуществление процесса поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов при отказе от вакуумного оборудования возможно лишь при минимизации или полном исключении высокотемпературных окислительных процессов, возникающих как на поверхности транспортной жидкометаллической среды, так и на поверхности обрабатываемого изделия.

Во-первых, формирование оксидов на поверхности расплава, а также окисление обрабатываемого изделия в момент его пребывания в нагревательной камере и до момента погружения в расплав может привести к значительному замедлению процесса или вовсе исключить его протекание. Во-вторых, оксиды напрямую влияют на качество формируемых диффузионных слоев, в частности возможно образование дефектов в виде пор и включений, а также неравномерности формируемого слоя.

Учитывая вышесказанное для осуществления технологического перехода от использования вакуумного оборудования в технологии поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов, требуется комплексный подход, способный обеспечить защиту всех элементов технологического процесса, контактирующих с повышенными температурами, которая включает в себя: транспортный расплав, обрабатываемое изделие, элементы термической камеры установки и т.д. Для решения данной задачи предложено одновременное использование защитного высокотемпературного флюса и продува реакционной камеры печи инертным газом.

В качестве высокотемпературного флюса, на основании изобарно-изотермического расчета, выбран состав $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$, направленный на восстановление оксидных пленок на поверхности обрабатываемого изделия в момент его погружения в расплав. Стекловидная структура, получаемая при его плавлении, позволяет надежно и равномерно укрыть поверхность транспортного расплава, тем самым изолируя ее от воздействия внешней среды.

Продув инертным газом, направленный на вытеснение воздушной среды из реакционной камеры, осуществляется аргоном.

В работе, для формирования Cr-Ni диффузионных слоев на поверхности стальных образцов, изготовленных из стали 20, применялся единый режим термообработки, предполагающий изотермическую выдержку при 950 °С, в течении 4 часов. Для сравнительной оценки качества обработанных поверхностей, на образцах были сформированы однокомпонентные слои на основе хрома и никеля, а также комплексный хромоникелевый слой

Основным критерием работоспособности предлагаемого метода защиты от высокотемпературного окисления являлась сплошность формируемых поверхностнолегированных слоев и отсутствие дефектов поверхности.

Проведенный визуально-измерительный контроль показал, что во всех случаях, после обработки по технологии поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов с использованием флюса $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ и продува нагревательной камеры аргоном, поверхность образцов получилась сплошной, без видимых разрывов и поверхностных дефектов. Геометрия и габариты образцов остались без изменений.

Исследования структуры выполнены на поперечных металлографических шлифах, фотографии поверхности которых представлены на рисунке 1.

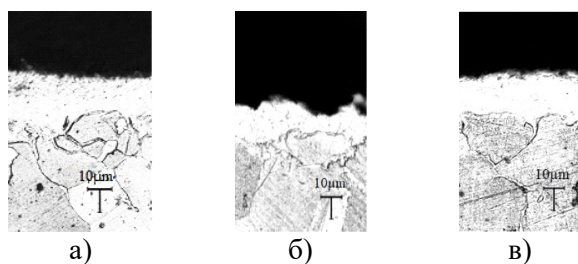


Рисунок 1 – Микроструктура образцов из стали 20, обработанных по технологии поверхностного легирования ($950\text{ }^\circ\text{C}$) следующими составами: а) Ni ($\times 500$); б) Cr ($\times 500$); в) Cr-Ni ($\times 500$)

Исследования микроструктуры показали, что в каждом из трех случаев были получены диффузионные слои, характеризующиеся как сплошные, однородные и бездефектные.

Средняя толщина видимого однокомпонентного никелевого слоя (рисунок 1 а) составила 17 мкм. Анализ микроструктуры не выявил дефектов в виде пор и включений, характерных для диффузионных покрытий, полученных в условиях окислительной атмосферы.

На однокомпонентном слое на основе хрома (рисунок 1 б) дефектов не обнаружено, средняя толщина видимой зоны составила 16 мкм.

Для образца с комплексным Cr-Ni слоем (рисунок 1 в) средняя толщина видимого слоя показала значение - 14 мкм, без видимых дефектов.

Отсутствие пор и включений свидетельствует о работоспособности предлагаемого метода защиты от высокотемпературного окисления.

Применяемый защитный флюс $\text{CaO-Li}_2\text{CO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ обладает достаточной газонепроницаемостью, что подтверждается качеством полученного однокомпонентного никелевого диффузионного слоя, где никелю характерна склонность к образованию пористости.

Использование инертного газа на протяжении всего процесса формирования диффузионных слоев исключило образование оксидов на образцах в момент их помещения в нагревательную камеру, что способствовало сохранению ювенильной поверхности, полученной при их подготовке.

2. Диффузионные покрытия на основе Cr-Ni комплексов, полученные по технологии поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов путем изотермической выдержки в обычных термических печах с эффективной защитой от окисления флюсом и инертным газом, обеспечивают одновременное повышение стойкости к коррозии и износу.

Диффузионные покрытия, характеризуются распределением элементов-диффузантов по градиенту от поверхности к центру изделия. Концентрация легирующих элементов у поверхности может достигать до 80 %. От видимой границы к центру находится диффузионный слой с убывающей концентрацией легирующих элементов по мере продвижения к центру изделия. Значение истинной толщины слоя определено путем измерения микротвердости. График распределения полученных значений микротвердости представлен на рисунке 2.

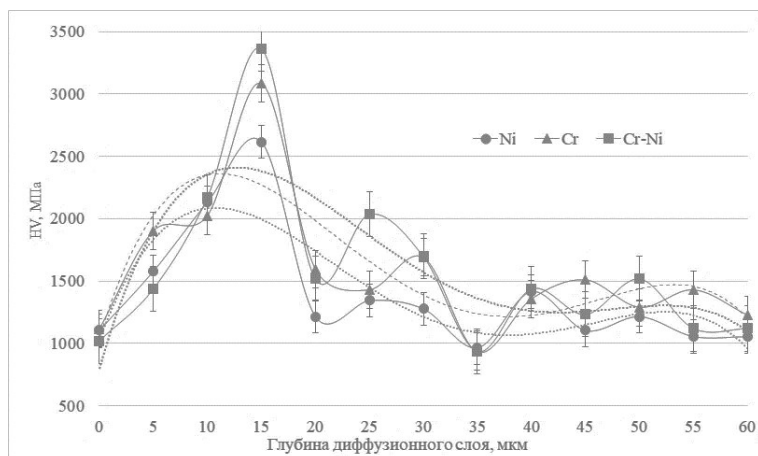


Рисунок 2 – Распределение микротвердости поверхностнолегированных слоев на стали 20 от поверхности к центру образца.

Наибольшие значения микротвердости получены для образцов с двухкомпонентным Cr-Ni слоем и составили 3361 МПа, что фактически в 1,5 раза превышает значения для необработанного материала. При однокомпонентном легировании также зафиксирован прирост значений микротвердости на поверхности, для покрытия на основе Cr пиковое значение составляет 3084 МПа, для Ni – 2615 МПа.

Истинная толщина поверхностнолегированного слоя, учитывающая видимую и диффузионную зону составила в среднем 25-30 мкм, при глубине диффузионной зоны 15-20 мкм. Окончание диффузионной зоны характеризуется постепенным снижением твердости до значений необработанного материала-основы.

Определение параметров износостойкости проводилось методом склерометрии. В результате проведенных измерений для комплексного Cr-Ni слоя наблюдается повышение износостойкости в 2 раза, для однокомпонентных диффузионных слоев на основе Cr и Ni в 1,5 раза по сравнению со значениями необработанной поверхности образцов из стали 20.

Оценка коррозионной стойкости поверхностнолегированных слоев выполнена в соответствии с ГОСТ Р 9.905-2007 при нормальной температуре, длительностью испытаний 720 часов. Агрессивные среды были представлены следующими реактивами: 10 и 40 % KOH, 10 % NaCl, а также 5 % HCl и H₂SO₄. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний на скорость коррозии в различных средах для образцов из стали 20 без обработки и с поверхностным легированием

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 обработки	0,01	0,05	0,5	5,0	7,0
Легирование Ni	0,003	0,001	0,004	0,5	0,45
Легирование Cr	0,001	0,001	0,05	0,45	0,45
Комплекс Cr-Ni	0,001	0,005	0,03	0,35	0,45

Установлено, что формируемые поверхностнолегированные слои на основе Cr и Ni в несколько раз снижают скорость коррозии образцов из стали 20 в различных агрессивных средах. Наилучшие показатели зафиксированы для комплексного Cr-Ni слоя, где скорость коррозии в 10 и 40 % водном растворе KOH снизилась в 10 раз, в 10 % растворе NaCl в 16 раз, в 5 % растворе HCl в 14 раз, в 5 % водном растворе H₂SO₄ в 15 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработан способ, позволяющий при исключении вакуумных нагревательных установок, обеспечивать формирование комплекснолегированного качественного диффузионного слоя на поверхности стальных изделий путем массопереноса из среды расплавов легкоплавких металлов в открытых термических печах с использованием для защиты от окисления специальных флюсов и защитной газовой атмосферы.

Предлагаемые решения могут быть успешно использованы для изготовления ответственных деталей и элементов химического, нефтехимического и иного оборудования, эксплуатируемого в агрессивных условиях.

Основные научные результаты и практические рекомендации отражены в следующих выводах:

1. На основании проведенного анализа установлено, что до 80 % выходов из строя технологического оборудования химических и нефтехимических производств связано с дефектами, вызванными коррозией и износом.

2. Предложена концепция технологического перехода от вакуумного оборудования к термическим печам, оснащенным системой продува реакционной камеры инертным газом совместно с применением высокотемпературного флюса.

3. Разработаны основы технологии поверхностного легирования стальных изделий из среды расплавов легкоплавких металлов с использованием открытых термических печей с системой продува их рабочего пространства инертным газом и защитой поверхности транспортного расплава высокотемпературным флюсом.

4. Разработан, изготовлен и апробирован экспериментальный стенд для осуществления технологии поверхностного легирования стальных изделий из среды расплавов легкоплавких металлов с системой защиты от высокотемпературного окисления методом продува инертным газом совместно с защитным флюсом.

5. На основании сформулированных научных положений и разработанных технологических особенностей поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов проведены экспериментальные исследования по формированию диффузионных Cr-Ni слоев на образцах из конструкционной стали.

6. Определено, что совместное использование продува рабочего пространства термической печи совместно с применением защитного флюса обеспечивает формирование сплошного, бездефектного поверхностнолегированного слоя на основе Cr и Ni, за счет исключения процессов высокотемпературного окисления обрабатываемого изделия транспортного расплава.

7. Выполнена оценка качества и основных характеристик полученных поверхностнолегированных слоев на основе Cr и Ni. В ходе экспериментов получены однородные, сплошные, беспористые диффузионные слои, точно воспроизводящие геометрию обрабатываемых изделий.

8. Проведено определение основных эксплуатационных характеристик обработанных изделий – микротвердости, износостойкости и стойкости к коррозии. Установлено, что наилучшие показатели получены на образцах с комплексным Cr-Ni легированием, пиковые значения микротвердости составили 3361 МПа, что в 1,5 раза превышает значения микротвердости для необработанного изделия из стали 20, зафиксирован прирост параметров износостойкости в 2 раза.

9. Определено, что поверхностнолегированные слои на основе Cr и Ni в несколько раз снижают скорость коррозии образцов из стали 20 в различных агрессивных средах. Наиболее значимые показатели зафиксированы для комплексного Cr-Ni слоя, где скорость коррозии в 10 и 40 % водном растворе KOH снизилась в 10 раз, в 10 % растворе NaCl в 16 раз, в 5 % растворе HCl в 14 раз, в 5 % водном растворе H₂SO₄ в 15 раз.

10. Результаты исследования были приняты к внедрению лабораторией неразрушающего контроля ООО «Первое Проектное Бюро», г. Санкт-Петербург.

11. Разработанная технология поверхностного легирования из расплавов легкоплавких металлов предлагается для применения на металлообрабатывающих и машиностроительных предприятиях, с целью повышения эксплуатационных характеристик металлоизделий, применяемых в химической, нефтехимической и других отраслях промышленности.

Предлагаемые идеи и решения по защите рабочего пространства открытой термической печи, транспортного расплава и обрабатываемых изделий от высокотемпературного окисления направлены на расширение конкурентоспособности технологии поверхностного легирования из среды расплавов легкоплавких металлов по сравнению с другими методами химико-термической обработки. Возможность применения широко распространенного

термического оборудования без вакуумных систем позволяет упростить технологию и повысить ее доступность для машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

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

2. **Михайлов, А.В.** Связь физико-механических и технологических свойств двойных сплавов с качественными изменениями интервалов кристаллизации / А.В. Михайлов, К.Ю. Шахназаров // Информационно-технологический вестник. – 2020. – № 4(26). – С. 134-144.

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

3. **Mikhailov, A.V.** Development of flux for protection of the surface of liquid-metallic low-melting-point fusible melt / A.V. Sivenkov, O.S. Chirkova, D.A. Konchus, A.V. Mikhailov // Key Engineering Materials. – 2020. – Vol. 854 KEM. – P. 126-132.

4. **Mikhailov, A.V.** Technological features of surface alloying of metal products with Cr – Ni complexes in the medium of low-melting metal melts / E.I. Pryakhin, A.V. Mikhailov, A.V. Sivenkov // Chernye metally. 2023. № 2. P. 58-65.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Михайлов, А.В.** 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.

6. **Mikhailov, A.V.** Development of the experimental device for surface alloying from the medium of fusible metal melts / A.V. Mikhailov, N.A. Serdiuk, A.V. Sivenkov, E.I. Pryakhin // XVI International forum-contest of students and young scientists «Topical issues of rational use of natural resources» - 2020 – Vol.2. – P. 175-176.

7. **Михайлов, А.В.** 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.

8. **Михайлов, А.В.** 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.

9. **Mikhailov, A.V.** 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.

Патенты:

10. Патент РФ № 2711701 Российская Федерация МПК F27B 1/10, C23C 10/18, C23C 2/08. «Установка для нанесения покрытий в среде легкоплавких материалов». Заявка № 2019127996. Дата приоритета: 03.04.2019. Дата регистрации: 21.01.2020. Авторы: Сивенков А.В., Михайлов А.В., Кончус Д.А., Пряхин Е.И. Заявитель: СПГУ. – 8 с.

11. Патент РФ № 2792992 Российская Федерация МПК F27B 1/10, C23C 10/18, C23C 2/08, C23C 2/10. «Установка для нанесения покрытия на стальное изделие в легкоплавком металлическом растворе». Заявка № 2022119085. Дата приоритета: 13.07.2022. Дата регистрации: 28.03.2023. Авторы: Сивенков А.В., Михайлов А.В., Кончус Д.А., Житин И.В. Заявитель: СПГУ. – 9 с.