

На правах рукописи

ГАО ЮАНЬ

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДОВ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМ ПОКРЫТИЕМ
ДЛЯ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ
СТАЛЕЙ**

Специальность 2.5.8. –

Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ») г. Санкт-Петербург.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ПАРШИН Сергей Георгиевич
ФГАОУ ВО «СПбПУ», профессор

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
КОВТУНОВ Александр Иванович
ТГУ, профессор

кандидат технических наук
КОРОЛЕВ Сергей Анатольевич
МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО ВолгГТУ, г. Волгоград

Защита состоится «26» июня 2025 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.20 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-66-33, доб. 4057

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » 2025 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета, к.т.н.,



Панкратов А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Объем монтажных и ремонтных работ с использованием подводной мокрой сварки металлических конструкций из сталей повышенной и высокой прочности в мире постоянно возрастает. Особенno важным направлением экономики РФ является освоение Арктики, Северного морского пути, районов Крайнего Севера. Подводная сварка наиболее часто используется на морском шельфе при строительстве и ремонте портовой инфраструктуры, морских сооружений, платформ, подводных трубопроводов, а также при аварийных ремонтах повреждений судов.

Ранее значительный вклад в разработку технологий подводной сварки и сварочных материалов внесли: академик Хренов К.К., Паршин С.Г., Левченко А.М., Мадатов Н.М., Авилов Т.И., Савич И.М., Максимов С.Ю., Fydrych D., Akselsen O.M., Ibarra S., Liu S., Pope A.M., Rowe M. Santos V.R. и другие ученые.

Подводная мокрая сварка коротких швов из низколегированных сталей повышенной и высокой прочности осуществляется водолазами вручную с применением покрытых электродов импортного производства США и Великобритании. Серьезной проблемой покрытых электродов при подводной мокрой сварке низколегированных сталей является появление дефектов в виде шлаковых включений, пористости, трещин и наличие крупнокристаллической структуры, что не позволяют достичь равнопрочности шва с основным металлом. Высокая прочность шва при подводной мокрой сварке может быть достигнута за счет разработки и внедрения редкоземельных газошлаковых систем прокрытых электродов на основе исследования металлургических, термодинамических и электрофизических процессов, что вместе с импортозамещением обуславливает актуальность настоящей работы.

Цель работы: повышение механических свойств сварного шва при подводной мокрой сварке низколегированных сталей с применением электродов с редкоземельным покрытием.

Задачи работы:

1. Проанализировать металлургические проблемы свариваемости и сварочные материалы при подводной мокрой сварке низколегированных сталей.
2. Выполнить термодинамическое моделирование газошлаковых и легирующих систем покрытых электродов.
3. Разработать электроды с редкоземельным покрытием и исследовать их сварочно-технологические свойства.
4. Исследовать свойства сварных швов при подводной мокрой сварке сталей покрытыми электродами.

Методы исследований. Для подводной мокрой сварки использовали пластины из сталей 09Г2С, D36, S960QC толщиной 4–16 мм. Для изготовления покрытых электродов использовали стержни диаметром 4 мм из стали Св-08А, Св-10Х16Н25АМ6, химически чистые порошки металлов, ферросплавы и минеральные компоненты. Подводную мокрую сварку производили на лабораторной установке на глубине 200–300 мм, а также в гипербарической

камере с применением покрытых электродов диаметром 4 мм с коэффициентом массы покрытия 21–22%, толщиной покрытия $1,1 \pm 0,1$ мм, толщиной водонепроницаемого лака 0,04–0,05 мм. Источником тока являлся выпрямитель ВД-313. Для анализа токов и напряжений использовали цифровой USB-осциллограф с частотой измерения 32 кГц, программы Multi VirAnalyzer software (Harbin Instrustar), программу Matlab. Для анализа подводных процессов использовали высокоскоростную видеокамеру Phantom VEO 710L (Vision Research, USA) с частотой записи 2000 кадров/с с программой Phantom CV. Для термодинамического моделирования использовали программу Терра (Институт высоких температур РАН). Металлографические исследования и рентгеноспектральный анализ производили с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN Mira 3 LMU. Измерение микротвердости производили микротвердомером MICRO-Duromat 4000E, при нагрузке 2 Н с шагом 100 мкм.

Научная новизна

1. На основе термодинамического моделирования и экспериментальных исследований установлен механизм увеличения прочности и плотности сварного шва низколегированных сталей при подводной мокрой сварке за счет снижения в атмосфере дуги атомарного кислорода О до 2,4 раза, в сварочной ванне оксида железа FeO до 14,7 раз с применением газошлаковой системы $\text{TiO}_2\text{-LaF}_3\text{-CaF}_2\text{-Na}_3\text{AlF}_6$, что подтверждается увеличением прочности швов до 550 МПа и снижением площади неметаллических включений до 0,5%.

2. Установлен механизм повышения активности газовой фазы по удалению водорода за счет роста концентрации HF в реакциях со фтором и фторидами при температурах до 7000 К и давлении до 0,6 МПа, который подтверждается уменьшением содержания диффузионного водорода в 1,52 раза и площади пористости до 0,37% в наплавленном металле.

3. Обнаружен эффект измельчения зерен первичного феррита в 2,5 раза при подводной мокрой сварке низколегированных сталей с применением электродов с редкоземельным покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$, который обуславливается наличием в сварочной ванне модификаторов LaO_2 , La_2O_3 , $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$, выделяющихся из фторидного шлака с повышенным содержанием LaF_3 , перовскита CaTiO_3 и криолита Na_3AlF_6 .

Практическая значимость:

1. Установлены оптимальные концентрации компонентов покрытых электродов на основе фторидно-перовскитной системы $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ в целях удаления кислорода, водорода, гидроксила и оксидов при подводной дуговой мокрой сварке.

2. Разработан химический состав и конструкция электрода с редкоземельным покрытием для дуговой сварки низколегированных сталей на основе низкокислородной композиции $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ высокой основности. Конструкция покрытого электрода состоит из внутреннего газошлакового покрытия с повышенной теплопроводностью с наполнением металлическими порошками из никеля, марганца и алюминия, внешнего водонепроницаемого покрытия из термостойкого лака, слоя графитового

композита на контактном торце и стальных стержней марок Св-08А и Св-10Х16Н25АМ6.

3. Разработана установка по изготовлению многослойных покрытых электродов методом многослойного вибрационного окунания и конвейерной сушки. Разработана лабораторная установка для испытаний сварочно-технологических свойств покрытых электродов при подводной мокрой сварке и наплавке с компьютерным управлением.

4. При мокрой сварке низколегированных сталей электродами с редкоземельным покрытием временное сопротивление сварного шва увеличилось в 1,24 раза до 550 МПа, ударная вязкость в 2,2 раза до 78 Дж/см², площадь неметаллических включений снизилась в 12–17 раз до 0,5%, содержание диффузионного водорода уменьшилось в 1,52 раза до 27,88 мл/100 г, что свидетельствует о достижении цели работы.

Достоверность результатов работы подтверждается использованием научно-обоснованных и апробированных методик исследований, с применением стандартизированного и поверенного оборудования, сопоставлением расчетных и экспериментальных результатов, анализа и математической обработки данных.

На защиту выносятся:

1. Результаты термодинамического моделирования фазового состава покрытых электродов на основе газошлаковых и легирующих систем TiO_2-CaF_2-CaO , $TiO_2-Fe_2O_3-CaF_2$, $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ и физико-металлургических процессов их взаимодействия с кислородом, водородом, гидроксилом и оксидами.

2. Результаты разработки химического состава и конструкции электрода с редкоземельным покрытием для дуговой сварки низколегированных сталей на основе низкокислородной композиции $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ и исследований сварочно-технологических свойств электродов с покрытиями TiO_2-CaF_2-CaO , $TiO_2-Fe_2O_3-CaF_2$, $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ и стержнями Св-08А и Св-10Х16Н25АМ6.

3. Результаты металлографических исследований, определения диффузионного водорода и механических свойств сварных соединений при подводной мокрой сварке низколегированных сталей.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на XIX и XX Международных научно-технических конференциях «Материалы и технологии XXI века» (Пенза, 2023, 2024 гг.), XIII Всероссийской научно-технической конференции «Жизненный цикл конструкционных материалов», (Иркутск, ИНИТУ, 2023 г.), Международной конференции «Инновационные сварочные технологии в судостроении, производстве морской техники и строительстве береговых объектов» – «НЕВА 2023» (Санкт-Петербург, 2023 г.), V Международной научной конференции «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения» (Москва, 2023 г.), научном семинаре НОЦ «Сварочные и лазерные технологии» ФГАОУ ВО СПбПУ (Санкт-Петербург, 2023 г.), международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы», посвященную 85-летию кафедры «Машины и автоматизация сварочного

производства ДГТУ» (Ростов-на-Дону, 2023 г.), 15-й Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении», научный конгресс «Русский инженер» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023 г.), международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, Белорусско-Российский университет, 2023 г.), Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН (Якутск, ЯНЦ СО РАН, 2024 г.), I Всероссийской научно-технической конференции им. ак. Н.П. Алешина с международным участием (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024 г.), 62-й научной конференции ВолГТУ (Волгоград, ВолГТУ, 2025 г.).

Внедрение результатов. Результаты исследований, лабораторный стенд для подводной мокрой сварки покрытыми электродами внедрены в учебную и научную деятельность ФГАОУ ВО «СПбПУ» при подготовке аспирантов по направлению 15.06.01_07 «Сварка, родственные процессы и технологии», магистров и бакалавров по направлению «Металлургия» и «Машиностроение», а также при ремонте портовых конструкций. Акты приложены к диссертации.

Личный вклад соискателя заключается в выполнении теоретических и экспериментальных исследований, разработке лабораторного стендса и установки для производства покрытых электродов, расчетно-экспериментальном моделировании составов покрытий, математической обработке результатов.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемом научном журнале, входящем в перечень ВАК РФ, 10 публикаций в сборниках конференций, получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы из 89 наименований и приложения. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 140 рисунков и 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, отражены практическая значимость, научная новизна полученных результатов, личный вклад автора, защищаемые положения, краткое содержание глав диссертации.

В первой главе выполнен анализ состояния вопроса, приведена формулировка задач исследования. При анализе состояния вопроса рассмотрены причины повреждаемости и дефекты морских конструкций и при подводной мокрой сварке. Рассмотрены составы известных покрытых электродов и порошковых проволок для подводной мокрой сварки низколегированных сталей, metallургические особенности подводной мокрой сварки, проблемы metallургической свариваемости сталей и причины шлаковых включений, пористости и трещин в сварных швах.

Во второй главе выполнено термодинамическое моделирование газошлаковых систем TiO_2-CaF_2-CaO , $TiO_2-Fe_2O_3-CaF_2$, $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$,

их теплофизических свойств, объема, активности к водороду, кислороду, гидроксилу и водяному пару в парогазовом пузыре, а также к оксидам в сварочной ванне. Для моделирования металлургической активности системы TiO_2-CaF_2-CaO использовали состав компонентов, масс. %: 55 TiO_2 -25 CaF_2 -2 Al_2O_3 -3 SiO_2 -15 $CaCO_3$; системы $TiO_2-Fe_2O_3-CaF_2$: 33 TiO_2 -21 Fe_2O_3 -28 CaF_2 -4 Al_2O_3 -6 SiO_2 -8 $MgCO_3$; системы $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$: 35 LaF_3 -20 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -10 $CaCO_3$; 30 LaF_3 -25 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -10 $CaCO_3$; 25 LaF_3 -30 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -10 $CaCO_3$. По сравнению с системами TiO_2-CaF_2-CaO и $TiO_2-Fe_2O_3-CaF_2$ установлено, что в системе $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ при $T=1900$ К при 0,1 МПа теплоемкость увеличивается в 1,9-2,7 раза до 5,4 Дж/кг \times К, а теплопроводность в 1,4-3,8 раза до 0,84 Вт/м \times К, Рис. 1.

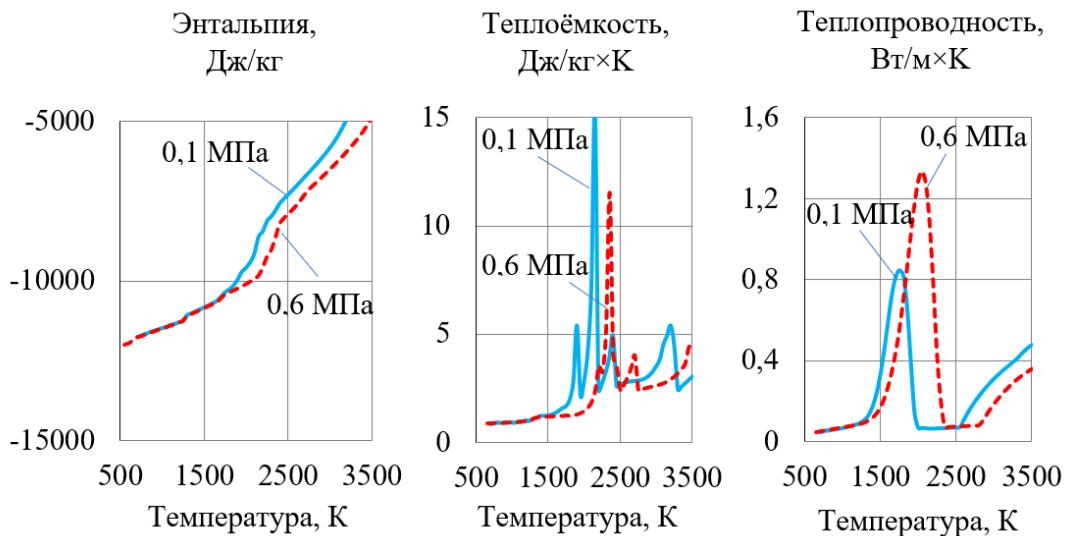


Рис. 1 Изменение теплофизических свойств системы, %: 35 LaF_3 -20 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -10% $CaCO_3$ при давлении 0,1 и 0,6 МПа

Механизм удаления водорода связан с образованием фторидов SiF_4 , TiF_2 , TiF_3 , которые связывают водород в нерастворимое соединение HF. Преимуществом газошлаковой системы, %: 35 LaF_3 -20 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -10 $CaCO_3$ при введении 10% H_2O является заметное снижение доли водяного пара и гидроксильной группы OH за счет роста концентрации TiF_2 , TiF_3 и HF в области температур, типичных для границы дуги. С учетом стержня, ферросплавов и легирующих элементов моделировали составы масс, %: в системе TiO_2-CaF_2-CaO : 42 TiO_2 -25 CaF_2 -2 Al_2O_3 -3 SiO_2 -15 $CaCO_3$ -7Mn-3Ti-3Si; в системе $TiO_2-Fe_2O_3-CaF_2$: 21 TiO_2 -21 Fe_2O_3 -28 CaF_2 -4 Al_2O_3 -6 SiO_2 -8 $MgCO_3$ -8Mn-1Si-3Ni; в системе $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$: 30 LaF_3 -16 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -10 $CaCO_3$ -3Mn-2Si-1Zr-3Al; 25 LaF_3 -21 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -10 $CaCO_3$ -3Mn-2Si-1Zr-3Al; 20 LaF_3 -26 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -10 $CaCO_3$ -3Mn-2Si-1Zr-3Al, Рис. 2-4.

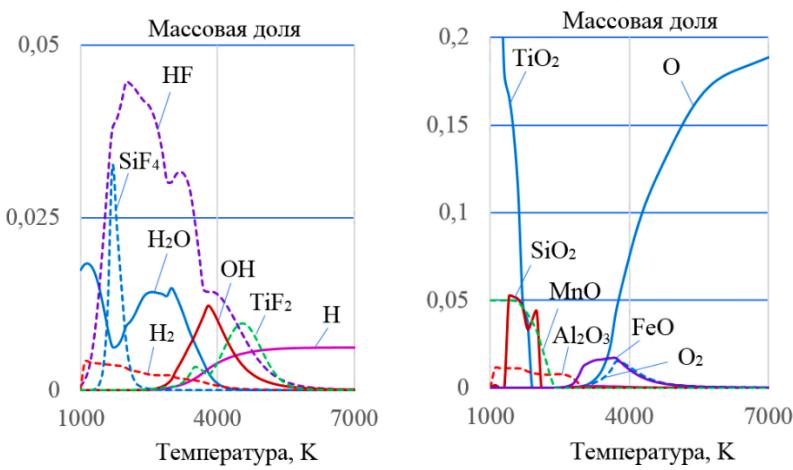


Рис. 2 Массовая доля водяного пара, фторидов и оксидов в системе 42% TiO_2 -25% CaF_2 -15% CaCO_3 -2% Al_2O_3 -3% SiO_2 -7% Mn-3% Ti-3% Si при введении 70% Fe и 10 % H_2O при давлении 0,1 (а) и 0,6 МПа

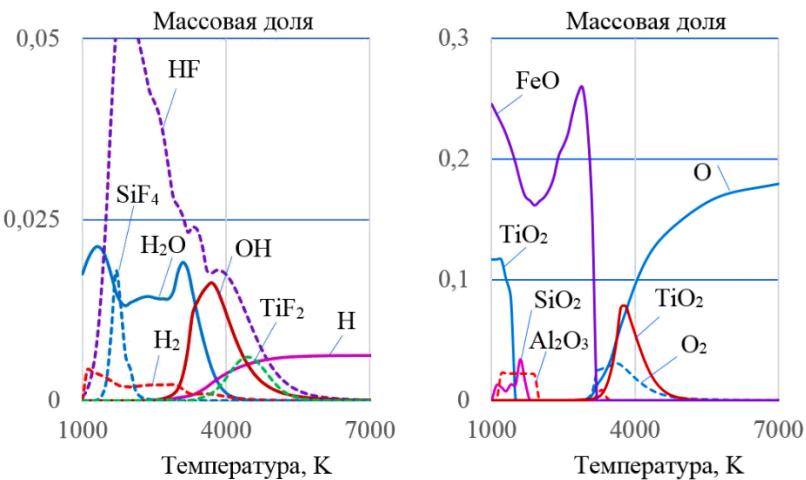


Рис. 3 Массовая доля водяного пара, фторидов и оксидов в системе 21% TiO_2 -21% Fe_2O_3 -28% CaF_2 -4% Al_2O_3 -6% SiO_2 -8% MgCO_3 -8% Mn-1% Si-3% Ni при введении 70% Fe и 10 % H_2O при давлении 0,1 (а) и 0,6 МПа

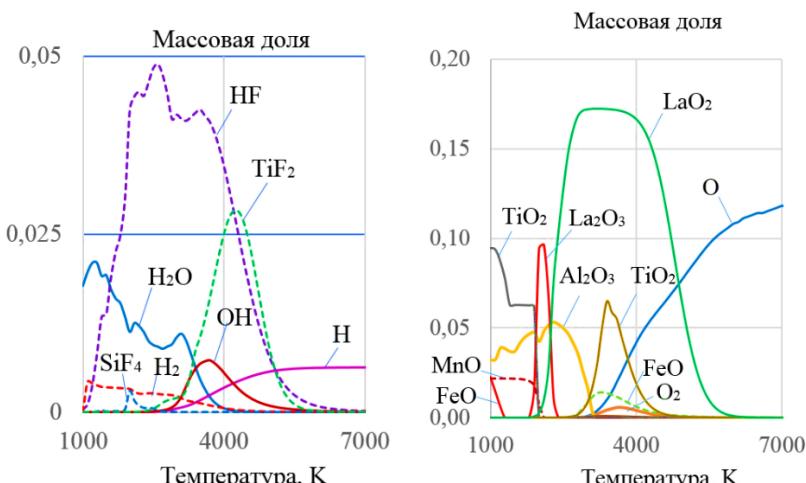


Рис. 4 Массовая доля водяного пара, фторидов и оксидов в системе, %: 30 LaF_3 -16 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -10 CaCO_3 -3Mn-2Si-1Zr-3Al при введении 70% Fe и 10 % H_2O при давлении 0,1 МПа

В результате моделирования установлено, что система $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ при давлении 0,1 МПа и температуре 4000 К позволяет снизить содержание, (масс. доли): атомарного водорода H в 1,17 раза с 0,004 до 0,003, атомарного кислорода O в 1,7–2,4 раза с 0,075–0,1 до 0,0417, увеличить содержание HF в 1,9–2,4 раза с 0,0143–0,0179 до 0,0348. При температуре 3000 К содержание (масс. доли) оксида железа FeO по сравнению с системой $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$ снижается в 1,11 раза с 0,0152 до 0,0136, а по сравнению с системой $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ содержание оксида железа FeO снижается в 14,7 раз с 0,2 до 0,0136. Содержание оксидов LaO_2 достигает 0,172 и La_2O_3 – 0,09.

Для определения оптимальных концентраций компонентов произвели анализ фазового состава двойных и тройных шлаковых систем при $T=1000\text{--}4000$ К и давлениях 0,1 и 0,6 МПа: $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2$, CaO-TiO_2 , $\text{CaF}_2\text{-CaO}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, $\text{CaF}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{LaF}_3\text{-TiO}_2$, $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-TiO}_2$, $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6$, $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$, $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$, $\text{TiO}_2\text{-LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6$, Рис. 5, 6.

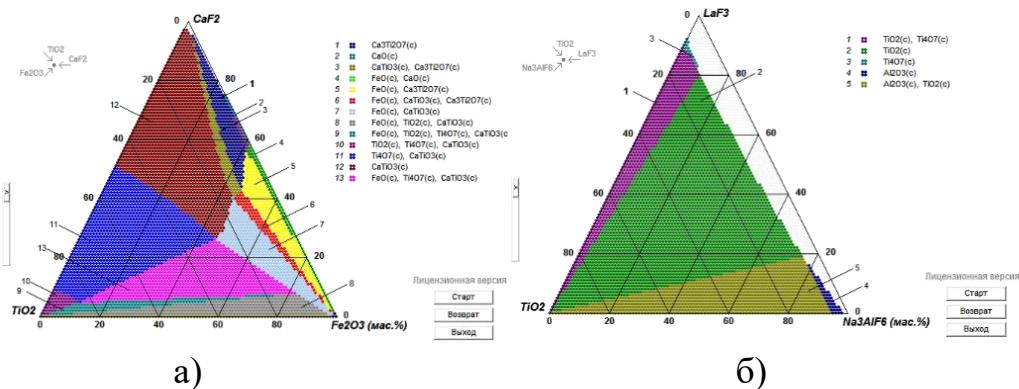


Рис. 5 Диаграмма равновесного фазового состава: а – системы $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ при 3200 К; б – $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-TiO}_2$ при 2500 К

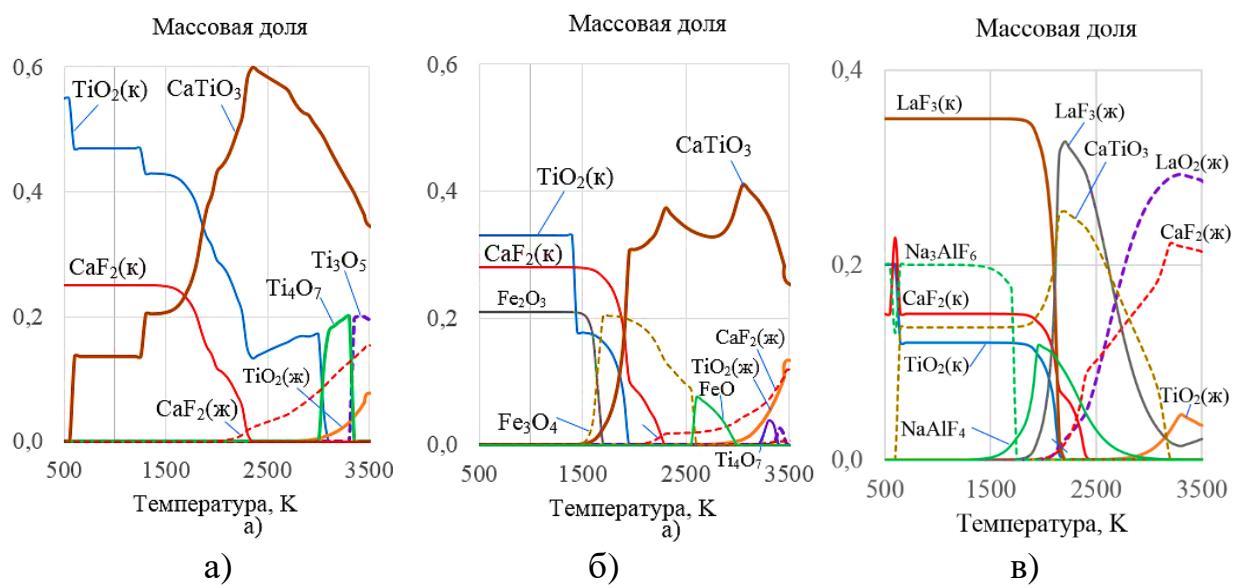


Рис. 6 Фазовый состав шлаковых систем: а – 55% TiO_2 -25% CaF_2 -15% CaCO_3 -2% Al_2O_3 -3% SiO_2 , б – 33% TiO_2 -28% CaF_2 -21% Fe_2O_3 -4% Al_2O_3 -6% SiO_2 -8% MgCO_3 , в – 35% LaF_3 -20% Na_3AlF_6 -15% CaF_2 -20% TiO_2 -10% CaCO_3 при давлении 0,1 МПа

Для получения гомогенной фазовой смеси с высокой активностью по отношению к водороду, гидроксиду и кислороду была выбрана фторидно-перовскитная шлаковая система для с наличием в шлаковой фазе модификаторов микроструктуры LaO_2 , La_2O_3 и $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$. На основе анализа шлаковых систем определили, что оптимальное содержание шлакообразующих компонентов (без учета ферросплавов и диссоциации мрамора) во фторидно-перовскитной системе $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-CaO-TiO}_2$ составляет, масс. %: 24–36 LaF_3 , 16–32 Na_3AlF_6 , 16–24 CaF_2 , 10 CaO , 20 TiO_2 . Таким образом разработана редкоземельная рутил-фторидно-перовскитная система $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ высокой основности (Патент РФ на изобретение № 2825112).

В третьей главе обоснован химический состав покрытия электродов, разработана многослойная конструкция покрытого электрода для подводной мокрой сварки. В новой конструкции использовано газошлаковое покрытие с повышенной теплопроводностью с наполнением металлическими порошками; использован графитовый композит на контактном торце для облегчения зажигания дуги в воде и водонепроницаемое покрытие из термостойкого лака. Покрытые электроды имели коэффициент массы покрытия 21–22%, толщину покрытия около 1,1 мм, толщину водонепроницаемого лака 0,04–0,05 мм. Покрытие $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ без учета жидкого стекла имело состав, масс. %: 21 TiO_2 -21 Fe_2O_3 -28 CaF_2 -4 Al_2O_3 -6 SiO_2 -8 MgCO_3 -8 Mn -1 Si -3 Ni ; редкоземельное покрытие $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$: 26 LaF_3 -20 Na_3AlF_6 -15 CaF_2 -20 TiO_2 -7 CaCO_3 -3 Ni -3 Mn -3 FeSiZr -3 Al [патент РФ № 2825112 от 14.07.2023 г.]. Для изготовления покрытых электродов методом окунания разработали опытную установку, а для испытаний электродов разработали лабораторный стенд с компьютерным управлением, Рис. 7, 8.

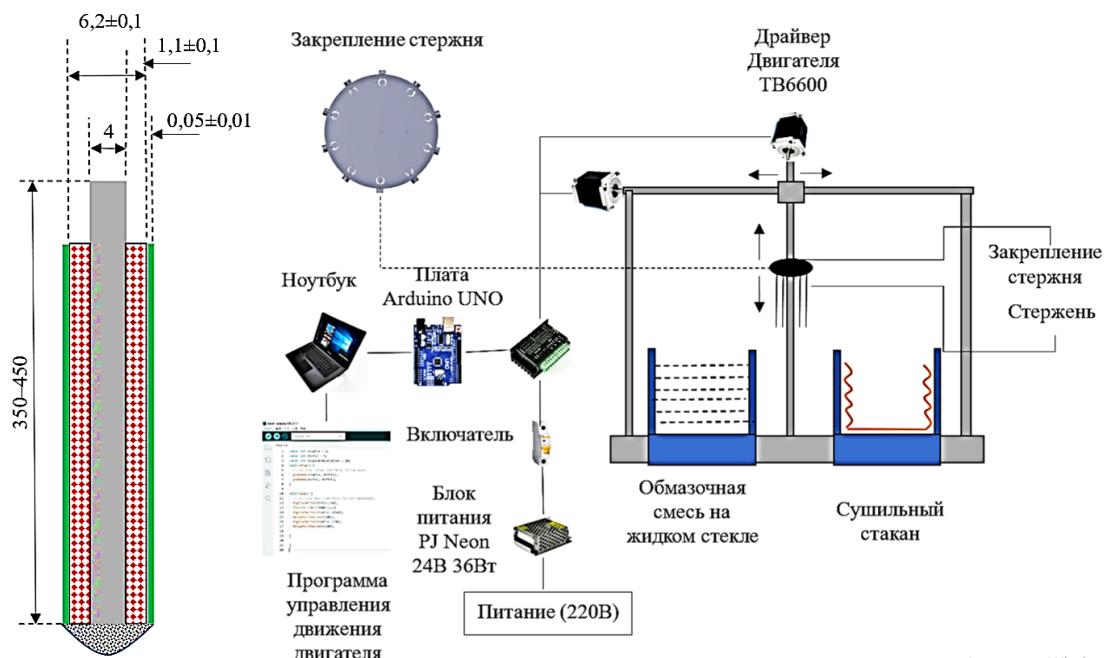


Рис. 7 Конструкция покрытого электрода и схема установки для изготовления покрытых электродов методом окунания

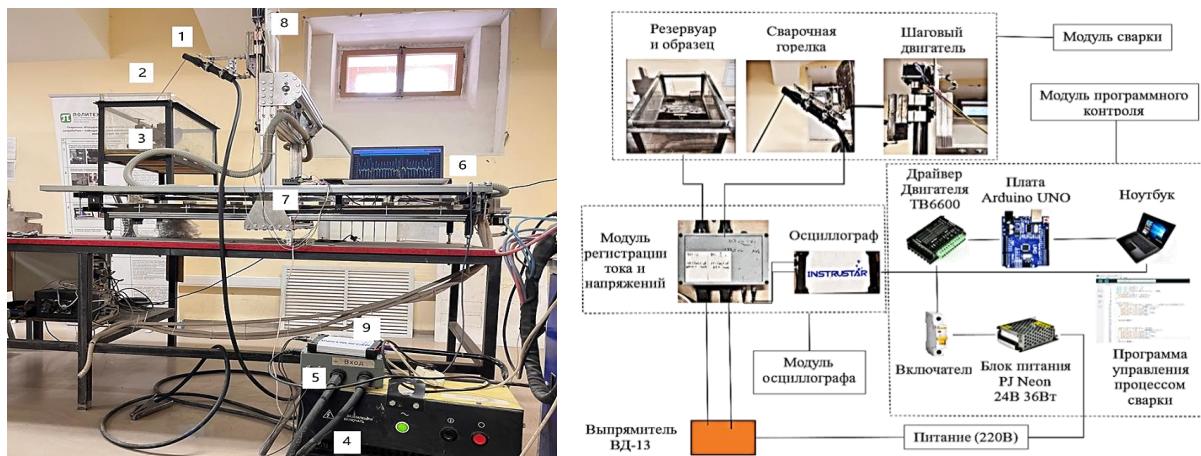


Рис. 8 Лабораторный стенд для подводной мокрой сварки и функциональная схема системы управления: 1 – электрододержатель; 2 – электрод; 3 – резервуар; 4 – выпрямитель; 5 – датчики тока и напряжения; 6 – компьютер; 7 – комплекс драйвера двигателя (драйвер шагового двигателя, плата Arduino UNO); 8 – шаговый двигатель; 9 – USB-осциллограф

Испытания показали, что опытные электроды с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ с аустенитным и ферритным стержнем снизили отклонения тока до 1,5 раз, напряжения до 1,33 раза, количество коротких замыканий в 2 раза, глубина проплавления увеличилась на 20 %, Рис. 9.

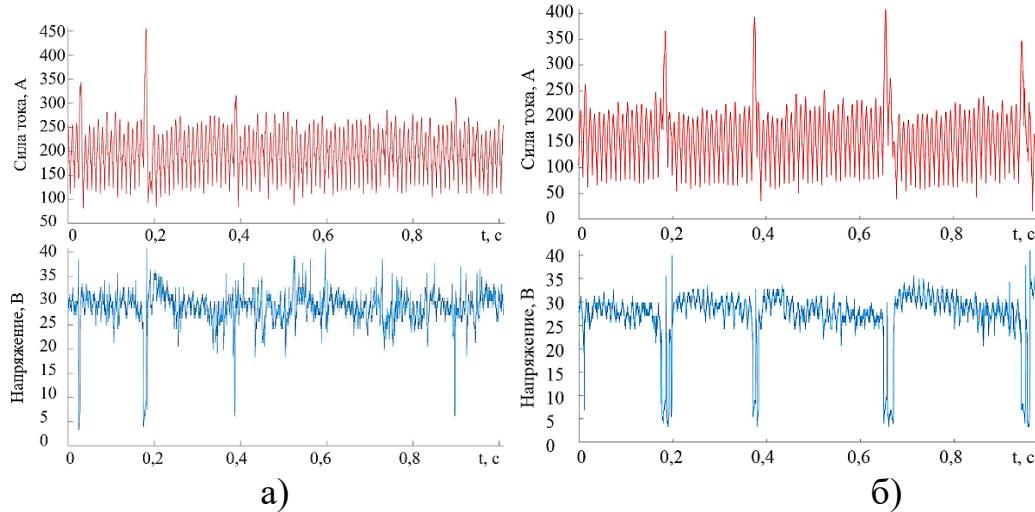


Рис. 9 Осциллограммы токов и напряжений при подводной мокрой сварке электродами с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$: а – электрод со стержнем Св-08А; б – электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 диаметром 4 мм

При мокрой сварке электродами со стержнем Св-08А средняя величина сварочного тока в 4-х режимах составила 159–215 А с отклонениями тока $\pm 60\text{--}75$ А; средняя величина напряжения в 4-х режимах составила 26–30 В с отклонениями напряжения $\pm 5,5\text{--}7,5$ В при частоте коротких замыканий 4–7 Гц. При скорости сварки 2,1–2,6 мм/с ширина и высота шва составили: 10–14 мм и 2–3,5 мм при отличном удалении шлаковой корки.

При мокрой сварке электродами со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 средняя величина сварочного тока в 4-х режимах составила 120–203 А с отклонениями тока ± 60 –85 А; средняя величина напряжения в 4-х режимах составила 27–32 В с отклонениями напряжения ± 6 –9 В при частоте коротких замыканий 2–5 Гц. При скорости сварки 2,2–3,4 мм/с ширина и высота шва составили: 12–16 мм и 2,5–4 мм. Твердость наплавленного металла при подводной сварке (сварке на воздухе) электродами с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ со стержнем Св-08А составила 180–210 HV (149–177 HV), со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 – 248–320 HV (322–365 HV) при твердости основного металла 155–165 HV.

В четвертой главе выполнили исследования свойств сварных соединений из стали 09Г2С, D36 и S960QC с редкоземельным покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ и стержнями Св-08А и Св-10Х16Н25АМ6. Распределение основных легирующих элементов (ЛЭ) по шву является равномерным. При сварке стали 09Г2С электродом со стержнем Св-10Х16Н25АМ6, на границе шва наблюдается увеличение содержания ЛЭ: Cr, Ni, Mo, снижение содержания Fe из-за формирования аустенитного шва типа Св-10Х16Н25АМ6, Рис. 10.

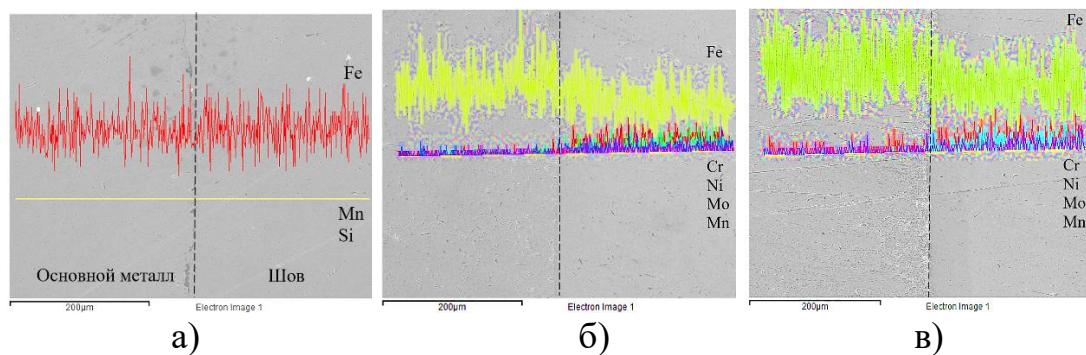


Рис. 10 Рентгеноспектральный анализ распределения легирующих элементов в основном металле и сварном шве при подводной сварке: а – сталь 09Г2С, электрод со стержнем Св-08А; сталь 09Г2С, электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6; в – сталь S960QC, электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6

Перемешивание с перлитной сталью 09Г2С снизило содержание в шве хрома до 9,06%, никеля до 13,94%, молибдена до 4,04%, содержание марганца увеличилось до 1,17%. При сварке стали S960QC электродом со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 перемешивание с мартенситно-бейнитной сталью S960QC снизило содержание в шве хрома до 9,19%, никеля до 13,37%, молибдена до 3,9%, содержание марганца увеличилось до 1,68%, кремния до 0,36%. Измерение микротвердости сварных соединений производили микротвердометром MICRO-Duromat 4000E, при нагрузке 2 Н с шагом 100 мкм вдоль и поперек сварного шва.

При сварке стали 09Г2С с применением электрода с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ и стержнем Св-08А была достигнута твердость шва 248 ± 27 HV и ЗТВ 280 ± 24 . По сравнению со стандартным покрытием $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ мокрая сварка электродами с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ и стержнем Св-08А позволила снизить твердость ЗТВ в 1,23 раза за счет уменьшения скорости охлаждения при вытеснении воды за счет расширения

объема парогазового пузыря. При сварке стали 09Г2С с твердостью 141–147 HV_{0,2} с применением электрода с покрытием LaF₃-Na₃AlF₆-CaF₂-TiO₂ и стержнем Св-10Х16Н25АМ6 достигнута твердость 165±5,5 HV и 3ТВ 334±12 HV, Рис. 11.

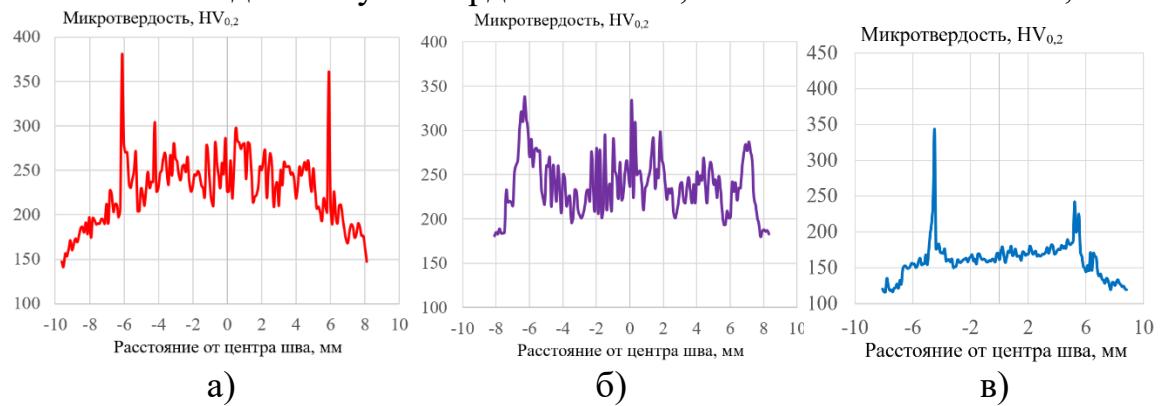


Рис. 11 Поперечное распределение микротвердости при сварке стали 09Г2С:
а – покрытие TiO₂-Fe₂O₃-CaF₂, Cv-08А; б – покрытие LaF₃-Na₃AlF₆-CaF₂-TiO₂. Cv-08А; в – покрытие LaF₃-Na₃AlF₆-CaF₂-TiO₂, Cv-10X16H25AM6

Анализ микроструктуры шва при сварке электродами с покрытием TiO₂-Fe₂O₃-CaF₂ и LaF₃-Na₃AlF₆-CaF₂-TiO₂ выявил, что при использовании покрытия LaF₃-Na₃AlF₆-CaF₂-TiO₂ размер зерен первичного феррита в верхней и средней части шва в среднем уменьшился в 2,5 раза с 50–150 мкм и 40–120 мкм до 30–50 и 20–40 мкм, размер зернограничного феррита увеличился в среднем в 1,5 раза с 20–60 мкм и 80–120 мкм до 50–70 мкм и 100–200 мкм, длина и ширина игольчатого феррита увеличилась в среднем в 2–2,5 раза, Рис. 12–15.

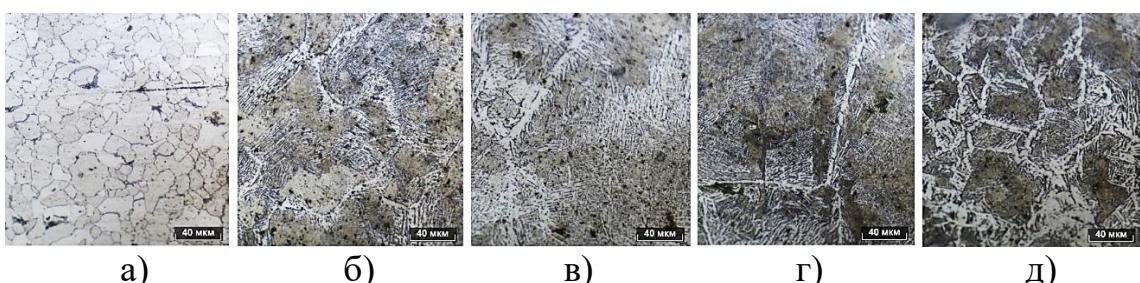


Рис. 12 Микроструктура сварного соединения из стали 09Г2С, электрод со стержнем Cv-08А с покрытием TiO₂-Fe₂O₃-CaF₂: а – основной металл; б – шов; в – граница шва; г – участок крупного зерна; д – участок мелкого зерна

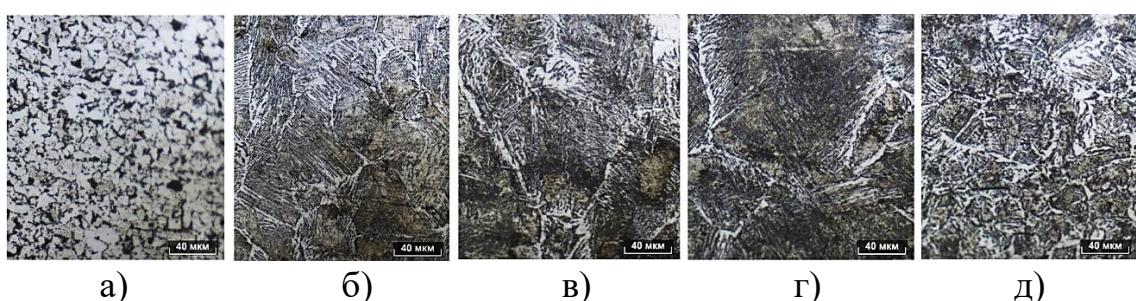


Рис. 13 Микроструктура сварного соединения из стали 09Г2С, электрод со стержнем Cv-08А с покрытием LaF₃-Na₃AlF₆-CaF₂-TiO₂: а – основной металл; б – шов; в – граница шва; г – участок крупного зерна; д – участок мелкого зерна

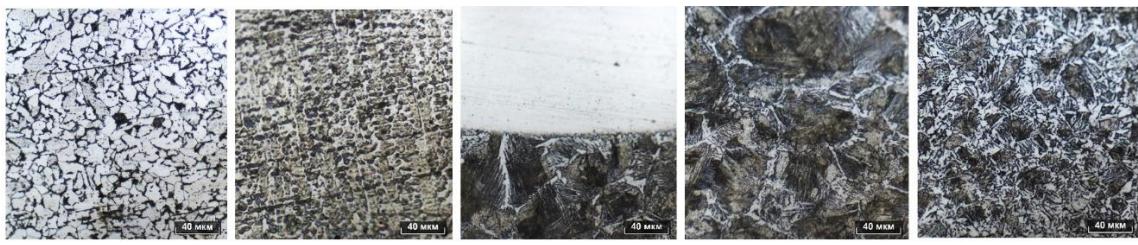


Рис. 14 Микроструктура сварного соединения из стали 09Г2С, электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$:
а – основной металл; б – шов; в – граница шва; г – участок крупного зерна;
д – участок мелкого зерна

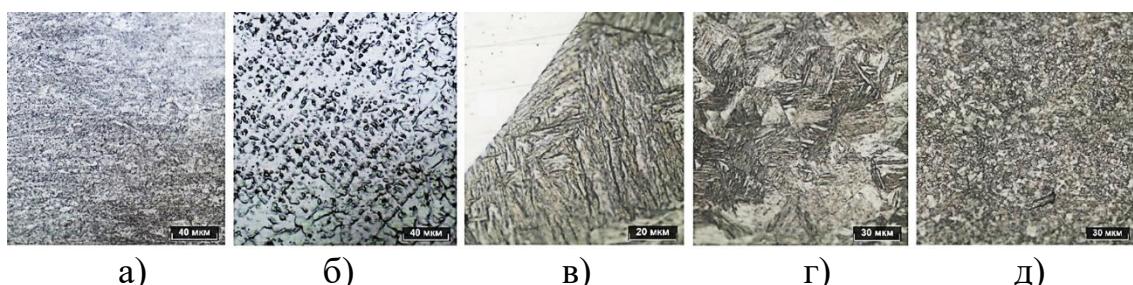


Рис. 15 Микроструктура сварного соединения из стали S960QC, электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$:
а – основной металл; б – шов; в – граница шва; г – участок крупного зерна;
д – участок мелкого зерна

При сварке электродами с покрытием $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ возникают неметаллические включения (НВ) окружной и неправильной формы диаметром до 0,3–5 мкм, а также транскристаллитные микротрещины длиной 20–90 мкм, с очагами зарождения на участках мартенсита и вблизи НВ. Площадь НВ составляет в верхней части шва 3–3,5%, в средней части шва 3,5–5% и 6–8,5% в нижней части шва. При сварке электродами с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ площадь НВ в шве сократилась до 0,5 %, пористость до 0,37%, отсутствовали микротрещины в макрошлифах и в пробе Теккен.

Содержание диффузионного водорода определяли по п. 4.2.3.2. Правил классификации и постройки морских судов. НД № 2-020101-174 Часть XIV. Сварка. РМРС глицериновым методом в термостате при температуре 45 °С при времени выдержки 72 ч образцов из стали 09Г2С размером 40×22×8 мм. Для измерений использовали глицерин ЧДА по ГОСТ 6259-75, которым заполняли бюретку Шиллинга, нагреваемую водяной баней в герметичном термостате.

Наплавку образцов на воздухе производили при токе 120 А, напряжении дуги 26 В, скорости сварки 1,88 мм/с, при погонной энергии 1,66 кДж/мм. Масса наплавленного металла электродами со стержнем Св-08А с покрытием $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ и $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ составила 1,69 и 2,19 г, содержание диффузионного водорода 8,88 и 6,16 мл/100 г, т.е. снизилось в 1,44 раза. Наплавку образцов под водой производили при токе 160 А, напряжении дуги 31 В, скорости сварки 2,06 мм/с, при погонной энергии 2,4 кДж/мм. Масса наплавленного металла электродами со стержнем Св-08А с покрытием $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ и $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ составила 1,69 и 2,19 г, содержание диффузионного водорода 8,88 и 6,16 мл/100 г, т.е. снизилось в 1,44 раза.

$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ и $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ составила 5,24 и 3,91 г, содержание диффузионного водорода 42,37 и 27,88 мл/100 г., т.е. снизилось в 1,52 раза. Содержание диффузионного водорода при подводной сварке электродами со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ составило 2,42 мл/100 г, Рис. 16.

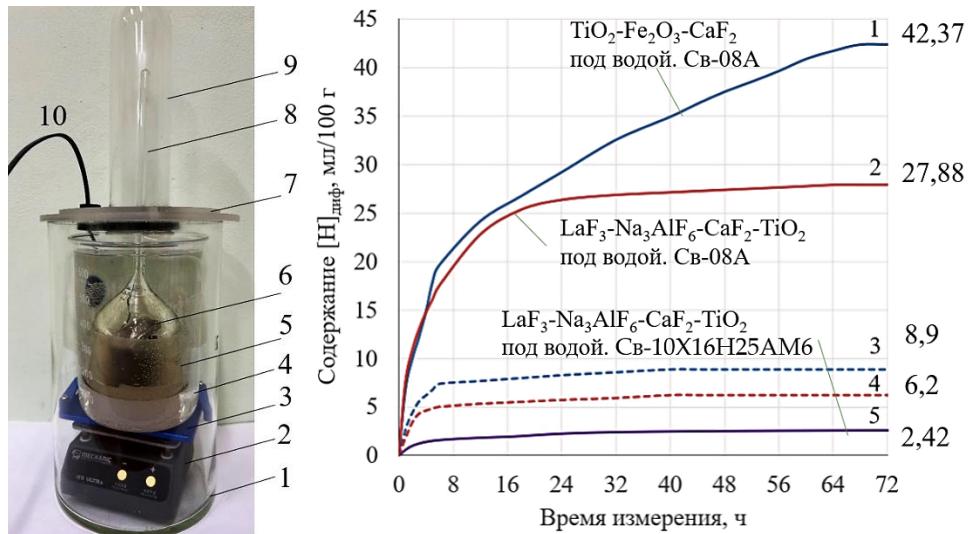


Рис. 16. Конструкция прибора и кинетика выделения диффузионного водорода из сварочных проб: 1 – внешний стакан; 2 – термостат; 3 – столик нагревателя; 4 – внутренний стакан с водой; 5 – бюретка Шиллинга с глицерином; 6 – сварочная проба; 7 – крышка внешнего стакана; 8 – измерительная шкала бюретки Шиллинга; 9 – колба внешнего стакана; 10 – шнур электропитания термостата. 1, 2, 5 – подводная мокрая сварка. 3, 4 – сварка на воздухе. 1 – электрод с покрытием $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$, стержень Св-08А; 2, 4 – электрод с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$, стержень Св-08А; 5 – электрод с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$, стержень Св-10Х16Н25АМ6

Испытания на ударный изгиб проводили по ГОСТ 9454-78, ГОСТ 6996-66 на копре РН450, статическое растяжение проводили по ГОСТ 1497-84, ГОСТ 6996-66, тип образца XII на машине Super L60 при скорости нагружения 4 мм/мин. При мокрой сварке бейнитной стали по сравнению с электродами с покрытием $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ применение новых электродов с покрытием $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ увеличило временное сопротивление сварного шва в среднем в 1,24 раза с 419–443 МПа до 521–550 МПа, ударная вязкость KCV_0 возросла в 2,2 раза с 28–38 Дж/см² до 68–78 Дж/см².

В приложении представлены акты внедрения результатов работы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен комплексный подход и системное решение по разработке электродов с редкоземельным низкокислородным покрытием для подводной мокрой сварки на основе анализа теплофизических, термодинамических характеристик газошлаковых систем и их активности по удалению водорода, кислорода, гидроксила и оксидов при повышенном давлении.
2. На основе термодинамического моделирования установлено, что рост давления снижает теплоёмкость и теплопроводность газошлаковых систем на основе рутила и оксида железа, что способно ухудшать ионизацию дуги. Для увеличения теплоёмкости и теплопроводности предложено использовать в качестве основы газошлаковой системы – смесь фторида лантана и криолита, что увеличило теплоёмкость и теплопроводность до 1,5 раза.
3. На основе термодинамического моделирования определен фазовый состав и оптимальные концентрации компонентов для газошлаковых систем TiO_2-CaF_2-CaO , $TiO_2-Fe_2O_3-CaF_2$, $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$, предложена фторидно-перовскитная шлаковая система для удаления водорода, гидроксила, кислорода, оксидов и модификации микроструктуры за счет наличия модifikаторов LaO_2 , La_2O_3 , $Na_5Al_3F_{14}$.
4. В результате термодинамического моделирования установлено, что покрытые электроды с газошлаковой системой $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ при давлении 0,1 МПа и температуре 4000 К на границе дуги снижают содержание (масс. доли) атомарного водорода H в 1,17 раза с 0,004 до 0,003, атомарного кислорода O в 1,7–2,4 раза с 0,075–0,1 до 0,0417, увеличивают содержание HF в 1,9–2,4 раза с 0,0143–0,0179 до 0,0348. При температуре 3000 К содержание оксида железа FeO снижается в 14,7 раза с 0,2 до 0,0136, а содержание оксидов LaO_2 достигает 0,172 и La_2O_3 – 0,09.
5. Расчетно-экспериментальным методом разработан химический состав и конструкция электрода с редкоземельным покрытием для дуговой сварки низколегированных сталей на основе низкокислородной композиции $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ высокой основности. Конструкция покрытого электрода состоит из внутреннего газошлакового покрытия с повышенной теплопроводностью с наполнением металлическими порошками из никеля, марганца и алюминия, внешнего водонепроницаемого покрытия из термостойкого лака, слоя графитового композита на контактном торце и стального стержня марок Св-08А и Св-10Х16Н25АМ6.
6. Разработана установка и технологические рекомендации по изготовлению многослойных покрытых электродов методом многослойного вибрационного окунания и конвейерной сушки. Разработана лабораторная установка для испытаний сварочно-технологических свойств покрытых электродов при подводной мокрой сварке и наплавке с компьютерным управлением.
7. На основе статистической обработки осциллограмм токов и напряжений установлено, что при оптимальных режимах подводной мокрой сварки с применением электродов с покрытием $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ высокой основности в сочетании со электродными стержнями Св-08А и Св-10Х16Н25АМ6 отклонения тока снижаются до 1,5 раз, напряжения до 1,33 раза,

количество коротких замыканий в 2 раза, глубина проплавления увеличивается на 20 %, по сравнению с электродами с покрытием системы $TiO_2-Fe_2O_3-CaF_2$.

8. Экспериментальным методом установлено, что мокрая сварка электродами с покрытием $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ и стержнем Св-08А увеличивает твердость шва в 1,18 раза и снижает твердость ЗТВ в 1,23 раза по сравнению с электродами с покрытием $TiO_2-Fe_2O_3-CaF_2$. При сварке стали 09Г2С с твердостью 141–147 HV_{0,2} с применением электродов с покрытием $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ и стержнем Св-10Х16Н25АМ6 была достигнута твердость шва выше твердости основного металла.

9. Металлографическим анализом установлено, что при использовании покрытия $LaF_3-Na_3AlF_6-CaF_2-TiO_2$ размер зерен первичного феррита уменьшился в 2,5 раза до 20–50 мкм, размер зерен зернограничного феррита увеличился в 1,5 раза, размер игольчатого феррита увеличился в 2–2,5 раза, площадь неметаллических включений уменьшилась в 12–17 раз до 0,5%, пористость до 0,37%.

10. Таким образом, в результате исследований созданы электроды с редкоземельным покрытием для сварки низколегированных сталей. При мокрой сварке бейнитной стали электродами с редкоземельным фтористым покрытием временное сопротивление сварного шва увеличилось в 1,24 раза до 550 МПа, ударная вязкость в 2,2 раза до 78 Дж/см², площадь неметаллических включений снизилась до 17 раз, содержание диффузионного водорода уменьшилось в 1,52 раза, что свидетельствует о достижении цели работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Исследование микроструктуры и свойств сварных соединений при подводной мокрой сварке электродами с редкоземельным покрытием / Паршин С.Г. [и др.] // Сварка и диагностика. 2025, № 1. С. 41–46 (0,375 п.л./0,25 п.л.).
2. Разработка редкоземельной рутил-фторидно-первоскитной системы покрытых электродов для подводной мокрой сварки / Паршин С.Г. [и др.] // Сварка и диагностика. 2024, № 2. С. 37–44 (0,5 п.л./0,25 п.л.).
3. Исследование термических циклов и упрочнение зоны термического влияния при подводной мокрой сварке судостроительной стали / Паршин С.Г. [и др.] // Сварка и диагностика. 2024, № 2. С. 18–23 (0,31 п.л./0,05 п.л.).
4. Остаточные напряжения и анизотропия микроструктуры при различных технологиях подводной мокрой сварки низколегированной стали / Никулин В.Е. [и др.] // Сварка и диагностика, 2024. № 3. С. 21–25 (0,31 п.л./0,1 п.л.).
5. Паршин С.Г., Гао Ю. Покрытый электрод для подводной мокрой сварки. Патент РФ на изобретение № 2825112 от 14.07.2023. Бюл. № 23 от 20.08.2024 г. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
6. Исследование сварных соединений при ручной подводной мокрой сварке покрытым электродом с рутиловой шлаковой системой / Паршин С.Г. [и др.] // XIX Международная НТК «Материалы и технологии XXI века». Пенза. Март 2023. С. 53–56 (0,25 п.л./0,1 п.л.).

7. Оптимизация газошлаковой системы покрытых электродов системы $TiO_2-CaF_2-Na_3AlF_6$ для подводной мокрой сварки / Паршин С.Г. [и др.] // XIX Международная НТК «Материалы и технологии XXI века». Пенза. Март 2023. С. 50–52 (0,18 п.л./0,08 п.л.).
8. Паршин С.Г., Гао Ю., Николаев А.С. Подводная мокрая сварка высокопрочной стали штучным электродом с покрытием системы рутил-мрамор // Материалы XIII Всероссийской НТК «Жизненный цикл конструкционных материалов» (от получения до утилизации). Иркутск. ИНИТУ. 2023 г. С. 102–106 (0,31 п.л./0,1 п.л.).
9. Гао Ю. Исследование сварочной дуги при подводной мокрой сварке покрытым электродом // Материалы международной НТК «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности». 26–27 октября 2023 г. Могилев: Белорусско-Российский университет. С. 80 (0,06 п.л./0,06 п.л.).
10. Паршин С.Г., Гао Ю. Металлургические особенности подводной дуговой сварки при диссоциации и ионизации пресной и морской воды // Сборник трудов международной НТК «Машиностроительные технологические системы», посвященную 85-летию кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства ДГТУ». Ростов-на-Дону, ДГТУ, 26–30 сентября 2023 г. С. 143–147 (0,31 п.л./0,15 п.л.).
11. Паршин С.Г., Гао Ю. Термодинамическое моделирование газошлаковой системы $TiO_2-LaF_3-Na_3AlF_6$ покрытых электродов для подводной мокрой сварки сталей повышенной прочности // Сборник трудов 15-й Международной НТК «Наукоемкие технологии в машиностроении». Научный конгресс «Русский инженер». 1–3 ноября 2023 г. Том 2. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 118–120 (0,18 п.л./0,09 п.л.).
12. Гао Ю., Паршин С.Г., Никулин В.Е. Сварочно-технологические свойства ферритных и аустенитных электродов для подводной мокрой сварки судостроительной стали // Сборник статей XX Международной НТК «Материалы и технологии XXI века». Пенза. 2024. С. 38–41 (0,25 п.л./0,08 п.л.).
13. Технологии подводной мокрой сварки судостроительной стали с регулируемой скоростью охлаждения / Паршин С.Г. [и др.] // Сборник Всероссийской конференции к 75-летию ЯНЦ СО РАН. 19–23 сентября 2024 г., Якутск. С. 105–106 (0,12 п.л./0,04 п.л.).
14. Технологии и материалы для подводной мокрой сварки высокопрочных сталей / Паршин С.Г. [и др.] // Сборник тезисов I Всероссийской НТК им. ак. Н.П. Алешина (с международным участием), Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 11–13 ноября 2024 года. С. 9–11 (0,18 п.л./0,05 п.л.).
15. Паршин С.Г., Гао Ю., Разработка покрытых электродов для подводной мокрой сварки судостроительной стали // Сборник тезисов I Всероссийской НТК им. ак. Н.П. Алешина, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 11–13 ноября 2024 года. С. 7–8 (0,12 п.л./0,06 п.л.).