

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. Особенно 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 покрытых 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-Duomat 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 газшлаковой 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  $\text{LaO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$ , выделяющихся из фторидного шлака с повышенным содержанием  $\text{LaF}_3$ , перовскита  $\text{CaTiO}_3$  и криолита  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ .

### **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, гидроксидов 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 газшлакового 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 окунаия 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/см<sup>2</sup>, 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 газшлаковых и легирующих систем  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$ ,  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ ,  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  и физико-металлургических процессов их взаимодействия с кислородом, водородом, гидроксидом и оксидами.

2. Результаты разработки химического состава и конструкции электрода с редкоземельным покрытием для дуговой сварки низколегированных сталей на основе низкокислородной композиции  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  и исследований сварочно-технологических свойств электродов с покрытиями  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$ ,  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ ,  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  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 направленности 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 стенда 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, металлургические особенности подводной мокрой сварки, проблемы металлургической свариваемости сталей и причины шлаковых включений, пористости и трещин в сварных швах.

**Во второй главе** выполнено термодинамическое моделирование газшлаковых систем  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$ ,  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ ,  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ ,

их теплофизических свойств, объема, активности к водороду, кислороду, гидроксиду и водяному пару в парогазовом пузыре, а также к оксидам в сварочной ванне. Для моделирования металлургической активности системы  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$  использовали состав компонентов, масс. %:  $55\text{TiO}_2\text{-}25\text{CaF}_2\text{-}2\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}3\text{SiO}_2\text{-}15\text{CaCO}_3$ ; системы  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ :  $33\text{TiO}_2\text{-}21\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-}28\text{CaF}_2\text{-}4\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}6\text{SiO}_2\text{-}8\text{MgCO}_3$ ; системы  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ :  $35\text{LaF}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}15\text{CaF}_2\text{-}20\text{TiO}_2\text{-}10\text{CaCO}_3$ ;  $30\text{LaF}_3\text{-}25\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}15\text{CaF}_2\text{-}20\text{TiO}_2\text{-}10\text{CaCO}_3$ ;  $25\text{LaF}_3\text{-}30\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}15\text{CaF}_2\text{-}20\text{TiO}_2\text{-}10\text{CaCO}_3$ . По сравнению с системами  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$  и  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$  установлено, что в системе  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  при  $T=1900$  К при 0,1 МПа теплоемкость увеличивается в 1,9–2,7 раза до 5,4 Дж/кг×К, а теплопроводность в 1,4–3,8 раза до 0,84 Вт/м×К, Рис. 1.

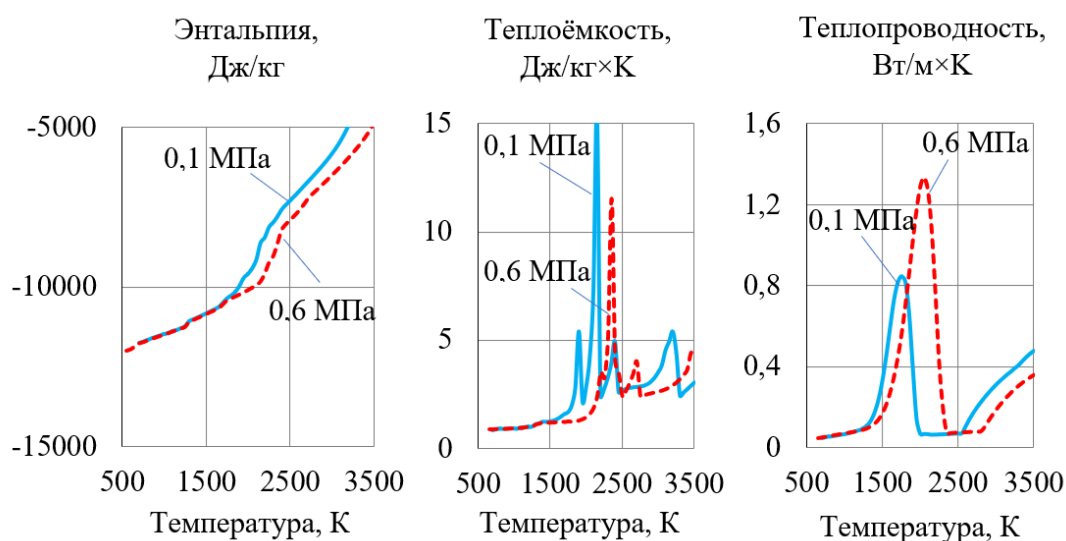


Рис. 1 Изменение теплофизических свойств системы, %:  $35\text{LaF}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}15\text{CaF}_2\text{-}20\text{TiO}_2\text{-}10\% \text{CaCO}_3$  при давлении 0,1 и 0,6 МПа

Механизм удаления водорода связан с образованием фторидов  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{TiF}_2$ ,  $\text{TiF}_3$ , которые связывают водород в нерастворимое соединение  $\text{HF}$ . Преимуществом газшлаковой системы, %:  $35\text{LaF}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}15\text{CaF}_2\text{-}20\text{TiO}_2\text{-}10\text{CaCO}_3$  при введении 10%  $\text{H}_2\text{O}$  является заметное снижение доли водяного пара и гидроксильной группы  $\text{OH}$  за счет роста концентрации  $\text{TiF}_2$ ,  $\text{TiF}_3$  и  $\text{HF}$  в области температур, типичных для границы дуги. С учетом стержня, ферросплавов и легирующих элементов моделировали составы масс, %: в системе  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$ :  $42\text{TiO}_2\text{-}25\text{CaF}_2\text{-}2\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}3\text{SiO}_2\text{-}15\text{CaCO}_3\text{-}7\text{Mn}\text{-}3\text{Ti}\text{-}3\text{Si}$ ; в системе  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ :  $21\text{TiO}_2\text{-}21\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-}28\text{CaF}_2\text{-}4\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}6\text{SiO}_2\text{-}8\text{MgCO}_3\text{-}8\text{Mn}\text{-}1\text{Si}\text{-}3\text{Ni}$ ; в системе  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ :  $30\text{LaF}_3\text{-}16\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}15\text{CaF}_2\text{-}20\text{TiO}_2\text{-}10\text{CaCO}_3\text{-}3\text{Mn}\text{-}2\text{Si}\text{-}1\text{Zr}\text{-}3\text{Al}$ ;  $25\text{LaF}_3\text{-}21\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}15\text{CaF}_2\text{-}20\text{TiO}_2\text{-}10\text{CaCO}_3\text{-}3\text{Mn}\text{-}2\text{Si}\text{-}1\text{Zr}\text{-}3\text{Al}$ ;  $20\text{LaF}_3\text{-}26\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}15\text{CaF}_2\text{-}20\text{TiO}_2\text{-}10\text{CaCO}_3\text{-}3\text{Mn}\text{-}2\text{Si}\text{-}1\text{Zr}\text{-}3\text{Al}$ , Рис. 2–4.

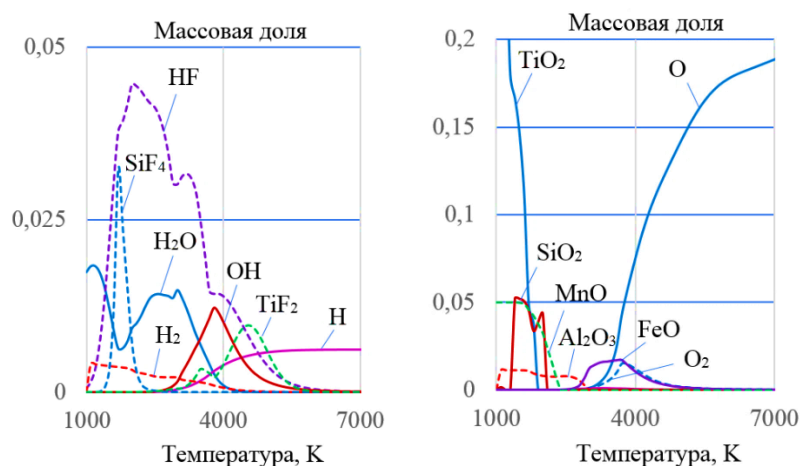


Рис. 2 Массовая доля водяного пара, фторидов и оксидов в системе 42%  $\text{TiO}_2$ -25%  $\text{CaF}_2$ -15%  $\text{CaCO}_3$ -2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -3%  $\text{SiO}_2$ -7%  $\text{Mn}$ -3%  $\text{Ti}$ -3%  $\text{Si}$  при введении 70%  $\text{Fe}$  и 10 %  $\text{H}_2\text{O}$  при давлении 0,1 (а) и 0,6 МПа

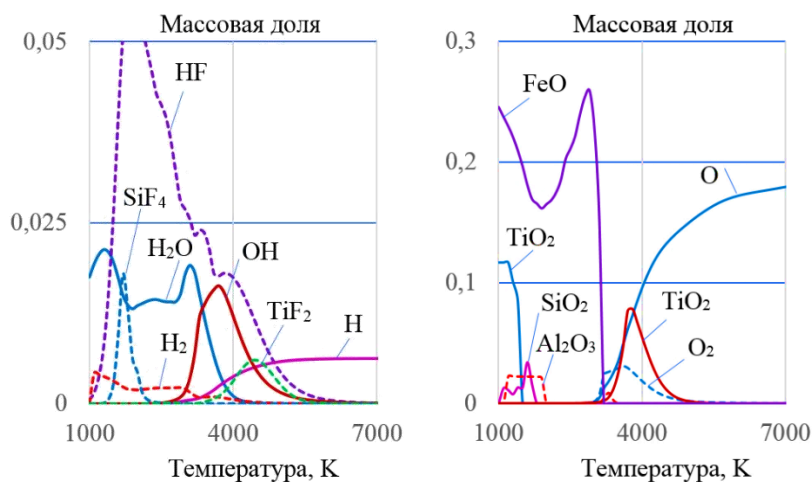


Рис. 3 Массовая доля водяного пара, фторидов и оксидов в системе 21%  $\text{TiO}_2$ -21%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -28%  $\text{CaF}_2$ -4%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -6%  $\text{SiO}_2$ -8%  $\text{MgCO}_3$ -8%  $\text{Mn}$ -1%  $\text{Si}$ -3%  $\text{Ni}$  при введении 70%  $\text{Fe}$  и 10 %  $\text{H}_2\text{O}$  при давлении 0,1 (а) и 0,6 МПа

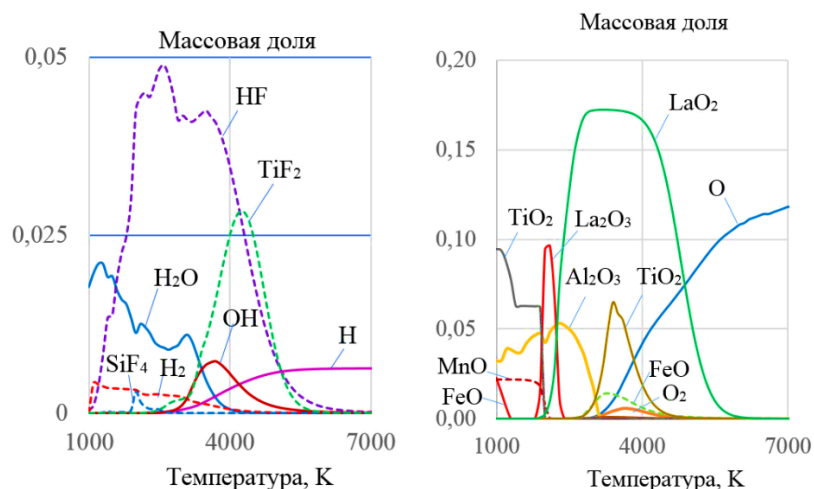


Рис. 4 Массовая доля водяного пара, фторидов и оксидов в системе, %: 30 $\text{LaF}_3$ -16 $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ -15 $\text{CaF}_2$ -20 $\text{TiO}_2$ -10 $\text{CaCO}_3$ -3 $\text{Mn}$ -2 $\text{Si}$ -1 $\text{Zr}$ -3 $\text{Al}$  при введении 70%  $\text{Fe}$  и 10 %  $\text{H}_2\text{O}$  при 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 Н в 1,17 раза с 0,004 до 0,003, атомарного кислорода О 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  $\text{LaO}_2$  достигает 0,172 и  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 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:  $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2$ ,  $\text{CaO-TiO}_2$ ,  $\text{CaF}_2\text{-CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ,  $\text{CaF}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{LaF}_3\text{-TiO}_2$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-TiO}_2$ ,  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6$ ,  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$ ,  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ ,  $\text{TiO}_2\text{-LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6$ , Рис. 5, 6.

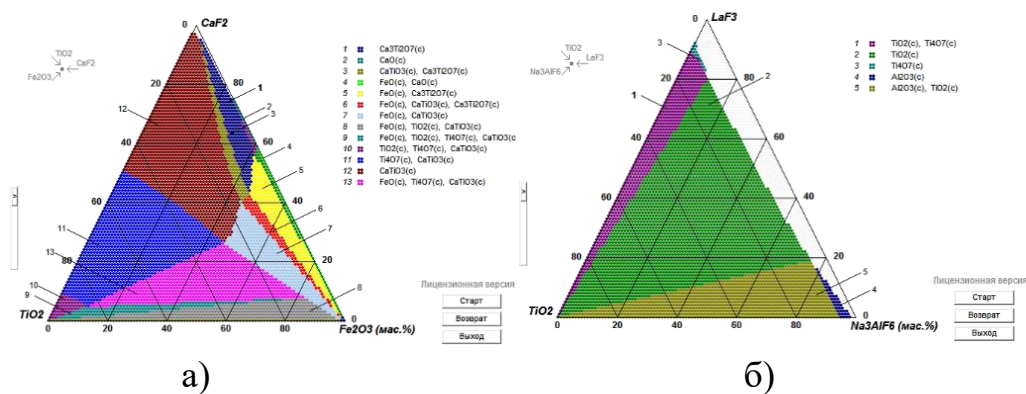


Рис. 5 Диаграмма равновесного фазового состава: а – системы  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$  при 3200 К; б –  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-TiO}_2$  при 2500 К

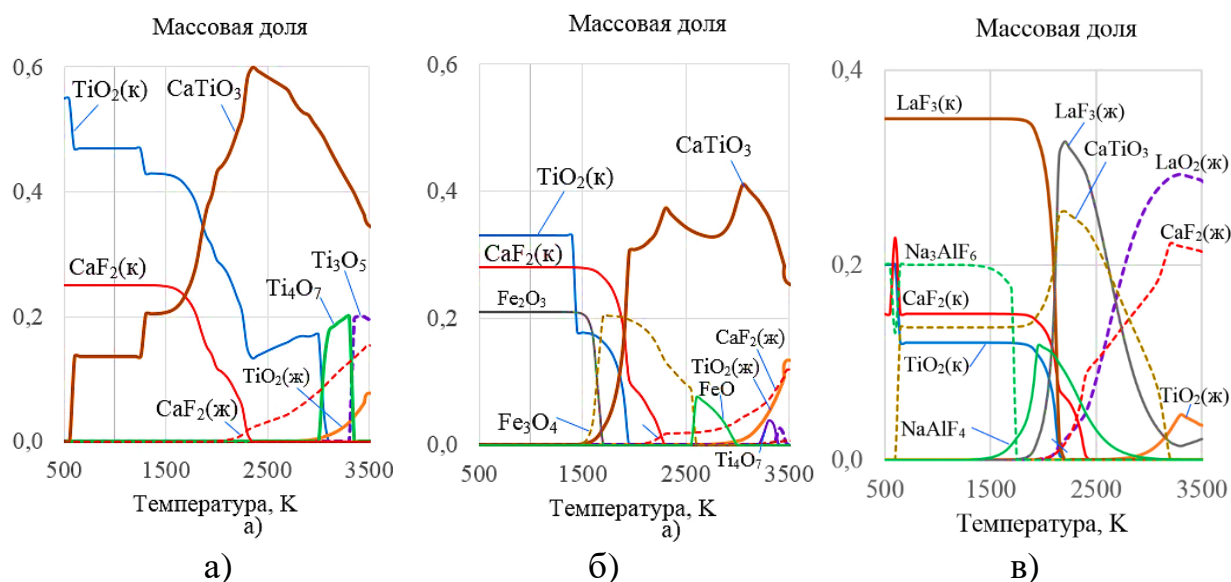


Рис. 6 Фазовый состав шлаковых систем: а – 55%  $\text{TiO}_2$ -25%  $\text{CaF}_2$ -15%  $\text{CaCO}_3$ -2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -3%  $\text{SiO}_2$ , б – 33%  $\text{TiO}_2$ -28%  $\text{CaF}_2$ -21%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -4%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -6%  $\text{SiO}_2$ -8%  $\text{MgCO}_3$ , в – 35%  $\text{LaF}_3$ -20%  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ -15%  $\text{CaF}_2$ -20%  $\text{TiO}_2$ -10%  $\text{CaCO}_3$  при давлении 0,1 МПа

Для получения гомогенной фазовой смеси с высокой активностью по отношению к водороду, гидроксилу и кислороду была выбрана фторидно-перовскитная шлаковая система для с наличием в шлаковой фазе модификаторов микроструктуры  $\text{LaO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  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 $\text{LaF}_3$ , 16–32 $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , 16–24 $\text{CaF}_2$ , 10 $\text{CaO}$ , 20 $\text{TiO}_2$ . 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 газшлаковое 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 $\text{TiO}_2$ -21 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -28 $\text{CaF}_2$ -4 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -6 $\text{SiO}_2$ -8 $\text{MgCO}_3$ -8 $\text{Mn}$ -1 $\text{Si}$ -3 $\text{Ni}$ ; редкоземельное покрытие  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ : 26 $\text{LaF}_3$ -20 $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ -15 $\text{CaF}_2$ -20 $\text{TiO}_2$ -7 $\text{CaCO}_3$ -3 $\text{Ni}$ -3 $\text{Mn}$ -3 $\text{FeSiZr}$ -3 $\text{Al}$  [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.

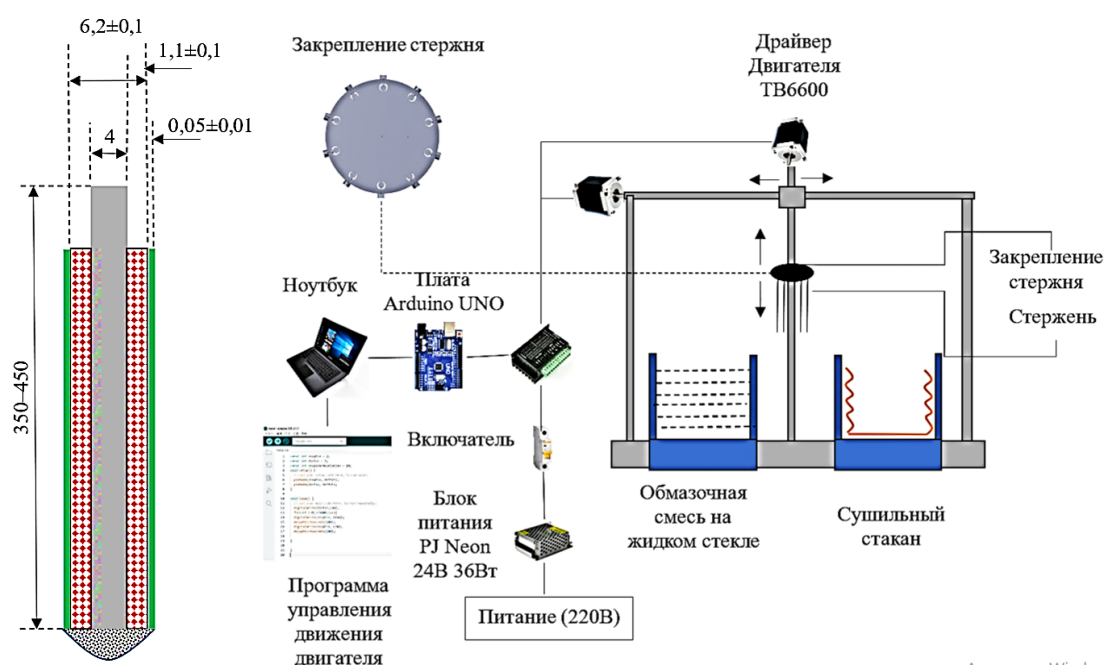


Рис. 7 Конструкция покрытого электрода и схема установки для изготовления покрытых электродов методом окунания

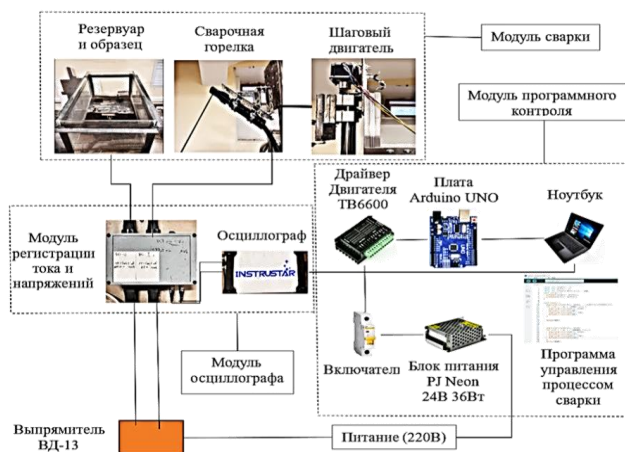
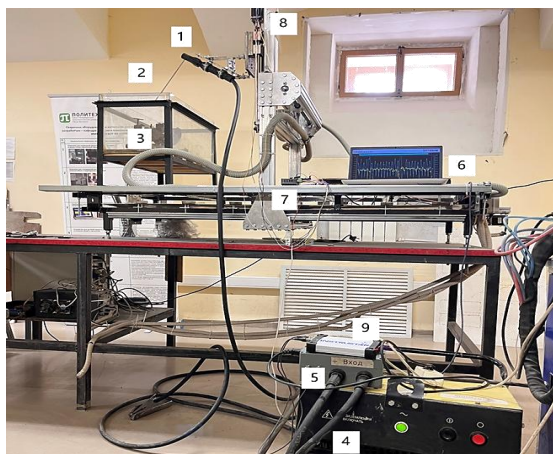


Рис. 8 Лабораторный стенд для подводной мокрой сварки и функциональная схема системы управления: 1 – электродержатель; 2 – электрод; 3 – резервуар; 4 – выпрямитель; 5 – датчики тока и напряжения; 6 – компьютер; 7 – комплекс драйвера двигателя (драйвер шагового двигателя, плата Arduino UNO); 8 – шаговый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

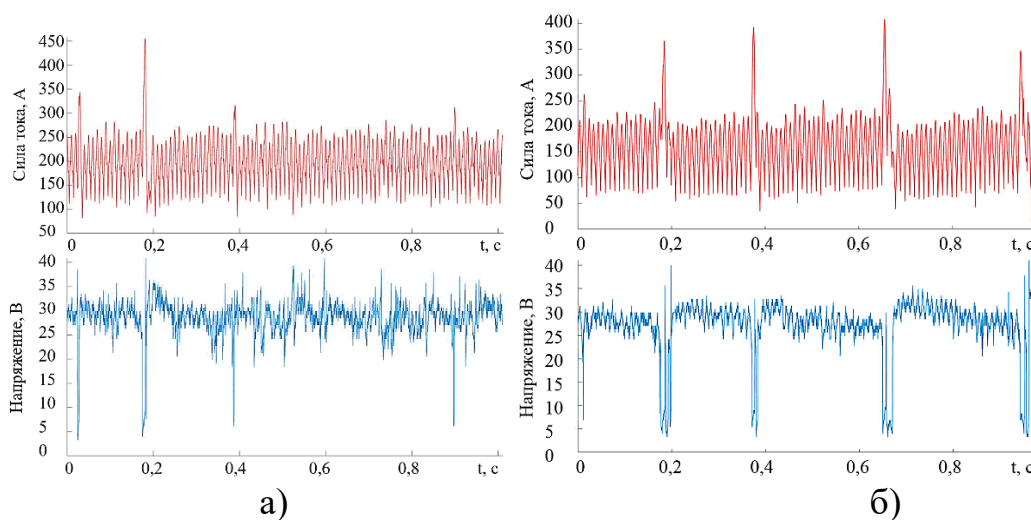


Рис. 9 Осциллограммы токов и напряжений при подводной мокрой сварке электродами с покрытием  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ : а – электрод со стержнем Св-08А; б – электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 диаметром 4 мм

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  $\pm 60$ –85 А; средняя величина напряжения в 4-х режимах составила 27–32 В с отклонениями напряжения  $\pm 6$ –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 НВ (149–177 НВ), со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 – 248–320 НВ (322–365 НВ) при твердости основного металла 155–165 НВ.

**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.

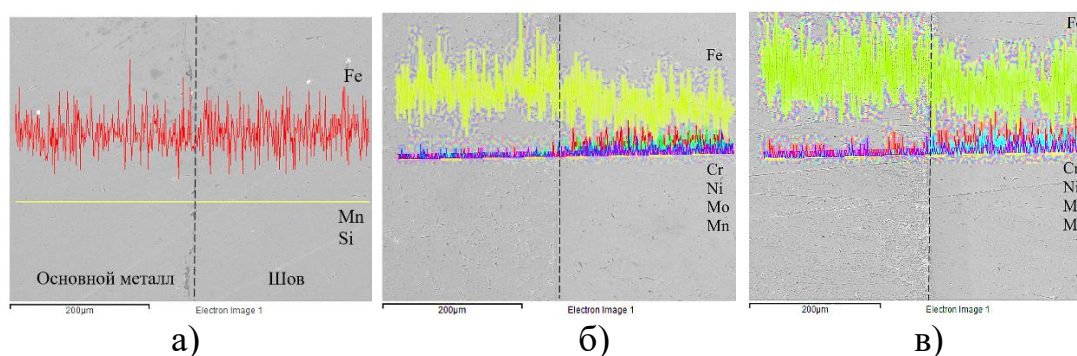


Рис. 10 Рентгеноспектральный анализ распределения легирующих элементов в основном металле и сварном шве при подводной сварке: а – сталь 09Г2С, электрод со стержнем Св-08А; б – сталь 09Г2С, электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6; в – сталь S960QC, электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6

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 микротвердомером MICRO-Duomat 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  $248 \pm 27$  НВ и ЗТВ  $280 \pm 24$ . 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<sub>0,2</sub> с применением электрода с покрытием LaF<sub>3</sub>-Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>-CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> и стержнем Св-10Х16Н25АМ6 достигнута твердость 165±5,5 HV и ЗТВ 334±12 HV, Рис. 11.

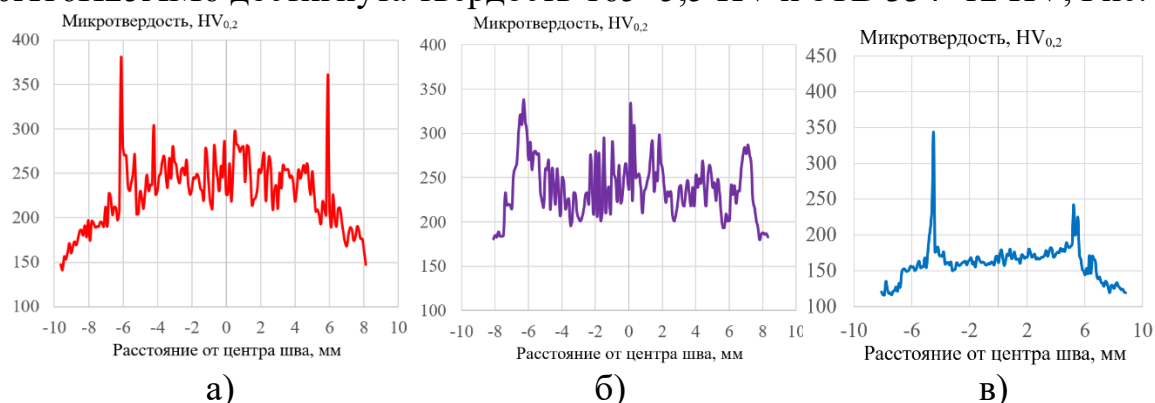


Рис. 11 Поперечное распределение микротвердости при сварке стали 09Г2С: а – покрытие TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub>, Св-08А; б – покрытие LaF<sub>3</sub>-Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>-CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>. Св-08А; в – покрытие LaF<sub>3</sub>-Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>-CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>, Св-10Х16Н25АМ6

Анализ микроструктуры шва при сварке электродами с покрытием TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub> и LaF<sub>3</sub>-Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>-CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> выявил, что при использовании покрытия LaF<sub>3</sub>-Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>-CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 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.

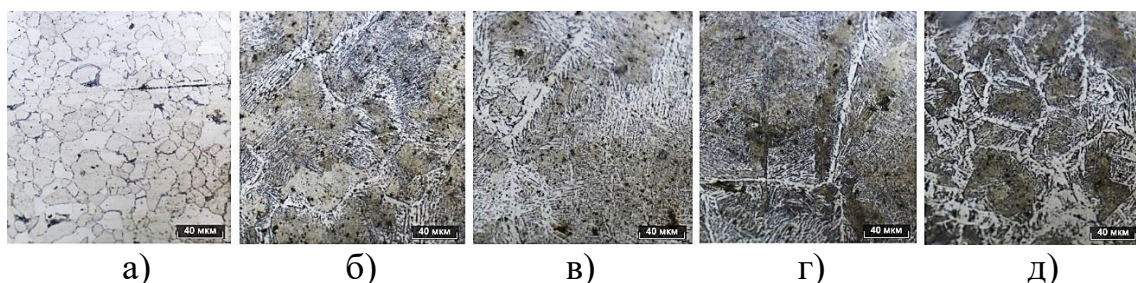


Рис. 12 Микроструктура сварного соединения из стали 09Г2С, электрод со стержнем Св-08А с покрытием TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub>: а – основной металл; б – шов; в – граница шва; г – участок крупного зерна; д – участок мелкого зерна

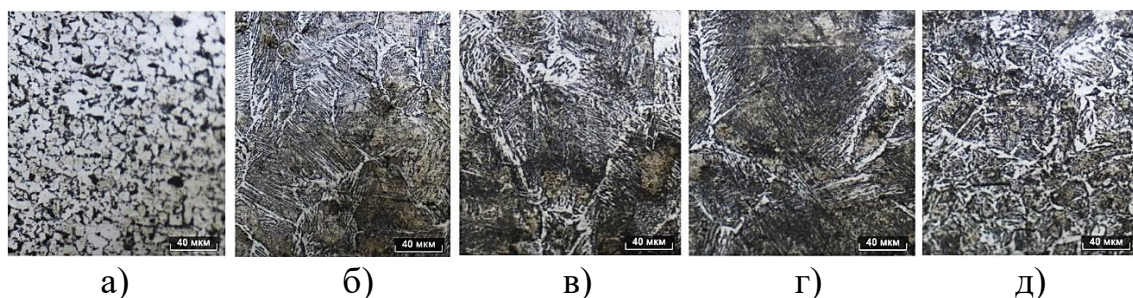


Рис. 13 Микроструктура сварного соединения из стали 09Г2С, электрод со стержнем Св-08А с покрытием LaF<sub>3</sub>-Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>-CaF<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>: а – основной металл; б – шов; в – граница шва; г – участок крупного зерна; д – участок мелкого зерна



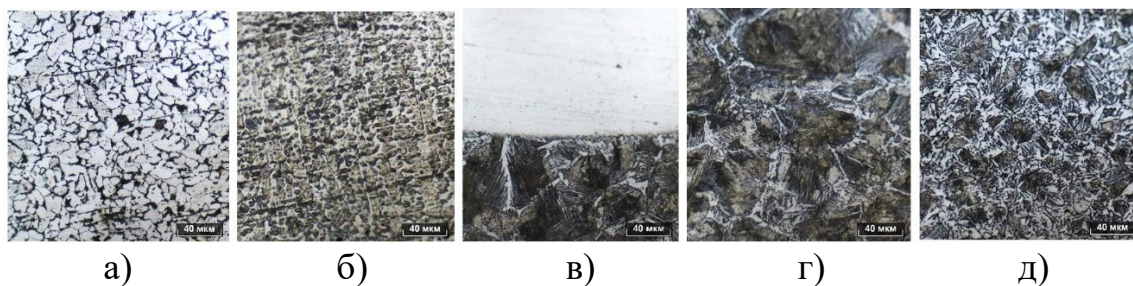


Рис. 14 Микроструктура сварного соединения из стали 09Г2С, электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 с покрытием  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ :  
а – основной металл; б – шов; в – граница шва; г – участок крупного зерна; д – участок мелкого зерна

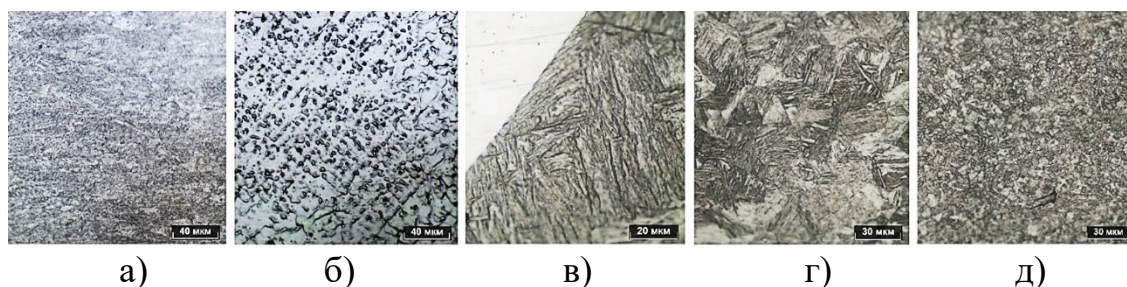


Рис. 15 Микроструктура сварного соединения из стали S960QC, электрод со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 с покрытием  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ :  
а – основной металл; б – шов; в – граница шва; г – участок крупного зерна; д – участок мелкого зерна

При сварке электродами с покрытием  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$  возникают неметаллические включения (НВ) округлой 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  $\text{TiO}_2\text{-}$

$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$  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.

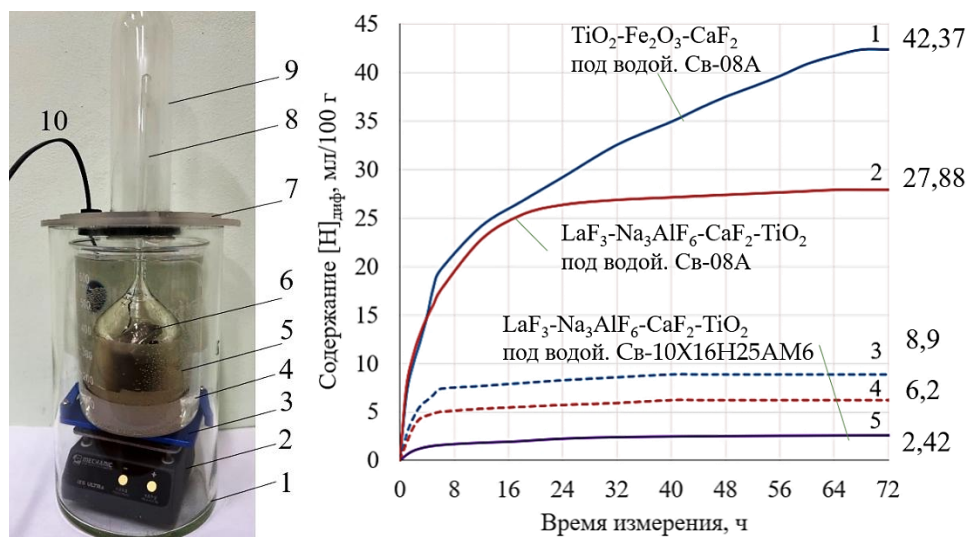


Рис. 16. Конструкция прибора и кинетика выделения диффузионного водорода из сварочных проб: 1 – внешний стакан; 2 – термостат; 3 – столик нагревателя; 4 – внутренний стакан с водой; 5 – бюретка Шиллинга с глицерином; 6 – сварочная проба; 7 – крышка внешнего стакана; 8 – измерительная шкала бюретки Шиллинга; 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  $\text{KCV}_0$  возросла в 2,2 раза с 28–38 Дж/см<sup>2</sup> до 68–78 Дж/см<sup>2</sup>.

**В приложении** представлены акты внедрения результатов работы.

## ОБЩИЕ ВЫВОодЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен комплексный подход и системное решение по разработке электродов с редкоземельным низкоокислородным покрытием для подводной мокрой сварки на основе анализа теплофизических, термодинамических характеристик газшлаковых систем и их активности по удалению водорода, кислорода, гидроксидов и оксидов при повышенном давлении.
2. На основе термодинамического моделирования установлено, что рост давления снижает теплоёмкость и теплопроводность газшлаковых систем на основе рутила и оксида железа, что способно ухудшать ионизацию дуги. Для увеличения теплоёмкости и теплопроводности предложено использовать в качестве основы газшлаковой 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 газшлаковых систем  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$ ,  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ ,  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ , предложена фторидно-перовскитная шлаковая система для удаления водорода, гидроксидов, кислорода, оксидов и модифицирования микроструктуры за счет наличия модификаторов  $\text{LaO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$ .
4. В результате термодинамического моделирования установлено, что покрытые электроды с газшлаковой системой  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  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  $\text{LaO}_2$  достигает 0,172 и  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 0,09.
5. Расчетно-экспериментальным методом разработан химический состав и конструкция электрода с редкоземельным покрытием для дуговой сварки низколегированных сталей на основе низкоокислородной композиции  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  высокой основности. Конструкция покрытого электрода состоит из внутреннего газшлакового 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  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  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  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ .

8. Экспериментальным методом установлено, что мокрая сварка электродами с покрытием  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  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  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ . При сварке стали 09Г2С с твердостью 141–147  $\text{HV}_{0,2}$  с применением электродов с покрытием  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  и стержнем Св-10Х16Н25АМ6 была достигнута твердость шва выше твердости основного металла.

9. Металлографическим анализом установлено, что при использовании покрытия  $\text{LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$  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/см<sup>2</sup>, 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 газшлаковой системы покрытых электродов системы  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-Na}_3\text{AlF}_6$  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 газшлаковой системы  $\text{TiO}_2\text{-LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6$  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.).