

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права
УДК 621.791.754.4

**ФЕТИСОВА
Екатерина Анатольевна**

**ТЕХНОЛОГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ
С МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ
ГАЛОГЕНИДНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»

Могилев 2025

Научная работа выполнена в Межгосударственном образовательном учреждении высшего образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель

Коротеев Артур Олегович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Оборудование и
технология сварочного производства»
Межгосударственного образовательного
учреждения высшего образования «Белорусско-
Российский университет»

Официальные оппоненты:

Коберник Николай Владимирович,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Сварка, диагностика и специальная
робототехника» ФГАОУ ВО «Московский
государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана»

Болотов Сергей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, декан
электротехнического факультета Межгосудар-
ственного образовательного учреждения выс-
шего образования «Белорусско-Российский
университет»

Оппонирующая организация

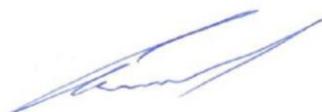
**Государственное научное учреждение
«Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларусь»**

Защита состоится «5» декабря 2025 г. в 14:00 на заседании совета по защите
диссертаций Д 02.18.02 при Межгосударственном образовательном учреждении
высшего образования «Белорусско-Российский университет» по адресу:
Республика Беларусь, 212022, г. Могилев, пр-т Мира, 43, ауд. 323, e-mail:
office@exec.bru.by, телефон ученого секретаря +375 (222) 60-33-66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусско-Российского
университета.

Автореферат разослан «31» октября 2025 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



С. В. Болотов

ВВЕДЕНИЕ

Дуговая сварка в среде защитных газов на сегодняшний день находит широкое применение при изготовлении металлоконструкций во всех отраслях промышленности. Для создания сварных конструкций всё чаще используются конструкционные стали с многокомпонентной системой легирования, что приводит к существенному усложнению задачи получения изделий с требуемыми показателями эксплуатационных характеристик. Возникает необходимость в совершенствовании имеющихся подходов к выбору технологии сварки, которая не будет ограничиваться вопросами цифрового управления оборудованием, а сосредоточится на решении металлургических задач формирования требуемого состава, структуры и свойств материала.

В настоящее время растет тенденция в применении для изготовления нагруженных сварных металлоконструкций низко- и среднеуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей, что диктуется технико-экономическими показателями, снижением веса изделий при сохранении эксплуатационных свойств на высоком уровне. Сложность при сварке таких материалов заключается не только в необходимости обеспечения равнопрочности основного и наплавленного металла, но в большей степени в высокой склонности к появлению недопустимого и наиболее опасного дефекта – холодных трещин. Трещины возникают по механизму замедленного разрушения, что вызвано диффузионной подвижностью водорода в сварном соединении. Основным способом снижения содержания водорода в наплавленном металле и околошовной зоне на сегодняшний день является его связывание в нерастворимые химически стабильные соединения через взаимодействие с фторсодержащими компонентами, как правило фторидами щелочных и щелочноземельных металлов (компонентами флюсов, электродных покрытий, наполнителем порошковой присадочной проволоки и др.). В случае дуговой сварки в защитной атмосфере такой подход можно реализовать через введение в ее состав газообразных галогенидов, в частности гексафторида серы (SF_6). При анализе возможных методов решения описанных проблем следует учитывать тот факт, что газовая атмосфера выполняет не только защитную функцию зоны сварки, но и оказывает прямое воздействие на протекание химических и физико-металлургических процессов, способствующих изменению характера плавления присадочной сварочной проволоки, переноса электродного металла и формирования комплекса требуемых эксплуатационных характеристик наплавленного металла. Введение активных компонентов в защитную газовую смесь позволит изменить характер протекания сварочных процессов. Использование элементов группы галогенидов в сварочных технологиях известно. Однако не вполне ясна картина по определению введения оптимального количества таких соединений в состав защитной газовой атмосферы, их влияния на количество водорода в наплавленном металле и околошовной зоне, а также степени воздействия на характеристики, определяющие основные технологические параметры процесса сварки.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: машиностроение и машиноведение» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156.

Научные исследования по диссертационной работе проводились в соответствии с Планом государственной программы научных исследований на 2021–2025 гг. (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 27 декабря 2019 г. № 34/1пр) в рамках задания «Создание теоретических основ формирования функционально-градиентных газовых сред и разработка способов управления структурой и свойствами сварных соединений из композиционных материалов», ГБ 2119ф (ГР № 20211744) НИР «Создание теоретических основ формирования функционально-градиентных защитных газовых сред и разработка технологии дуговой сварки композиционных материалов с их использованием», а также научными темами:

- ГБ 1120 (ГР № 20111338) «Разработка ресурсосберегающей технологии дуговой сварки высокопрочных сталей с комбинированной газовой защитой, обеспечивающей экономию сварочных материалов»;
- ГБ 2107 (ГР № 20210572) «Разработка новых технологий и систем автоматического управления процессами аддитивного синтеза и сварки современных материалов и сплавов»;

– ГБ 1501ф (ГР № 20150549, грант Министерства образования Республики Беларусь) «Разработка ресурсосберегающей технологии дуговой сварки высокопрочных сталей с комбинированной газовой защитой, обеспечивающей экономию сварочных материалов».

В 2024–2025 гг. проводилась НИР с ОАО «140 ремонтный завод» (г. Борисов) (договор от 25 июня 2024 г. № Ц01.64) по разработке технологии сварки высокопрочных броневых сталей. Использование результатов разработки позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики сварных соединений корпусных нагруженных несущих металлоконструкций со специальными свойствами. Результаты докладывались на конференции в МГТУ имени Н. Э. Баумана «Сварка и диагностика» имени академика РАН Н. П. Алёшина, посвященной 90-летию кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника» (г. Москва, 2024).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель работы – повышение эксплуатационных характеристик сварных соединений из низколегированных высокопрочных сталей путем снижения количества диффузионного водорода в наплавленном металле и разработки способов управления технологическими характеристиками процесса дуговой сварки и наплавки посредством модификации защитной атмосферы

галогенидным газообразным соединением SF_6 , вводимым непосредственно в струю защитной газовой смеси $Ar + CO_2$.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи.

1. Путем термодинамического моделирования теоретически исследовать и экспериментально подтвердить возможность снижения количества диффузионного водорода в наплавленном металле посредством связывания его в нерастворимые соединения NF через реакции с высокотемпературными продуктами галогенидного соединения SF_6 , вводимого непосредственно в струю защитной газовой смеси $Ar + CO_2$.

2. Исследовать физико-металлургические и технологические характеристики процесса плавления присадочной проволоки и переноса электродного металла через дуговой промежуток в условиях модификации защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ галогенидным соединением SF_6 . Исследовать особенности формирования химического состава наплавленного металла и разработать механизмы сдерживания роста в нем массовой доли серы.

3. Исследовать особенности формирования микроструктуры и комплекса механических характеристик сварных соединений при сварке низколегированных высокопрочных сталей в условиях модификации защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ галогенидным соединением SF_6 . Провести сравнительный анализ с традиционными технологиями газовой защиты.

4. Исследовать склонность сварных соединений к образованию холодных трещин. Провести экспериментальные исследования и механические испытания технологических проб.

5. Разработать технологию дуговой сварки с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 , обеспечивающую требуемые механические свойства и эксплуатационные характеристики сварного соединения с низкой чувствительностью к диффузионному водороду.

Объектом исследований является дуговая сварка плавящимся электродом высокопрочных низколегированных сталей в среде активных защитных газовых смесей.

Предметом исследований являются термодинамические и металлургические механизмы связывания водорода в высокотемпературной области защитной атмосферы в нерастворимые соединения посредством введения в струю защитной газовой смеси галогенидов и влияние такой модификации при сварке и наплавке на технологические характеристики процесса плавления присадочной проволоки, а также условия формирования микроструктуры и комплекса эксплуатационных характеристик сварного соединения.

Научная новизна

Теоретически установлен и экспериментально подтвержден механизм интенсификации metallургических процессов при дуговой сварке, заключающийся в модификации защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ галогенидным соединением SF_6 , что позволяет не только создать условия для эффективного связывания водорода в атмосфере дуги в нерастворимые и

ограниченно растворимые в жидким металле химические соединения HF в диапазоне интервала температур его максимальной растворимости 1000...3000 К и снизить посредством этого чувствительность наплавленного металла к водородной хрупкости при сварке и наплавке низколегированных высокопрочных сталей, но и повысить эффективность использования тепловой мощности дугового разряда, сжав столб дуги продуктами высокотемпературной диссоциации SF_6 и повысив глубину проплавления основного металла на 20 %...30 % по сравнению с традиционной технологией с использованием защитной смеси 82 % Ar + 18 % CO₂, обеспечив формирование требуемой микроструктуры и комплекса эксплуатационных характеристик соединения.

Положения, выносимые на защиту

1. По результатам термодинамического моделирования вероятности образования химических стойких соединений HF при нагреве защитной газовой среды установлено, что механизм связывания водорода фтором, образующимся в высокотемпературной области дугового промежутка в результате диссоциации вводимого в состав защитной газовой смеси Ar + CO₂ гексафторида серы (SF₆), обеспечивающий формирование соединений HF, позволяет подавить реакции образования водородсодержащих компонентов в диапазоне температур от 1000 до 3000 К, что соответствует максимальной растворимости водорода в стали. На основании экспериментальных исследований с применением глицериновых проб установлено, что в случае использования при сварке защитной газовой среды 82 % Ar + 18 % CO₂ + 0,25 % SF₆ количество диффузионного водорода в наплавленном металле снижается в 2 раза по сравнению с использованием газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂.

2. Установлены зависимости характера переноса электродного металла от значений параметров режима и состава защитной газовой среды, отличающейся от традиционной для высокопрочных низколегированных сталей 82 % Ar + 18 % CO₂ введением в её состав SF₆ с объемной долей от 0,5 % до 2 %, позволяющие повысить частоту коротких замыканий дугового промежутка до 20 % и обеспечить снижение значения коэффициента потерь до 0,02 при значениях скорости подачи сварочной проволоки в диапазоне от 2,3 до 9,2 м/мин и напряжении на дуге от 20 до 33 В.

3. Экспериментально установлено, что введение SF₆ в защитную газовую смесь 82 % Ar + 18 % CO₂ при сохранении значений скорости подачи присадочной проволоки и напряжения на дуге приводит к снижению высокотемпературных потерь легирующих элементов в дуговом промежутке и росту массовой доли раскислителей (Mn и Si) в составе наплавленного металла в среднем на 30 %...32 % для Si и 8 %...10 % для Mn. В наплавленном металле с повышением значения напряжения на дуге с 14 до 24 В с шагом 1...2 В и объемной доли SF₆ в защитной газовой смеси с 0,25 % до 2 % наблюдается трехкратное снижение массовой доли углерода, обеспечивающее увеличение значения относительного удлинения до 30 % и ударной вязкости наплавленного металла и зоны термического влияния на 5 %...15 % по сравнению с наплавкой в среде 82 % Ar + 18 % CO₂.

4. Разработаны и экспериментально подтверждены способы, позволяющие сдерживать рост массовой доли серы в наплавленном металле до 2 раз, заключающиеся в сварке и наплавке на пониженных более чем на 2...3 В с использованием низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных проволок и на 4...5 В с использованием низкоуглеродистых низколегированных проволок значениях напряжения на дуге относительно рекомендуемых, повышении окислительного потенциала защитной смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ путем увеличения объемной доли углекислого газа до 25 % и применении проволок с повышенным содержанием марганца.

5. Установлены зависимости геометрических характеристик проплавления основного металла от значений параметров режима и состава защитной газовой смеси при введении в нее SF_6 . С повышением объемной доли SF_6 в диапазоне значений от 0,25 % до 2 % в защитной газовой среде ширина валика наплавленного металла уменьшается на 20 %...60 %, а глубина проплавления увеличивается на 20 %...30 % по сравнению с технологией сварки и наплавки в защитной смеси 82 % $\text{Ar} + 18\%$ CO_2 , что способствует сокращению ширины зоны закалочной структуры в основном металле вблизи линии сплавления за счет более рационального ввода тепловой энергии, обеспечивающего снижение неравномерности значений твердости на этом участке в среднем на 25...50 HV на каждые вводимые 0,25 % SF_6 в состав защитной газовой смеси.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в диссертации, получены автором лично. Опубликованные работы по теме диссертации были написаны в соавторстве с руководителем – канд. техн. наук, доц. А. О. Коротеевым, которому принадлежит основная идея работы. Определение целей и задач исследований, обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на многочисленных конференциях Белорусско-Российского университета 2019–2025 гг., а также:

– V Всероссийской национальной конференции молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (РФ, г. Комсомольск-на-Амуре, 2022);

– Международной научно-технической конференции «Новые технологии и материалы, автоматизация производства» (РБ, г. Брест, 2022);

– Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии» (Advanced Engineering) (РФ, г. Санкт-Петербург, 2022);

– XIII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (РФ, г. Барнаул, 2022);

– I Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности» (РБ, г. Могилев, 2022);

– XI Форуме вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства (РБ, г. Минск, 2022);

– Международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы» (METS-2023) (РФ, г. Ростов н/Д, 2023).

НИРС под руководством Е. А. Фетисовой «Технология дуговой сварки и наплавки с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями» в 2022 г. получила степень лауреата XXIX Республиканского конкурса научных работ студентов.

НИР под руководством Е. А. Фетисовой «Технология дуговой сварки высокопрочных сталей, чувствительных к водородному охрупчиванию» стала победителем Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов вузов «Наука будущего – наука молодых» в секции «Новые материалы и способы конструирования» (РФ, г. Орёл, 2023).

По результатам проведения конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в рамках 31-й Международной выставки высоких технологий и инноваций в научно-технической сфере «HI-TECH 2025» (РФ, г. Санкт-Петербург, 9–11 апреля 2025 г.) разработка «Технология дуговой сварки и аддитивного синтеза изделий с модификацией защитной газовой среды» стала победителем с вручением Диплома I степени и золотой медали.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 статьях, включенных в перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь, 2 статьях, входящих в перечень изданий Web of Science, 6 статьях и 34 тезисах докладов на международных научно-технических и научно-практических конференциях. Общее количество страниц опубликованных материалов – 182 страницы (10 авторских листов).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объём диссертации (с иллюстрациями, таблицами, списком использованных источников и приложениями) – 177 страниц. Печатный текст без учёта иллюстраций, таблиц, списка использованных источников и приложений составляет не более 100 страниц, что соответствует п. 21 гл. 3 Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации. При этом диссертация содержит 74 рисунка, 29 таблиц и 117 наименований использованных источников.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена литературному обзору по теме диссертационной работы. Представлены классификация, свойства и характеристики свариваемости современных высокопрочных сталей. Рассмотрены вопросы

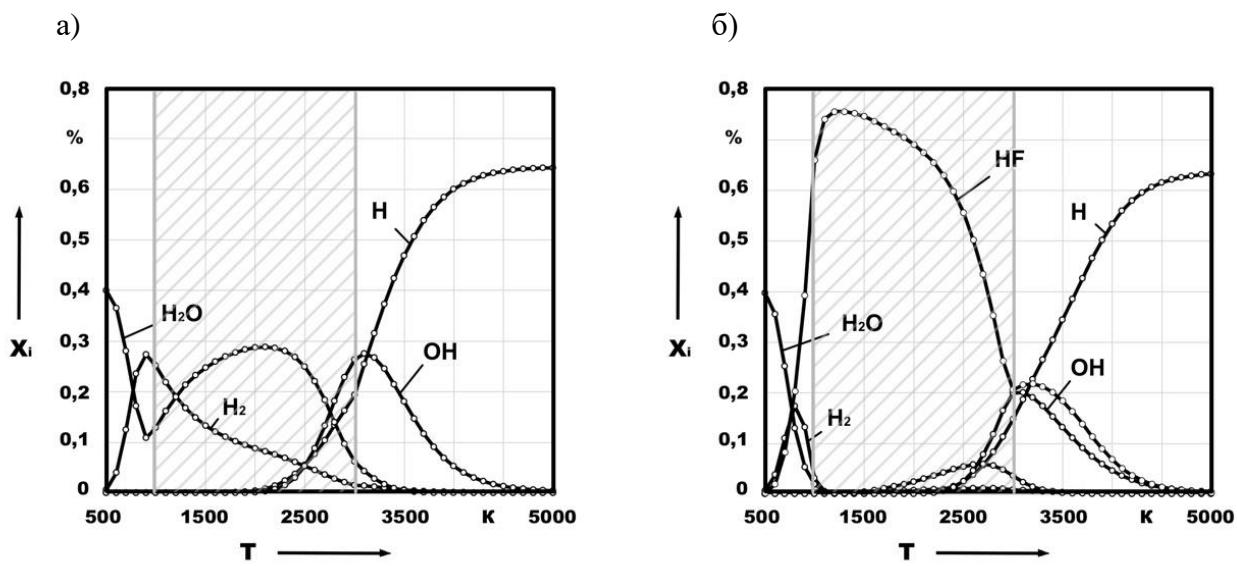
сварки сталей, чувствительных к содержанию водорода в основном металле и наплавленном металле шва, а также существующие методы борьбы с ним. Проанализированы имеющиеся данные о технологических характеристиках дуговой сварки в среде защитных газов и их смесей. Рассмотрены основные способы применения галогенидных соединений в дуговых сварочных технологиях. На основании обзора и имеющихся данных предложено направление совершенствования технологии сварки в среде защитных газов, заключающееся во введении галогенидного газообразного соединения SF_6 непосредственно в струю защитной газовой смеси $Ar + CO_2$, что позволяет связать свободный водород в высокотемпературной области дугового промежутка в нерастворимые или слаборастворимые в жидким металле соединения, а также изменяет условия плавления сварочной проволоки и переноса электродного металла, что открывает широкие возможности для управления технологическими характеристиками процесса сварки.

Во второй главе представлены результаты исследования эффективности связывания водорода в соединения HF в атмосфере дуги через взаимодействие между компонентами защитной газовой среды ($Ar + CO_2 + SF_6$) в высокотемпературной области дугового промежутка. Основные результаты получены при помощи термодинамического моделирования и экспериментальных исследований по методике глицериновой пробы. В качестве основного источника водорода в зоне сварки при моделировании рассматривался влажный воздух, попадающий в зону сварки в количествах, не превышающих 5 % (объемная доля).

Анализ полученных результатов показал, что при нагреве защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ без введения в нее SF_6 в широком диапазоне температур наблюдается значительное количество водородсодержащих компонентов, включая пары воды (H_2O), молекулярный (H_2) и атомарный (H) водород (рисунок 1), что способствует интенсивному взаимодействию водорода с металлом. При введении в такую защитную газовую смесь SF_6 в различных объемных долях происходит практически полное подавление образования водородсодержащих компонентов с формированием соединений HF (см. рисунок 1).

Реакция образования HF в анализируемом температурном диапазоне 500...5000 К с наибольшей эффективностью протекает в интервале температур 1000...3000 К, что соответствует максимальной растворимости H в стали и позволяет связать его в нерастворимые соединения, предотвращая возможную последующую адсорбцию и диффузию водорода в сталь. Отмечено, что полное подавление реакций образования водородсодержащих компонентов обеспечивается даже при малых количествах введения гексафторида серы (0,25 % по объему или 0,753 % в массовых долях) в защитную газовую атмосферу.

Полученные результаты указывают на то, что эффективность связывания водорода фтором при высоких температурах (свыше 3500 К) падает, что объясняется свойствами взаимодействующих компонентов.

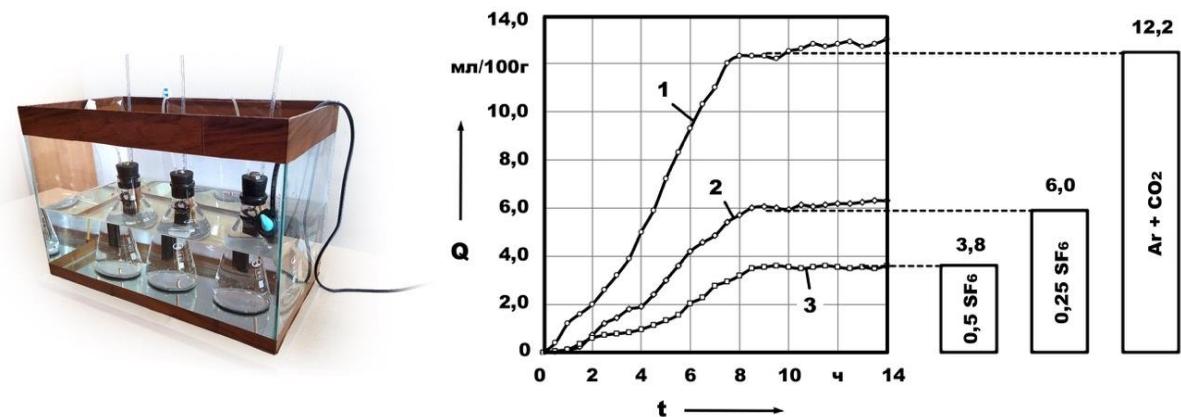


а – SF_6 отсутствует; б – массовая доля вводимого SF_6 – 0,753 %

Рисунок 1 – Результаты термодинамического моделирования равновесного состава газовой смеси в мольных долях

Повышение объёмной доли гексафторида серы в составе защитной газовой смеси приводит к увеличению количества свободного фтора в высокотемпературной области. Однако такой эффект не позволяет существенно расширить температурный интервал эффективного связывания Н, т. к. в вышеуказанной области существуют не вступающие во взаимодействие между собой фтор и водород.

Для сравнительной количественной оценки объема выделяющегося водорода в зависимости от объемной доли вводимого в состав защитной смеси SF_6 проведен ряд экспериментов по методике вытеснения глицерина на глицериновых пробах. Внешний вид установки представлен на рисунке 2.



1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2 ; 2 – (Ar + CO_2) + 0,25 % SF_6 ;
3 – (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6

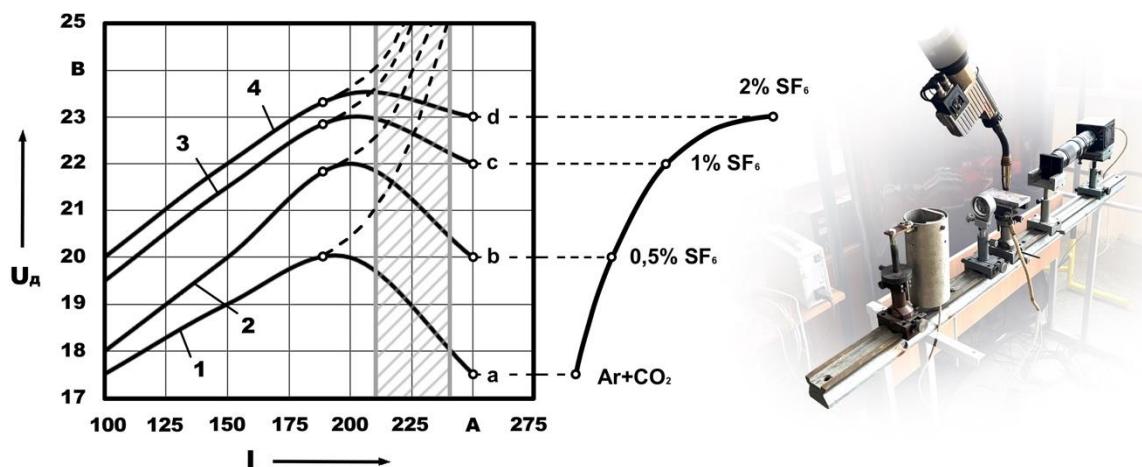
Рисунок 2 – Результаты анализа количества выделяющегося из наплавленного металла водорода

Эксперимент проводился в течение 14 ч после помещения образца в термостатированную ёмкость. Результаты анализа показали, что введение 0,25 % SF₆ позволяет снизить объем выделившегося водорода в 2 раза (с 12 до 6 мл/100 г). Это свидетельствует об эффективности предлагаемого решения. При этом следует отметить, что полученные значения сравнимы лишь в рамках проведенного эксперимента, т. к. объем поступившего в зону сварки водорода определяется многими факторами.

Экспериментальная установка и сама методика чрезвычайно чувствительны к изменениям окружающей среды, и даже небольшое изменение температуры в силу высокого коэффициента температурного расширения глицерина может приводить к существенным изменениям результатов. В случае же сварки образцов в одних условиях сравнительный эксперимент является достаточно эффективным.

В третьей главе представлены результаты исследования технологических характеристик процесса сварки с модификацией защитной газовой среды SF₆.

По результатам проведенных исследований установлено, что наиболее эффективное, с точки зрения стабильности существования дугового промежутка и процесса плавления присадочной электродной проволоки, соотношение между значениями параметров режима (скоростью подачи проволоки и напряжением на дуге) в условиях модификации защитной газовой смеси Ar + CO₂ гексафторидом серы (SF₆) смещено в сторону больших значений напряжения по сравнению с традиционной технологией сварки и наплавки в среде Ar + CO₂, что объясняется необходимостью повышения мощности дугового разряда (рисунок 3).



1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 – (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆;
3 – (Ar + CO₂) + 1 % SF₆; 4 – (Ar + CO₂) + 2 % SF₆

Рисунок 3 – Графики выбора значений напряжения на дуге в зависимости от значения силы тока и количества SF₆, вводимого в защитную газовую атмосферу, по показателю потерь электродного металла на разбрзгивание и внешний вид установки для исследования характера переноса электродного металла

Амплитуда диапазона значений напряжения, соответствующих этому соотношению, составляет 2...3 В. Снижение значений напряжения на дуге с выходом из этого диапазона вызывает дестабилизацию процесса, более интенсивную, чем вызванную его повышением. Модификация защитной атмосферы позволяет предотвратить отклонение дуги от оси из-за чрезмерной длины столба при повышенных значениях напряжения путем ее пространственного сжатия продуктами высокотемпературной диссоциации SF_6 .

Установлено, что введение до 2 % SF_6 в состав защитной газовой среды $Ar + CO_2$ при использовании скоростей подачи электродной проволоки в диапазоне значений 2,3...7,7 м/мин, что соответствует значениям силы тока 98...254 А, оказывает существенное влияние на частоту коротких замыканий дугового промежутка. При скорости подачи до 3,7 м/мин частота уменьшается с повышением количества SF_6 . Вместе с тем повышение напряжения на дуге для стабилизации дугового промежутка позволяет не только оставить частоту коротких замыканий на прежнем уровне, но и, начиная со скоростей подачи 5,3 м/мин (сила тока 195 А) и выше, повысить ее значение. При этом чем выше значение скорости подачи проволоки, тем этот эффект проявляется сильнее. Введение в защитную среду до 0,5 %...1 % SF_6 при скорости подачи 7,7 м/мин дает возможность повысить частоту коротких замыканий до 20 % по сравнению с технологией сварки и наплавки в среде $Ar + CO_2$. Введение SF_6 в защитную газовую среду приводит к уменьшению длины дуги и ее мощности и, как следствие, к снижению времени контактирования расплавленного металла с омывающим его потоком защитной газовой смеси. Это снижает высокотемпературные потери легирующих элементов в дуговом промежутке и приводит к росту массовой доли элементов раскислителей (Mn и Si) в составе наплавленного металла в среднем на 30 %...32 % для Si и 8 %...10 % для Mn. Менее интенсивный рост Mn обусловлен частичным связыванием его с серой с образованием сульфидов MnS, что является положительным, но недостаточным эффектом для блокировки растворимости серы в наплавленном металле в рассматриваемом диапазоне значений параметров режима и объемных долей компонентов защитной газовой смеси.

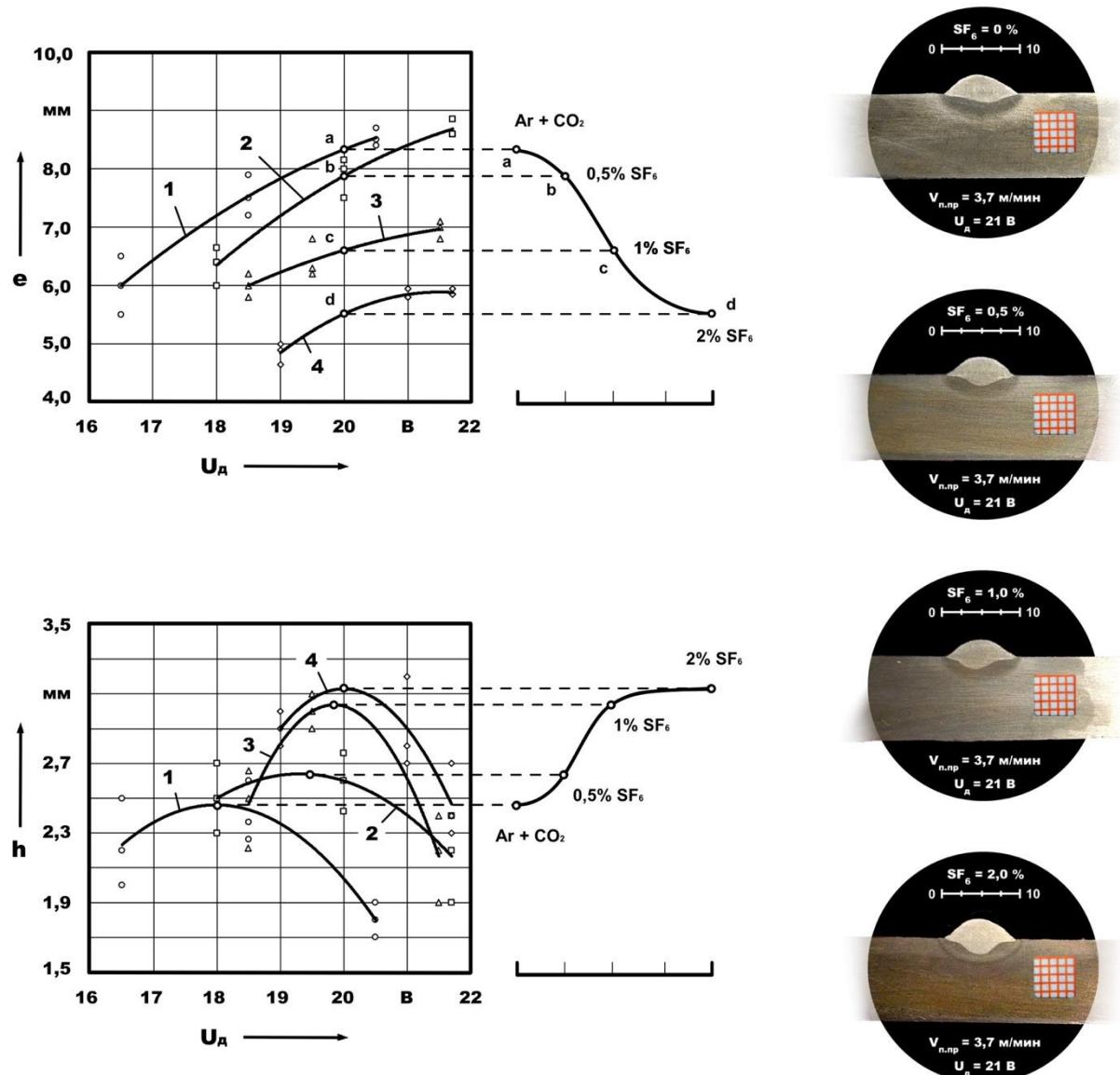
Установлено снижение массовой доли углерода в наплавленном металле, что объясняется его связыванием в соединения CF_4 посредством интенсивно протекающих металлургических реакций на стадии капли расплавленного металла с адсорбированными свободными ионами фтора.

Массовая доля серы в наплавленном металле увеличивается с повышением количества SF_6 в защитной газовой среде. Наиболее существенное влияние на этот процесс оказывает напряжение на дуге. Установлено, что эффективным способом сдерживания перехода серы в наплавленный металл является сварка и наплавка на пониженных более чем на 2...3 В значениях напряжения.

В случае использования присадочных электродных низкоуглеродистых низколегированных проволок типа Св-08Г2С (Св-08ГС) изменение напряжения на 4...5 В позволяет изменить количество серы в наплавленном металле более чем в 2 раза. В случае использования легированных высокопрочных проволок

типа СТБ ISO 16834–2010: G 69 4 M21 Mn3Ni1CrMo применение пониженных на 2...3 В значений напряжения позволяет сдерживать рост серы и ограничить ее количество в допустимом диапазоне значений 0,025 %...0,03 %.

Исследовали геометрические характеристики проплавления основного металла на макрошлифах наплавки одиночных валиков на пластину, выполненных с различным количеством вводимого в защитную газовую смесь SF_6 (0,5 %, 1 % и 2 % по объемной доли) и различными значениями параметров режима наплавки. По результатам анализа металлографических макрошлифов построены графические зависимости ширины валика и глубины проплавления основного металла (рисунок 4).



1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 – (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆;
3 – (Ar + CO₂) + 1 % SF₆; 4 – (Ar + CO₂) + 2 % SF₆

Рисунок 4 – Зависимость значения ширины наплавленного валика (e) и глубины проплавления основного металла (h) от напряжения на дуге (U_д) при различном количестве вводимого SF₆ в защитную атмосферу (V_{н,пр.} = 3,7 м/мин)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшее воздействие на глубину проплавления основного металла оказывает введение SF_6 в количестве до 1 %, которое выражается в повышении её значений на этом участке от 20 % до 30 %. Дальнейшее повышение объёмной доли SF_6 в составе газовой защитной атмосферы приводит к изменению значений h с меньшей эффективностью.

Установлено, что SF_6 снижает ширину валика на 20 %...60 % во всем диапазоне используемых параметров. Анализ полученных результатов свидетельствует о более эффективном вводе энергии в основной металл (снижение ширины валика наплавленного металла), что подтверждается результатами исследования глубины его проплавления.

В четвертой главе представлены результаты механических испытаний и металлографических исследований наплавленного металла и сварных соединений, полученных в условиях модификации защитной газовой смеси различным количеством SF_6 (рисунок 5, а).

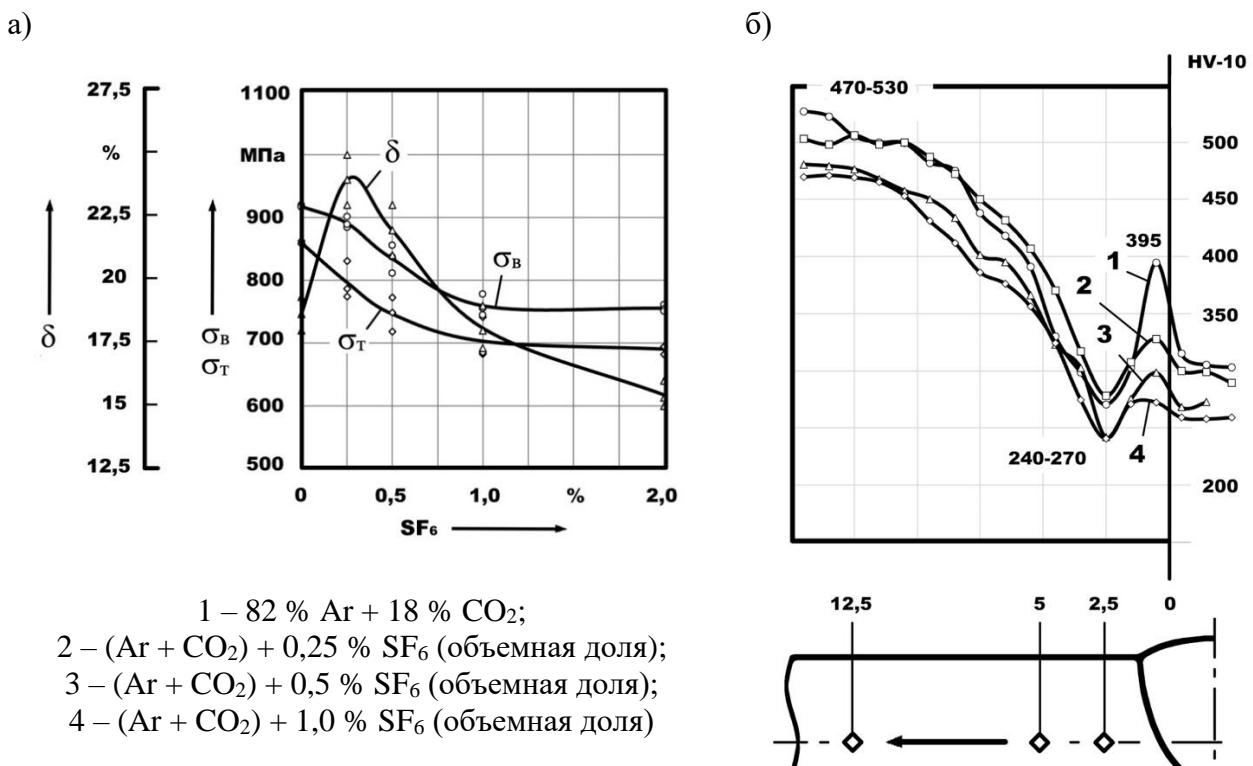


Рисунок 5 – Результаты механических испытаний наплавленного металла на статическое растяжение (а) и определение твердости сварного соединения по шкале HV-10 (б)

Установлено, что временное сопротивление разрыву при испытаниях на статическое растяжение наплавленного металла при введении в состав защитной газовой смеси SF_6 в диапазоне объемных долей 0,25 %...2,0 % несколько снижается (на 100...150 МПа) в пределах допустимого диапазона значений в силу снижения количества углерода в наплавленном металле. При этом

относительное удлинение повышается до 30 %, что имеет большое значение для выполнения сварки высокопрочных материалов, склонных к образованию трещин.

Значение ударной вязкости наплавленного металла и зоны термического влияния (ЗТВ) с введением 0,25 % SF₆ в состав защитной газовой смеси повышается на 5 %...15 % по сравнению с наплавкой в традиционной газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂. Значение твердости ЗТВ вблизи линии сплавления снижается на 25...20 HV каждые 0,25 % SF₆ со стороны лицевой поверхности соединения и на 50...25 HV со стороны корня шва (рисунок 5, б), что обусловлено изменением характера ввода тепла в основной металл и формированием более высокодисперсной микроструктуры на этом участке.

По совокупности воздействий, оказываемых наличием в составе защитной газовой смеси SF₆, удается создать наиболее благоприятные условия для снижения вероятности образования трещин по замедленному механизму разрушения:

- снижается силовой фактор. Благодаря повышению пластичности, ударной вязкости и снижению твердости материала удается частично «разгрузить» окколошовную зону;

- измельчается микроструктура и снижается количество крупных пластинчатых блоков, неспособных выдерживать высокий уровень внутренних напряжений и являющихся препятствием для выхода водорода из зоны ЗТВ в окружающую среду и основной металл;

- снижается количество диффузионного водорода в наплавленном металле, что является основным и наиболее эффективным методом борьбы с формированием трещин.

Результаты подтверждаются испытаниями технологических проб (проба Тэккен по СТБ ISO 17642-1–2012 и ГОСТ Р ИСО 17642-2–2012).

Пятая глава посвящена разработке технологических рекомендаций по сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидом SF₆, промышленной апробации и анализу экономических показателей процесса.

Разработана и опробована в производственных условиях технология дуговой сварки высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой атмосферы, а также конструкция установки для получения трехкомпонентной газовой защиты 82 % Ar + 18 % CO₂ + SF₆ с возможностью введения модификатора в количестве 0,1...4,0 % с необходимой точностью. Установка изготовлена из доступных материалов, что делает её конкурентоспособной по сравнению с имеющимися в доступе однопостовыми газовыми смесителями.

Разработаны практические рекомендации по выбору значений параметров режима сварки, позволяющие получить качественные сварные соединения и обеспечить реализацию предлагаемых на основании полученных в диссертационной работе результатов по снижению чувствительности к образованию трещин. Рассчитаны основные экономические показатели применения предлагаемой технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В соответствии с поставленными в работе задачами получены следующие результаты.

1. На основе термодинамического моделирования процессов, происходящих в защитной газовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$, исследованы вероятности протекания реакций между компонентами и проведен анализ эффективности такого способа. Показано, что в диапазоне наибольшей растворимости водорода в жидким металле в диапазоне значений температур 1000...3000 К присутствие высокотемпературных компонентов диссоциации галогенида SF_6 полностью подавляет реакции образования водородсодержащих компонентов. Экспериментально подтверждено двухкратное снижение количества диффузионного водорода в наплавленном металле на основании глицериновых проб образцов, выполненных в защитной газовой среде с введением 0,25 % SF_6 , по сравнению с образцами, полученными в смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ [3, 11, 18, 19, 20, 22, 23, 31].

2. Сжатие столба дуги продуктами высокотемпературной диссоциации SF_6 и стабилизация дугового промежутка с повышенным значением напряжения, но меньшим сечением столба дуги приводят к изменению характера переноса электродного металла, повышая частоту коротких замыканий при скорости подачи присадочной проволоки от 2,3 до 9,2 м/мин до 20 % по сравнению с технологией сварки и наплавки в среде $\text{Ar} + \text{CO}_2$.

Экспериментально исследованы варианты наиболее эффективного соотношения между значениями параметров режима (силой тока, напряжением на дуге, скоростью подачи присадочной проволоки) с точки зрения минимизации потерь электродного металла, а также области стабильного существования различных типов его переноса.

При введении SF_6 в защитную газовую среду снижаются высокотемпературные потери легирующих элементов в дуговом промежутке, что способствует повышению массовой доли элементов-раскислителей (Mn и Si) в составе наплавленного металла в среднем на 30 %...32 % для Si и 8 %...10 % для Mn. Экспериментально зафиксировано снижение массовой доли углерода в наплавленном металле с повышением напряжения на дуге с 14 до 24 В с шагом 1...2 В и объемной доли SF_6 в составе защитной газовой смеси с 0,25 % до 2 %, что объясняется его связыванием в соединения CF_4 .

Установлено, что эффективными способами сдерживания роста массовой доли серы в наплавленном металле являются:

– сварка и наплавка на пониженных значениях напряжения на дуге (на 2...3 В с использованием низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных проволок и на 4...5 В с использованием низкоуглеродистых низколегированных проволок) относительно рекомендуемых;

– повышение окислительного потенциала защитной атмосферы путем повышения объемной доли CO_2 в защитной газовой смеси;

– применение сварочных проволок с повышенным содержанием марганца.

С этой точки зрения эффективность введения SF_6 в защитную газовую атмосферу при сварке ограничена 0,5 %...1,5 % (остальное – смесь 82 % Ar + 18 % CO_2) [1, 3–7, 9, 14, 17, 19, 20, 24, 28, 30–34, 39, 41, 44–47, 51, 52].

3. Введение в состав защитной газовой среды SF_6 , благодаря изменению теплофизических свойств дугового разряда, позволяет более эффективно использовать тепловую мощность. Установлено, что по сравнению с традиционной технологией сварки и наплавки в смеси 82 % Ar + 18 % CO_2 , в случае введения в нее до 1 % SF_6 глубина проплавления основного металла повышается на 20 %...30 %. Ширина валика наплавленного металла уменьшается на 20 %...60 %, и геометрия проплавления имеет более узкую форму по оси шва [8, 9, 34, 35, 40, 43, 47].

4. Установлено, что в основном металле вблизи линии сплавления отсутствует крупная пластинчатая закалочная структура, характеризующаяся повышенной твердостью, низкой пластичностью и практически полным отсутствием диффузионной подвижности водорода. Исследование механических характеристик наплавленного металла показывает повышение значений относительного удлинения на 30 % и ударной вязкости на 5 %...15 %. Снижается неравномерность распределения твердости вблизи линии сплавления в ЗТВ, что благоприятно сказывается на повышении стойкости материала к образованию трещин по замедленному механизму разрушения. Испытания технологических проб показали отсутствие трещин, что свидетельствует об эффективности предлагаемых в работе решений [2, 10, 21, 50].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработана технология дуговой сварки высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 , позволяющая обеспечить повышение стойкости сварных соединений против образования трещин, индуцированных диффузионным водородом и возникающих по замедленному механизму разрушения.

2. Разработаны принципиальная схема и конструкция, а также изготовлено устройство для получения трехкомпонентной газовой защитной смеси Ar + CO_2 + SF_6 с последовательным смешиванием компонентов, что позволяет обеспечить ввод галогенида SF_6 с объемной долей в диапазоне значений 0,25 %...3 %.

3. Работа выполнялась в связи с прямой потребностью производства и необходимостью разработки решений по снижению склонности сварных соединений к образованию холодных трещин на ОАО «БЕЛАЗ» (г. Жодино), ОАО «БЕЛАЗ» «Управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» – «Строммашина» (г. Могилев) в сварных соединениях элементов платформ самосвалов карьерной техники; сварных соединений «овоидных» стрел нового типа автокранов МАЗ производства завода «Могилевтрансмаш» ОАО «МАЗ» управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ» и др. Результаты работы внедрены в производство на ОАО «БЕЛАЗ» «Управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» – «Строммашина» (г. Могилев).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах

1. Коротеев, А. О. Технологические характеристики дуговой сварки с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой среды / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. П. Куликов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2019. – № 2 (63). – С. 14–22.
2. Коротеев, А. О. Особенности дуговой сварки высокопрочных низколегированных сталей с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой смеси / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. П. Куликов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – № 1 (66). – С. 46–57.
3. Фетисова, Е. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.
4. О потерях электродного металла при дуговой сварке с модификацией защитной атмосферы газообразными галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева, В. П. Куликов, А. А. Лопатина, В. Д. Долгая // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 97–106.
5. Технологические особенности выбора значений параметров режима дуговой сварки в защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ / А. О. Коротеев, Н. М. Шукан, Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева // Наука и техника. – 2023. – № 22 (4). – С. 269–277.
6. Особенности переноса электродного металла при дуговой сварке и наплавке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 ($Ar + CO_2 + SF_6$) / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. А. Лопатина, В. Д. Долгая // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 25–34.
7. Коротеев, А. О. Особенности перехода легирующих элементов через дуговой промежуток в условиях модификации защитной газовой среды $Ar + CO_2$ галогенидом SF_6 / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 14–25.
8. Особенности проплавления основного металла при дуговой наплавке и сварке с модификацией защитной газовой среды галогенидом SF_6 ($Ar + CO_2 + SF_6$) / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. В. Пятакова, М. М. Мирончик, А. А. Коротеева, В. Д. Долгая // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (83). – С. 77–87.
9. Технологические особенности плавления присадочной проволоки при дуговой сварке и наплавке с введением SF_6 / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, С. Г. Паршин, А. А. Коротеева // Наука и техника. – 2024. – № 23 (4). – С. 380–389.
10. Механические характеристики наплавленного металла при дуговой сварке высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой среды

газообразным флюсом SF₆ / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. В. Клименкова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1 (86). – С. 23–31.

11. Оценка эффективности применения фторсодержащих газовых флюсов для связывания водорода в защитной газовой атмосфере при сварке и наплавке в соединения HF / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, С. Г. Паршин, А. И. Ляпин, В. П. Куликов, А. А. Коротеева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 2 (87). – С. 43–53.

Материалы конференций

12. Фетисова, Е. А. Перспективы применения нанодисперсных добавок в составе защитного газа при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 171.

13. Коротеев, А. О. Межваликовые несплавления при дуговой сварке в защитных газовых смесях на основе аргона / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. П. Куликов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 164.

14. Фетисова, Е. А. Перспективные технологии управления переносом электродного металла при дуговой сварке в среде защитных газов / Е. А. Фетисова, В. П. Куликов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 96.

15. Коротеев, А. О. Дуговая сварка с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой среды / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. П. Куликов // Машиностроение и металлообработка: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Ин-т технологии металлов Нац. акад. наук Беларуси, Администрация свобод. экон. зоны «Могилев», Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 40–42.

16. Фетисова, Е. А. Применение газообразных галоидных соединений в составе защитной газовой атмосферы при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 165.

17. Фетисова, Е. А. Влияние напряжения на частоту переноса электродного металла при дуговой сварке с введением газообразных галоидных соединений в защитную газовую атмосферу / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы

Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2020. – С. 104.

18. Фетисова, Е. А. Влияние гексафторида серы в составе газовой защитной атмосферы при дуговой сварке на содержание водорода в наплавленном металле / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2021. – С. 174.

19. Фетисова, Е. А. Влияние введения гексафторида серы в защитную атмосферу при сварке на уровень дефектности сварного шва / Е. А. Фетисова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2021. – С. 101.

20. Фетисова, Е. А. Особенности дуговой сварки и наплавки с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всерос. нац. науч. конф. молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апр. 2022 г. : в 4 ч. / Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т; редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре, 2022. – С. 89–90.

21. Фетисова, Е. А. Влияние введения гексафторида серы в состав защитной газовой атмосферы на значения ударной вязкости сварных соединений / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 192.

22. Коротеева, А. А. Применение газообразных галоидных соединений в составе защитной атмосферы при сварке высокопрочных сталей / А. А. Коротеева, Е. А. Фетисова // 58-я студенч. науч.-техн. конф. Белорус.-Рос. ун-та: материалы конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 93.

23. Фетисова, Е. А. Перспективы применения галоидных соединений в составе защитной газовой атмосферы при дуговой сварке / Е. А. Фетисова // I Респ. форум молодых ученых учреждений высшего образования : сб. материалов / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Е. Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 75–76.

24. Фетисова, Е. А. Технология дуговой сварки с введением модифицирующих газовых компонентов в защитную атмосферу / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. / М-во

образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: М. В. Нерода [и др.]. – Брест, 2022. – С. 175–178.

25. Фетисова, Е. А. К вопросу о несплавлениях при дуговой сварке в защитных газах / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 86–87.

26. Установка для смешивания трехкомпонентной защитной газовой среды при сварке / Е. А. Фетисова, Н. А. Шукан, А. А. Коротеева, А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 88.

27. Особенности аддитивного синтеза изделий с контролем тепловложения в основной материал / Н. М. Шукан, Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 89.

28. Фетисова, Е. А. Технология дуговой сварки с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 19–21.

29. Фетисова, Е. А. Получение материалов дуговым аддитивным синтезом с введением модифицирующих компонентов / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, Н. М. Шукан // Перспективные машиностроительные технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Advanced Engineering). – Санкт-Петербург, 2022. – С. 477–480.

30. Фетисова, Е. А. Влияние введения гексафторида серы в состав газовой защитной среды на потери электродного металла / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, Н. М. Шукан // Инновации в машиностроении: тез. докл. XIII науч.-практ. конф. / Алтайский гос. техн. ун-т. – Барнаул, 2022. – С. 143–145.

31. Коротеев, А. О. Дуговая сварка с функциональной модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т, Белорус. нац. техн. ун-т, С.-Петерб. политехн. ун-т Петра Великого, Объед. ин-т проблем информатики НАН Беларуси ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 112–118.

32. Фетисова, Е. А. Перспективы применения галогенидных газообразных соединений при дуговой сварке и наплавке / Е. А. Фетисова // XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства, Минск, 12–16 дек. 2022 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2023. – С. 85–88.

33. Фетисова, Е. А. Содержание серы в наплавленном металле при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы SF₆ / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2023. – С. 203–204.

34. Шукан, Н. М. Влияние модификации защитной атмосферы галогенидом SF₆ на характеристики дугового разряда при сварке / Н. М. Шукан, Е. А. Фетисова, И. И. Цыганков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2023. – С. 212.

35. Фетисова, Е. А. Влияние трехкомпонентной защитной газовой среды на форму и размеры шва при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2023. – С. 205.

36. Фетисова, Е. А. Анализ актуальных проблем возникновения трещин в сварных конструкциях на предприятиях машиностроительной отрасли / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева // Машиностроительные технологические системы: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (METS-2023) / Донской гос. техн. ун-т; под ред. В. А. Лебедева. – Ростов н/Д, 2023. – С. 512–514.

37. Коротеева, А. А. О некоторых проблемах при сварке в смесях защитных газов стали А 335 GRADE P91 / А. А. Коротеева, Е. А. Фетисова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2023. – С. 87.

38. Фетисова, Е. А. Перспективы применения галогенидных газообразных соединений при дуговой сварке порошковой проволокой / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. А. Лопатина // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2023. – С. 95.

39. Коротеев, А. О. Особенности переноса электродного металла при дуговой сварке в условиях модификации защитной среды SF₆ / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. Д. Долгая // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ.

Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 159.

40. Фетисова, Е. А. Влияние гексафторида серы в составе защитной газовой среды на ширину валика наплавленного металла / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, В. Д. Долгая // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 174.

41. Частота коротких замыканий при дуговой сварке и наплавке с модификацией защитной газовой среды SF₆ / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева, В. Д. Долгая // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 175.

42. Фетисова, Е. А. Особенности сварки легированных сталей со специальными свойствами / Е. А. Фетисова, А. Г. Лупачёв, И. И. Цыганков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 176–177.

43. Фетисова, Е. А. Дуговая аддитивная наплавка изделий из алюминиевых сплавов с управлением тепловложением и модификацией защитной газовой атмосферы SF₆ / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. А. Лопатина // E.R.A. – Современная наука: электроника, робототехника, автоматизация: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель 29 февр. 2024 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого [и др.]; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2024. – С. 108–110.

44. Фетисова, Е. А. Технологические особенности протекания процессов дуговой сварки и наплавки с модификацией защитной газовой среды галогенидным соединением / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // I Междунар. молодеж. науч.-культур. форум студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 5–7 марта 2024 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого [и др.]; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2024. – С. 108.

45. Химический состав наплавленного металла при дуговой сварке с модифицированной защитной газовой средой / Е. А. Фетисова, Н. В. Попов, Д. В. Кутневич, В. Д. Долгая // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2024. – С. 26–29.

46. Фетисова, Е. А. Технологические характеристики дуговой сварки с модифицированной газовой средой / Е. А. Фетисова // Новые материалы,

оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 14–16.

47. Коротеева, А. А. Применение газовых флюсов для управления технологическими и металлургическими характеристиками процесса дуговой сварки / А. А. Коротеева, Е. А. Фетисова, В. Д. Долгая // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 98.

48. Фетисова, Е. А. Влияние модификации защитной газовой атмосферы SF_6 на механические характеристики наплавленного металла / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, К. Н. Сердюкова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 105.

49. Фетисова, Е. А. О моделировании поведения компонентов в газовой атмосфере при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, И. А. Лисовая // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2025. – С. 193–194.

50. Механические характеристики наплавленного металла при сварке высокопрочной стали с модификацией защитной газовой среды SF_6 / Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. О. Коротеев, М. А. Сиваков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2025. – С. 192.

51. Фетисова, Е. А. Пути снижения содержания серы в наплавленном металле при дуговой сварке в среде защитных газов / Е. А. Фетисова, В. Д. Долгая, А. В. Клименкова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2025. – С. 191.

52. Коротеева, А. А. О причинах снижения массовой доли углерода в наплавленном металле при сварке с модификацией защитной газовой среды SF_6 / А. А. Коротеева, В. Д. Долгая, Е. А. Фетисова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2025. – С. 179.

РЭЗЮМЭ
Фяціса Кацярына Анатольеўна

**Тэхналогія дугавой зваркі высокатрываальных сталей з мадыфікацыяй
ахоўнай газавай атмасферы галагенідным злучэннем**

Ключавыя слова: дугавая зварка ў асяроддзі ахоўных газаў, высокатрываальная сталь, мадыфікацыя ахоўнай газавай атмасфери, гексафтарыд серы, трэшчыны ў зварных злучэннях, дыфузійны вадарод

Мэта працы: павышэнне эксплуатацыйных характарыстык зварных злучэнняў з высокатрываалай сталь шляхам зніжэння колькасці дыфузійнага вадароду ў наплаўленым метале і распрацоўка спосабаў кіравання тэхнагічнымі параметрамі працэсу дугавой зваркі пры дапамозе мадыфікацыі ахоўнай газавай сумесі $Ar + CO_2$ галагенідам SF_6 .

Методы даследавання: тэрмадынамічнае мадэляванне, тэарэтычныя і эксперыментальныя даследаванні, механічныя выпрабаванні, спектральны оптыка-эмісійны аналіз, металаграфічныя даследаванні.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: тэарэтычна ўстаноўлены і эксперыментальна даследаваны механізм інтэнсіфікацыі металургічных працэсаў пры дугавой зварцы, які заключаецца ў мадыфікацыі ахоўнай газавай сумесі $Ar + CO_2$ галагенідам SF_6 , што дазваляе не толькі стварыць умовы для эфектуўнага звязвання вадароду ў атмасфери дугі ў злучэнні NF і знізіць з дапамогай гэтага адчувальнасць зварных злучэнняў да вадароднай крохкасці, але і павысіць эфектуўнасць выкарыстання цеплавой магутнасці дугавога разраду шляхам сціскання слупа дугі прадуктамі высокатэмпературнай дысацыяцыі SF_6 , павысіўшы глыбіню праплаўлення асноўнага металу і забяспечыўшы фарміраванне патрабуемай мікраструктуры і комплексу эксплуатацыйных характарыстык злучэння. Устаноўлены залежнасці частаты пераносу электроднага металу, каэфіцыента страт і геаметрычных характарыстык праплаўлення асноўнага металу ад значэнняў параметраў рэжыму зваркі і складу ахоўнай атмасфери, якія дазволілі вызначыць эфектуўную колькасць уведзенага ў склад ахоўнай газавай сумесі $Ar + CO_2$ галагеніду SF_6 з пункту гледжання забеспячэння патрабуемага комплексу механічных характарыстык. Распрацаваны спосабы стрымлівання росту масавай долі серы ў наплаўленым метале.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: распрацаваная тэхналогія можа быць прыменена для зваркі нізкавугляродзістых нізкалегіраваных высокатрываальных сталей, зносстойкіх сталей павышанай цвёрдасці з тэрмамеханічным умацоўваннем і іншых матэрыялаў, якія маюць у зоне тэрмічнага ўплыву ўчастак загартавачных структур, які з'яўляецца фактарам, што тармозіць дыфузію вадароду праз лінію сплаўлівання і, як вынік, спрыяе ўтварэнню і развіццю халодных трэшчын.

Вобласць выкарыстання: вынікі дысертацыйных даследаванняў могуць быць выкарыстаны пры вырабе зварных металаканструкцый са сталей, якія валодаюць высокай адчувальнасцю да дыфузійнага вадароду, спосабамі дугавой зваркі ў асяроддзі ахоўных газаў плаўкім электродам.

РЕЗЮМЕ
Фетисова Екатерина Анатольевна

Технология дуговой сварки высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением

Ключевые слова: дуговая сварка в среде защитных газов, высокопрочные стали, модификация защитной газовой атмосферы, гексафторид серы, трещины в сварных соединениях, диффузионный водород

Цель работы: повышение эксплуатационных характеристик сварных соединений из высокопрочной стали путем снижения количества диффузионного водорода в наплавленном металле и разработка способов управления технологическими параметрами процесса дуговой сварки посредством модификации защитной газовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ галогенидом SF_6 .

Методы исследования: термодинамическое моделирование, теоретические и экспериментальные исследования, механические испытания, спектральный оптико-эмиссионный анализ, металлографические исследования.

Полученные результаты и их новизна: теоретически установлен и экспериментально исследован механизм интенсификации metallургических процессов при дуговой сварке, заключающийся в модификации защитной газовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ галогенидом SF_6 , что позволяет не только создать условия для эффективного связывания водорода в атмосфере дуги в соединения HF и снизить посредством этого чувствительность сварных соединений к водородной хрупкости, но и повысить эффективность использования тепловой мощности дугового разряда путем сжатия столба дуги продуктами высокотемпературной диссоциации SF_6 , повысив глубину проплавления основного металла и обеспечив формирование требуемой микроструктуры и комплекса эксплуатационных характеристик соединения. Установлены зависимости частоты переноса электродного металла, коэффициента потерь и геометрических характеристик проплавления основного металла от значений параметров режима сварки и состава защитной атмосферы, позволившие определить эффективное количество вводимого в состав защитной газовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ галогенида SF_6 с точки зрения обеспечения требуемого комплекса механических характеристик. Разработаны способы сдерживания роста массовой доли серы в наплавленном металле.

Рекомендации по использованию: разработанная технология применима для сварки низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей, износостойких сталей повышенной твердости с термомеханическим упрочнением и других материалов, имеющих в зоне термического влияния участок закалочных структур, являющийся фактором, тормозящим диффузию водорода через линию сплавления и, как следствие, способствующим образованию и развитию холодных трещин.

Область применения: результаты диссертационных исследований могут быть использованы при изготовлении сварных металлоконструкций из сталей, обладающих высокой чувствительностью к диффузионному водороду, способами дуговой сварки в среде защитных газов плавящимся электродом.

SUMMARY

Fiatsisava Katsiaryna Anatoljeuna

Arc welding technology of high-strength steels with modification of the shielding gas by a halide compound

Keywords: gas shielded arc welding, high-strength steels, shielding gas modification, sulfur hexafluoride, cracks in welded joints, diffusive hydrogen

The objective of the research: to improve the operational characteristics of welded joints made of high-strength steel by reducing the amount of diffusive hydrogen in the deposited metal and to develop methods for controlling the technological parameters of the arc welding process by modifying the shielding gas mixture $\text{Ar} + \text{CO}_2$ with SF_6 halide.

Research methods: thermodynamic modeling, theoretical and experimental studies, mechanical tests, spectral optical emission analysis, metallographic studies.

The results obtained and their novelty: the mechanism of intensification of metallurgical processes in arc welding has been theoretically determined and experimentally investigated, it implies the modification of the shielding gas mixture $\text{Ar} + \text{CO}_2$ with SF_6 halide, which allows not only to create conditions for the effective binding of hydrogen in the shielding gas into HF compounds and thereby reduce the sensitivity of welded joints to hydrogen brittleness, but also to increase the efficiency of using the thermal power of the arc discharge by compressing the arc column with high-temperature SF_6 dissociation products, increasing the depth of penetration in the base metal and ensuring the formation of the required microstructure and a number of operational characteristics of the joint. The dependences of the frequency of transfer of the electrode metal, the loss coefficient and the geometric characteristics of the penetration of the base metal on the values of the welding mode parameters and the shielding gas composition were established, which made it possible to determine the effective amount of SF_6 halide introduced into the shielding gas mixture $\text{Ar} + \text{CO}_2$ from the point of view of providing the required number of mechanical characteristics. The techniques to control the growth of the mass fraction of sulfur in the deposited metal have been developed.

Recommendations for use: the developed technology is applicable for welding low-carbon low-alloy high-strength steels, wear-resistant steels of increased hardness with thermomechanical hardening and other materials, having a section of quenched structures in the heat-affected zone, which is a factor inhibiting the diffusion of hydrogen through the fusion line and, as a result, contributing to the initiation and propagation of cold cracks.

Scope of application: the results of the dissertation research can be used in the manufacture of welded metal structures using steels with high sensitivity to diffusive hydrogen by gas shielded arc welding with a melting electrode.



**Фетисова
Екатерина Анатольевна**

**ТЕХНОЛОГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ
С МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ
ГАЛОГЕНИДНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.- изд. л. . Тираж 60 экз. Заказ № .

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.