

УТВЕРЖДАЮ

Директор государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларусь»,
доктор физико-математических наук

В. Г. Залесский

«20» ноября 2025 г.



ОТЗЫВ ОППОНИРУЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Фетисовой Екатерины Анатольевны «Технология дуговой сварки высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа Фетисовой Е.А. посвящена важной и актуальной для современного машиностроения проблеме – повышению эксплуатационных характеристик сварных соединений металлоконструкций, выполненных из высокопрочных сталей, склонных к образованию так называемых холодных трещин. Это является одной из серьезных проблем, обусловленных наличием в металле диффузионного водорода.

Поиск металлургических способов управления содержанием диффузионного водорода в металле шва является одной из классических и наиболее сложных задач в сварочном производстве. Работа Е. А. Фетисовой направлена на решение этой задачи путем управления физико-химическими процессами в дуговом промежутке путём модификации защитной газовой среды галогенидным соединением.

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.

По решаемым задачам, содержанию и основным выводам диссертация Фетисовой Е.А. «Технология дуговой сварки высокопрочных сталей с

модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением» соответствует отрасли наук – технические. Положения, выносимые на защиту, соответствуют областям исследований, предусмотренным паспортом специальности 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии», по которой она представлена к защите.

Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости

Научный вклад соискателя состоит в реализации механизма связывания водорода в атмосфере сварочной дуги в нерастворимые в жидким металле химические стойкие соединения HF путем введения в защитную смесь Ar (82 об. %) + CO₂ (18 об. %) газообразного модификатора SF₆, что снижает содержание диффузионного водорода в металле шва и зоне термического влияния сварного соединения и, как следствие, вероятность образования холодных трещин, повышая тем самым работоспособность металлоконструкций.

В работе исследованы технологические характеристики процесса дуговой сварки, механические свойства сварного соединения и наплавленного металла, проведено термодинамическое моделирование поведения водородсодержащих компонентов при нагреве трёхкомпонентной защитной газовой среды Ar (82 %) + CO₂ (18 %) + SF₆, проведены экспериментальная оценка содержания водорода в наплавленном металле и испытания технологических проб на сопротивляемость сталей образованию холодных трещин.

Проведенный комплекс исследований и совокупность полученных и обоснованных результатов позволили решить поставленную научную задачу диссертационной работы. Задача заключалась в разработке комплекса технологических приемов дуговой сварки с модификацией защитной газовой среды галогенидным соединением SF₆. Это позволило снизить чувствительность сталей к диффузионному водороду путем связывания его в атмосфере дуги в нерастворимые в жидким металле сварочной ванне стойкие химические соединения, обеспечить требуемые механические свойства и эксплуатационные характеристики сварного соединения.

Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Фетисовой Е.А. может быть присуждена ученая степень кандидата технических наук по специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии» за научно-обоснованные результаты, включающие:

– результаты термодинамического моделирования протекания реакций связывания водорода в химические соединения HF при нагреве трёхкомпонентной защитной газовой среды Ar + CO₂ + SF₆, на основании которых установлено, что наличие в среде газообразного SF₆ позволяет снизить

содержание водорода в наплавленном металле путем связывания его в атмосфере дуги в нерастворимые в жидким металле сварочной ванне соединения HF в температурном диапазоне от 1000 до 3000 К;

– результаты экспериментальных исследований технологических характеристик процесса сварки, включающих частоту переноса электродного металла, коэффициент потерь, зависимостей геометрических характеристик проплавления основного металла от значений параметров режима и состава защитной атмосферы, что по совокупности полученных результатов позволило определить наиболее эффективные соотношения между значениями параметров режима;

– разработку способов сдерживания роста массовой доли серы в наплавленном металле, заключающихся в сварке и наплавке на пониженных значениях напряжения на дуге, повышении окислительного потенциала защитной атмосферы за счет увеличения объемной доли CO_2 в ней, а также применении сварочных присадочных проволок с повышенным содержанием марганца;

– установленные зависимости значений механических свойств наплавленного металла и сварного соединения от состава защитной газовой среды, позволившие определить оптимальное содержание SF_6 , вводимого в состав газовой смеси Ar (82 %) + CO_2 (18 %), с точки зрения обеспечения требуемого комплекса механических характеристик.

Научная значимость полученных результатов заключается в установлении закономерностей эффективного действия различных объемных долей газообразного модификатора SF_6 в составе защитной атмосферы 82 % Ar + 18 % CO_2 на физико-химические, металлургические и технологические характеристики процесса сварки, а также разработке металлургического механизма снижения объемной доли диффузионного водорода в наплавленном металле путем модификации защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 .

Практическая значимость полученных результатов исследований заключается в разработке комплекса технологических приемов дуговой сварки в среде защитных газов, направленного на решение одной из главных проблем при сварке высокопрочных сталей – образование холодных трещин, что напрямую повышает надежность и безопасность эксплуатации сварных металлоконструкций. Для реализации предложенного комплекса приемов разработаны технологические рекомендации и конструкция установки для получения трехкомпонентной газовой защиты $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$.

Практическая значимость результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы, подтверждена актом внедрения в производство в ОАО «БЕЛАЗ» «Управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» – «Строммашина» (г. Могилев), а также подписанием соглашения о сотрудничестве с ОАО «КРИОН».

Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Диссертационная работа Фетисовой Е. А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача повышения эксплуатационной надежности сварных соединений высокопрочных сталей. Работа выполнена на высоком научном уровне и имеет большое научное и практическое значение. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой квалификации соискателя и дальнейшей перспективности разработок в области дуговой сварки.

Научные положения и выводы, изложенные в работе, соискатель получила лично или внесла определяющий вклад, они аргументированы теоретически и подтверждены экспериментально.

Диссертация Фетисовой Е.А. отвечает требованиям п. 20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Автореферат диссертации и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертационной работы и раскрывают вопросы актуальности, научной новизны, практической значимости выполненной работы. Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждаются использованием комплекса современных, апробированных на практике, методик исследований и не вызывают сомнения.

Научные результаты, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 9 статьях, включенных в перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь, 2 статьях, входящих в перечень изданий Web of Science, в 6 статьях и 34 тезисах докладов на Международных научно-технических и научно-практических конференциях. Опубликованность материалов диссертации соответствует требованиям ВАК Республике Беларусь. Все полученные выводы подтверждены ссылками на работы автора.

Диссертационная работа представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, обладающую научной новизной и высокой практической значимостью, а научная квалификация Фетисовой Е. А. соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Республики Беларусь к соискателям ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии», по которой она представлена к защите.

Рекомендации по использованию результатов диссертации, которые могут найти практическое применение

Разработанный в диссертационной работе комплекс технологических приемов дуговой сварки с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным

соединением SF₆ может быть использован на машиностроительных предприятиях, выпускающих сварные металлоконструкции из сталей, склонных к образованию трещин, а также выполняющих их ремонтные работы, с использованием дуговой сварки в среде защитных газов.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе не рассмотрен вопрос о том, как наличие серы в сварных соединениях, даже в допустимых пределах (0,025 %–0,03 %), влияет на их качество.

2. Гексафторид серы при высоких температурах образует высокотоксичные соединения, в том числе фтористый водород (HF). Недостаточно раскрыты практические требования к организации рабочего места сварщика, системам вентиляции и средствам индивидуальной защиты, что критически важно при внедрении.

3. Из работы следует, что для достижения различных целей оптимальны разные объемные доли SF₆ в составе защитной газовой среды 82 % Ar + 18% CO₂: для снижения объемной доли водорода в металле достаточно 0,25 %, а для максимального эффекта сжатия дуги и роста глубины проплавления основного металла – до 1-2%. Не до конца ясно, какое содержание SF₆ является оптимальным для получения совокупности требуемых свойств.

4. В экспериментальных исследованиях использованы сталь Magstrong H500 (позиционируемая как высококачественная, прочная и износостойкая) и сварочная проволока ESAB OK Aristorod 69 (Швеция). Непонятно, почему при применении таких качественных материалов в среде Ar + CO₂ на образцах образуются трещины? Возникают ли такие дефекты при всех режимах дуговой сварки в «традиционной» смеси через 12 ч после завершения сварки указанной стали и остывания до комнатной температуры?

Заключение

Диссертация Фетисовой Е. А. на тему «Технология дуговой сварки высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением», является законченной научной работой и соответствует требованиям п. 20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии».

Фетисова Е. А. заслуживает присуждение ей степени кандидата технических наук по специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии» за совокупность новых научно-обоснованных результатов, теоретических и экспериментальных исследований, включающих:

– теоретически обоснованный и экспериментально подтвержденный механизм связывания водородсодержащих компонентов в атмосфере дуги при сварке и

наплавке в нерастворимые в жидким металле соединения HF в диапазоне температур от 1000 до 3000 К путем введения в состав традиционно используемой защитной газовой смеси Ar (82 %) + CO₂ (18 %) газообразного модификатора SF₆, что обеспечивает снижение объемной доли диффузионного водорода в наплавленном металле в 2 и более раз;

– установленные зависимости характера переноса электродного металла от значений параметров режима сварки и состава защитной газовой среды (Ar + CO₂ + SF₆), позволившие повысить частоту коротких замыканий дугового промежутка до 20 % по сравнению с традиционной технологией сварки и наплавки в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂, что благоприятно сказывается на стабильности процесса и минимизации потерь электродного металла;

– экспериментально установленные зависимости содержания элементов-раскислителей (Mn и Si) в наплавленном металле от объемной доли вводимого SF₆ в защитную газовую смесь 82 % Ar + 18 % CO₂ и значений скорости подачи присадочной проволоки, а также напряжения на дуге, обеспечивающие снижение их высокотемпературных потерь в зоне горения дуги и способствующие росту в металле массовой доли Si на 30-32 % и Mn на 8-10 %;

– экспериментальные результаты изучения механических свойств наплавленного металла и зоны термического влияния от напряжения сварочной дуги и содержания SF₆ в защитной газовой атмосфере, позволившие установить, что с увеличением объемной доли SF₆ в газовой атмосфере с 0,25 до 2 % в наплавленном металле наблюдается трехкратное снижение массовой доли углерода, способствующее повышению до 30 % значения относительного удлинения и на 5-15 % ударной вязкости наплавленного металла и зоны термического влияния, по сравнению с использованием для наплавки защитной смеси 82 % Ar + 18 % CO₂;

– разработанные и экспериментально подтверждённые способы сдерживания роста массовой доли серы в наплавленном металле (до 2 раз), заключающиеся в сварке и наплавке на пониженных более чем на 2-4 В значениях напряжения на дуге (в зависимости от используемых присадочных материалов) и повышении окислительного потенциала защитной смеси путем изменения соотношения между объемными долями Ar и CO₂, а также применение сварочных проволок с повышенным содержанием марганца;

– установленные зависимости геометрических характеристик проплавления основного металла от значений параметров режима сварки и состава защитной газовой смеси, позволяющие увеличить глубину проплавления на 20–30 % при одновременном сужении ширины валика наплавленного металла на 20–60 %, что обеспечивает сокращение ширины зоны закалочной структуры в основном металле вследствие эффективного ввода тепловой энергии в него,

что по совокупности позволило разработать комплекс технологических приемов дуговой сварки с модификацией защитной газовой среды галогенидным соединением SF₆, позволяющей снизить чувствительность сталей к диффузионному водороду путем связывания его в атмосфере дуги в нерастворимые в жидким металле сварочной ванне стойкие химические соединения и обеспечивающей требуемые механические свойства и эксплуатационные характеристики сварного соединения.

Эксперт от оппонирующей организации назначен приказом директора государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларусь» № 140 от 12 ноября 2025 г.

Доклад соискателя и проект отзыва на диссертационную работу Е.А. Фетисовой рассмотрены на расширенном заседании секции "Технологическая", протокол № 3 от 20 ноября 2025 г.

В работе научного семинара приняли участие 18 научных сотрудников, из них 18 с ученой степенью, в том числе 7 докторов наук и 11 кандидатов наук.

Соискатель выступила с докладом и ответила на заданные ей вопросы. Состоялось обсуждение доложенных результатов исследований и проекта отзыва оппонирующей организации, подготовленного экспертом.

Результаты открытого голосования участников семинара, имеющих ученые степени, относительно принятия отзыва по диссертационной работе и по вопросу присуждения Фетисовой Е.А. ученой степени кандидата технических наук: «за» – 18, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Председатель научного семинара, академик



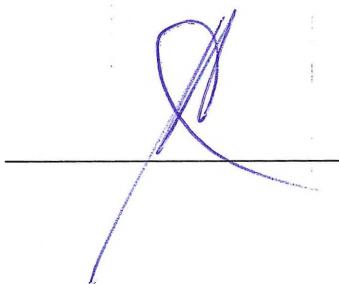
А.П. Ласковнев

Секретарь секции, кандидат технических наук



О.И. Посылкина

Эксперт по диссертации, доктор технических наук, профессор



И.Л. Поболь