

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию
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»

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа Фетисовой Е. А. посвящена разработке технологии дуговой сварки с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением высокопрочных сталей, обладающих высокой чувствительностью к диффузионному водороду, что является одной из серьёзных проблем при выполнении сварки таких сталей.

Данная тематика относится к техническим наукам и соответствует специальности 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии».

Положения, выносимые на защиту, соответствуют областям исследований, предусмотренным паспортом специальности 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии», утвержденным приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 27 марта 2017 г. № 67:

- п. 1. Физико-химические процессы в сварочных источниках энергии – дуге, плазме, электронном, световом и лазерном луче, взрывчатом веществе.
- п. 2. Металлургические процессы в сварочной ванне, формирование сварных соединений, в том числе при сварке давлением.
- п. 3. Физико-химические процессы, фазовые и структурные превращения в материалах при сварке и родственных технологиях.
- п. 4. Технологические основы сварки плавлением и давлением (в том числе сварки трением с перемешиванием, сварки взрывом) и родственных технологий.
- п. 6. Разработка и создание новых материалов для сварки и родственных процессов и оборудования для их производства.

2. Актуальность темы диссертации

На машиностроительных предприятиях Республики Беларусь в настоящее время наблюдается рост объёмов применения высокопрочных сталей, что диктуется требованиями к снижению металлоемкости конструкций при сохранении их прочностных характеристик.

Обеспечение надежности сварных соединений из высокопрочных сталей, в частности борьба с водородным охрупчиванием, приводящим к образованию опасного дефекта сварных соединений в виде холодных трещин, на сегодняшний день является одной из сложных и до конца нерешённых задач.

Одним из известных методов борьбы с водородом в металле является связывание его в нерастворимые в жидким металле стойкие химические соединения HF. Такие решения находят применение в технологических процессах сварки при использовании сварочных материалов, основу которых составляют фтористо-кальциевые добавки, например, во флюсах, порошковых проволоках и т.д. При этом наиболее распространённым способом сварки для получения неразъёмных соединений на сегодняшний день является дуговая сварка в среде защитных газов проволокой сплошного сечения. Однако данный способ сварки лишен возможности применения фтористо-кальциевых добавок через присадочные сварочные материалы в силу возникающих сложностей в реализации такого решения.

Поэтому перспективным и актуальным является использование фторсодержащих компонентов, вводимых в защитную газовую атмосферу при дуговой сварке. Именно этому направлению посвящена диссертационная работа Фетисовой Е. А.

3. Степень новизны полученных в диссертации результатов и научных положений, выносимых на защиту

1. Впервые получены результаты термодинамического моделирования, позволившие установить возможность образования стойких химических соединений HF в атмосфере дуги посредством связывания водорода фтором при нагреве трехкомпонентной защитной газовой среды 82 % Ar + 18 % CO₂ + SF₆.

2. Установлены наиболее эффективные соотношения между значениями параметров режима сварки в условиях модификации защитной газовой атмосферы 82 % Ar + 18 % CO₂ галогенидным соединением SF₆, обеспечивающих стабилизацию процесса сварки, заключающуюся в характере переноса электродного металла (переход к струйному переносу), снижении значений коэффициента его потерь и улучшении геометрических характеристик проплавления основного металла.

3. Установлен и научно обоснован рациональный диапазон объёмных долей галогенидного модификатора SF₆ в составе защитной газовой атмосферы, что позволило улучшить механические характеристики и эксплуатационные свойства сварных соединений.

4. Разработаны и экспериментально подтверждены механизмы сдерживания роста массовой доли серы в наплавленном металле

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе, подтверждается результатами, которые получены автором в ходе проведения теоретических и экспериментальных исследований с использованием современных проверенных технических средств, а также апробированных методик исследований.

Выводы в работе сформулированы четко, в логической последовательности и аргументированы.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

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 технологий 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 работы 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).

Научная значимость результатов работы состоит в раскрытии механизма и разработке способа снижения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле сварных соединений сталей, склонных к водородному охрупчиванию, при дуговой сварке в среде защитных газов путем модификации газовой среды галогенидным соединением SF₆, а также в установлении закономерностей влияния различных объемных долей этого модификатора в составе защитной атмосферы на физико-металлургические и технологические характеристики процесса сварки.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке технологии дуговой сварки с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF₆, обеспечивающей требуемые механические свойства и эксплуатационные характеристики сварного соединения с низкой чувствительностью к диффузионному водороду.

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

Экономическая значимость результатов работы заключается в повышении работоспособности сварных металлоконструкций путем предотвращения образования опасного дефекта сварных соединений в виде холодных трещин, индуцированных водородным охрупчиванием, что может привести к выходу из строя изделия и последующему дорогостоящему ремонту.

Социальная значимость заключается в возможности использования материалов диссертационной работы в образовательных процессах, как теоретических, так и практических.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертации 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. Общее количество страниц опубликованных материалов – 182 страницы (10 авторских листов).

Опубликованность результатов диссертационной работы в полной мере удовлетворяет требованиям ВАК Республики Беларусь. Опубликованные работы полностью отражают содержание диссертационной работы и раскрывают вопросы актуальности, научной новизны, практической значимости выполненной работы.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК Республики Беларусь

Диссертационная работа Фетисовой Е. А. полностью соответствует требованиям ВАК РБ. Имеются все требуемые разделы. Основной материал и полученные результаты диссертационной работы изложены в пяти главах. Приведен список использованных источников в количестве 117 ссылок. Также автором диссертации использованы зарубежные источники литературы. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы, раскрывает вопросы актуальности, научной новизны и практической значимости работы.

8. Замечания по работе

1. В работе отсутствует сравнительный анализ предлагаемого соискателем метода снижения количества диффузионного водорода в наплавленном металле с другими методами, рекомендуемыми специалистами сварочного производства.

2. При исследовании ударной вязкости наплавленного металла сварных соединений было бы целесообразно использовать подходы механики разрушения и рассматривать особенности и механизм разрушения образцов на основе оценки процентного содержания в зоне разрушения вязкой составляющей.

3. Выводы соискателя о причинах снижения количества углерода в наплавленном металле за счет введения в состав защитной газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ газообразного модификатора – галогенидного соединения SF₆, экспериментально не подтверждены.

Указанные замечания не снижают значимость полученных в работе результатов и не влияют на общее положительное впечатление о диссертационной работе.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Научная квалификация Фетисовой Е. А. соответствует ученой степени кандидата наук, что подтверждается качеством изложения материала в диссертационной работе, количеством публикаций и участием автора в конференциях различного уровня, научным уровнем проведенных ею теоретических и экспериментальных исследований.

Соискатель ученой степени кандидата наук Фетисова Е. А. обладает высокой научной квалификацией и достойна присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии».

10. Заключение

Диссертация Фетисовой Екатерины Анатольевны является законченной научной работой и соответствует требованиям п. 20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий.

Фетисова Екатерина Анатольевна достойна присуждения ей ученой степени кандидата технических наук за выполнение комплекса научно-исследовательских работ, направленных на разработку технологии дуговой сварки высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением, включающего:

– разработанный на основе термодинамического моделирования и подтверждённый экспериментально механизм связывания водорода фтором в дуговом промежутке защитной газовой атмосферы, модифицированной галогенидным соединением SF₆, обеспечивающий формирование химически стойкого соединения HF, позволяющего за счет введения 0,25 % SF₆ в защитную газовую смесь 82 % Ar + 18 % CO₂, в два раза подавить образование водородсодержащих компонентов в диапазоне температур максимальной растворимости водорода в стали (1000...3000 K);

– установленные зависимости характера переноса электродного металла от значений параметров режима и состава защитной газовой среды, позволяющие повысить частоту коротких замыканий дугового промежутка до 20 % и обеспечивающие снижение значения ко-

эффективента потерь электродного металла до 0,02 при введении в защитную атмосферу 82 % Ar + 18 % CO₂ газообразного модификатора SF₆ в количестве от 0,5 % до 2,0 % (объемная доля);

– установленные закономерности снижения массовой доли углерода в наплавленном металле с повышением значения напряжения на дуге при введении SF₆ в защитную газовую смесь в объемной доле от 0,25 % до 2,0 %, позволяющие повысить значения относительного удлинения до 30 % и ударной вязкости наплавленного металла и зоны термического влияния на 5 %...15 % в отличие от наплавки, выполненной в защитной газовой среде 82 % Ar + 18 % CO₂;

– установленные закономерности роста массовой доли раскислителей (Mn и Si) в составе наплавленного металла в среднем на 30 %...32 % для Si и 8 %...10 % для Mn при значениях скорости подачи присадочной проволоки 3,7 и 5,3 м/мин и напряжении на дуге от 14 В до 24 В и введении газообразного модификатора гексафторида серы в традиционную смесь 82 % Ar + 18 % CO₂ в количестве 0,25 % до 2,0 % по объемной доле;

– разработанные технологические механизмы сдерживания роста массовой доли серы в наплавленном металле, заключающиеся в использовании при сварке пониженных значений напряжения на дуге (на 2...5 В относительно рекомендуемых значений и в зависимости от химического состава присадочной проволоки), сварочных проволок с повышенным содержанием Mn и регулировании окислительного потенциала защитной газовой смеси, обеспечивающие сдерживание роста массовой доли серы в наплавленном металле в 2 раза при введении SF₆ в состав защитной газовой атмосферы 82 % Ar + 18 % CO₂;

– установленные зависимости характера проплавления основного металла от параметров режима сварки и состава защитной газовой смеси, отличающейся от традиционно применяемой технологии сварки и наплавки высокопрочных материалов (82 % Ar + 18 % CO₂), введением в неё газообразного модификатора SF₆ объемной долей от 0,25 % до 2,0 %, позволяющие увеличить глубину проплавления на 20 %...30 % и снизить ширину валика наплавленного металла на 20 %...60 %, обеспечив тем самым сокращение зоны закалочной структуры посредством более эффективного ввода тепловой мощности в основной металл.

Официальный оппонент –
доцент кафедры «Технологии металлов»
Межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет», кандидат технических наук, доцент

И. М. Кузменко

