

## **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 жидком 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 % CO<sub>2</sub> + SF<sub>6</sub>.

2. Установлены наиболее эффективные соотношения между значениями параметров режима сварки в условиях модификации защитной газовой атмосферы 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> галогенидным соединением SF<sub>6</sub>, 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 объемных долей галогенидного модификатора SF<sub>6</sub> 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 поверенных 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 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 экономии 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 экономии 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  $\text{SF}_6$ , 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  $\text{SF}_6$ , 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 РФ. 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 % CO<sub>2</sub> газообразного модификатора – галогенидного соединения SF<sub>6</sub>, 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 подтвержденный экспериментально механизм связывания водорода фтором в дуговом промежутке защитной газовой атмосферы, модифицированной галогенидным соединением SF<sub>6</sub>, обеспечивающий формирование химически стойкого соединения HF, позволяющего за счет введения 0,25 % SF<sub>6</sub> в защитную газовую смесь 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>, 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-

эффициента потерь электродного металла до 0,02 при введении в защитную атмосферу 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> газообразного модификатора SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub> 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 % CO<sub>2</sub>;

– 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 % CO<sub>2</sub> 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 SF<sub>6</sub> в состав защитной газовой атмосферы 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>;

– 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 % CO<sub>2</sub>), введением в неё газообразного модификатора SF<sub>6</sub> 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

