

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

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представляется к защите.

В диссертационной работе соискателя Фетисовой Е.А. содержатся научно обоснованные результаты исследований процесса дуговой сварки сталей в среде защитной атмосферы с галогенидным соединением, позволяющего снизить количество водорода в сварном шве и, тем самым, снизить чувствительность наплавленного металла к водородной хрупкости. На основании вышеизложенного, содержание диссертационной работы соответствует технической отрасли наук и специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии». Область исследования диссертационной работы соответствует следующим пунктам паспорта указанной выше специальности: п. 1. Физико-химические процессы в сварочных источниках энергии – дуге, плазме, электронном, световом и лазерном луче, взрывчатом веществе. п. 3. Физико-химические процессы, фазовые и структурные превращения в материалах при сварке и родственных технологиях. п. 6. Разработка и создание новых материалов для сварки и родственных процессов и оборудования для их производства.

2. Актуальность темы диссертации

В настоящее время растет тенденция в применении для изготовления нагруженных сварных металлоконструкций низко- и среднеуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей, что диктуется технико-экономическими показателями и 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 образованию холодных трещин, недопустимого и наиболее опасного дефекта. Трещины возникают по механизму замедленного разрушения, что может быть вызвано наличием водорода в сварном соединении. Одним из способов снижения содержания водорода в металле шва является его связывание фтором в нерастворимые химически стабильные соединения. Как правило фтор вводят в составе соединений фтора в составе флюса, покрытия электродов или в составе шихты порошковой проволоки. В случае дуговой сварки в среде защитных газов можно использовать газообразные галогениды,

при их введении в состав защитного газа. В частности, в качестве газообразных галогенидов в работе был использован гексафторид серы (SF_6).

Актуальность выбранной темы диссертационной работы подтверждает её соответствие приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2021-2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь №156 от 07 мая 2020 года. (п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: машиностроение и машиноведение»).

Научные исследования по диссертационной работе проводились в соответствии с Планом государственной программы научных исследований на 2021–2025 годы (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 г. проводилась НИР с ОАО «140 Ремонтный завод» г. Борисов (Договор № Ц01.64 от 25.06.2024 г.) по разработке технологии сварки высокопрочных броневых сталей.

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

1. По результатам термодинамического моделирования установлено, что механизм связывания водорода фтором, образующимся в высокотемпературной области дугового промежутка в результате диссоциации вводимого в состав защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ гексафторида серы (SF_6), с формированием соединений NF , является эффективным в температурном диапазоне максимальной растворимости водорода в стали, что соответствует значениям от 1000 до 3000 К. Экспериментально подтверждено двухкратное снижение количества диффузионного водорода в наплавленном металле на основании

глицериновых проб образцов при введении в защитную газовую смесь 0,25 % SF₆.

2. Установлены закономерности частоты коротких замыканий дугового промежутка от значений параметров режима и состава защитной газовой среды (Ar + CO₂ + SF₆), позволяющие повысить частоту коротких замыканий до 20 % по сравнению с технологией сварки и наплавки в среде 82 % Ar + 18 % CO₂, что благоприятно сказывается на стабильности процесса и минимизации потерь электродного металла.

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, что объясняется уменьшением длины и мощности дуги, и, как следствие, снижением времени контактирования перегретой капли расплавленного металла на торце присадочной проволоки с омывающим его потоком защитной газовой смеси.

В наплавленном металле наблюдается активное снижение массовой доли углерода с повышением напряжения на дуге и объемной доли SF₆ в защитной газовой смеси с 0,25 до 2 %, что оказывает непосредственное влияние на комплекс его механических характеристик. При сохранении временного сопротивления разрыву наплавленного металла в требуемом диапазоне значений его относительное удлинение и ударная вязкость повышаются.

Разработаны и экспериментально подтверждены механизмы сдерживания роста массовой доли серы в наплавленном металле заключающиеся в сварке и наплавке на пониженных более чем на 2...3 В значениях напряжения на дуге и повышении окислительного потенциала защитной смеси за счет изменения соотношения между объемными долями Ar и CO₂.

4. Установлены зависимости геометрических характеристик проплавления основного металла от значений параметров режима и состава защитной газовой смеси при введении в нее SF₆. С повышением концентрации SF₆ в защитной газовой среде ширина валика наплавленного металла уменьшается, а глубина проплавления увеличивается на 20...30 % по сравнению с традиционной технологией, что свидетельствует о более рациональном вводе тепловой энергии в основной материал и приводит к сокращению ширины зоны закалочной структуры в основном металле вблизи линии сплавления, в результате чего снижается неравномерность значений твердости на этом участке.

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

Обоснованность сформулированных и достоверность выводов и рекомендаций в диссертационной работе обуславливается использованием современных технических средств, а также методик проведения исследований. Термодинамические расчеты проведены с использованием программного продукта FactSage. Определение количества диффузионного водорода в наплавленном металле, металлографический анализ, механические свойства, а также склонность к образованию холодных трещин выполняли по апробированным методикам. Достоверность сформулированных выводов и рекомендаций работы подтверждается публикациями автора в научных изданиях.

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

Научная значимость диссертационной работы заключается в том, что автором теоретически разработан и экспериментально подтвержден механизм связывания водорода в атмосфере дуги в нерастворимые в жидким металле химические соединения HF при дуговой сварке в среде газовой смеси Ar + CO₂ + SF₆. Показано, что указанные металлургические процессы интенсифицируются в диапазоне интервала температур 1000...3000 К, что соответствует диапазону температур максимальной растворимости водорода. Такой подход позволяет снизить чувствительность наплавленного металла к водородной хрупкости при сварке низколегированных высокопрочных сталей. Кроме того, применение гексафторида серы в составе защитного газа позволяет повысить эффективность использования тепловой мощности дугового разряда, сжав столб дуги продуктами высокотемпературной диссоциации SF₆, что, в свою очередь, приводит к повышению глубины проплавления основного металла на 20...30 % по сравнению с технологией сварке в газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂, обеспечив формирование требуемой микроструктуры и комплекса эксплуатационных характеристик соединения.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в разработке технологии дуговой сварки высокопрочных сталей в среде защитных газов, в составе которых присутствует галогенидное соединение SF₆. Применение такого защитного газа позволяет обеспечить повышение стойкости сварных соединений против образования трещин, вызванных диффузионным водородом, и возникающих по замедленному механизму разрушения. Разработана принципиальная схема, конструкция и изготовлено устройство для получения трехкомпонентной газовой защитной смеси Ar + CO₂ + SF₆ с последовательным смешиванием компонентов. Результаты работы в виде технологической инструкции на процесс сварки внедрены в производство на ОАО «БЕЛАЗ «Управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»-«Строммашина» (г. Могилев).

6. Полнота опубликования основных положений и результатов диссертационной работы

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 страниц (10 авторских листов).

7. Соответствие оформления диссертации требованиям Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь. Материал изложен в пяти главах последовательно и хорошо иллюстрирован. Автореферат соответствует диссертации и отражает её основное содержание. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Диссертация изложена на 176 страницах, содержит 74 рисунка, 29 таблиц и 117 наименований использованных источников. Печатный текст 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.

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

Представленные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований, объем полученных данных с использованием современных приборов и методов исследований, уровень их анализа и интерпретации свидетельствуют о соответствии научной квалификации соискателя ученой степени кандидата технических наук по искомой специальности.

9. Замечания по диссертации

1. Использование в составе защитного газа соединения SF₆ способствует насыщению металла шва серой, что негативно сказывается на технологической и эксплуатационной прочности сварных соединений. В работе отмечается, что сера связывается марганцем, однако в ходе термодинамического моделирования этот аспект не был изучен.

2. При количественной оценки объема выделяющегося водорода из наплавленного металла в зависимости от объемной доли вводимого в состав защитной смеси соединения SF₆ одним из важнейших параметров является

влажность окружающего воздуха при проведении исследований. Стоило бы, при выполнении этой части исследований, фиксировать влажность воздуха.

3. В ходе выполнения исследований в состав защитной смеси вводили малые доли SF_6 (0,25 %, 0,5%, 1%, 2%), при этом неясно объемные или массовые проценты имеются в виду, а также как это количество газа обеспечивали и контролировали.

4. В работе установлено, что для обеспечения стабильности горения дуги в смеси газов $Ar + CO_2 + SF_6$ необходимо повысить значение напряжения на дуге на 2...3 В, при этом отмечается, что для снижения количества серы в наплавленном металле необходимо снижать напряжение на дуге на 4...5 В. Как такие противоречивые данные были учтены при разработки технологии сварки с использованием указанной смеси газов.

5. В работе были установлены зависимость глубины проплавления от состава защитного газа и напряжения на дуге, а также зависимость относительного удлинения от состава защитного газа. Эти зависимости имеют ярко выраженный экстремум, причинам которого не было уделено достаточного внимания.

6. В тексте автореферата и диссертации присутствует ряд опечаток и неточностей. Например, в подписях к рисункам 2.1 ...2.8 отсутствует расшифровка обозначения X_i

Приведенные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы.

10. Заключение

Диссертационная работа Фетисовой Екатерины Анатольевны «Технология дуговой сварки высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением» является законченной квалификационной научной работой, самостоятельно подготовленной соискателем и содержит новые научно обоснованные теоретические и экспериментальные результаты, совокупность которых позволяет решить важную научную задачу повышения износостойкости и ресурса эксплуатации деталей машин и ответственного оборудования в химической промышленности. Содержание диссертационной работы соответствует специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии» и отрасли технических наук, по которым она представлена к защите. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, соответствует пункту 20 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь», а ее автор Фетисова Е.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических

наук по специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии» за:

– установление возможности связывания водорода в нерастворимое соединений HF в диапазоне температур от 1000 до 3000 К, за счет добавления в смесь защитного газа Ar + CO₂ гексафторида серы (SF₆), что приводит к двукратному снижению количества диффузионного водорода в наплавленном металле при введении в защитную газовую смесь 0,25 % SF₆.

– выявление эффекта повышения частоты коротких замыканий при переносе электродного металла за счет добавления в защитный газ гексафторида серы, что благоприятно сказывается на стабильности процесса сварки и минимизации потерь электродного металла.

– установление снижения выгорания кремния и марганца при введении в смесь защитных газов SF₆, что приводит к повышению количества Si в среднем на 30...32 % и Mn в среднем на 8...10 % в наплавленном металле, что объясняется уменьшением длины и мощности дуги, и, как следствие, снижением времени контактирования перегретой капли расплавленного металла на торце присадочной проволоки с омывающим его потоком защитной газовой смеси. При этом, происходит снижение массовой доли углерода с повышением напряжения на дуге и объемной доли SF₆ в газовой смеси.

– разработку механизма сдерживания роста массовой доли серы в наплавленном металле за счет снижения напряжения на дуге на 2...3 В

– установление зависимости геометрических параметров сварного шва от значений параметров режима и от количества SF₆ в защитной газовой смеси. С повышением концентрации SF₆ в защитной газовой среде ширина валика наплавленного металла уменьшается, а глубина проплавления увеличивается на 20...30 % по сравнению с традиционной технологией.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой «Сварка,
диагностика и специальная
робототехника» МГТУ им. Н.Э.
Баумана, д.т.н., доцент:



Н.В. Коберник



Специалист по персоналу
отдела кадрового
администрирования
Ходыкина Л.Д.