

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-2-14-22

УДК 621.791.754

А. А. КОРОТЕЕВА

Е. А. ФЕТИСОВА, канд. техн. наук

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОЦЕНКА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВАРКЕ В АТМОСФЕРЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ ГАЛОГЕНИДЫ

Аннотация

На основании испытаний технологических проб показана эффективность применения галогенидов в качестве модификаторов защитных газовых смесей $Ar + CO_2$ с точки зрения снижения количества диффузионного водорода и повышения стойкости сварных соединений против образования холодных трещин по замедленному механизму разрушения. Использовались пробы Тэккен, изготовленные из термомеханически упрочненной высокопрочной стали Magstrong H500.

Ключевые слова:

дуговая сварка, защитные газовые смеси, гексафторид серы, модификация защитной газовой среды, значения параметров режима, технологические пробы, холодные трещины.

Для цитирования:

Коротеева, А. А. Оценка трещинообразования при сварке в атмосфере, содержащей галогениды / А. А. Коротеева, Е. А. Фетисова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 2 (91). – С. 14–22.

Введение

Современное развитие промышленности неразрывно связано с совершенствованием применяемых материалов и технологий их сварки. Все чаще используются стали с комплексными системами упрочнения, обладающие высокой прочностью при невысоких показателях относительного удлинения. Специфика упрочнения материала существенно усложняет технологию его сварки. Основной проблемой свариваемости таких сталей является высокая склонность к образованию так называемых холодных трещин, возникающих после сварки и охлаждения материала ниже $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Иногда такие трещины могут возникать после полного остывания металла, через некоторое время, в течение суток и более.

На сегодняшний день достаточно много исследований посвящено причинам возникновения такого дефекта, и все многообразие имеющихся представле-

ний сводится к трем ключевым факторам:

- 1) высокий уровень внутренних напряжений в сварном соединении;
- 2) наличие в околошовной зоне закалочных структур, вызванных термическим циклом сварки и связанными с этим структурно-фазовыми превращениями;
- 3) наличие диффузионного водорода в металле сварного соединения.

Если первые два фактора при сварке металлоконструкций из такого рода сталей практически неизбежны, то именно наличие водорода играет решающую роль в зарождении и образовании трещины с последующим ее развитием и выходом на поверхность, приводящим к полному разрушению конструкции.

Существуют различные способы снижения чувствительности сварных соединений и применяемой технологии сварки к наличию диффузионного водорода, попадающего в зону горения дуги преимущественно из влаги. Это может быть влажность окружающего воздуха,

адсорбированная влага на поверхностях свариваемых деталей, влажность сварочных материалов и др. Практически все способы связаны с применением фторсодержащих компонентов в электродных покрытиях, флюсах, наполнителях сердечника порошковых присадочных проволок и др.

В ряде публикаций нами описана перспективная технология, основанная на введении таких компонентов непосредственно в струю защитной газовой смеси при сварке плавящимся электродом [1–7]. При этом в качестве наиболее подходящего компонента предлагается использовать газообразный гексафторид серы SF_6 , широко используемый ранее в электротехнике. Основное его преимущество заключается в доступности и стабильности в нормальных условиях. При этом открываются широкие возможности управления технологическими характеристиками плавления проволоки [1–5], изменения химического состава наплавленного металла, характера проплавления основного металла свариваемых деталей [6, 7] и др. Вместе с тем основным вопросом, окончательно свидетельствующим об эффективности предлагаемых решений с точки зрения связывания водорода в нерастворимые в жидком металле соединения HF и снижения таким образом его количества в наплавленном металле, будет снижение вероятности образования трещины в сварном соединении.

Существует несколько основных способов определения склонности сварных соединений к образованию холодных трещин. В целом их можно классифицировать на количественные (расчетные) и качественные.

В количественных методах используется химический состав материала. Применяя различные методики расчета, в конечном счете все приводится к эквивалентному значению углерода, что является критерием склонности материала к образованию трещин при охлаждении

с заданными скоростями. Так как предлагаемая в работе технология основана на воздействии на технологические характеристики процесса плавления проволоки и переноса электродного металла через защитную газовую среду, а ключевым параметром является наличие водорода, рассчитать вероятность образования трещины количественными методами довольно сложно. В таких условиях наиболее информативным методом является качественная оценка склонности путем сварки специальных технологических проб.

Выбор технологической пробы должен быть обусловлен условиями эксплуатации конструкции. Чтобы приблизить состояние технологической пробы к реальному условию работы конструкции, в пробе предварительно выполняют специальные концентраторы напряжений с помощью разделок кромок, ребер жесткости, внешних нагрузок и др. Отсутствие холодных трещин после испытания такого вида технологических проб является в некотором приближении гарантией их отсутствия при эксплуатации конструкции в реальных условиях.

В работе выбрана технологическая проба Тэккен, которая относится к пробам без внешнего нагружения с прямолинейными стыковыми швами, обладающая максимальной жесткостью, а следовательно, наибольшей склонностью к образованию холодных трещин [8].

Основная часть

Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях проводили в соответствии с СТБ ISO 17642-1 [9] и ГОСТ Р ИСО 17642-2 [10]. Для этого было подготовлено четыре комплекта контрольных образцов в виде пластин толщиной 16 мм из высокопрочной износостойкой стали повышенной твердости Magst-

rong H500 с У-образной разделкой кромок в соответствии с рис. 1 [9, 10]. Сталь широко применяется при изготовлении элементов платформ карьерной техники БЕЛАЗ. Химический состав и механические характеристики стали приведены в табл. 1 и 2.

В качестве присадочного материала

использовалась сварочная высокопрочная проволока ESAB ОК Aristorod 69 СТБ ISO 16834–2010: G Mn3Ni1CrMo с системой легирования Cr–Ni–Mo диаметром 1,2 мм. Химический состав проволоки и механические характеристики наплавленного металла представлены в табл. 3 и 4.

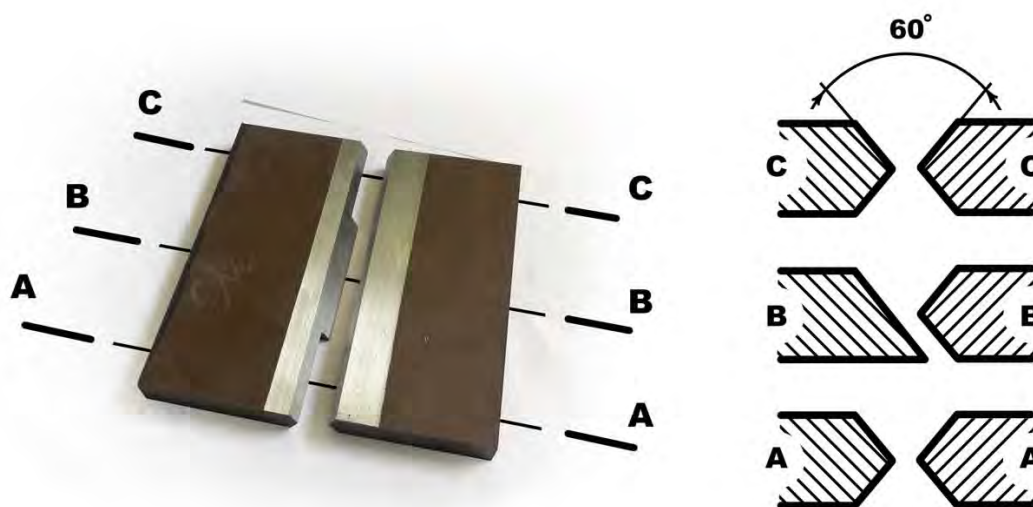


Рис. 1. Подготовка контрольных соединений для выполнения технологической пробы

Табл. 1. Химический состав стали Magstrong H500 [11]

Массовая доля содержания химического элемента, %										
C	Si	Mn	P	S	Nb	Mo	Al	V	Ti	B
0,30	0,20	0,85	0,012	0,005	0,01	0,4	0,05	0,035	0,01	0,005

Табл. 2. Механические свойства стали Magstrong H500 [11]

Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV ⁻⁴⁰ , Дж/см ²	Твердость HV
1200	1500	≥ 10	30	475...505

Табл. 3. Химический состав сварочной проволоки

Массовая доля содержания химического элемента, %											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Zr
0,10	0,40...0,70	1,5...1,8	0,015	0,015	0,2...0,4	1,2...1,6	0,2...0,3	0,15	0,05...0,1	0,1	0,1

Табл. 4. Механические характеристики наплавленного металла

Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Энергия удара, Дж	
			20 °С	-40 °С
730	800	19	100	73

Подобные проволоки широко используются для сварных конструкций из высокопрочных низколегированных низкоуглеродистых сталей, работающих под воздействием нагрузок в энергетике, машиностроении, нефтехимии и других отраслях промышленности.

Подготовка деталей (разделка кромок и вырезка в требуемый размер) осуществлялась методом гидроабразивной

резки с последующей частичной механической обработкой (см. рис. 1). Пластины выставлялись с требуемым зазором и фиксировались крепежными швами в свободном состоянии. Крепежные швы выполнялись в несколько проходов указанной выше проволокой.

Сварка образцов выполнялась в один проход с использованием двух режимов и двух вариантов защитной газовой среды (табл. 5).

Табл. 5. Режимы сварки технологических проб

Номер соединения	Состав защитной газовой среды	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость наплавки, м/ч
1	(82 % Ar + 18 % CO ₂)	150	19,5	25
2		200	20,0	15
3	(82 % Ar + 18 % CO ₂) + 0,5 % SF ₆	150	21,0	25
4		200	22,0	15

Два режима были необходимы для оценки склонности к образованию трещины в двух вариантах (см. табл. 5):

1) имитация сварки корневого шва (режим образцов 1, 3). В этом случае используются невысокое значение силы тока и повышенная скорость для формирования валика наплавленного металла с

небольшой площадью поперечного сечения. Массивные холодные детали способствуют высокой скорости охлаждения, что имитирует сварку корневого шва в разделку кромок;

2) сварка с использованием повышенного значения силы тока и невысокой скорости (режим образцов 2, 4).

В этом случае за один проход в разделке кромок кристаллизуется достаточно большой объем металла (сварочной ванны) с большим тепловложением. Несмотря на более низкую скорость охлаждения, в этом случае присутствуют

значительные внутренние напряжения, вызванные усадкой жидкого металла шва при кристаллизации.

На рис. 2 представлен внешний вид контрольных образцов непосредственно после сварки.

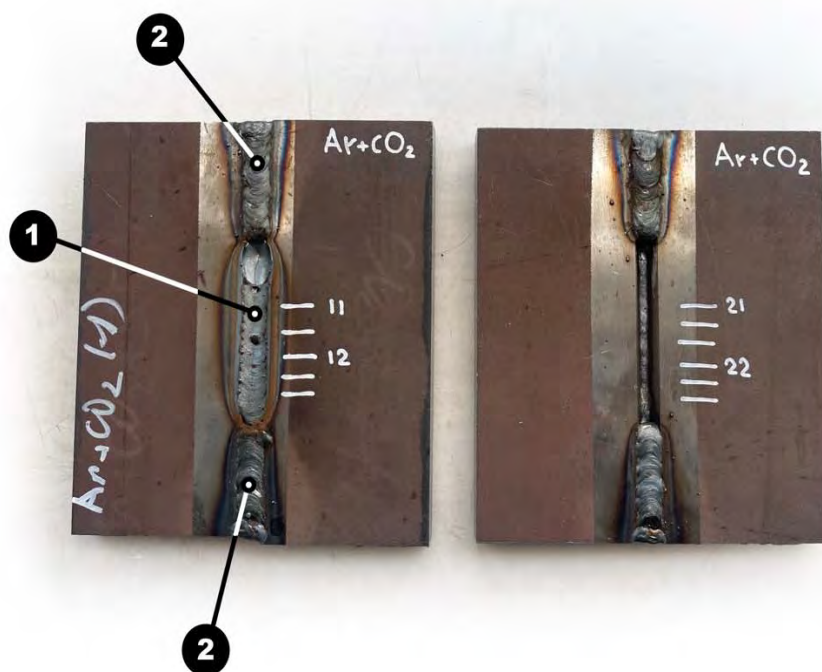


Рис. 2. Внешний вид технологических проб: 1 – испытуемый шов; 2 – крепежный шов

После сварки производилось охлаждение контрольных образцов до комнатной температуры и выдержка в течение 48 ч [10]. Далее выполнялись секционные разрезы контрольных соединений для проведения анализа и металлографических исследований макроструктуры. Травление производилось в растворе азотной кислоты HNO_3 до выявления линии сплавления и границ шва. На рис. 3 и 4 представлены макрошлифы технологических проб.

По результатам проведенных исследований установлено, что на образцах, полученных с использованием традиционной технологии (сварка в среде $\text{Ar} + \text{CO}_2$), обнаружены трещины (см. рис. 3, С и D; рис. 4, G и H).

В случае использования более высоких значений параметров режима (номера соединений 2 и 4 согласно табл. 5), когда площадь поперечного сечения наплавленного металла заполняла практически весь объем V-образной части разделки кромок, трещина образовывалась в основном металле в корневой части соединения, вблизи линии сплавления (см. рис. 3, А.1–С, А.2–D). Ранее в ряде публикаций нами было установлено, что именно в этой части соединения наблюдается участок с наиболее высокими значениями твердости, обусловленный возникновением крупной закалочной структуры.

Образовавшаяся трещина развивается параллельно линии сплавления по

участку повышенной твердости, после чего переходит в наплавленный металл шва. Далее происходит рост и развитие

трещины по направлению роста кристаллов к центру сечения с выходом на лицевую поверхность валика.

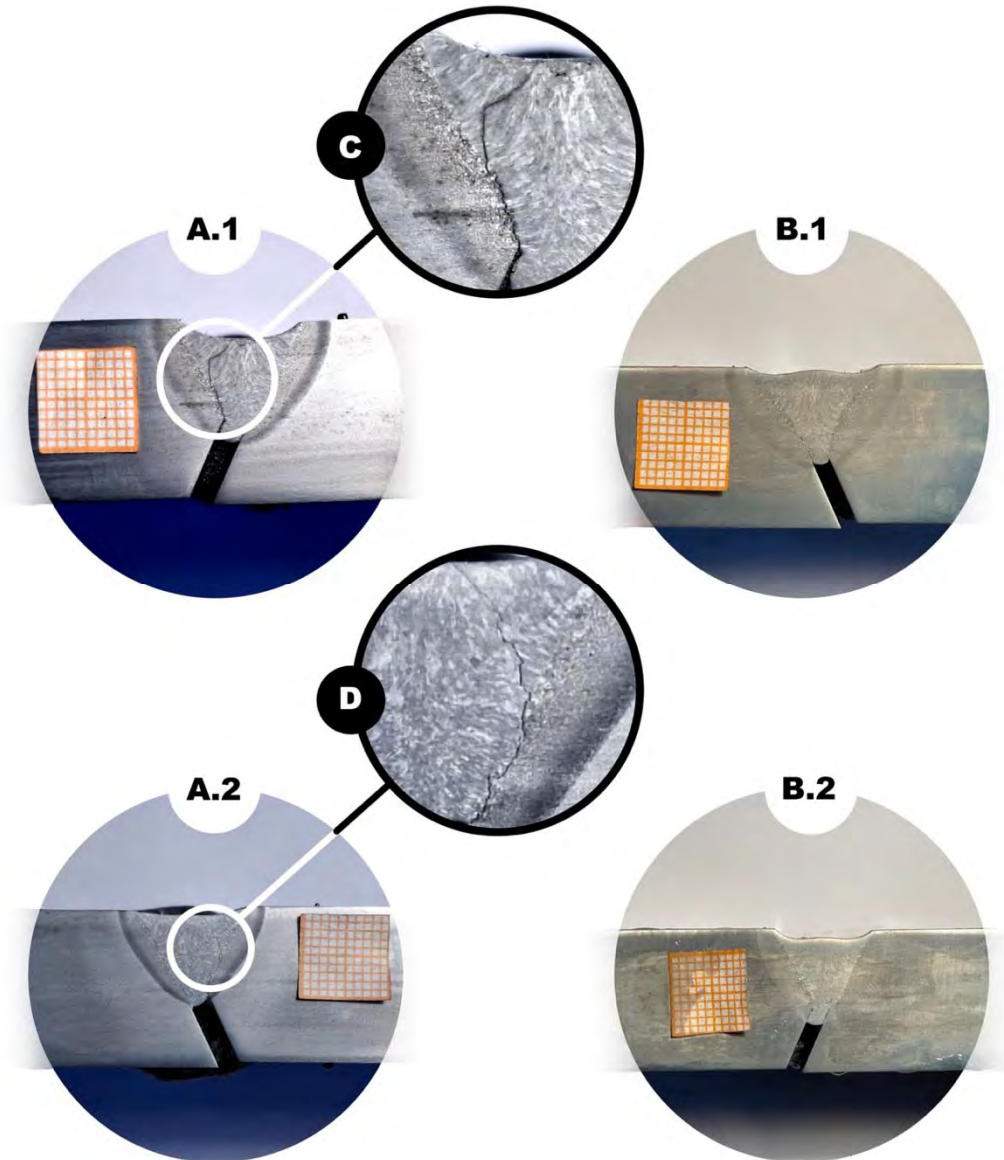


Рис. 3. Макрошлифы технологической пробы Тэккен: А – сварка с традиционной защитной газовой смесью (82 % Ar + 18 % CO₂); В – сварка с введением в состав защитной газовой смеси SF₆; С, D – трещины в сварном соединении

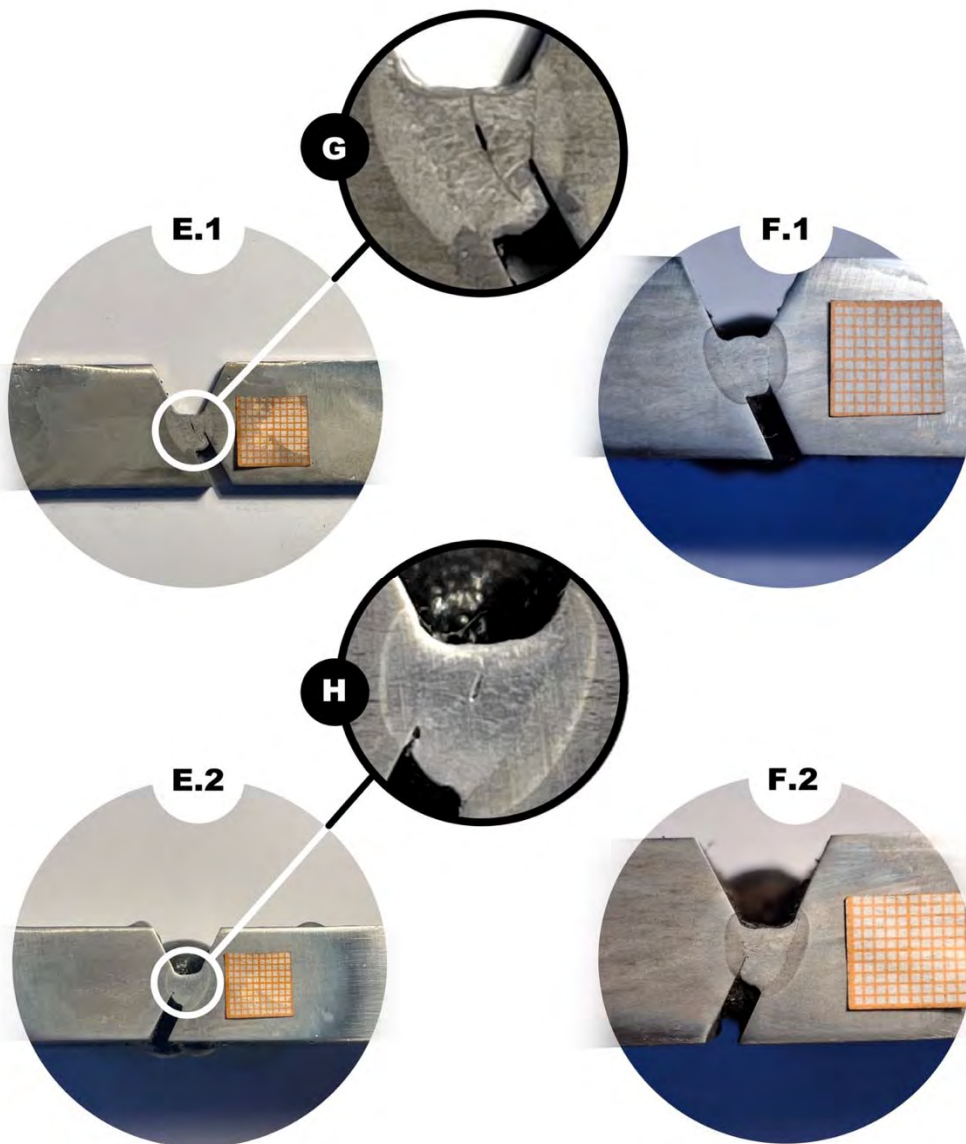


Рис. 4. Макрошлифы технологической пробы Тэккен: Е – сварка с использованием традиционной защитной газовой смеси (82 % Ar + 18 % CO₂); F – сварка с введением в состав защитной газовой смеси SF₆; G, H – трещины в сварном соединении

Так как шов выполнялся за один проход, он имеет литую структуру с направлением роста кристаллов, перпендикулярным поверхности кромки (направление отвода теплоты). Наличие больших внутренних напряжений, обусловленных жестким закреплением деталей и невозможностью их взаимного перемещения, приводит к тому, что с

энергетической точки зрения распространение трещины по наплавленному металлу становится более выгодным, т. к. предел его прочности заметно ниже по сравнению с основным.

В случае использования при сварке контрольного соединения технологической пробы значений параметров режима, обеспечивающих формирова-

ние шва с меньшей площадью поперечного сечения (номера соединений 1 и 3 согласно табл. 5), трещина также образуется, но ведет себя иначе. Малая площадь поперечного сечения и объем наплавленного металла не способны выдержать высокий уровень внутренних напряжений, что приводит к образованию трещины по оси шва. Эта плоскость является наиболее неблагоприятной в случае выполнения однопроходного шва в стесненных условиях. Направление роста кристаллов таково, что по оси шва наблюдается некоторая анизотропия свойств и возможна ликвация легкоплавких примесей.

Следует отметить, что характер образования трещин в обоих случаях свидетельствует о замедленном механизме разрушения. Трещина образовалась через 12 ч после выполнения сварного соединения и его остывания до комнатной температуры.

В случае выполнения сварного соединения технологической пробы с введением в состав защитной газовой смеси гексафторида серы SF_6 на макрошлифах поперечных сечений образцов технологической пробы трещины не наблюдалось. Причиной этого является снижение количества диффузионного водорода в материале, т. к. условия выполнения пробы и, соответственно, значения силового фактора, обусловленные геометрией свариваемых деталей, были идентичны.

Таким образом, по результатам испытаний технологических проб установлено, что введение в состав защитной газовой смеси SF_6 позволяет

предотвратить образование трещины. Это свидетельствует об эффективности предлагаемого механизма с точки зрения снижения водородного фактора и повышения эксплуатационных характеристик сварного соединения.

Выводы

На основании испытаний технологических проб Тэккен установлено, что введение в состав защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ галогенида SF_6 при сварке высокопрочной износостойкой термомеханически упрочненной стали Magstrong H500 позволяет предотвратить образование холодных трещин, индуцированных диффузионным водородом в сварном соединении. Сварка с использованием традиционной технологии в аналогичных условиях характеризуется образованием трещины в двух вариантах. В случае применения более высоких значений силы тока (большая площадь поперечного сечения валика наплавленного металла) трещина образуется в околошовной зоне вблизи линии сплавления и развивается параллельно ей с переходом в наплавленный металл и последующим выходом на лицевую поверхность валика шва. В случае использования меньшей погонной энергии при выполнении шва на технологической пробе (меньшая сила тока и более высокая скорость сварки) трещина возникает по наплавленному металлу с полным разрушением по оси шва. В обоих вариантах разрушение происходит по замедленному механизму.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. О потерях электродного металла при дуговой сварке с модификацией защитной атмосферы газообразными галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 97–106.
2. **Фетисова, Е. А.** Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.

3. 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.

4. 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 [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 25–34.

5. **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.

6. 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.

7. 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 [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (83). – С. 77–87.

8. **Кархин, В. А.** Поведение водорода при сварке сталей / В. А. Кархин, А. М. Левченко. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 321 с.

9. Разрушающие испытания сварных швов металлических материалов. Испытания сварных соединений на сопротивляемость образованию холодных трещин. Процессы дуговой сварки. Часть 1. Общие положения : СТБ ISO 17642-1–2012. – Введ. 01.01.2013. – Мн. : Госстандарт ; Бел. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2013. – 12 с.

10. Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 2. Испытания с естественной жесткостью : ГОСТ Р ИСО 17642-2–2012. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293789/4293789443.pdf>.

Статья сдана в редакцию 6 апреля 2026 года

Контакты:

sashaklemiato@mail.ru (Коротеева Александра Александровна);

fetisova9891@gmail.com (Фетисова Екатерина Анатольевна).

A. A. KARATSEYEVA, E. A. FIATSIŠAVA

EVALUATION OF CRACK FORMATION DURING WELDING IN A HALIDE ATMOSPHERE

Abstract

Testing of weld samples demonstrated the effectiveness of using halides as modifiers in $Ar + CO_2$ shielding gas mixtures in terms of reducing the amount of diffusible hydrogen and increasing the resistance of welded joints to cold cracking via a delayed fracture mechanism. Tekken samples made from thermomechanically hardened Magstrong H500 high-strength steel were used.

Keywords:

arc welding, protective gas mixtures, sulfur hexafluoride, modification of protective gas environment, operating parameter values, weld samples, cold cracks.

For citation:

Karatseyeva, A. A. Evaluation of crack formation during welding in a halide atmosphere / A. A. Karatseyeva, E. A. Fiatsisava // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 2 (91). – P. 14–22.