

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-4-43-51

УДК 621.791.754

Е. А. ФЕТИСОВА¹

А. А. КОРОТЕЕВА¹

А. О. КОРОТЕЕВ¹, канд. техн. наук, доц.

В. П. КУЛИКОВ¹, д-р техн. наук, проф.

И. В. ИВАНОВА², канд. техн. наук, доц.

С. Г. ПАРШИН², д-р техн. наук, проф.

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ГАЗООБРАЗНЫМ ГАЛОГЕНИДОМ SF_6 НА СВОЙСТВА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОЙ СТАЛИ

Аннотация

На основании экспериментальных исследований определены зависимости значений твердости в различных участках зоны термического влияния от количества, вводимого в состав защитной газовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$, галогенида SF_6 при сварке стыкового сварного соединения из высокопрочной износостойкой стали, используемой при производстве платформ карьерной техники. Исследована микроструктура зоны термического влияния вблизи линии сплавления.

Ключевые слова:

механические характеристики, твердость, микроструктура, гексафторид серы, модификация защитной газовой среды, сварка в среде защитных газов, высокопрочная износостойкая сталь, ударная вязкость.

Для цитирования:

Особенности влияния модификации защитной газовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ газообразным галогенидом SF_6 на свойства зоны термического влияния при сварке высокопрочной износостойкой стали / Е. А. Фетисова, А. А. Коротева, А. О. Коротеев [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 4 (89). – С. 43–51.

Введение

Тенденция в использовании сталей со сложной системой упрочнения и легирования приводит к переходу на использование преимущественно инертных защитных газов и их смесей. Это позволяет минимизировать взаимодействие перегретого расплавленного металла с омывающим его потоком защитного газа и, таким образом, обеспечить требуемый состав и комплекс характеристик сварного шва. В то же время повышается чувствительность технологии к посторонним факторам, наличию нежелательных газовых примесей и компонентов в

защитной атмосфере. Практически отсутствуют металлургические механизмы воздействия на процессы плавления электродной проволоки. Так, например, присутствие повышенного количества водорода в защитной газовой среде из-за влажности окружающей атмосферы и наличия адсорбированной влаги на поверхностях свариваемых деталей, становится в случае сварки высокопрочных сталей практически непреодолимой проблемой, приводящей к образованию холодных трещин. Изменение и соблюдение общих условий выполнения сварочных работ в цеху, а также культуры

производства, является сложной организационной задачей и в некоторых случаях практически невыполнимой.

В связи с этим подходы к разработке технологии, позволяющие реализовать механизмы управления металлургическими процессами, снизив при этом количество водорода в наплавленном металле без изменения типа используемого сварочного материала и оборудования, являются актуальными.

Ранее в ряде публикаций [1–6] предложены пути снижения чувствительности высокопрочной стали к холодным трещинам, инициированным повышенным содержанием водорода в материале, основанные на применении модифицирующих добавок в виде галогенида SF_6 , вводимого непосредственно в струю защитной газовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ с образованием нерастворимых в жидком металле соединений HF .

Такая модификация позволяет изменить условия плавления присадочной проволоки и переноса расплавленного металла через дуговой промежуток, а также теплофизические характеристики дугового разряда и характер ввода тепловой энергии в основной металл.

Основная часть

При сварке высокопрочных сталей, чувствительных к термическому циклу, работоспособность сварного соединения определяется в большинстве случаев особенностями формирования микроструктуры и свойств зоны термического влияния. Химический состав, структура и свойства наплавленного металла шва определяются типом используемой присадочной проволоки, режимами и техникой выполнения сварки, что позволяет управлять ими и с достаточной точностью прогнозировать формируемый комплекс эксплуатационных характеристик. Зона термического влияния, особенно если сталь склонна к образованию нежелательных закалочных структур, образованию зон разупрочнения при

применении термомеханически упрочненного проката, в ряде случаев оказывается наиболее слабым и уязвимым участком.

В статье приведены результаты исследования особенностей формирования микроструктуры и свойств зоны термического влияния при использовании технологии дуговой сварки с модификацией защитной газовой атмосферы $\text{Ar} + \text{CO}_2$ галогенидом SF_6 для высокопрочной износостойкой стали. Ранее в ряде публикаций [1–4] представлены результаты исследования эффективности такого решения с точки зрения снижения количества диффузионного водорода в сварном соединении и склонности к образованию холодных трещин. Кроме того, установлено, что при сохранении значений параметров режима подобная модификация защитной газовой среды способствует существенному изменению теплофизических характеристик дугового разряда и геометрии проплавления основного металла [4].

Исследования проводились на контрольных стыковых сварных соединениях из стали Magstrong H500 производства ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (Российская Федерация), химический состав и механические свойства которой приведены в табл. 1 и 2.

Сталь широко используется при производстве нагруженных элементов карьерной техники (платформы самосвалов БЕЛАЗ), воспринимающих воздействие, в том числе абразивного износа. В связи с этим материал обладает не только высокой прочностью (1500 МПа), но и твердостью (475...505 HV).

Для сварки может использоваться как высокопрочная проволока (EN ISO 16834–A: G 69 4 M20 Mn3Ni1CrMo), так и низкоуглеродистая низколегированная проволока типа Св-08Г2С или Св-08ГС, например, когда сварные швы являются связующими. При этом шов непосредственно не воспринимает

действие рабочих нагрузок, приоритетным становится обеспечение повышенной пластичности материала наплавленного металла с целью снижения вероятности образования трещин из-за повышенного уровня внутренних напряжений в соединении.

В качестве основных характеристик сварного соединения оценивалась твердость и ударная вязкость.

Измерение твердости производилось по шкале HV-10 в соответствии с

СТБ ИСО 6507-1–2007 и СТБ ИСО 9015-1–2003 на образцах поперечного сечения сварного соединения. Для визуализации линий сплавления применялось макрометаллографическое травление 5-процентным раствором азотной кислоты (HNO_3). Измерения производились с использованием твердомера AFFRI-URBV-VRS по лицевой поверхности сварного шва и в корневой его части. Использовались четыре варианта технологии (табл. 3).

Табл. 1. Химический состав стали Magstrong H500

Массовая доля содержания химического элемента, %										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V
0,30	0,20	1,85	0,012	0,005	0,5	3,20	0,35	0,40	0,01	0,035

Табл. 2. Механические свойства стали Magstrong H500

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

Табл. 3. Режимы сварки и состав защитных газовых сред для выполнения контрольных соединений

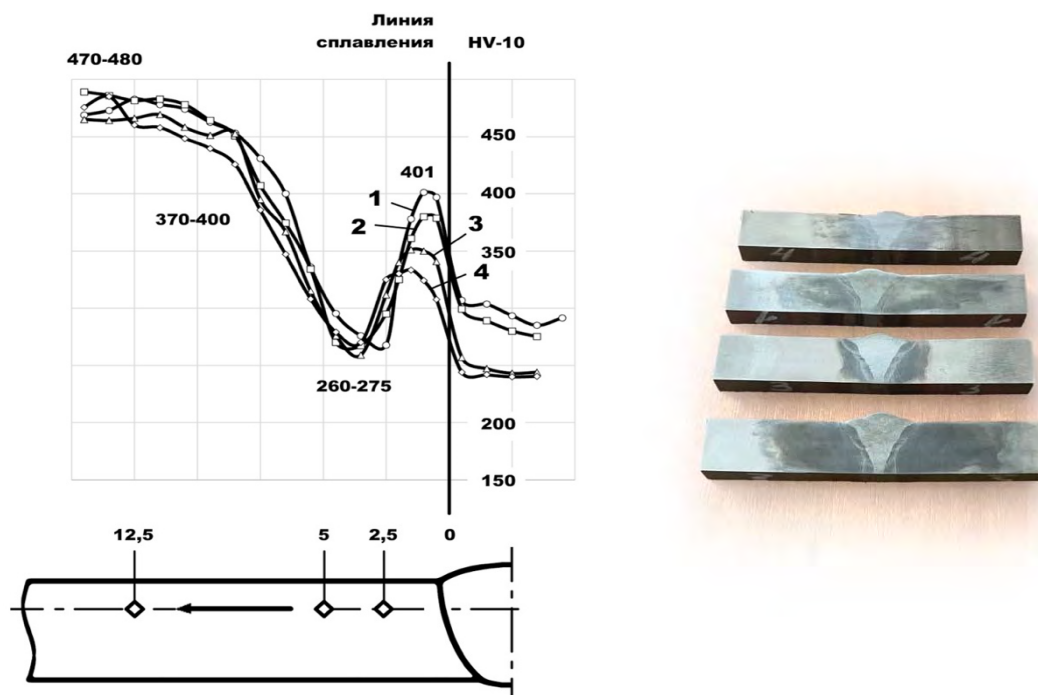
Вариант технологии (номер образца)	Состав защитной газовой среды	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В
1	(82 % Ar + 18 % CO ₂)	200	19,5
2	(82 % Ar + 18 % CO ₂) + 0,25 % SF ₆	200	19,5
3	(82 % Ar + 18 % CO ₂) + 0,5 % SF ₆	200	21,0
4	(82 % Ar + 18 % CO ₂) + 1,0 % SF ₆	200	22,0

Результаты измерения твердости представлены на рис. 1. Анализ полученных результатов показал неравномерность распределения значений твердости в сварном соединении.

Наплавленный металл шва имеет твердость в диапазоне значений 250...300 HV. При переходе в зону термического влияния значение твердости резко возрастает. Это является следствием изменения микроструктуры материала. Причем рост значений твердости

может достигать 100 HV на участке протяженностью 1 мм. Следует отметить, что этот участок является наиболее опасным с точки зрения возникновения холодных трещин в материале. Неравномерный нагрев, вызванный термическим циклом сварки, высокая скорость охлаждения, а также особенности химического состава материала способствуют формированию закалочной структуры и высокого уровня внутренних напряжений.

а)



б)

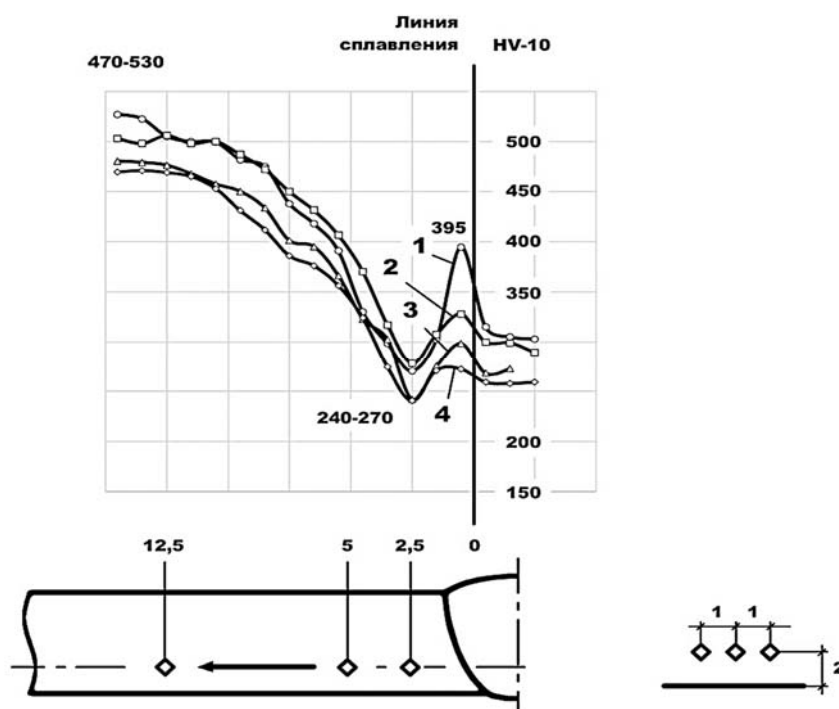


Рис. 1. Распределение твердости сварного соединения по «лицевой» поверхности (а) и в корневой части (б), полученного с введением в состав защитной газовой смеси различного количества SF₆: 1 – 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 – 0,25 % SF₆ (объемная доля); 3 – 0,5 % SF₆ (объемная доля); 4 – 1,0 % SF₆ (объемная доля)

Все это в конечном счете создает благоприятные условия для концентрации водорода на этом участке в силу его крайне низкой диффузионной подвижности и высокой вероятности зарождения и развития трещин, с последующим их выходом на поверхность в течение некоторого времени.

На расстоянии около 2,5...3 мм от линии сплавления в зоне термического влияния наблюдается зона разупрочнения материала. Значения твердости на этом участке составляют 250...270 HV, что сопоставимо с твердостью наплавленного металла шва. Ширина зоны разупрочнения составляет 3...5 мм. По мере удаления от шва твердость плавно возрастает на 50...80 HV каждые 2...2,5 мм, достигая уровня свойств основного металла на расстоянии 10...12 мм.

Введение в состав защитной газовой смеси модификатора SF₆ оказывает существенное влияние на значения твердости наплавленного металла и зоны термического влияния вблизи линии сплавления. Для наплавленного металла это можно объяснить изменением его химического состава. В ряде публикаций авторами приведены данные спектрального оптико-эмиссионного анализа сварного шва, позволившие установить снижение массовой доли углерода, что по результатам механических испытаний оказывает существенное влияние на пластические свойства материала [2, 3, 5].

Свойства участка зоны термического влияния вблизи линии сплавления определяются главным образом термическим циклом сварки, мощностью и характером тепловложения. Установлено, что SF₆ в составе защитной газовой среды понижает значение твердости на 25...20 HV (каждые 0,25 % SF₆) в зоне «лицевой» поверхности сварного соединения и на 50...25 HV в области корня шва. Присутствие фторсодержащих компонентов изменяет характер проплавления основного металла. Эффект более ярко выражен в корневой

части соединения, что обусловлено многократной частичной термообработкой последующими проходами при выполнении многослойного сварного соединения с выравниванием общей структуры в зоне термического влияния.

Проведены исследования влияния модификации защитной газовой среды на значение ударной вязкости на участке зоны термического влияния вблизи линии сплавления. Испытания на ударный изгиб проводились с использованием маятникового копра с энергией 300 Дж в диапазоне температур –40 °С...20 °С, с шагом 20 °С. Вырезка образцов осуществлялась методом гидроабразивной резки с последующим фрезерованием и шлифовкой. Полученные результаты испытаний представлены на рис. 2 в виде графических зависимостей, анализ которых показал, что с увеличением объемной доли SF₆ в составе защитной газовой среды Ar + CO₂ ударная вязкость возрастает на 15...20 Дж/см². Наиболее интенсивный рост наблюдается в диапазоне концентраций SF₆ до 0,5 %. Внешний вид поверхностей излома образцов после проведения испытаний показан на рис. 3.

Таким образом, модификация защитной газовой атмосферы SF₆ позволяет повысить ударную вязкость в зоне термического влияния, что положительно сказывается на работоспособности сварного соединения. Наиболее вероятной причиной этого является изменение условий ввода тепловой энергии в основной металл, что приводит к благоприятному формированию микроструктуры и твердости на этом участке.

Анализ микроструктуры сварного соединения показал, что вблизи линии сплавления формируется крупная пластинчатая закалочная структура (рис. 4). Длина отдельных участков может достигать 100 мкм. Наблюдаются участки образования бейнитной структуры как вблизи линии сплавления, так и при удалении от нее в направлении основного металла.

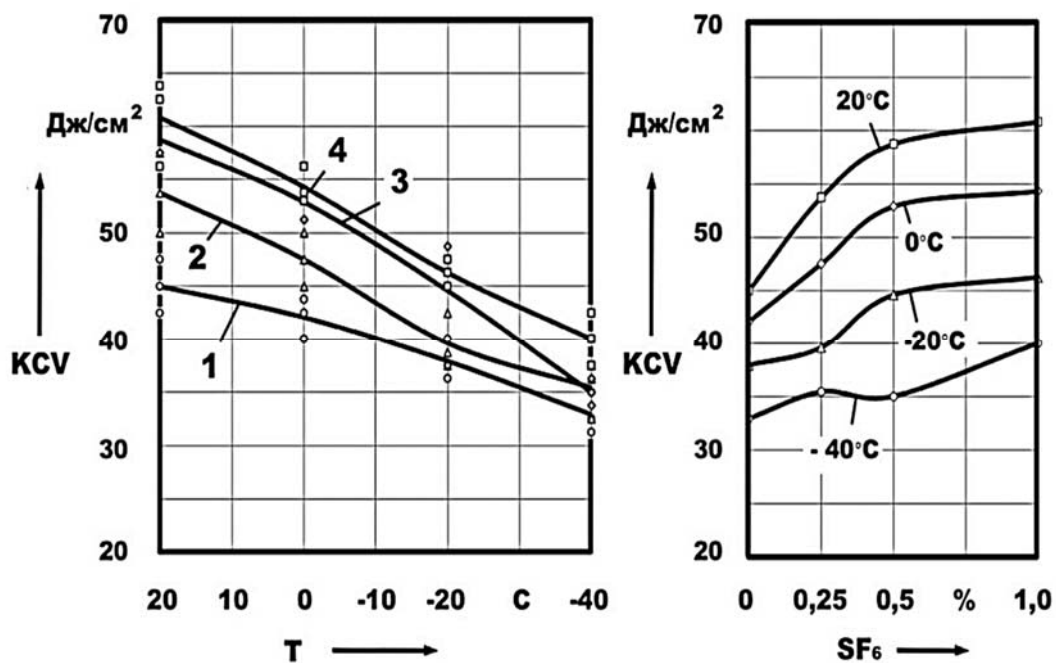


Рис. 2. Результаты испытаний на ударный изгиб зоны термического влияния: 1 – 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 – 0,25 % SF₆; 3 – 0,5 % SF₆; 4 – 1,0 % SF₆

а)

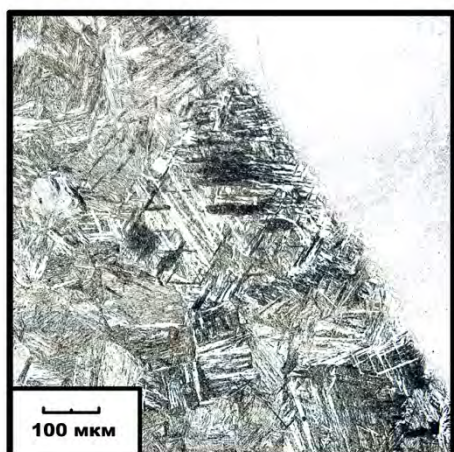


б)



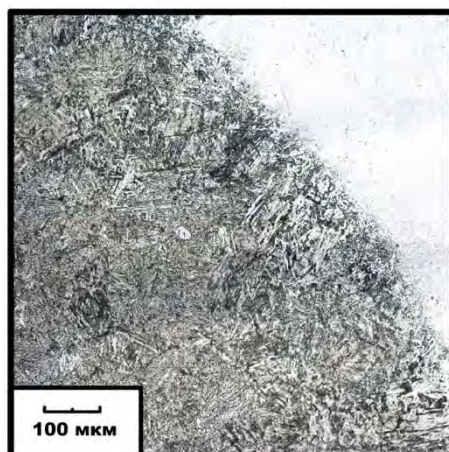
Рис. 3. Внешний вид поверхностей образцов после испытаний на ударный изгиб (-20 °C): а – 82 % Ar + 18 % CO₂; б – (Ar + CO₂) + 0,25 % SF₆

а)

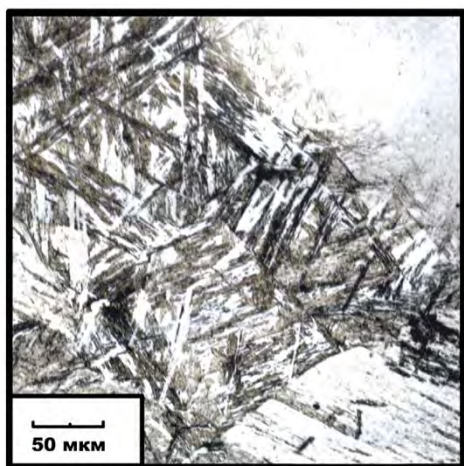


200х (ЛС)

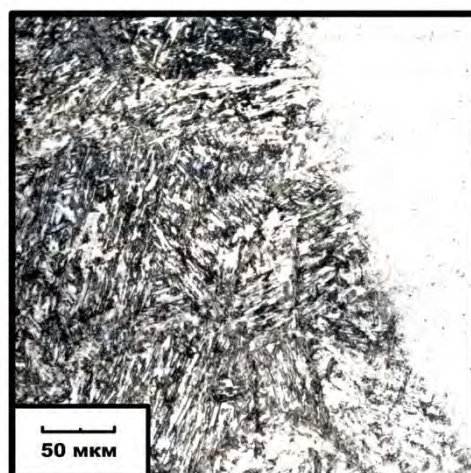
б)



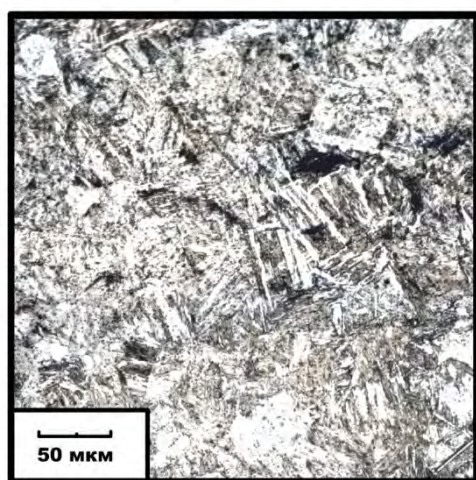
200х (ЛС)



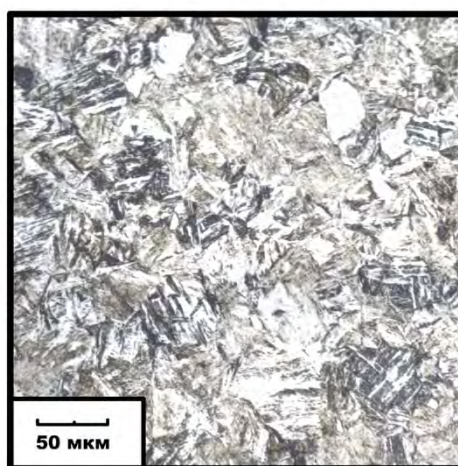
500х (ЛС)



500х (ЛС)



500х (ЗТВ)



500х (ЗТВ)

Рис. 4. Микроструктура сварного соединения вблизи линии сплавления (ЛС) и в зоне термического влияния (ЗТВ): а – 82 % Ar + 18 % CO₂; б – (Ar + CO₂) + 0,25 % SF₆ (объемная доля)

При введении в защитную газовую смесь галогенида SF_6 структура вблизи линии сплавления сильно измельчается. Так как состав защитной газовой среды в рассматриваемом случае оказывает непосредственное влияние на теплофизические характеристики дугового разряда и изменяет форму проплавления основного металла, снижая ширину зоны нагрева, то выявленные изменения связаны с особенностями тепловложения.

Следует отметить, что измельчение зерна и минимизация крупных блоков закалочных структур в зоне термического влияния вблизи линии сплавления является положительной тенденцией, т. к. наблюдается выравнивание значений твердости и снижение анизотропии свойств.

В силу того, что введение SF_6 в состав защитной газовой смеси и его последующая высокотемпературная диссоциация с образованием активных компонентов приводит к изменению химического состава наплавленного металла и резкому снижению массовой доли углерода, в дальнейшем интерес пред-

ставляет исследование характера протекания диффузионных процессов при кристаллизации металла и формирования его конечной структуры, а также возможная диффузия компонентов через линию сплавления.

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных исследований установлено следующее.

1. Значение ударной вязкости в ЗТВ с введением 0,25 % SF_6 в состав защитной газовой смеси повышается на 5 %...15 % по сравнению с наплавкой в традиционной газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO_2 .

2. Значение твердости ЗТВ вблизи линии сплавления при введении в состав защитной газовой смеси Ar + CO_2 галогенида SF_6 несколько снижается (на 25...20 HV каждые 0,25 % SF_6 со стороны лицевой поверхности сварного соединения и на 50...25 HV со стороны корня шва), что обусловлено формированием высокодисперсной микроструктуры на этом участке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. О потерях электродного металла при дуговой сварке с модификацией защитной атмосферы газообразными галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 97–106.
3. **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.
4. Особенности проплавления основного металла при дуговой наплавке и сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением 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.
5. Механические характеристики наплавленного металла при дуговой сварке высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой среды газообразным флюсом SF_6 / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. В. Клименкова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1 (86). – С. 23–31.
6. Оценка эффективности применения фторсодержащих газовых флюсов для связывания водорода в защитной газовой атмосфере при сварке и наплавке в соединениях HF / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, С. Г. Паршин [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 2 (87). – С. 43–53.

Статья сдана в редакцию 18 сентября 2025 года

Контакты:

fetisova9891@gmail.com (Фетисова Екатерина Анатольевна);
sashaklemiato@mail.ru (Коротеева Александра Александровна);
karatseyeu.artur@gmail.com (Коротеев Артур Олегович);
kafoitps@gmail.com (Куликов Валерий Петрович);
ivanova_iv@spbstu.ru (Иванова Ирина Владимировна);
parshin@spbstu.ru (Паршин Сергей Георгиевич).

***E. A. FIATSISSAVA, A. A. KARATSEYEVA, A. O. KARATSEYEU, V. P. KULIKOU,
I. V. IVANOVA, S. G. PARSHIN***

**FEATURES OF THE EFFECT OF Ar + CO₂ PROTECTIVE GASEOUS MIXTURE
MODIFIED WITH SF₆ GASEOUS HALIDE ON PROPERTIES OF HEAT-AFFECTED
ZONE IN HIGH-STRENGTH WEAR-RESISTANT STEEL WELDING**

Abstract

Based on experimental studies, the relationships between hardness values in various areas of the heat-affected zone and the amount of SF₆ halide introduced into the Ar + CO₂ shielding gas mixture have been determined for butt welding of high-strength wear-resistant steel used in the production of quarry equipment platforms. The microstructure of the heat-affected zone near the fusion line has been examined.

Keywords:

mechanical properties, hardness, microstructure, sulfur hexafluoride, modification of protective gas environment, gas-shielded welding, high-strength wear-resistant steel, impact toughness.

For citation:

Features of the effect of Ar + CO₂ protective gaseous mixture modified with SF₆ gaseous halide on properties of heat-affected zone in high-strength wear-resistant steel welding / E. A. Fiatsisava, A. A. Karatseyeva, A. O. Karatseyeu [et al.] // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 4 (89). – P. 43–51.