

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-1-23-31

УДК 621.791.763.2

**А. О. КОРОТЕЕВ**, канд. техн. наук, доц.

**Е. А. ФЕТИСОВА**

**А. А. КОРОТЕЕВА**

**А. В. КЛИМЕНКОВА**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ С МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ГАЗООБРАЗНЫМ ФЛЮСОМ SF<sub>6</sub>

### Аннотация

На основании экспериментальных исследований установлены зависимости механических характеристик наплавленного металла из высокопрочной стали, полученного в условиях модификации защитной газовой среды газообразным галогенидом SF<sub>6</sub>. Определены основные факторы, оказывающие влияние на формирование комплекса свойств материала, на основании чего разработаны практические рекомендации по наиболее эффективным концентрациям вводимого модификатора. Исследования проведены для высокопрочной низколегированной проволоки, предназначенной для сварки сталей бейнитной структуры с термомеханическим упрочнением.

### Ключевые слова:

механические характеристики, модификация защитной газовой среды, гексафторид серы, газовые флюсы, сварка в среде защитных газов, высокопрочная сталь.

### Для цитирования:

Механические характеристики наплавленного металла при дуговой сварке высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой среды газообразным флюсом SF<sub>6</sub> / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. В. Клименкова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1 (86). – С. 23–31.

### Введение

Формирование требуемого комплекса эксплуатационных характеристик сварного соединения является главной задачей при проектировании металлоконструкций и разработке технологии сварки. На сегодняшний день большую долю в объеме использования занимают высокопрочные стали, позволяющие существенно снизить металлоемкость конструкций при сохранении требуемых прочностных показателей. Особенно это актуально при производстве нагруженных элементов карьерной техники, кранов, несущих элементов рам и др. Такие материалы, несмотря на широкое распространение, обладают повышенной чувствительностью к подготовке деталей под сварку, параметрам режима

и, в целом, к культуре производства. Нередко это может приводить к тому, что используемые на предприятиях подходы являются неэффективными и могут приводить к появлению серьезных дефектов. Наиболее опасными и недопустимыми из них являются трещины. Основной причиной их образования является ряд факторов, ключевое значение в котором играет диффузионный водород. Такие трещины на сегодняшний день принято классифицировать как индуцированные водородом холодные трещины (НСС – Hydrogen Induced Cold Cracking).

Ранее авторами предложены пути снижения чувствительности стали к таким дефектам, основанные на применении так называемых газовых флюсов, модифицирующих добавок, вводимых

непосредственно в струю защитной газовой смеси при сварке и позволяющих связать водород в нерастворимые или слабо растворимые в жидком металле соединения. Такой механизм является наиболее эффективным, т. к. борьба с водородом, уже находящимся в металле, металлургическими путями затруднена. Основная идея предлагаемых решений заключается в применении газообразных галогенидов, стабильных при нормальных условиях и диссоциирующих в условиях высокотемпературного воздействия сварочной дуги с образованием свободного фтора, вступающего в реакцию с водородом с образованием HF. В результате исследований, опубликованных в ряде работ [1–3], определены наиболее эффективные концентрации SF<sub>6</sub>, вводимого в струю защитной газовой смеси Ar + CO<sub>2</sub>, с точки зрения стабилизации процесса плавления присадочной проволоки, переноса электродного металла через дуговой промежуток и особенностей формирования сварного шва.

В работе приведены результаты исследования механических характеристик наплавленного металла на примере сварочной проволоки, предназначенной для сварки высокопрочной износостой-

кой стали, используемой при изготовлении элементов платформ самосвалов.

### Основная часть

Состав защитной газовой атмосферы оказывает непосредственное влияние на комплекс механических характеристик сварного соединения. Это обусловлено непосредственным взаимодействием расплавленного металла с омывающим потоком защитной газовой смеси. Активные компоненты защитного газа изменяют химический состав материала и, таким образом, оказывают влияние на формирование конечной микроструктуры. Состав присадочных сварочных материалов выбирается с учетом этих изменений для конкретной газовой среды. В то же время введение новых компонентов и модификаторов может привести к тому, что этот выбор не будет являться оптимальным, в связи с чем характер формирования микроструктуры и комплекса свойств будет не оптимальным.

Химический состав и механические свойства используемой в качестве основного материала стали приведены в табл. 1 и 2.

Табл. 1. Химический состав стали Magstrong S700 MC

Массовая доля содержания химического элемента, %										
C	Si	Mn	P	S	Nb	Mo	Al	V	Ti	B
0,12	0,25	2,1	0,025	0,01	0,09	0,5	0,015	0,2	0,22	0,005

Табл. 2. Механические свойства стали Magstrong S700 MC

Характеристика	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>
Значение	700...820	750...950	≥ 17	KCV <sup>-40</sup> 40

На сегодняшний день существует два подхода к выполнению сварных соединений из таких материалов. В случае, если сварной шов не воспринимает действия рабочих нагрузок (является

связующим), возможно применение низкоуглеродистых низколегированных проволок группы Св-08Г2С (Св-08ГС), G3Si1. В остальных случаях используется высокопрочная проволока, легиро-

ванная, как правило, в небольших количествах Mn, Ni, Cr и Mo. В работе используется проволока ESAB OK Aristorod 69 EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo, химический состав и механические характеристики наплавленного металла

которой представлены в табл. 3 и 4. Проволока предназначена для сварки низколегированных высокопрочных сталей с пределом текучести до 700 МПа в смеси M21 (82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>).

Табл. 3. Химический состав наплавленного металла используемой проволоки (EN ISO 16834-A: G 694 M20 Mn3Ni1CrMo)

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 проволокой ESAB OK Aristorod 69 (EN ISO 16834-A: G 694 M20 Mn3Ni1CrMo)

Характеристика	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
Значение	730	800	19

Методика оценки механических характеристик наплавленного металла согласно ГОСТ 6996–66 заключалась в выполнении стыкового соединения пластин с большим зазором на подкладной остающейся пластине, после чего изготавливались образцы с ориентацией вдоль оси шва (тип II по ГОСТ 6996–66).

Большая величина зазора и площади поперечного сечения наплавленного металла исключала участие основного металла в формировании материала образца. Наплавка осуществлялась на режимах, приведенных в табл. 5, с различным количеством вводимого в защитную газовую смесь SF<sub>6</sub>.

Табл. 5. Режимы выполнения контрольных соединений для анализа свойств наплавленного металла

Номер образца	Состав защитной газовой смеси *	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость наплавки, м/ч
1	Ar + CO <sub>2</sub>	190...200	19...21	16...18
2	(Ar + CO <sub>2</sub> ) + 0,25 % SF <sub>6</sub>			
3	(Ar + CO <sub>2</sub> ) + 0,5 % SF <sub>6</sub>			
4	(Ar + CO <sub>2</sub> ) + 1,0 % SF <sub>6</sub>			
5	(Ar + CO <sub>2</sub> ) + 2,0 % SF <sub>6</sub>			
<i>Примечание</i> – * – в составе защитной газовой смеси соотношение между Ar и CO <sub>2</sub> составляет 82/18. SF <sub>6</sub> вводится уже после получения такой смеси				

Для проведения испытаний на статическое растяжение использовалась разрывная машина РГМ 1000 М1 с применением компьютерной системы регистрации параметров и построением диаграммы растяжения. Также проводились измерения твердости наплавленного

металла по шкале HV-10 с применением твердомера AFFRI-URBV-VRS. Испытания проводились при нормальной температуре. Внешний вид образцов представлен на рис. 1. Результаты проведения испытаний приведены в табл. 6, а также на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид образцов для определения свойств наплавленного металла при испытании на статическое растяжение и измерения твердости

Табл. 6. Результаты испытаний на статическое растяжение

Номер образца	Размер образца, мм	Нагрузка, соответствующая пределу текучести, Н / Предел текучести, МПа	Нагрузка, соответствующая временному сопротивлению разрыва, Н / Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость, HV-10
1	Ø 6,1	25126 / 859,7	26826 / 917,9	18,6	307
2	Ø 6,0	22540 / 797,2	25206 / 891,5	24	277
3	Ø 6,1	21700 / 746,6	24260 / 834,7	22	276
4	Ø 6,0	20550 / 703,1	22200 / 759,6	18,1	272
5	Ø 6,0	19851 / 690,5	21723 / 755,6	15,4	270

*Примечание* – Приведены средние значения по результатам испытаний трех образцов. Результаты измерения твердости представлены как среднее значение по шести измерениям

По полученным результатам установлено, что введение SF<sub>6</sub> в состав защитной газовой среды при сварке и наплавке оказывает существенное влияние на формирование комплекса меха-

нических характеристик наплавленного металла. В первую очередь следует отметить некоторое снижение временного сопротивления разрыву и предела текучести. По-видимому, это обуслов-

лено снижением количества углерода в наплавленном металле, о чем свиде-

тельствуют данные, публикуемые ранее [4].

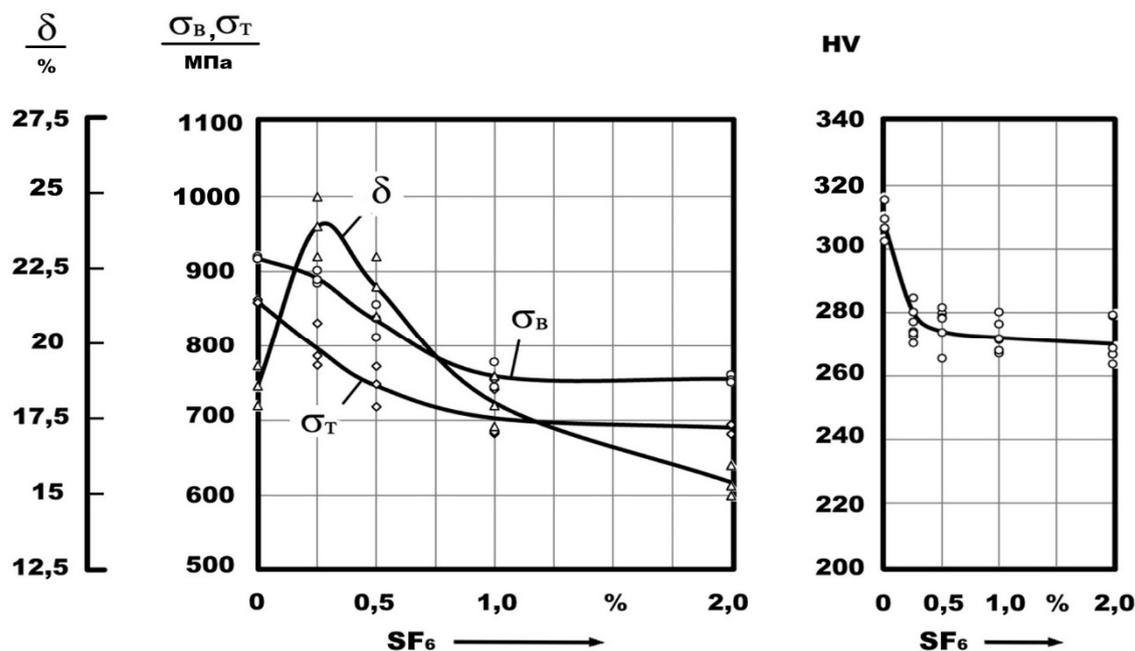


Рис. 2. Результаты механических испытаний наплавленного металла на статическое растяжение и определение твердости по шкале HV-10

Вместе с тем, введение SF<sub>6</sub> в количестве 0,25 %...0,5 % позволяет существенно повысить значения относительного удлинения. Особенно активно (до 25 %) этот рост наблюдается при содержании около 0,25 % SF<sub>6</sub>. Учитывая тот факт, что при такой концентрации SF<sub>6</sub> значения временного сопротивления разрыву и предела текучести находятся в пределах допустимых (более 800 и 730 МПа соответственно, согласно предъявляемым к материалу требованиям), повышение пластичности металла будет благоприятно сказываться на формировании сварного соединения.

Значения твердости наплавленного металла также снижаются в среднем на 15 %...20 %. Причем введение 0,25 % SF<sub>6</sub> приводит к наиболее интенсивному снижению твердости, после чего значения остаются в пределах 270 HV.

Одной из важнейших характеристик, определяющих работоспособность сварного соединения, является ударная вязкость. Большинство материалов, об-

ладая высокой прочностью, зачастую теряют свою способность воспринимать воздействие ударных динамических нагрузок, особенно при отрицательных температурах, что вызывает хрупкие разрушения и выход из строя элементов конструкций. Как было установлено нами ранее, в силу изменения химического состава материала в условиях модификации защитной газовой среды галогенидом SF<sub>6</sub>, а также вызванных этим изменений твердости и относительного удлинения (рис. 3), важное значение имеет характер зависимости ударной вязкости от состава газовой среды при сварке и наплавке при различных температурах.

Ударную вязкость образцов фиксировали при различных температурах от минус 40 °С до плюс 20 °С. Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре ИО 5003-0,3. Для охлаждения образцов до минимальных температур проведения испытаний (минус 40 °С) использовался криостат, позволяющий

точно контролировать температуру и поддерживать её на постоянном уровне в течение длительного времени.

Для проведения испытаний на ударный изгиб наплавленного металла сварного шва были изготовлены образцы

с V-образным концентратором по СТБ ЕН 875 (см. рис. 3).

Результаты испытаний представлены в виде графиков зависимости на рис. 4, а также сведены в табл. 7.



Рис. 3. Внешний вид образцов для проведения испытаний на ударный изгиб наплавленного металла

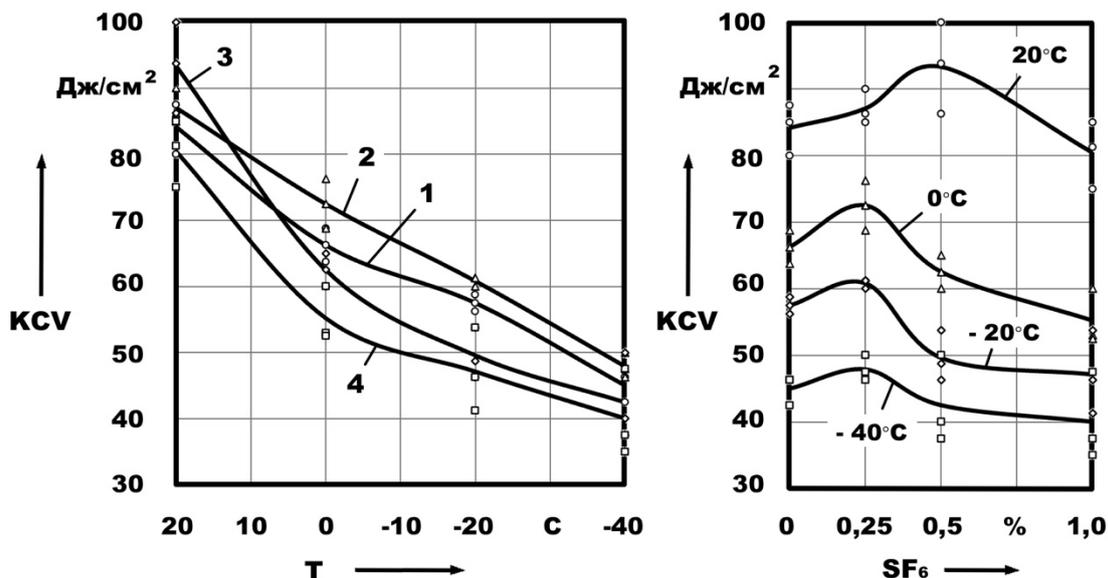


Рис. 4. Результаты испытаний наплавленного металла на ударный изгиб: 1 – 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>; 2 – 0,25 SF<sub>6</sub>; 3 – 0,5 SF<sub>6</sub>; 4 – 1,0 SF<sub>6</sub>

Табл. 7. Результаты испытаний образцов на ударный изгиб

Состав защитной газовой смеси	Тип образца	Номер образца	Температура испытаний, °С	Энергия удара*, Дж	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>
Ar + CO <sub>2</sub>	VWT 0/2	1-1	+20	67,3	84,2
		1-2	0	53,0	66,25
		1-3	-20	46,0	57,5
		1-4	-40	36,0	45
(Ar + CO <sub>2</sub> ) + 0,25 % SF <sub>6</sub>	VWT 0/2	1-1	+20	69,7	87,1
		1-2	0	58,0	72,5
		1-3	-20	48,7	60,8
		1-4	-40	38,4	47,9
(Ar + CO <sub>2</sub> ) + 0,5 % SF <sub>6</sub>	VWT 0/2	1-1	+20	74,7	93,4
		1-2	0	50,0	62,5
		1-3	-20	39,7	49,6
		1-4	-40	34,0	42,5
(Ar + CO <sub>2</sub> ) + 1,0 % SF <sub>6</sub>	VWT 0/2	1-1	+20	64,4	80,4
		1-2	0	44,2	55,2
		1-3	-20	37,7	47,1
		1-4	-40	32,0	40
<i>Примечание</i> – * – приведены средние значения по результатам испытаний трех образцов					

По результатам испытаний на ударный изгиб установлено, что введение SF<sub>6</sub> в количестве 0,25 % (0,25 %...0,5 % при температуре плюс 20 °С) позволяет повысить значение ударной вязкости на 5 %...15 % по сравнению с наплавкой в среде 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>. По-видимому, это обусловлено повышением пластичности материала вследствие снижения массовой доли углерода в наплавленном металле. Чем выше температура испытаний, тем эффект более ярко выражен (см. рис. 4). При этом полученные результаты хорошо коррелируются с дан-

ными, представленными на рис. 2. Для всех вариантов наплавки с понижением температуры испытаний ударная вязкость плавно снижается, достигая значений 40...50 Дж/см<sup>2</sup>. Это является естественным поведением материала. Стоит отметить, что на графиках не наблюдается резкого падения значений ударной вязкости, что свидетельствовало бы о достижении критической температуры хрупкости. Снижение ударной вязкости при введении свыше 0,25 %...0,5 % SF<sub>6</sub> обусловлено дальнейшим изменением химического состава наплавленного металла и снижением

его пластичности.

### **Выводы**

Таким образом, по результатам проведенных исследований установлено следующее.

1. Введение SF<sub>6</sub> в защитную газовую среду в количестве 0,25 % позволяет повысить относительное удлинение материала наплавленного металла на 25 % по сравнению с наплавкой в среде 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> при некотором снижении временного сопротивления при испытании на статическое растяжение, что обусловлено, в первую очередь, изменением химического состава, в частности, массовой доли углерода. При этом следует отметить, что значения временного сопротивления и предела текучести материала остаются на

допустимом уровне.

2. Ударная вязкость наплавленного металла имеет наибольшее значение при введении SF<sub>6</sub> объемной долей 0,25 %. Этот результат сохраняется во всем диапазоне температур испытаний. Повышение ударной вязкости связано с изменением химического состава наплавленного металла. Чем выше температура испытаний, тем эффект выражен более ярко.

3. По полученным результатам установлено, что наиболее эффективным с точки зрения дальнейшего формирования свойств сварного соединения комплексом механических характеристик обладает наплавленный металл, полученный с введением 0,25 % SF<sub>6</sub> применительно к присадочным проволокам рассматриваемого типа.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Особенности переноса электродного металла при дуговой сварке и наплавке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF<sub>6</sub> (Ar + CO<sub>2</sub> + SF<sub>6</sub>) / 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. Особенности проплавления основного металла при дуговой наплавке и сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF<sub>6</sub> (Ar + CO<sub>2</sub> + SF<sub>6</sub>) / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. В. Пятакова [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (83). – С. 77–87.
4. **Коротеев, А. О.** Особенности перехода легирующих элементов через дуговой промежуток в условиях модификации защитной газовой среды Ar + CO<sub>2</sub> галогенидом SF<sub>6</sub> / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 14–25.

*Статья сдана в редакцию 27 января 2025 года*

Контакты:

karatseyeu\_artur@fastmail.com (Коротеев Артур Олегович);  
fetisova9891@gmail.com (Фетисова Екатерина Анатольевна);  
sashaklemiato@mail.ru (Коротеева Александра Александровна);  
piperkaaaa@gmail.com (Клименкова Александра Владимировна).

**A. O. KARATSEYEU, E. A. FIATSISSAVA, A. A. KARATSEYEVA, A. V. KLIMIANKOVA**

**MECHANICAL CHARACTERISTICS OF DEPOSITED METAL IN ARC WELDING OF HIGH-STRENGTH STEELS WITH MODIFICATION OF SHIELDING GAS ENVIRONMENT BY SF<sub>6</sub> GASEOUS FLUX**

**Abstract**

Based on the experimental studies, mechanical characteristics of a deposited metal from high-strength steel obtained under the modification of protective gas environment with gaseous SF<sub>6</sub> halide were determined. The main factors influencing the formation of a set of material properties were identified, and on this basis practical recommendations were developed for the most effective concentrations of the introduced modifier. The studies were conducted for high-strength low-alloy wire intended for welding steels of bainitic structure with thermomechanical strengthening.

**Keywords:**

mechanical properties, modification of shielding gas environment, sulfur hexafluoride, gas fluxes, gas-shielded welding, high-strength steel, transfer of alloying elements.

**For citation:**

Mechanical characteristics of deposited metal in arc welding of high-strength steels with modification of shielding gas environment by SF<sub>6</sub> gaseous flux / A. O. Karatseyeu, E. A. Fiatsisava, A. A. Karatseyeva, A. V. Klimiankova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 1 (86). – P. 23–31.