

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-14-25

УДК 621.791.763.2

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

Е. А. ФЕТИСОВА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЧЕРЕЗ ДУГОВОЙ ПРОМЕЖУТОК В УСЛОВИЯХ МОДИФИКАЦИИ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ГАЛОГЕНИДОМ SF_6

Аннотация

На основании экспериментальных исследований установлены закономерности изменения концентрации легирующих элементов присадочной проволоки в наплавленном металле, вызванного модификацией защитной газовой среды ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) галогенидом SF_6 . Определены ключевые факторы, оказывающие влияние на переход элементов через дуговой промежуток, а также предложены подходы к объяснению металлургических процессов, происходящих в высокотемпературной области дугового промежутка. Исследования проведены для высокопрочной низколегированной проволоки, предназначенной для сварки сталей бейнитной структуры с термомеханическим упрочнением.

Ключевые слова:

переход легирующих элементов, дуговая наплавка, сварка, модификация защитной газовой среды, гексафторид серы.

Для цитирования:

Коротеев, А. О. Особенности перехода легирующих элементов через дуговой промежуток в условиях модификации защитной газовой среды $\text{Ar} + \text{CO}_2$ галогенидом SF_6 / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 14–25.

Введение

Высокопрочные стали являются эффективным материалом для создания нагруженных элементов металлоконструкций, снижения металлоемкости при обеспечении требуемой несущей способности изделий, непосредственно воспринимающих рабочие нагрузки. Современные высокопрочные стали, используемые для изготовления сварных металлоконструкций, как правило, относятся к низколегированным низкоуглеродистым материалам. При этом высокие прочностные показатели обеспечиваются комплексной системой легирования, обеспечивающей формирование требуемой микроструктуры в результате сложной термомеханической обработки (прокатки, с контролируемой скоростью охлаждения в горячем состоянии). Содержание же каждого элемента невелико и эффект упрочнения достигается путем создания комплексной системы

взаимодополняющих эффектов.

С точки зрения сварки, такие стали более предпочтительны, по сравнению с классическими высокопрочными материалами (низкоуглеродистые среднелегированные и среднеуглеродистые низколегированные стали), т. к. содержат небольшое количество углерода и легирующих элементов. Формируемая микроструктура обладает достаточным уровнем пластичности, что существенно упрощает технологию сварки и термической обработки, если она необходима.

Традиционно высокопрочные стали проявляют повышенную чувствительность к диффузионному водороду, что обусловлено его крайне низкой подвижностью в структурах мартенсита и бейнита. При неблагоприятном стечении обстоятельств это может вызывать появление трещин по замедленному механизму разрушения, инициированных повышением давления в микропустотах образующейся молекулярной формой

водорода. Особенно это актуально при наличии на поверхности свариваемых деталей адсорбированной влаги, повышенной влажности помещения и сварочных материалов, недостаточно качественной подготовки деталей под сварку. Ограничение содержания водорода в таких материалах является крайне важной задачей и реализуется на практике посредством различных подходов. В ряде статей нами предлагается для связывания водорода в нерастворимые в жидком металле соединения при сварке и наплавке в среде защитных газов использовать газообразный гексафторид серы SF_6 , галогенид, диссоциирующий при высоких температурах дугового промежутка [1–4] с образованием активных продуктов. В работах показана эффективность такого способа с точки зрения снижения количества водорода и особенности выбора значений параметров режима.

Переход расплавленного металла через дуговой промежуток сопровождается изменением его химического состава в силу высоких температур, металлургических реакций взаимодействия с защитной газовой атмосферой и др. Это вызывает необходимость учета потерь легирующих элементов при разработке сварочных материалов с целью обеспечения их требуемого состава в наплавленном металле. В противном случае, нарушение процентного содержания основных легирующих элементов может вызвать потерю эксплуатационных характеристик и снижение работоспособности соединения, что можно часто наблюдать в случае неправильного выбора материалов или защитной газовой среды. Модификация газовой атмосферы будет оказывать прямое воздействие на характер перехода элементов, особенно в случае введения активных компонентов, участвующих в металлургических реакциях на стадии капли в сильно перегретом состоянии. Этим вопросам посвящена данная статья.

Основная часть

Для оценки характера перехода легирующих элементов через дуговой промежуток нами проведена серия экспериментальных исследований, сущность которых заключалась в выполнении наплавки на пластины с использованием различных значений параметров режима и состава защитной газовой атмосферы ($Ar + CO_2 + SF_6$), и последующем спектральным оптико-эмиссионным анализом химического состава на установке SOLARIS GNR-SCP (рис. 1). Наплавка выполнялась на робототехническом комплексе в восемь слоев с регистрацией значений параметров режима системой РКДП-0401. Внешний вид образцов представлен на рис. 1.

При проведении экспериментов использовалась проволока ESAB OK Aristorod 69 EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo, химический состав наплавленного металла которой представлен в табл. 1. Проволока предназначена для сварки низколегированных высокопрочных сталей с пределом текучести до 700 МПа в смеси M21 (82 % Ar + 18 % CO_2).

Основным параметром режима, оказывающим непосредственное влияние на переход элементов через дуговой промежуток, является напряжение на дуге (при заданных условиях технологического процесса значения силы тока). Это объясняется, в первую очередь, изменением времени контактирования расплавленного металла присадочной проволоки с омывающим его потоком защитного газа, т. к. повышение напряжения будет способствовать увеличению длины дуги и, как следствие, увеличению времени существования фазы ее горения между короткими замыканиями дугового промежутка. Ранее рассматривались особенности влияния напряжения на частоту этих замыканий в условиях модификации

защитной атмосферы галогенидом SF_6 . В представленных исследованиях используется диапазон регулирования зна-

чений параметров режима в соответствии с полученными ранее результатами [1].

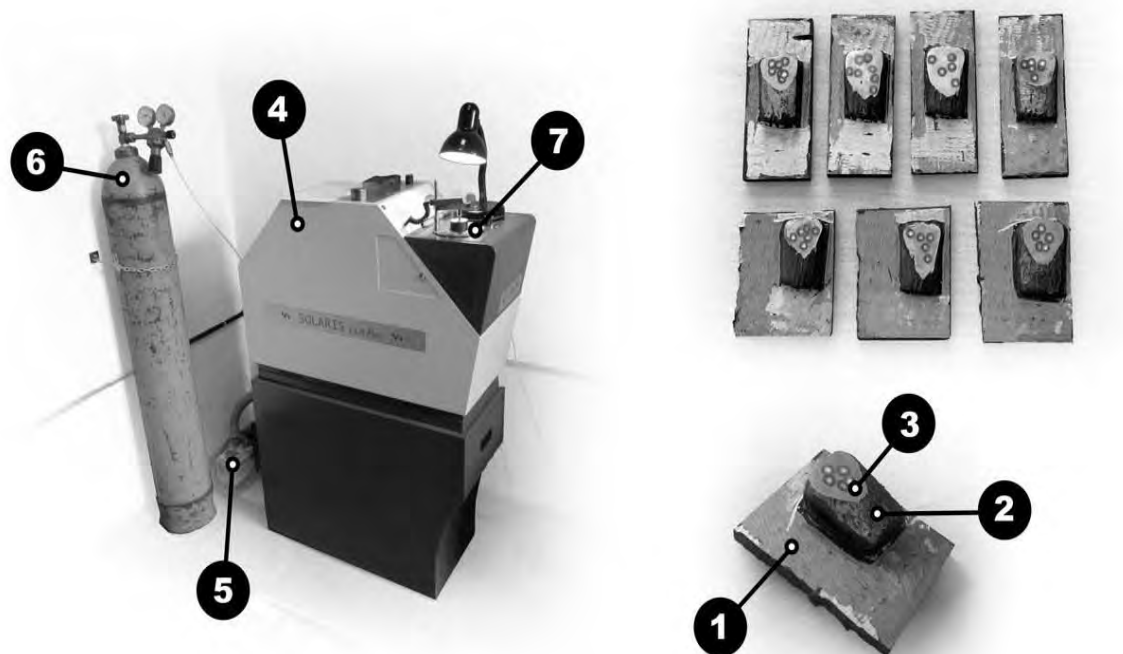


Рис. 1. Установка для проведения спектрального оптико-эмиссионного анализа и внешний вид образцов: 1 – пластина для выполнения наплавки; 2 – наплавка; 3 – плоская площадка с отпечатками от проведения спектрального оптико-эмиссионного анализа массовой доли элементов; 4 – спектрометр SOLARIS GNR-SCP; 5 – вакуумный насос; 6 – баллон с аргонем высокой чистоты; 7 – предметный столик с образцом для исследований

Табл. 1. Химический состав используемой проволоки

Содержание 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

В процессе выполнения наплавки производилась зачистка промежуточных слоев и выдерживалась температура остывания предыдущего слоя не выше $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. После выполнения наплавки на ее поверхности методом фрезеровки выполнялась площадка площадью $140...160\text{ мм}^2$ для размещения на рабочей поверхности спектрометра и проведения химического анализа.

Основными химическими элементами, представляющими интерес в данной работе, являются раскислители (Mn и Si), углерод (C), сера (S), являющаяся продуктом диссоциации SF_6 и вредной примесью для стали (см. табл. 1). Также оценка производилась по основным легирующим элементам (Cr, Ni, V, Mo, Ti). Однако, как и следовало ожидать, их процентное соотношение осталось прежним, что объясняется активностью

раскислителей и их достаточным количеством для подавления реакций окисления.

Результаты анализа содержания кремния и марганца в наплавленном металле в виде графических зависимостей представлены на рис. 2 и 3. Кривые на графиках представляют варианты наплавки с различной концентрацией SF_6 . Так как введение гаксафторида серы приводит к существенному изменению условий существования дугового промежутка, эксперименты проведены для различных диапазонов регулирования напряжения на дуге, что обусловлено необходимостью обеспечения стабильности протекания процесса (чем выше концентрация SF_6 , тем кривая сдвигается в область более высоких значений напряжения). Этот эффект был описан ранее в ряде публикаций [1].

В целом, необходимо отметить общее снижение процентного содержания кремния (Si) и марганца (Mn) в наплавленном металле для представленных случаев. В то же время анализ кривых для одного заданного значения напряжения свидетельствует о некотором росте концентрации каждого из них (кривые, приведенные рядом с графиками). Это объясняется тем, что в случае введения SF_6 в защитную газовую среду при сохранении значений скорости подачи присадочной проволоки и напряжения на дуге, во вновь сложившихся условиях последнее становится заниженным относительно оптимального, что в конечном счете приводит к уменьшению длины дуги и ее мощности, и, как следствие, к снижению времени контактирования расплавленного металла с омывающим его потоком защитной газовой смеси, что по естественным причинам снижает высокотемпературные потери легирующих элементов в дуговом промежутке.

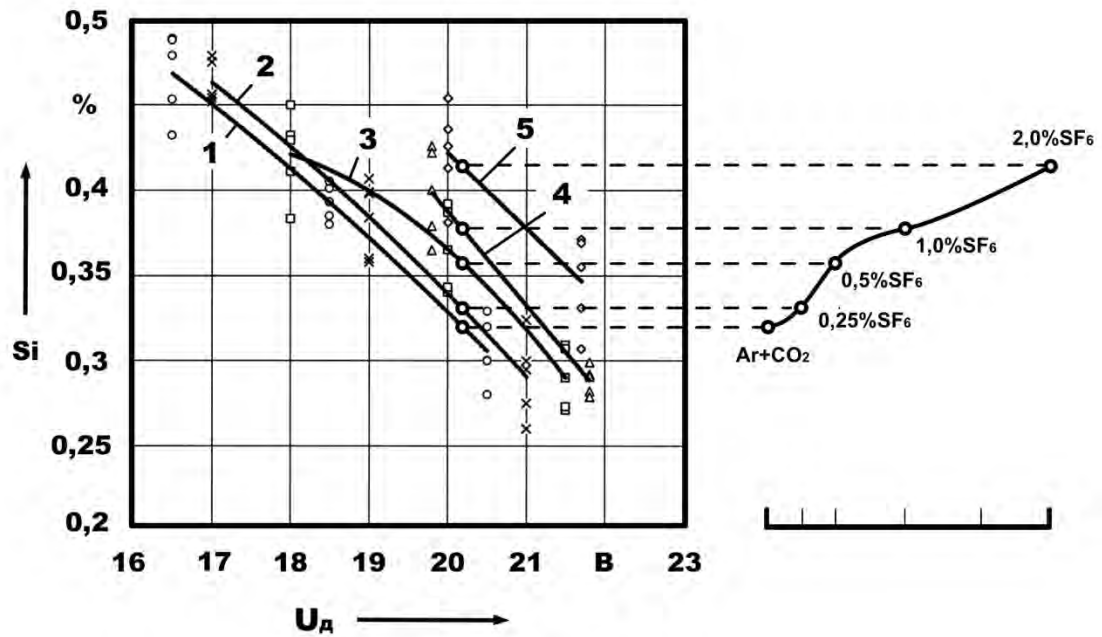
Роль кремния и марганца, как раскислителей, с введением SF_6 , по нашему мнению, заметно не повышается, что обусловлено относительным постоян-

ством окислительного потенциала защитной газовой атмосферы. При этом следует отметить, что концентрация кремния в наплавленном металле повышается более активно, по сравнению с марганцем, чье содержание практически остается постоянным. По-видимому, это объясняется частичным связыванием марганца с серой с образованием сульфидов MnS , что является положительным эффектом, но недостаточным для эффективной блокировки растворимости серы в наплавленном металле в рассматриваемых концентрациях. Возможно, в случае применения проволок с большим содержанием марганца этот эффект будет более явным, однако это требует проведения дополнительных исследований.

Результаты анализа содержания серы в наплавленном металле представлены на рис. 4.

Процентное содержание серы в наплавленном металле возрастает с повышением концентрации SF_6 в защитной газовой среде. Это является естественным, т. к. в высокотемпературной области защитной атмосферы вблизи дугового разряда повышается концентрация продуктов диссоциации SF_6 с образованием активных компонентов, способных вступать в реакции с расплавленным, сильно перегретым присадочным металлом в виде капли на торце плавящейся проволоки. Причем повышение напряжения приводит к более активному росту серы, что объясняется увеличением длины дуги и, как следствие, времени контактирования расплавленной капли с омывающим ее потоком защитной газовой смеси между короткими замыканиями дугового промежутка. Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований частоты переноса электродного металла и особенностей плавления присадочной проволоки в условиях модификации защитной смеси SF_6 , полученные нами ранее [1].

а)



б)

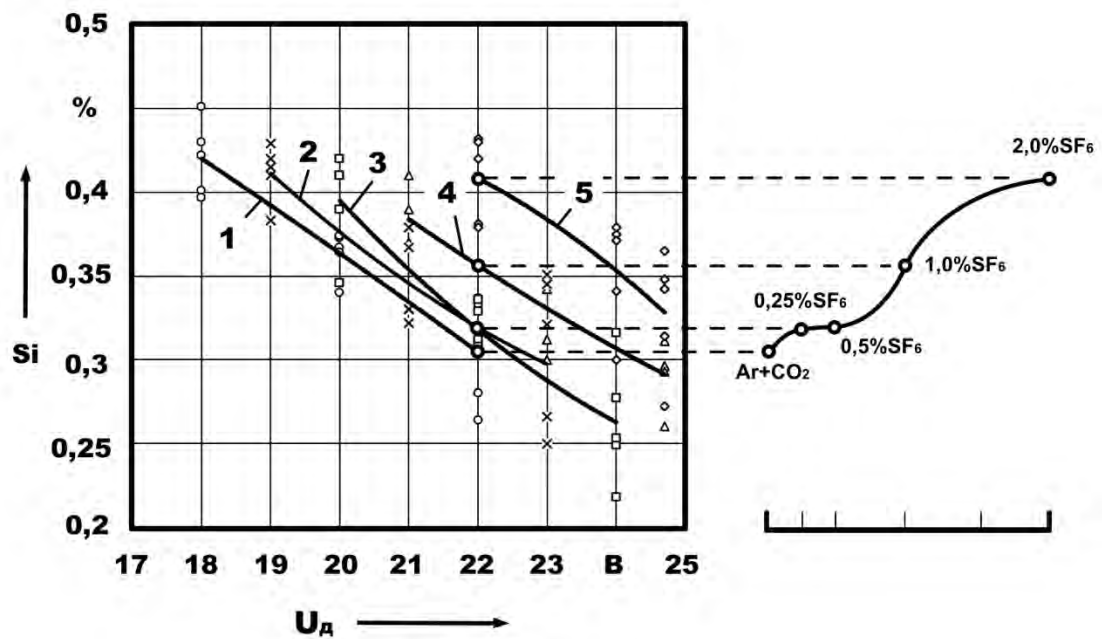
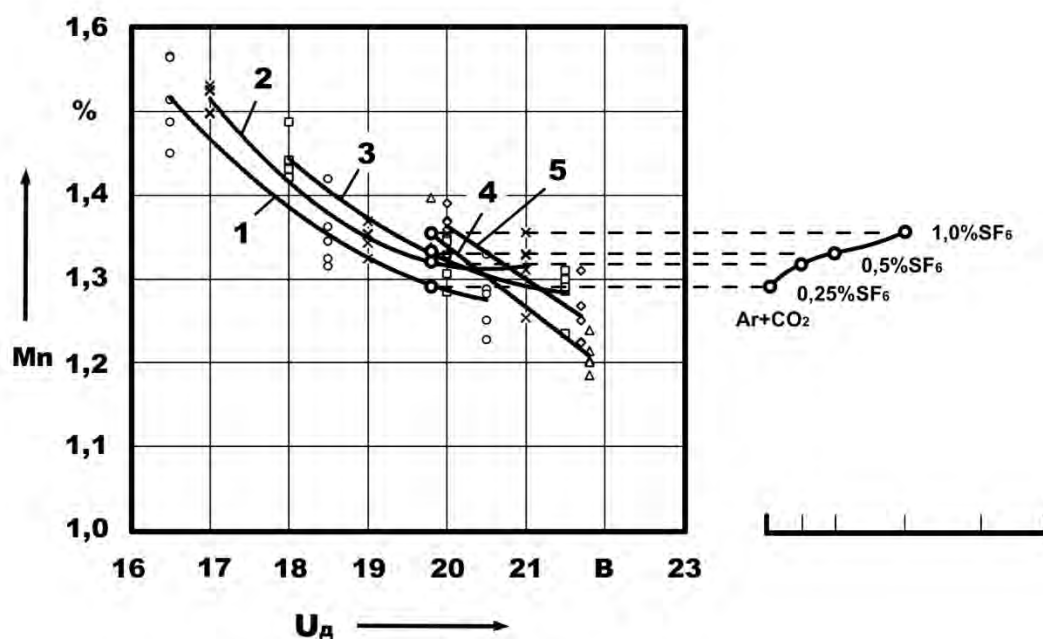


Рис. 2. Зависимость содержания кремния (Si) в наплавленном металле от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF_6 в защитную атмосферу: а – $V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; б – $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2 ; 2 – (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6 ; 3 – (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6 ; 4 – (Ar + CO_2) + 1 % SF_6 ; 5 – (Ar + CO_2) + 2 % SF_6

а)



б)

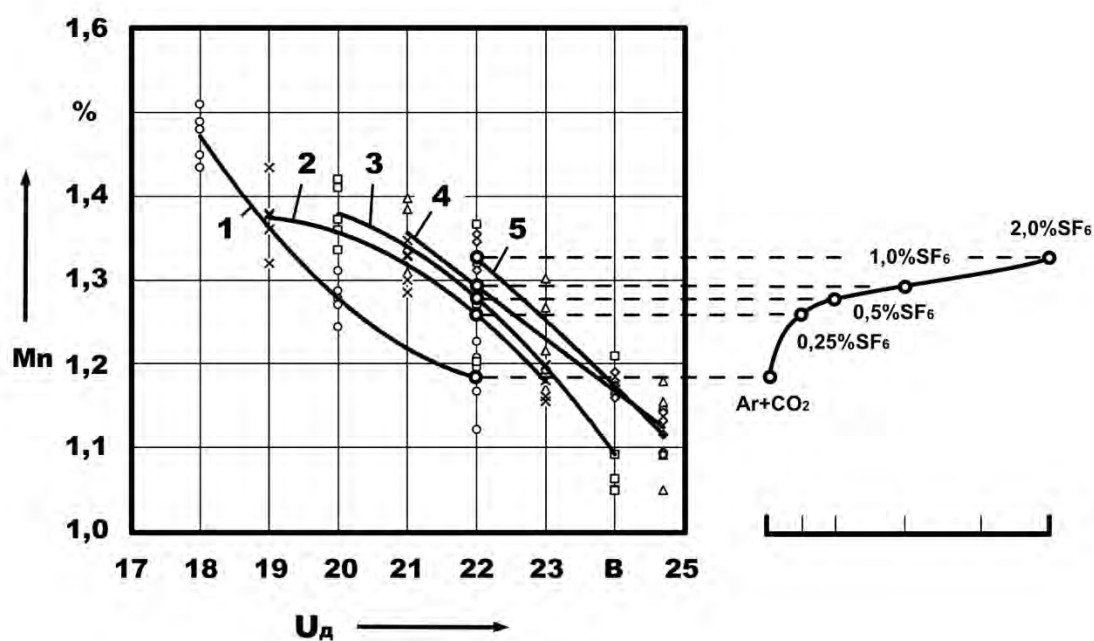
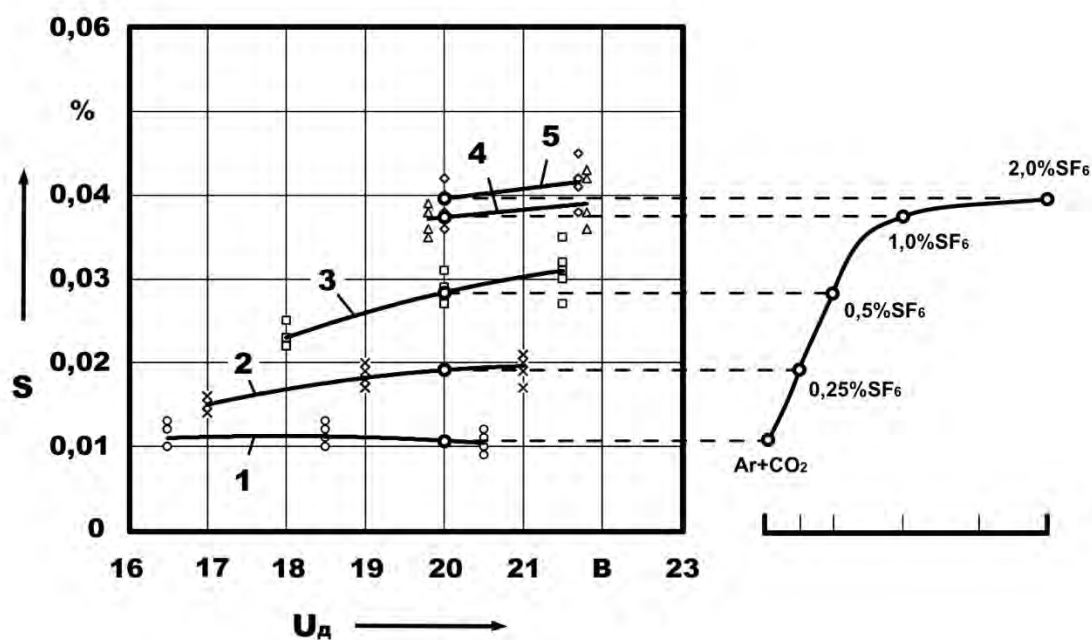


Рис. 3. Зависимость содержания марганца (Mn) в наплавленном металле от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF_6 в защитную атмосферу: а – $V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; б – $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2 ; 2 – (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6 ; 3 – (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6 ; 4 – (Ar + CO_2) + 1 % SF_6 ; 5 – (Ar + CO_2) + 2 % SF_6

а)



б)

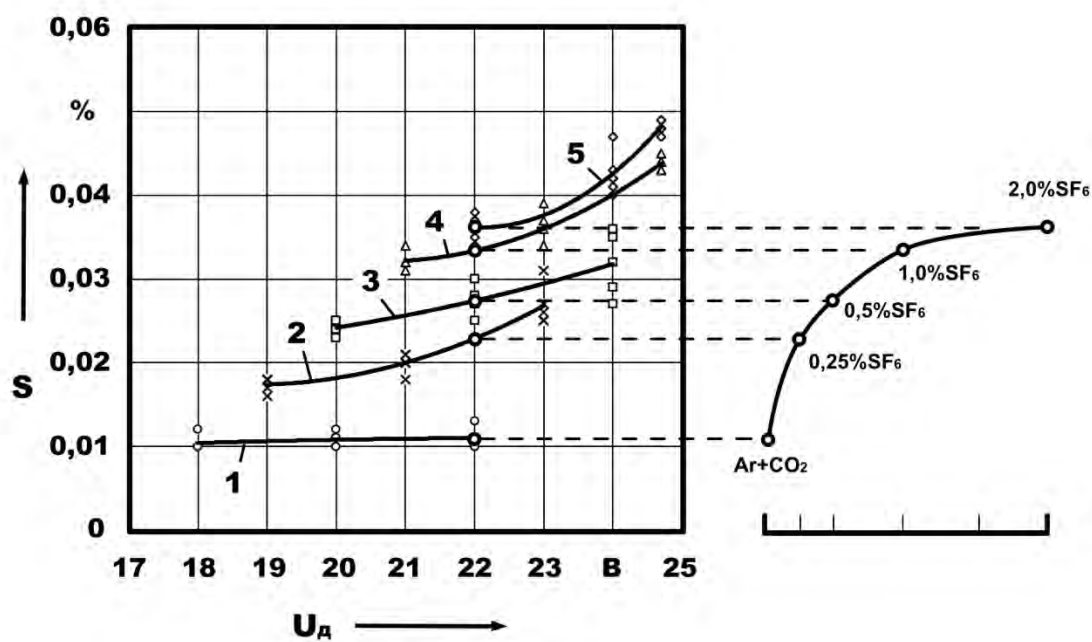


Рис. 4. Зависимость содержания серы (S) в наплавленном металле от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF₆ в защитную атмосферу: а – $V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; б – $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 – (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 3 – (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 4 – (Ar + CO₂) + 1 % SF₆; 5 – (Ar + CO₂) + 2 % SF₆

Напряжение на дуге практически не оказывает влияния на рост серы в наплавленном металле в случае применения в качестве защитной среды смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ без SF_6 (см. рис. 2, кривые 4), т. к. отсутствует источник серы как таковой. Кроме того, в некоторых случаях можно заметить (см. рис. 4, а, кривая 1) некоторое его падение из-за естественных потерь в высокотемпературной области при повышенных напряжениях (свыше 19 В при скорости подачи присадочной проволоки 3,7 м/мин). В случае же повышения концентрации SF_6 влияние напряжения на дуге на количество серы в наплавленном металле становится все более явным. Угол наклона графиков к горизонтальной оси увеличивается. Следует отметить также, что несмотря на то, что сера является вредной примесью для большинства конструкционных материалов, введение до 0,5 % SF_6 не приводит к ее росту сверх недопустимых значений. Особенно эффективно применение пониженных напряжений, что позволяет снизить концентрацию серы до значений менее 0,025 %.

Анализ изменения содержания углерода в наплавленном металле представлен на рис. 5. Наблюдается снижение концентрации для всех используемых вариантов наплавки. Вероятной причиной этого является его взаимодействие с продуктами диссоциации SF_6 с образованием CF_4 . При этом концентрация углерода в случае введения до 2 % может быть снижена в 3 раза, что является существенным эффектом, т. к. углерод является важнейшим элементом, обеспечивающим комплекс эксплуатационных характеристик стали и особенностей поведения всей системы легирующих элементов.

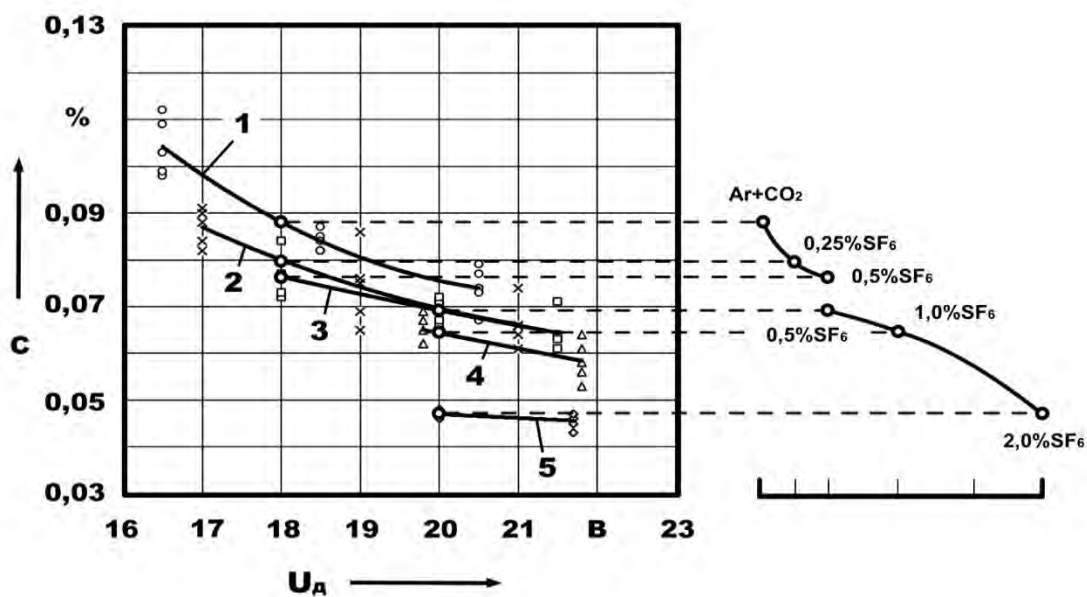
Важным вопросом, решение которого позволяет сформировать более комплексную картину поведения газовых компонентов в зоне горения дуги,

является влияние окислительного потенциала защитной среды на поведение SF_6 и переход серы в наплавленный металл. Наиболее эффективным механизмом в этом случае является управление соотношением Ar и CO_2 на первом этапе подготовки состава защитной атмосферы. Углекислый газ может взаимодействовать с продуктами диссоциации гексафторида серы. Кроме того, возможны непосредственные реакции с кислородом в ионизированном состоянии в высокотемпературной области.

Для анализа возможности изменения концентрации серы в наплавленном металле путем изменения количества углекислого газа в диапазоне регулирования 2 %...25 % нами проведена серия экспериментальных исследований. Результаты представлены на графиках рис. 6. На первом участке графиков (см. рис. 6) при содержании углекислого газа в защитной газовой смеси до 10 %...12 % наблюдается некоторый рост концентрации серы в наплавленном металле, что при сохранении остальных параметров постоянными обусловлено завышенным напряжением на дуге (значение выбиралось по содержанию 18 % CO_2).

По мере увеличения концентрации CO_2 в защитной атмосфере длина дуги уменьшается, что приводит к сокращению времени активного взаимодействия перегретой капли с омывающим потоком газа (содержащего гексафторид, являющийся источником серы). При значениях углекислого газа свыше 12 % наблюдается активное уменьшение количества серы, а это, по-видимому, обусловлено преобладающим эффектом взаимодействия углекислого газа с продуктами высокотемпературной диссоциации SF_6 , что оказывается более значимым на фоне уменьшающейся длины дуги, способствующей его некоторому росту.

а)



б)

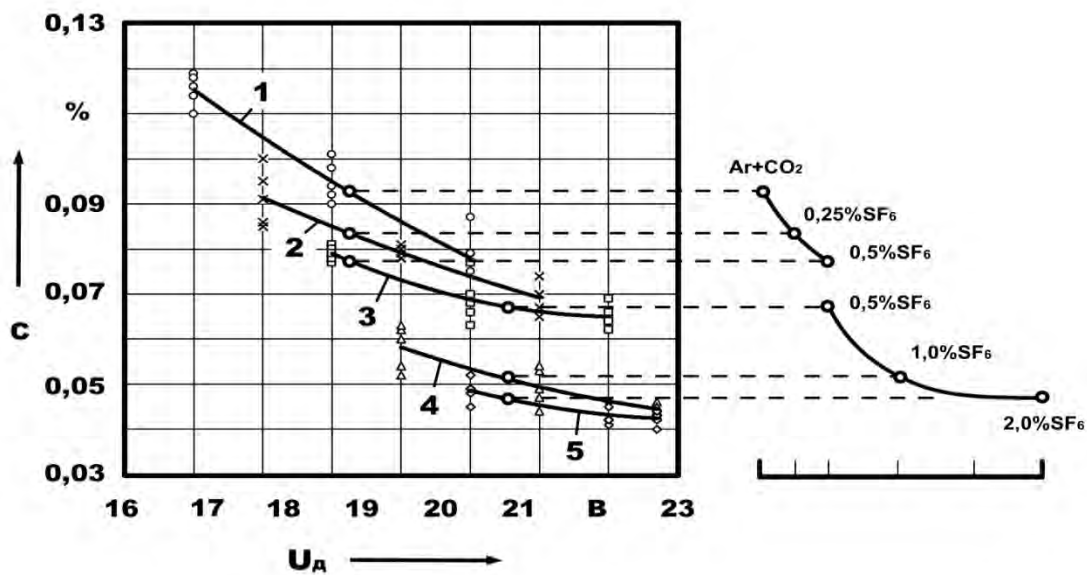


Рис. 5. Зависимость содержания углерода (C) в наплавленном металле от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF_6 в защитную атмосферу: а – $V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; б – $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 – (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 3 – (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 4 – (Ar + CO₂) + 1 % SF₆; 5 – (Ar + CO₂) + 2 % SF₆

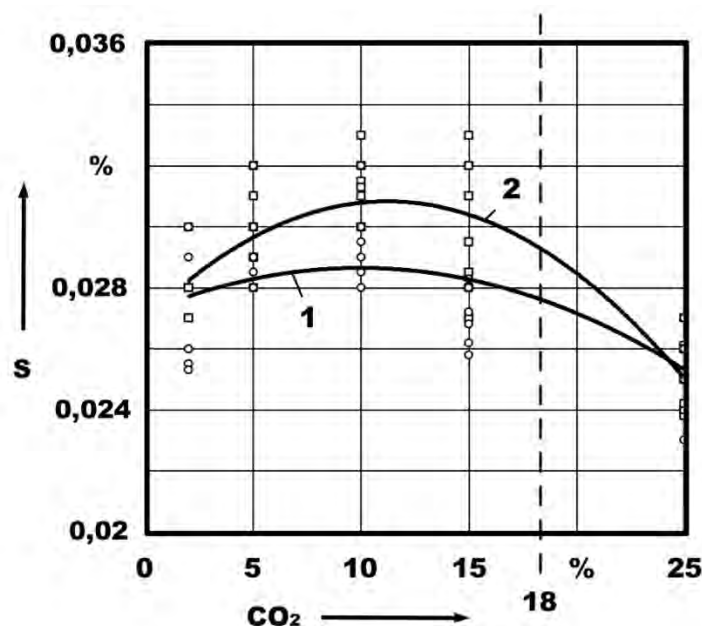


Рис. 6. Зависимость содержания серы (S) в наплавленном металле от количества углекислого газа в защитной газовой смеси (содержание $\text{SF}_6 = 0,5\%$, остальное аргон): 1 – $V_{\text{н.пр.}} = 3,7$ м/мин; 2 – $V_{\text{н.пр.}} = 5,3$ м/мин

Таким образом, изменение окислительного потенциала защитной газовой среды посредством управления соотношением Ar и CO_2 на первом этапе ее образования (до введения SF_6) также может выступать одним из эффективных механизмов снижения количества серы в наплавленном металле. Однако механизм такого воздействия сложен и является предметом отдельного исследования вне рассматриваемой работы.

Поведение кремния и марганца в целом соответствует предполагаемому (рис. 7), что объясняется их активностью по отношению к кислороду, как элементов раскислителей.

При этом эффект от этого взаимодействия более явный, чем от снижения длины дуги, что приводит к снижению концентрации элементов во всем диапазоне значений изменения параметров при проведении эксперимента.

Выводы

Введение гексафторида серы SF_6 в состав защитной газовой атмосферы

оказывает существенное влияние на характер перехода легирующих элементов через дуговой промежуток.

1. Введения SF_6 в защитную газую среду при сохранении значений скорости подачи присадочной проволоки и напряжения на дуге приводит к уменьшению длины дуги и ее мощности и, как следствие, к снижению времени контактирования расплавленного металла с омывающим его потоком защитной газовой смеси, что по естественным причинам снижает высокотемпературные потери легирующих элементов в дуговом промежутке. Это вызывает повышение количества раскислителей (Mn и Si) в составе наплавленного металла в среднем на 30 %...32 % для Si и 8 %...10 % для Mn. Менее интенсивный рост Mn обусловлен частичным связыванием его с серой с образованием сульфидов MnS , что является положительным, но недостаточным эффектом для блокировки растворимости серы в наплавленном металле в рассматриваемом диапазоне значений параметров режима и концентраций компонентов

защитной газовой смеси.

2. Количество серы в наплавленном металле с повышением концентрации SF_6 увеличивается, причем наиболее существенное влияние на процесс оказывает напряжение на дуге. Эффективным способом сдерживания перехода серы в наплавленный металл является

сварка и наплавка на пониженных, более чем на 2...3 В, значениях напряжения. Также одним из механизмов предотвращения чрезмерного перехода серы в наплавленный металл является изменение окислительного потенциала защитной атмосферы.

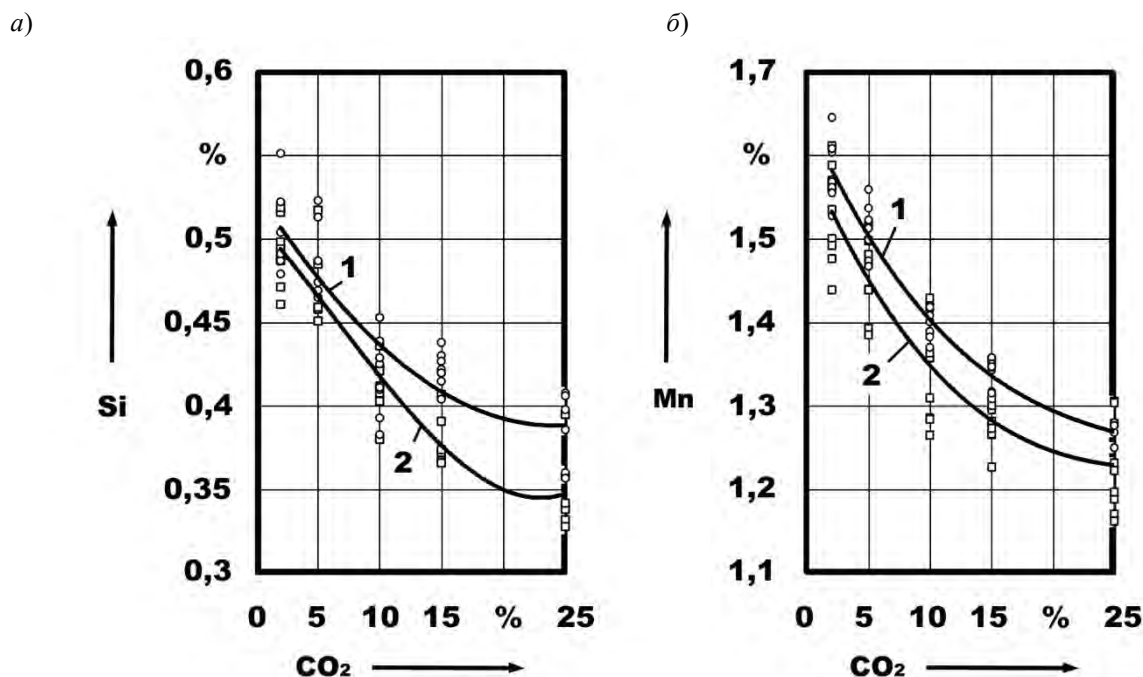


Рис. 7. Зависимость содержания кремния (Si) (а) и марганца (Mn) (б) в наплавленном металле от количества углекислого газа в защитной газовой смеси (содержание $\text{SF}_6 = 0,5\%$, остальное аргон): 1 – $V_{\text{пр.}} = 3,7$ м/мин; 2 – $V_{\text{пр.}} = 5,3$ м/мин

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности переноса электродного металла при дуговой сварке и наплавке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$) / А. О. Коротеев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2024. – № 1 (82). – С. 25–35.
2. Коротеев, А. О. Дуговая сварка с функциональной модификацией защитной газовой атмосферы галогидными соединениями / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 112–118.
3. Фетисова, Е. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галогидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.

Статья сдана в редакцию 13 июня 2024 года

Контакты:

karatseyeu_artur@fastmail.com (Коротеев Артур Олегович);
fetisova9891@gmail.com (Фетисова Екатерина Анатольевна).

A. O. KARATSEYEU, E. A. FIATSISSAVA

FEATURES OF TRANSFER OF ALLOYING ELEMENTS THROUGH THE ARC GAP UNDER CONDITIONS OF MODIFICATION OF Ar + CO₂ PROTECTIVE GAS ENVIRONMENT WITH SF₆ HALOGENIDE

Abstract

Based on experimental studies, patterns of changes in the concentration of alloying elements of the filler wire in the deposited metal have been established, which are caused by modification of the protective gas environment (Ar + CO₂) with SF₆ halogenide. The key factors influencing the transition of elements through the arc gap have been identified, and approaches to explaining metallurgical processes occurring in the high-temperature region of the arc gap have been proposed. High-strength low-alloy wire intended for welding steels of bainitic structure with thermomechanical hardening has been studied.

Keywords:

transfer of alloying elements, arc surfacing, welding, modification of protective gas environment, sulfur hexafluoride.

For citation:

Karatseyeu, A. O. Features of transfer of alloying elements through the arc gap under conditions of modification of Ar + CO₂ protective gas environment with SF₆ halogenide / A. O. Karatseyeu, E. A. Fiatsisava // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 14–25.