

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_87

УДК 621.791.754

Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ С МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ ГАЛОИДНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

К. А. Fiatsisava, A. O. Karatseyeu, A. A. Karatseyeva

METALLURGICAL PROCESSES DURING ARC WELDING IN THE PROTECTIVE GAS ATMOSPHERE MODIFIED BY HALOIDE COMPOUNDS

Аннотация

Определены зависимости содержания серы и углерода в наплавленном металле, а также частоты коротких замыканий дугового промежутка от концентрации вводимого в защитную газовую атмосферу SF₆ при различных значениях параметров режима. На основании проведенного химического анализа наплавленного металла и результатов осциллографирования выдвинуты предположения о ключевых механизмах протекания металлургических процессов в условиях модификации защитной газовой атмосферы галоидными соединениями на основе F и области эффективного применения технологии дуговой сварки с использованием такой модификации.

Ключевые слова:

дуговая сварка в защитных газах, защитные газовые смеси, гексафторид серы, напряжение на дуге, частота переноса электродного металла, модификация защитной газовой атмосферы.

Для цитирования:

Фетисова, Е. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.

Abstract

The relationships between the sulfur and carbon content in deposited metal, as well as the frequency of short circuits of the arc gap, and the concentration of SF₆ introduced into protective gas atmosphere at various magnitudes of welding parameters were determined. Based on the chemical analysis of the deposited metal and the results of performed oscillographic testing, assumptions were made concerning the key mechanisms of metallurgical processes occurring under modification of the protective gas atmosphere with F-based halogen compounds, and the areas, in which the arc welding technology with such modifications can be effectively applied.

Keywords:

shielded arc welding, shielding gas mixtures, sulfur hexafluoride, arc voltage, electrode metal transfer frequency, modification of shielding gas atmosphere.

For citation:

Fiatsisava, K. A. Metallurgical processes during arc welding in the protective gas atmosphere modified by haloide compounds / K. A. Fiatsisava, A. O. Karatseyeu, A. A. Karatseyeva // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 87–96.

Дуговая сварка в среде защитных газов благодаря своей высокой произ-

водительности и простоте механизации в промышленных условиях традицион-

но является основным способом получения неразъемных соединений при изготовлении конструкций и изделий из металлов и сплавов. Совершенствование технологических процессов сварки на протяжении последнего времени главным образом было связано с разработкой новых способов эффективного управления переносом электродного металла путем программного задания характера изменения электрических параметров источника питания. Сварочные технологии при этом почти полностью зависели от возможностей оборудования и определялись исключительно как новые электротехнические решения. Вместе с тем, появление новых материалов, обладающих уникальными свойствами и имеющих комплекс характеристик, формируемых в сложных условиях термомеханического воздействия в процессе металлургического производства, требует разработки новых решений и подходов, не ограничивающихся вопросами цифрового управления оборудованием. Важный аспект в таких условиях – учет металлургических особенностей протекания сварочных процессов и возможностей управления и контроля микроструктуры материалов.

Одним из наиболее перспективных направлений при изготовлении тяжело нагруженных элементов сварных конструкций является переход на использование высокопрочных микролегированных сталей с контролируемой термомеханической прокаткой. Стали относятся к хорошо и удовлетворительно свариваемым, однако, как и большинство высокопрочных материалов, обладают повышенной чувствительностью к содержанию водорода в защитной атмосфере и наплавленном металле шва. Характерный дефект при этом – появление трещин, инициированных диффузионной подвижностью водорода в металле по механизму замедленного разрушения.

Одним из способов снижения чувствительности металла к водороду явля-

ется ограничение растворимости Н в металле шва и околошовной зоне путем связывания в нерастворимые стабильные химические соединения. В сварочной практике такие решения известны и находят практическое применение в электродных покрытиях, флюсах и порошковых проволоках, построенных на фтористо-кальциевой основе. Однако в наиболее распространенном способе дуговой сварки в защитных газах, где используется проволока сплошного сечения, введение такого рода компонентов затруднительно. Использование для таких целей флюсовых материалов в твердой фазе, наносимых на проволоку, вызывает ряд технических сложностей, поэтому практического применения такой способ не нашел.

Эффективным является использование термодинамически стабильных соединений фтора в газообразном виде, контролируемо вводимых в защитную атмосферу [1]. Чрезвычайно важный момент для практического применения предлагаемой технологии при этом – наличие таких компонентов в свободном доступе и их нетоксичность в условиях использования.

Наиболее известный и доступный для таких целей гексафторид серы, называемый по-другому «элегаз» в силу его распространения в качестве газообразного наполнителя предохранительных электрических выключателей. Газ обладает высоким потенциалом ионизации, что препятствует возникновению и стабильному состоянию электрических дуг между контактами в момент их размыкания.

Таким образом, наиболее важными свойствами с точки зрения применения гексафторида серы в составе защитной газовой смеси являются:

- нетоксичность в нормальных условиях благодаря высокой стабильности соединения SF₆;
- диссоциация при высоких температурах с образованием свободных соединений фтора, способных вступать

в реакцию с водородом с образованием нерастворимых в жидком металле сварочной ванны соединений HF;

– сжатие дуги из-за высокого эффективного потенциала ионизации.

Функциональная модификация защитной газовой атмосферы является эффективным способом воздействия на

перенос электродного металла и интенсификации физико-металлургических процессов при сварке. Ранее было показано, что введение SF_6 в защитную атмосферу позволяет качественно снизить количество диффузионного водорода (рис. 1) [2].

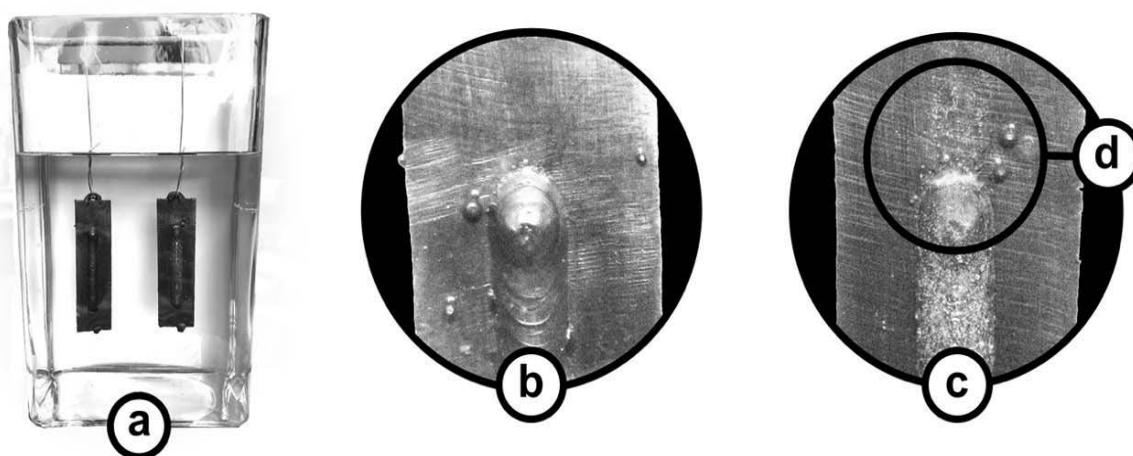


Рис. 1. Качественная оценка насыщаемости водородом образца наплавки при помощи глицериновой пробы: а – колба с образцами; б – образец, наплавленный с введением в защитную атмосферу SF_6 ; с – образец, наплавленный по традиционной технологии (в среде $Ar + CO_2$); d – выделившийся водород в виде сплошного потока всплывающих с поверхности наплавки пузырей

Однако наличие серы, традиционно рассматриваемой в качестве вредной примеси в сталях и сплавах, вызывает ряд ограничений по применению технологии и требует дополнительных исследований. Кроме того, очевидно, что переход серы в расплавленный металл будет определяться особенностями горения дуги в условиях повышения эффективного потенциала ионизации, вызванного наличием в ней фтора и пространственным сжатием дуги, а также изменившимися закономерностями влияния на эти процессы параметров режима сварки (наплавки). Этим вопросам посвящены исследования, результаты которых приведены в статье. Сущность проводимых исследований заключалась в установлении закономерностей влияния количества вводимого SF_6 в защит-

ную газовую смесь $Ar + CO_2$ и напряжения на дуге на частоту переноса электродного металла и содержание серы в наплавленном металле.

Наплавка образцов выполнялась сварочной проволокой Св-08Г2С на пластины из стали 09Г2С в шесть слоев с силой сварочного тока 130 А и при напряжениях на дуге 14, 16 и 18 В, а также с силой сварочного тока 200 А и при напряжениях на дуге 17, 20 и 22 В (рис. 2). В защитную газовую смесь (82 % $Ar + 18$ % CO_2) вводили SF_6 в количестве от 1 % до 5 %. В процессе наплавки регистрировались действующие значения силы тока и напряжения.

Для обеспечения требуемого состава защитной газовой смеси использовалась схема последовательного смешивания, представленная на рис. 3.

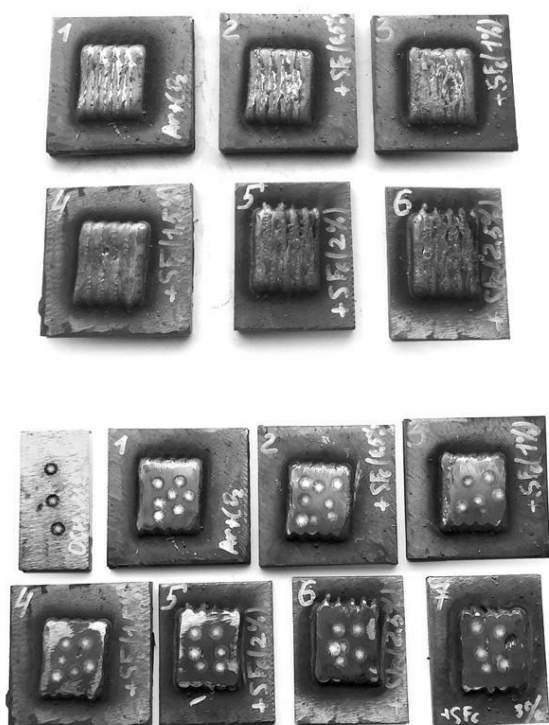


Рис. 2. Внешний вид наплавки до и после измерения химического состава спектральным оптико-эмиссионным способом

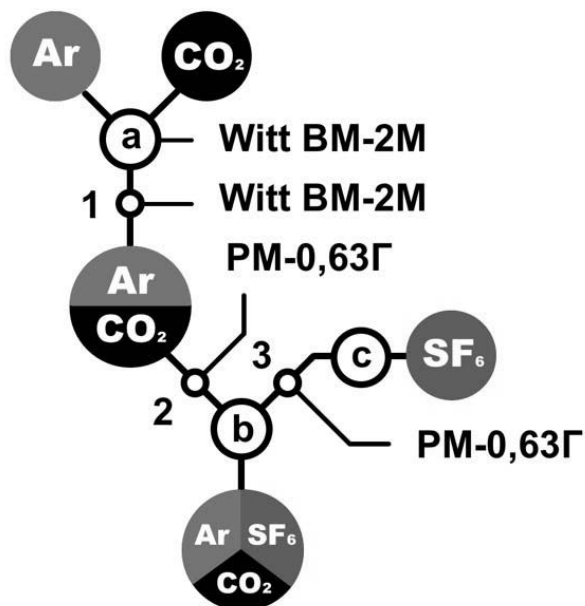


Рис. 3. Принципиальная схема смешивания компонентов защитной газовой смеси: а – смеситель газовый однопостовой Witt BM-2M; б – смеситель инжекторный; с – редуктор газовый; 1 – регулятор расхода газовой смеси в смесителе Witt BM-2M; 2 – ротаметр газовый поплавковый PM-1,6Г; 3 – ротаметр газовый поплавковый PC-3А

Принцип смешивания заключался в следующем: вначале при помощи смесителя Witt VM-2M (а) получалась газовая смесь $\text{Ar} + \text{CO}_2$ в соотношении 82 %...18 %. При этом смешивание газов происходило при высоком давлении в силу особенностей подключения смесителя к баллонам. После этого расход полученной смеси регулировался при помощи смесителя Witt VM-2M (1) и контролировался с помощью поплавкового ротаметра РМ-1,6Г ГОСТ 13045–81 (2). Баллон с гексафторидом серы SF_6 через редуктор (с) и поплавковый ротаметр РС-3А ГОСТ 13045–81 (3) подключался к смесителю (b) совместно со смесью $\text{Ar} + \text{CO}_2$. Для более точного контроля расхода SF_6 поплавков в ротаметре РС-3А (3) был изготовлен из фторопласта, что потребовало его дополнительной тарировки. Защитная газовая смесь $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$ в необходимой пропорции смешивания компонентов получалась при помощи механического инжекторного смешивания (b). Так как расход $\text{Ar} + \text{CO}_2$ существенно выше, то этот газ подавался через инжектор по центральной магистрали и при помощи регулировки расходов в него вводилось необходимое количество гексафторида серы SF_6 . Общий расход готовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$ при проведении экспериментов составлял 15 л/мин.

После выполнения серии наплавов образцы подвергались обработке и подготовке для проведения спектрального оптико-эмиссионного анализа на установке Solaris GNR SCP. Подготовка заключалась во фрезеровке и шлифовке поверхности до необходимого уровня шероховатости поверхности и обезжиривании (см. рис. 2). По результатам анализа построены графические зависимости содержания S и C в наплавленном металле от значений напряжения на дуге и количества гексафторида серы SF_6 , вводимого в защитную атмосферу (рис. 4 и 5). Вместе с графиками представлены микрометаллографические шлифы поверхностей наплавов.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением количества SF_6 в защитном газе содержание серы в наплавленном металле повышается [3]. Наиболее активный рост наблюдается при введении SF_6 в количестве более 1 %. Соотношение Ar и CO_2 при этом сохраняется в пропорции 82 %...18 % при общем расходе 15 л/мин.

На построенных графических зависимостях наблюдается интенсивное снижение содержания углерода в наплавленном металле при введении гексафторида серы в количестве 1 %...5 %, что объясняется интенсификацией процессов взаимодействия жидкого металла с галогенидной добавкой при увеличении напряжения на дуге. Наиболее вероятным фактором, влияющим на снижение количества C, является химическая реакция его взаимодействия с ионами фтора, адсорбированными поверхностью расплавленной капли электродного металла с образованием продуктов CF_4 и последующим их выгоранием.

Важное значение имеет напряжение на дуге U_d . Полученные результаты показали, что по мере увеличения количества гексафторида серы SF_6 в составе защитной атмосферы напряжение начинает оказывать все большее влияние на рассматриваемые процессы. Так, например, при содержании около 4 % SF_6 (остальное $\text{Ar} + \text{CO}_2$) изменение напряжения на 4...5 В (с 14 до 18 В для силы тока 130 А и с 17 до 22 В для силы тока 200 А) позволяет изменить количество серы в наплавленном металле более чем в 2 раза (с 0,05 % до 0,12 % при силе тока 130 А и с 0,075 % до 0,15 % при силе тока 200 А). Основной причиной такого характера зависимостей является время существования дугового промежутка t_d между отдельными короткими замыканиями при переносе электродного металла в сварочную ванну. Капля расплавленного металла на торце плавящейся присадочной проволоки интенсивно взаимодействует с омывающим её потоком защитной га-

зовой смеси и, будучи сильно перегретой, активно адсорбирует на поверхности и растворяет в себе продукты диссоциации компонентов газовой атмосферы (CO_2 и SF_6). Влияние напряжения на дуге на время её существования и длительность цикла переноса капли расплавленного металла в сварочную ванну

(время между последующими короткими замыканиями) в условиях введения в защитную газовую смесь $\text{Ar} + \text{CO}_2$ гексафторида серы является важным вопросом, для решения которого был проведен ряд экспериментальных исследований, результаты которых представлены на рис. 6 [4].

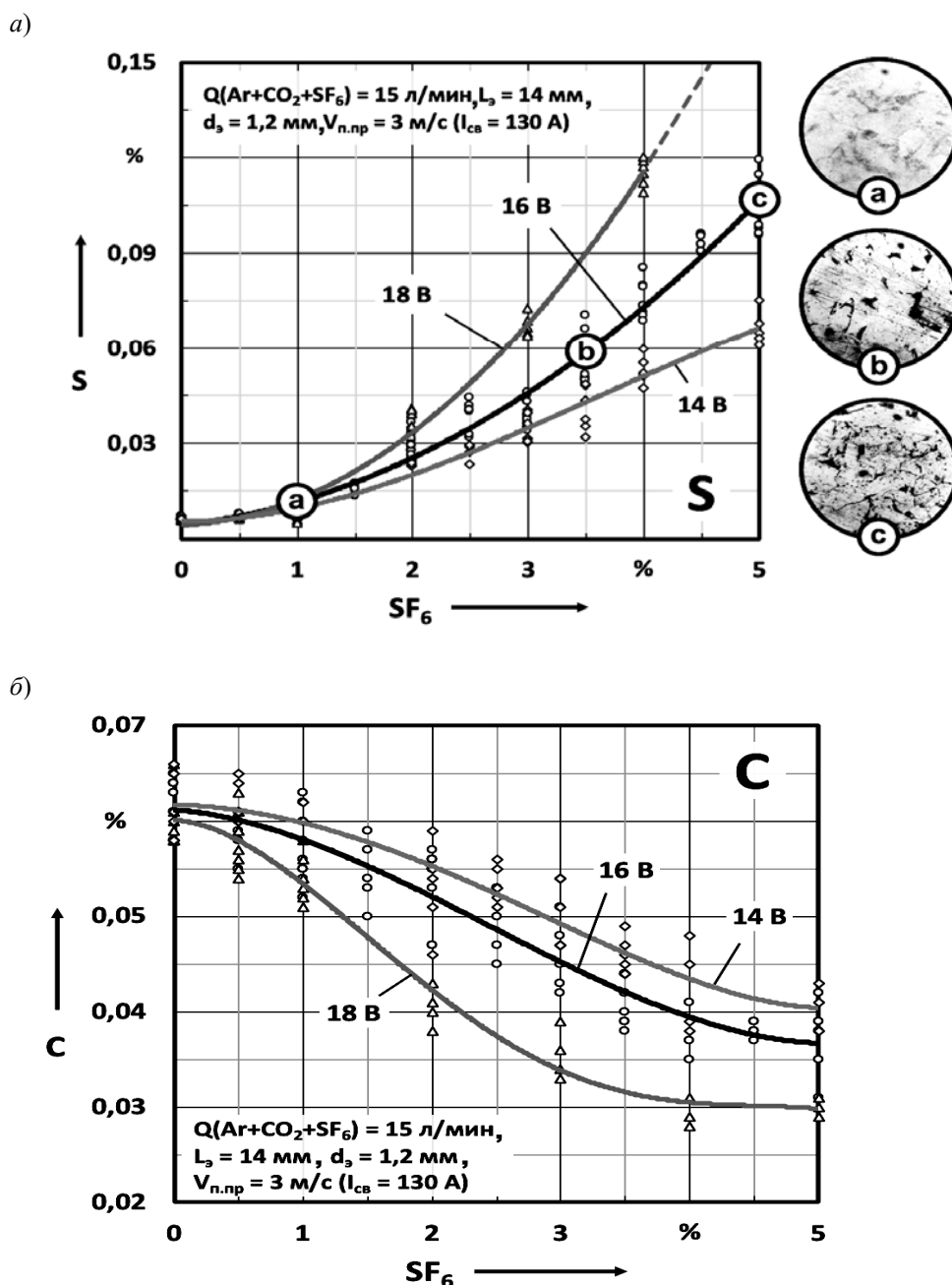


Рис. 4. Содержание S (а) и C (б) в наплавленном металле в зависимости от количества вводимого в защитную атмосферу SF_6 при наплавке с разными значениями напряжения на дуге (сила тока $I_{\text{св}} = 130 \text{ А}$): Q – расход защитной газовой смеси; L_3 – вылет электродной проволоки; $V_{\text{п.пр}}$ – скорость подачи сварочной проволоки; $I_{\text{св}}$ – значение силы сварочного тока

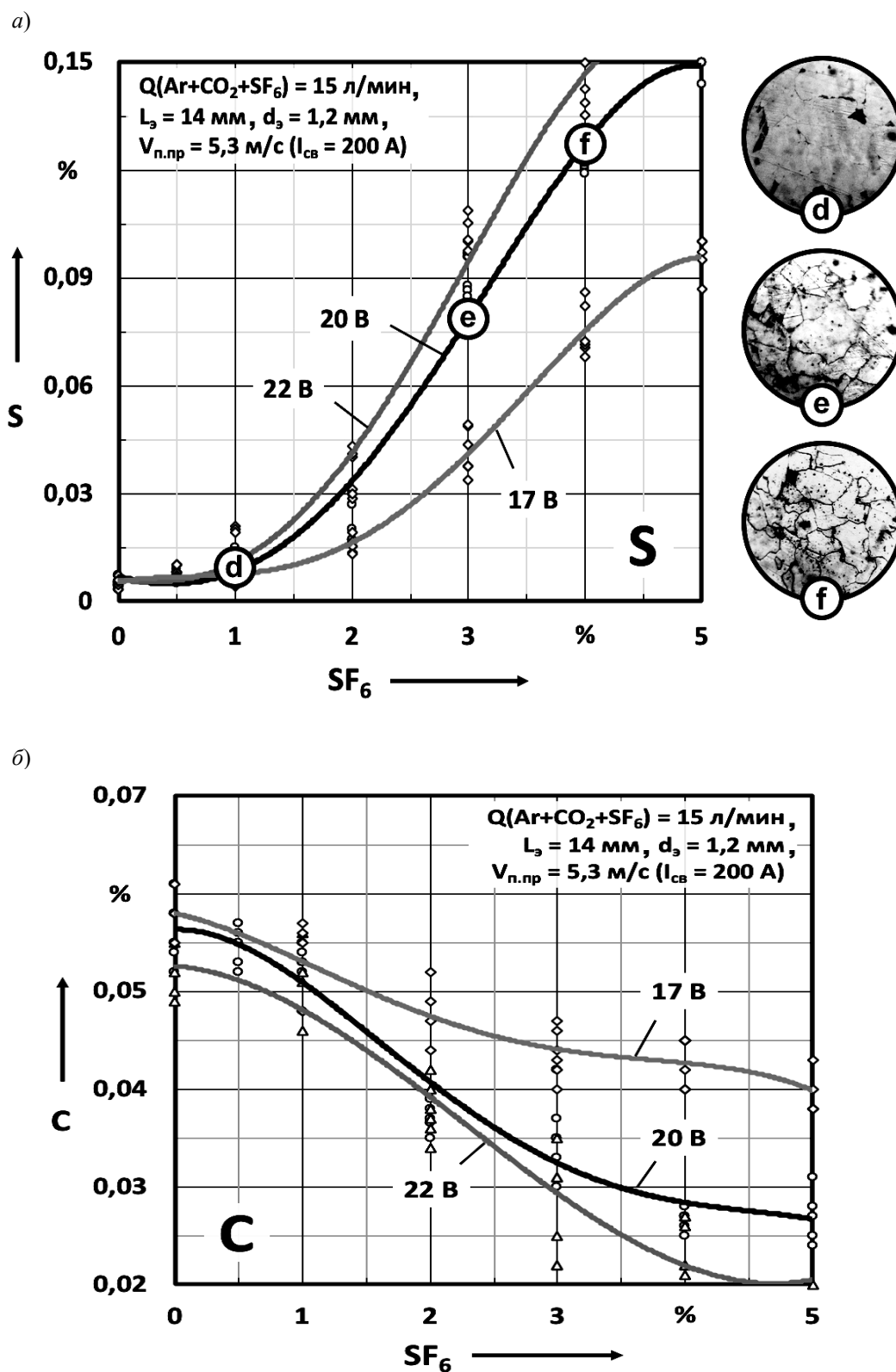
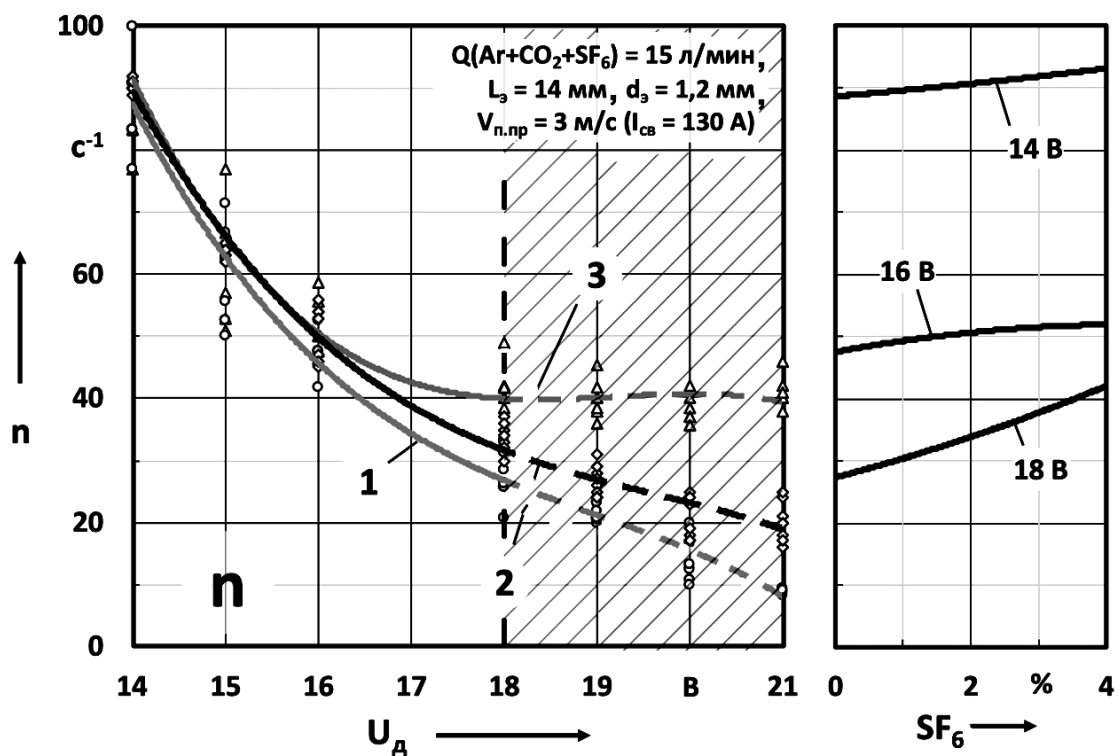


Рис. 5. Содержание S (a) и C (б) в наплавленном металле в зависимости от количества вводимого в защитную атмосферу SF₆ при наплавке с разными значениями напряжения на дуге (сила тока I_{св} = 200 А): Q – расход защитной газовой смеси; L₃ – вылет электродной проволоки; V_{н.пр.} – скорость подачи сварочной проволоки; I_{св} – значение силы сварочного тока

a)



б)

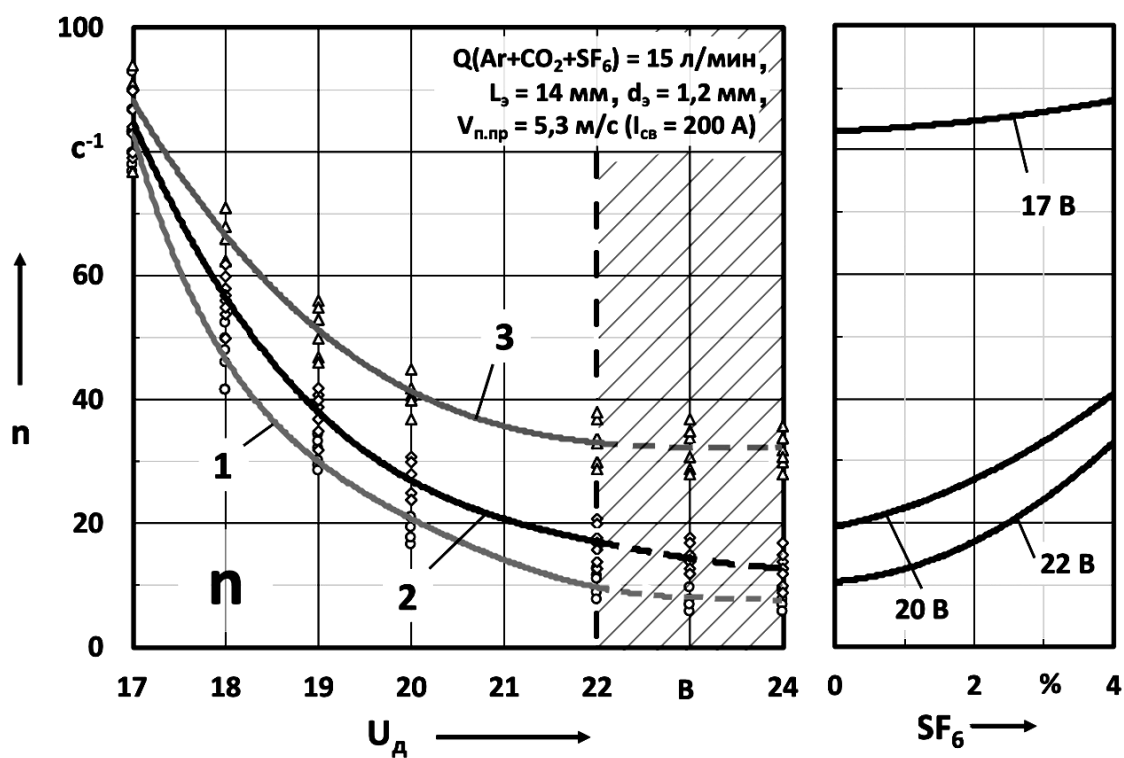


Рис. 6. Зависимость частоты коротких замыканий дугового промежутка (n) от концентрации SF_6 при различном напряжении на дуге U_d и значениях силы тока $I_{св} = 130 \text{ А}$ и $I_{св} = 200 \text{ А}$ соответственно: 1 – сварка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2 ; 2 – сварка с введением 2 % SF_6 ; 3 – сварка с введением 4 % SF_6

Эксперименты проводились с использованием метода скоростной съемки с одновременным осциллографированием процесса сварки. На рис. 6 представлены графические зависимости частоты коротких замыканий при изменении напряжения на дуге и введении в защитную газовую атмосферу различного количества SF₆.

Для подтверждения выдвинутых предположений эксперименты проводились с использованием значений параметров режима как для графиков на рис. 4 и 5.

Анализ полученных результатов показал, что напряжение на дуге оказывает существенное влияние на частоту коротких замыканий дугового промежутка, а введение гексафторида серы в защитный газ, в свою очередь, изменяет характер этого влияния. С увеличением длины дугового промежутка эффект воздействия добавки SF₆ на характер переноса усиливается, что связано с большей длительностью взаимодействия капли расплавленного металла с активными компонентами омывающего его потока защитной газовой смеси.

При большем количестве SF₆ напряжение на дуге оказывает меньшее влияние на частоту отрыва капель электродного металла, т. к. повышенный потенциал ионизации F не позволяет дуге активно увеличиваться вследствие повышения напряжения. Анализ графиков показывает, что в целом при меньшем напряжении эффект влияния продуктов диссоциации SF₆ имеет меньшее значение (см. рис. 6).

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных исследований установлено следующее.

1. Эффективность введения SF₆ в защитную газовую атмосферу при сварке ограничена 1 %...1,5 % (остальное смесь 82 % Ar + 18 % CO₂). Дальнейшее повышение концентрации компонента в защитной газовой смеси ведет к интенсивному насыщению наплавленного металла серой.

2. Ключевым параметром, определяющим интенсивность протекания металлургических реакций с продуктами диссоциации SF₆ при высоких температурах вблизи столба дуги и расплавленной сварочной ванны, является напряжение на дуге. Изменение напряжения на 4...5 В позволяет изменить количество серы в наплавленном металле более чем в 2 раза.

3. Введение SF₆ в рассматриваемых количествах в защитную газовую атмосферу при наплавке существенно изменяет традиционно известные закономерности между напряжением на дуге и частотой переноса электродного металла, что является следствием повышения эффективного потенциала ионизации газовой смеси (Ar + CO₂ + SF₆) в присутствии соединений F.

4. Выдвинута гипотеза о механизме снижения количества углерода в наплавленном металле путем связывания его в соединения CF₄ посредством интенсивно протекающих металлургических реакций на стадии капли расплавленного металла с адсорбированными свободными ионами фтора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паршин, С. Г. Исследование MIG-сварки стали S235JR с введением в аргон газообразного гексафторида серы SF₆ / С. Г. Паршин // Сварочное производство. – 2017. – № 1. – С. 9–13.
2. Фетисова, Е. А. Влияние гексафторида серы в составе газовой защитной атмосферы при дуговой сварке на содержание водорода в наплавленном металле / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Кули-

ков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 174.

3. **Фетисова, Е. А.** Применение газообразных галоидных соединений в составе защитной газовой атмосферы при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 165.

4. **Фетисова, Е. А.** Влияние напряжения на частоту переноса электродного металла при дуговой сварке с введением газообразных галоидных соединений в защитную газовую атмосферу / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 104.

Статья сдана в редакцию 31 января 2022 года

Екатерина Анатольевна Фетисова, аспирант, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-297-44-42-82. E-mail: fetisova9891@gmail.com.

Артур Олегович Коротеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-298-45-49-70. E-mail: karatseyeu_artur@fastmail.com.

Александра Александровна Коротеева, студент, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-298-45-49-70.

Katsiaryna Anatolyevna Fiatsisava, PhD student, Belarussian-Russian University. Tel.: +375-297-44-42-82.
E-mail: fetisova9891@gmail.com.

Artur Olegovich Karatseyeu, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarussian-Russian University.
Tel.: +375-298-45-49-70. E-mail: karatseyeu_artur@fastmail.com.

Aliaksandra Aliaksandrovna Karatseyeva, student, Belarussian-Russian University. Tel.: +375-298-45-49-70.