

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-2-77-87

УДК 621.791.763.2

Е. А. ФЕТИСОВА

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

В. В. ПЯТАКОВА

М. М. МИРОНЧИК

А. А. КОРОТЕЕВА

В. Д. ДОЛГАЯ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОСОБЕННОСТИ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ И СВАРКЕ С МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ГАЛОГЕНИДОМ SF₆ (Ar + CO₂ + SF₆)

Аннотация

На основании экспериментальных исследований определены зависимости геометрических характеристик проплавления основного металла при наплавке в среде Ar + CO₂ + SF₆ в зависимости от значений параметров режима и концентрации, вводимого в защитную атмосферу SF₆. Установлено, что модификация защитной газовой атмосферы галогенидами (до 2 % SF₆) оказывает существенное влияние на глубину проплавления, что, несмотря на «дугоподавляющий» эффект диссоциации фторсодержащих компонентов, обладающих высоким потенциалом ионизации, свидетельствует о более эффективном вводе энергии в основной материал. Процесс стабилизируется на повышенном (на 2...5 В) значениях напряжения без увеличения ширины валика наплавленного металла.

Ключевые слова:

гексафторид серы, дуговая сварка в защитных газах, защитные газовые смеси, напряжение на дуге, глубина проплавления, ширина валика наплавленного металла, модификация защитной газовой атмосферы.

Для цитирования:

Особенности проплавления основного металла при дуговой наплавке и сварке с модификацией защитной газовой среды галогенидом SF₆ (Ar + CO₂ + SF₆) / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. В. Пятакова, М. М. Мирончик, А. А. Коротеева, В. Д. Долгая // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (83). – С. 77–87.

Введение

Характер проплавления основного металла является одним из важнейших параметров процесса дуговой сварки, т. к. определяет не только диапазон выбора необходимых значений параметров режима с точки зрения получения требуемой геометрии сварного шва, соответствующей нормативной документации, но и позволяет учесть специфику технологии и выбрать наиболее эффективные типы подготовки деталей под сварку. Состав защитной газовой атмосферы оказывает непосредственное влияние на процессы, происходящие в

зоне горения дуги, определяет температуру дугового промежутка и характер ввода энергии в зону образования сварного соединения.

Известно, что основным определяющим параметром, управляющим процессами плавления проволоки и основного материала, является погонная энергия $q/V_{св}$, являющаяся отношением эффективной мощности q к скорости сварки $V_{св}$. Вместе с тем, изменение условий передачи теплоты от источника к изделию может оказывать существенное влияние на конечный результат при стабильности значений q и $V_{св}$.

Введение газовых компонентов,

модифицирующих состав защитной атмосферы с целью управления металлургическими процессами, оказывает прямое воздействие на характер проплавления материала. Одним из перспективных направлений снижения чувствительности сварных соединений к негативному влиянию диффузионного водорода, применительно преимущественно к высокопрочным сталям и сплавам, является модификация защитной газовой среды галогенидными соединениями. Это позволяет связать водород в нерастворимые в жидком металле соединения, существенно снизив тем самым его количество в сварном соединении. В ряде публикаций описаны особенности такой модификации и качественно оценен эффект снижения диффузионного водорода на основании глицериновой пробы [1–6].

При этом в процессе проведения экспериментов было установлено, что даже небольшие количества модификатора (до 2 %) оказывают существенное влияние на характер плавления присадочной проволоки, частоту коротких замыканий дугового промежутка и характеристики разбрызгивания электродного металла. Это обусловлено изменением эффективного потенциала ионизации дугового промежутка из-за присутствия в нем фторсодержащих компонентов. Возникающий «дугодавляющий» эффект, широко используемый в электротехнике с целью предотвращения электрического пробоя в автоматических выключателях, снижает мощность дугового разряда, что неизбежно сказывается не только на необходимости корректировки значений параметров режима, но и на стабилизации процесса при существенно увеличенном напряжении на дуге. По результатам скоростной съемки и осциллографирования установлено, что столб дуги имеет отличные от процесса сварки и наплавки в среде $Ar + CO_2$ характеристики. Для оценки характера проплавления основного металла проведен ряд

экспериментальных исследований, которым посвящена данная статья.

Основная часть

Исследования были основаны на анализе результатов макрометаллографических шлифов поперечных сечений наплавки одиночных валиков на пластину.

В экспериментах использовались низкоуглеродистые низколегированные сварочные проволоки типа Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Наплавка осуществлялась на пластины из низкоуглеродистой стали (сталь 20) на робототехническом комплексе с регистрацией значений параметров режима при помощи регистратора РКДП-0401. Это позволило устранить ряд субъективных факторов, стабилизировать значения скорости наплавки и вылета электродной проволоки. В работе не проводился анализ влияния скорости наплавки на геометрию проплавления при различном количестве вводимого SF_6 , т. к. предварительно установлено, что характер влияния этого параметра при сохранении стабильности значений скорости подачи присадочной проволоки и напряжения на дуге практически аналогичен при различных концентрациях вводимого в защитную газовую смесь SF_6 . Кроме того, в работе рассматриваются режимы, имеющие наибольшее распространение на практике в силу специфики выполнения наиболее распространенных типов сварных соединений. В случае использования сварки и наплавки на повышенных значениях скорости необходимо учитывать специфику кристаллизации сварочной ванны и представленные результаты требуют уточнения.

Эксперименты проводились с защитой зоны горения дуги смесью 82 % $Ar + 18$ % CO_2 , а также с введением SF_6 в смесь ($Ar + CO_2$) в количествах 0,5 %, 1 % и 2 %. При этом соотношение между Ar и CO_2 оставалось постоянным (82 % + 18 %), что обеспечива-

лось двуступенчатым процессом смешивания газовых компонентов. Для получения требуемого состава защитной газовой смеси использовалась разработанная нами установка [7].

Макрометаллографическое травление осуществлялось в соответствии с СТБ ЕН 1321–2004. В качестве реактива использовался спиртовой раствор

HNO_3 (5 %) (ISO/TR 16060:2003 Nital). В некоторых случаях для более четкого выявления линии сплавления концентрация HNO_3 в реактиве повышалась. На рис. 1–4 представлены некоторые из макрошлифов наплавков, полученных в диапазоне значений силы тока 98...254 А и введением SF_6 до 2 %.



Рис. 1. Макрошлифы наплавков, выполненных с различным количеством вводимого в защитную газовую смесь SF_6 : $V_{п.пр} = 2,3$ м/мин; $I = 98...103$ А

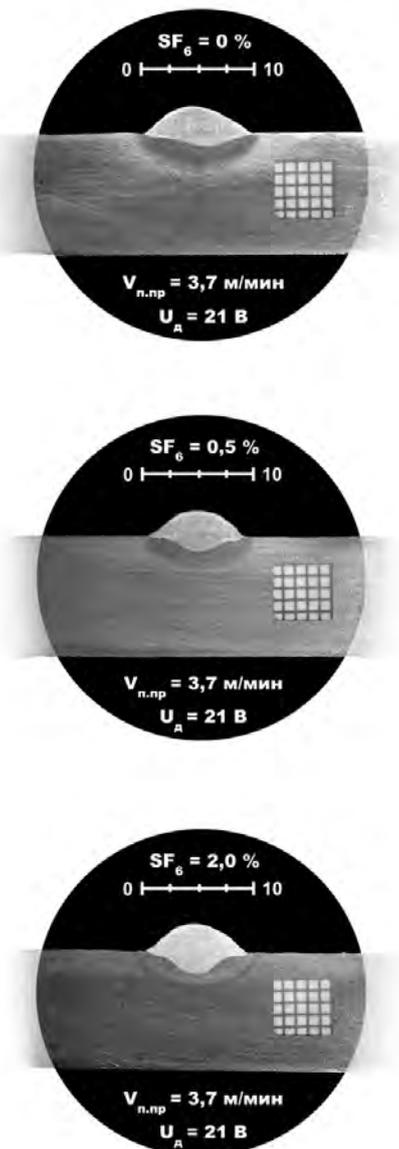


Рис. 2. Макрошлифы наплавков, выполненных с различным количеством вводимого в защитную газовую смесь SF_6 : $V_{п.пр} = 3,7$ м/мин; $I = 147...155$ А

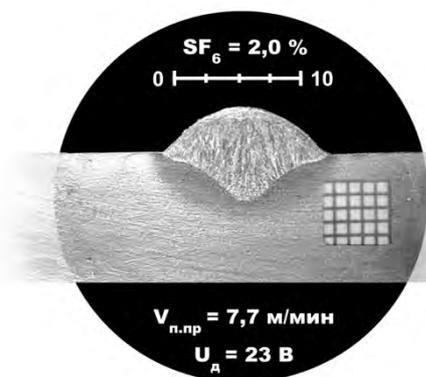
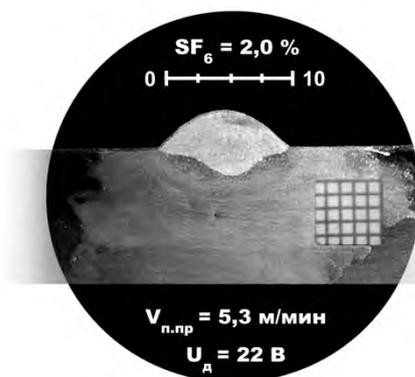
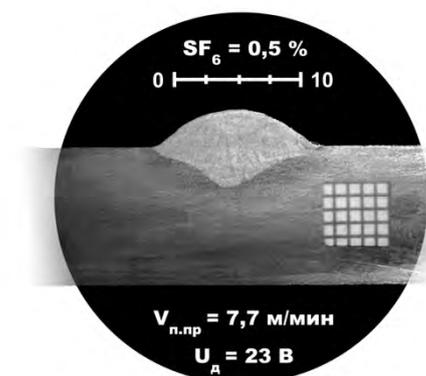
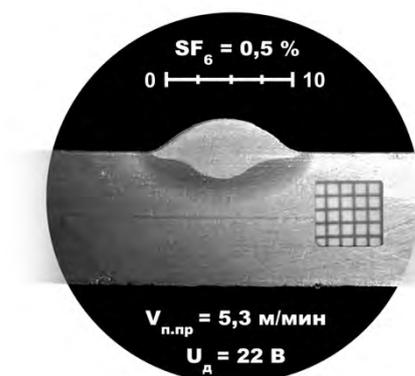
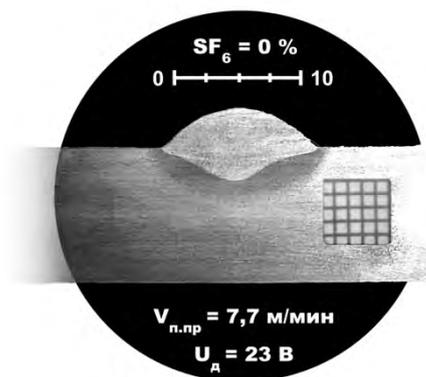
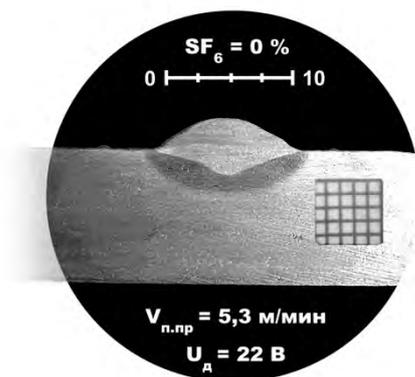


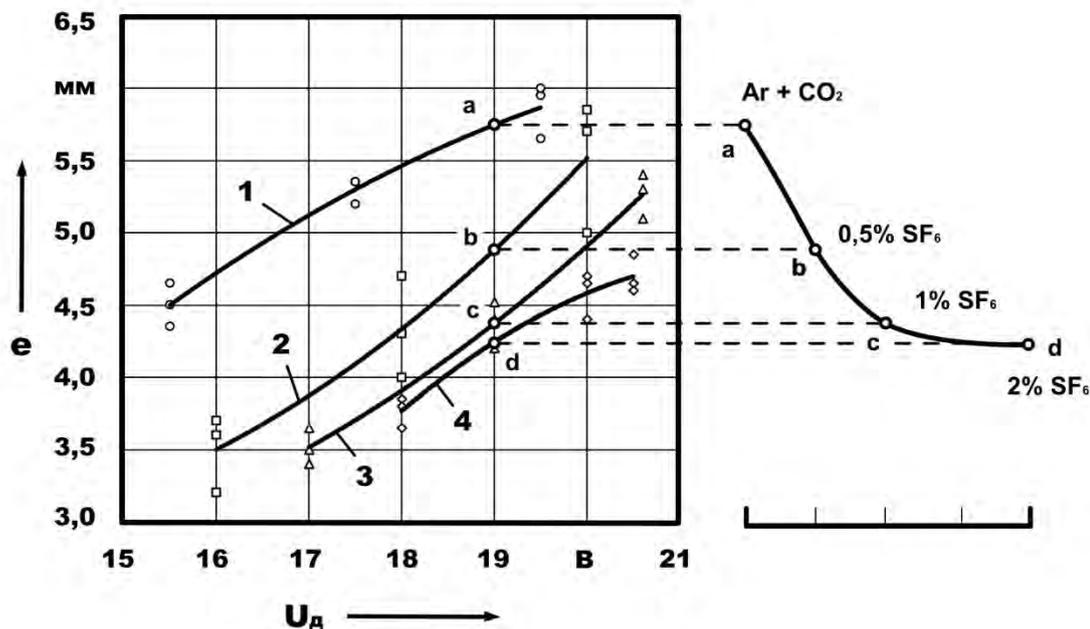
Рис. 3. Макрошлифы наплавов, выполненных с различным количеством вводимого в защитную газовую смесь SF_6 : $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; $I = 195...202$ А

Рис. 4. Макрошлифы наплавов, выполненных с различным количеством вводимого в защитную газовую смесь SF_6 : $V_{п.пр.} = 7,7$ м/мин; $I = 246...254$ А

Анализ представленных графических зависимостей ширины валика наплавленного металла от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволо-

ки $V_{п.пр.}$ (рис. 5 и 6) показал, что введение SF_6 в защитную газовую среду является эффективным инструментом воздействия на геометрические характеристики проплавления.

a)



б)

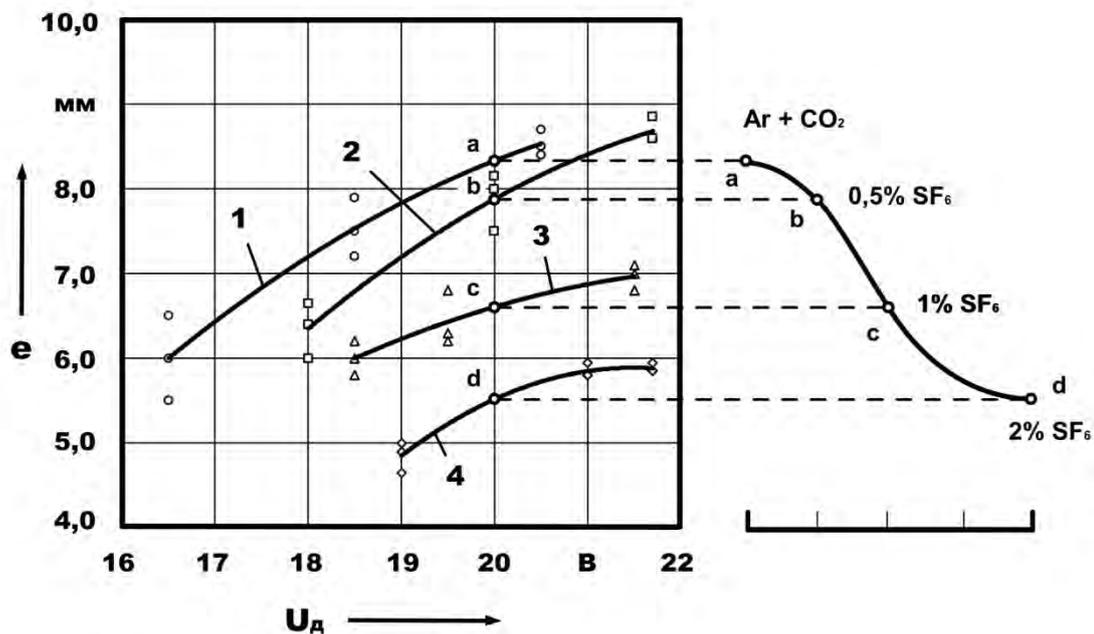


Рис. 5. Зависимость значения ширины валика наплавленного металла e от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF₆ в защитную атмосферу: $a - V_{п.пр.} = 2,3$ м/мин; $b - V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; 1 - наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 - (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 3 - (Ar + CO₂) + 1 % SF₆; 4 - (Ar + CO₂) + 2 % SF₆

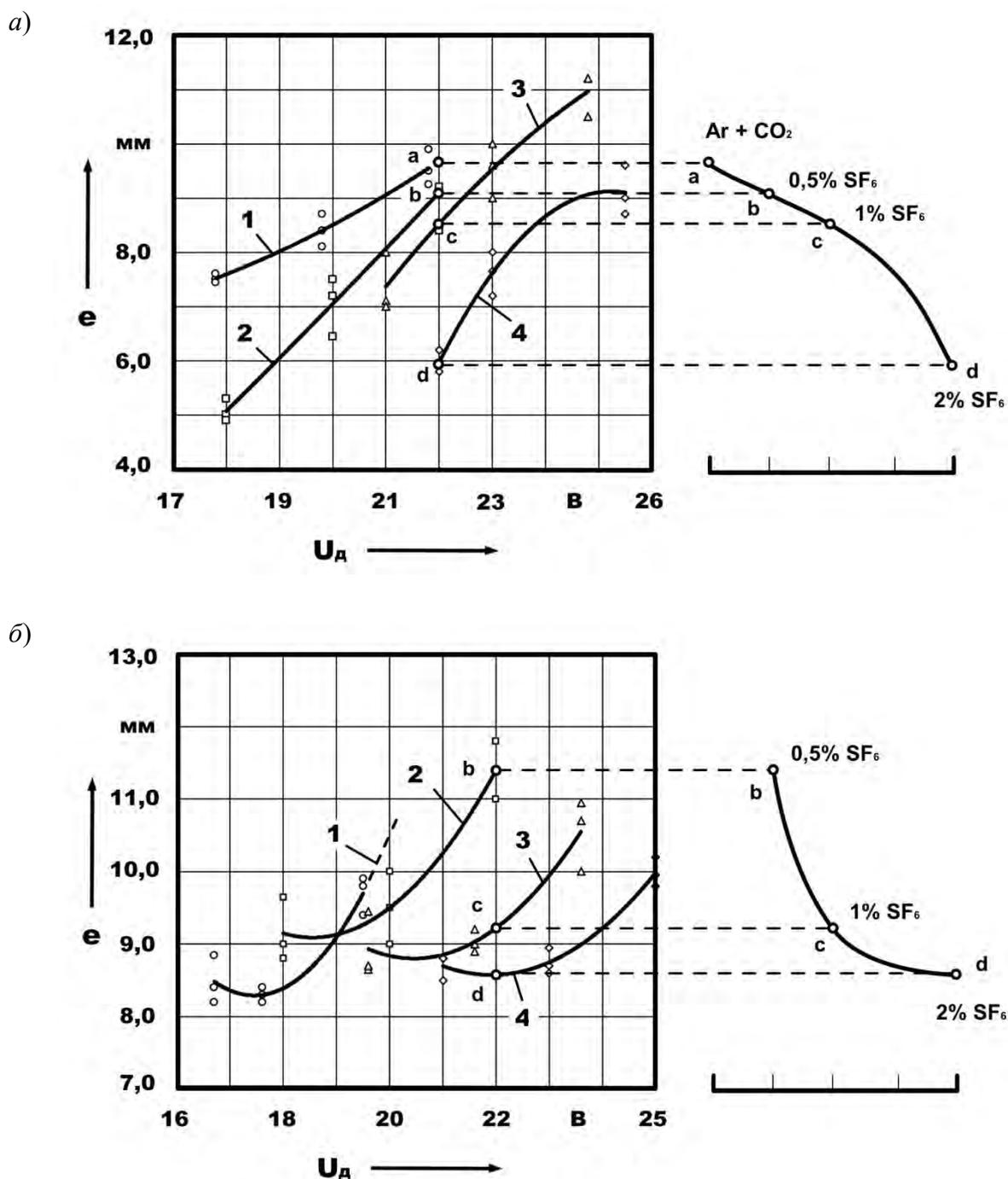


Рис. 6. Зависимость значения ширины валика наплавленного металла e от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF₆ в защитную атмосферу: $a - V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; $b - V_{п.пр.} = 7,7$ м/мин; 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 – (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 3 – (Ar + CO₂) + 1 % SF₆; 4 – (Ar + CO₂) + 2 % SF₆

Установлено, что повышение напряжения на 4 В в пределах диапазона значений стабильного существования процесса приводит к увеличению ширины валика наплавленного металла на 30 %...80 % (в зависимости от скорости подачи и количества вводимого SF₆).

Введение SF₆ в количестве 0,5 % делает процесс менее чувствительным к изменению ширины валика наплавленного металла ϵ от повышения напряжения на дуге U_d , о чем свидетельствует меньший угол наклона кривых к горизонтальной оси (см. рис. 5, б). По-видимому, это обусловлено некоторым пространственным «сжатием» дугового промежутка и преобладанием этого эффекта над ростом ширины валика, обусловленным повышением длины дуги на более высоких значениях напряжения. Причем, чем больше количество вводимого в защитную атмосферу SF₆, тем сильнее проявляется этот эффект (кривая 4 на рис. 5, б).

Использование более высоких скоростей подачи присадочной проволоки 5,3...7,7 м/мин, что соответствует диапазону значений силы тока 195...254 А, характеризуется существенно большей чувствительностью значения ширины валика при изменении напряжения на дуге. В этом случае эффект повышения мощности дугового разряда оказывается более существенным и кривые зависимостей имеют больший угол наклона к горизонтальной оси (см. рис. 6).

Для стабильного существования процесса введение SF₆ требует повышения напряжения на дуге. Это усложняет анализ результатов, т. к. диапазоны значений регулирования напряжения различны. Для анализа характера влияния SF₆ на ширину валика наплавки при одинаковых значениях параметров режима построены вспомогательные кривые на одном значении напряжения на дуге (см. рис. 5, а – 18 В, рис. 5, б – 20 В, рис. 6, а – 22 В, рис. 6, б – 22 В).

Важно отметить, что не для всех концентраций SF₆ эти значения напряжений будут наиболее эффективными, однако такой метод позволяет установить, что SF₆ снижает ширину валика на 20 %...60 % во всем диапазоне значений.

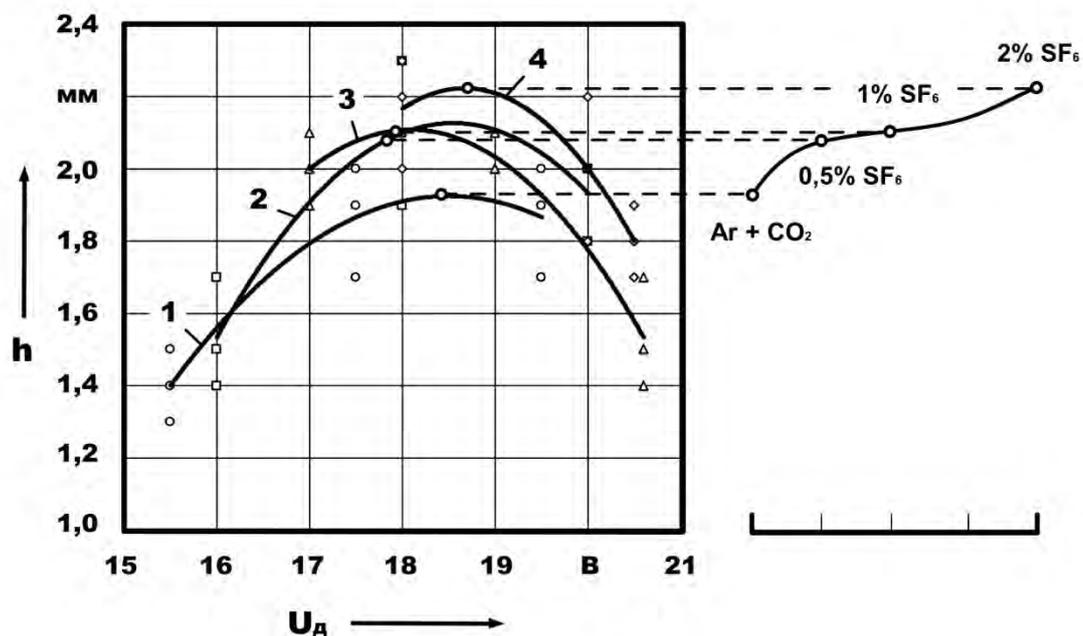
Полученные результаты свидетельствуют в первую очередь о более эффективном вводе энергии в зону наплавки, что подтверждается результатами исследования глубины проплавления основного металла.

На рис. 7 и 8 представлены графические зависимости значений глубины проплавления основного металла h от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF₆ в защитную атмосферу.

Анализ полученных результатов показал, что введение SF₆ позволяет повысить глубину проплавления h во всем диапазоне используемых значений. На вспомогательных кривых к графикам изображены зависимости максимальных значений глубины проплавления h для наплавки с введением различного количества SF₆ в защитную среду. Так как практический интерес представляет оценка глубины проплавления на эффективных соотношениях значений параметров режима, основной целью чего и является построение этих кривых, напряжение на дуге U_d может отличаться на 2...4 В в сторону повышения, что является необходимым для стабилизации процесса.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что введение до 1 % SF₆ оказывает наиболее сильное влияние на повышение глубины проплавления (на этом участке она может повыситься на 20 % до 30 %). Эффективность дальнейшего повышения количества SF₆ с точки зрения повышения глубины проплавления уже существенно ниже. На некоторых графиках вспомогательная кривая асимптотически приближается к горизонтальной (см. рис. 7, б и 8, б).

a)



б)

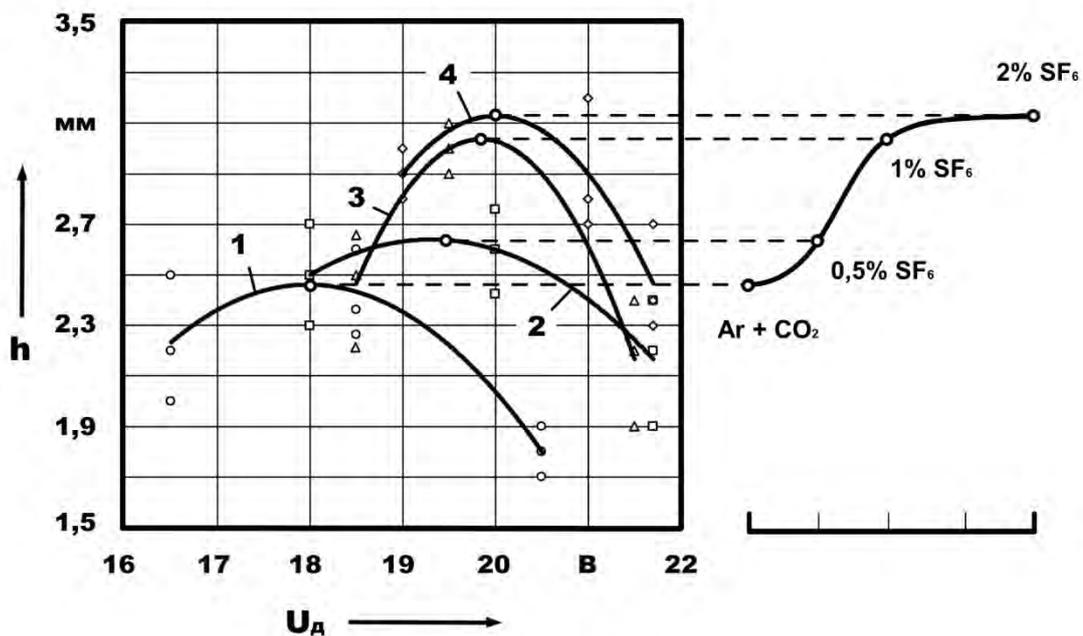
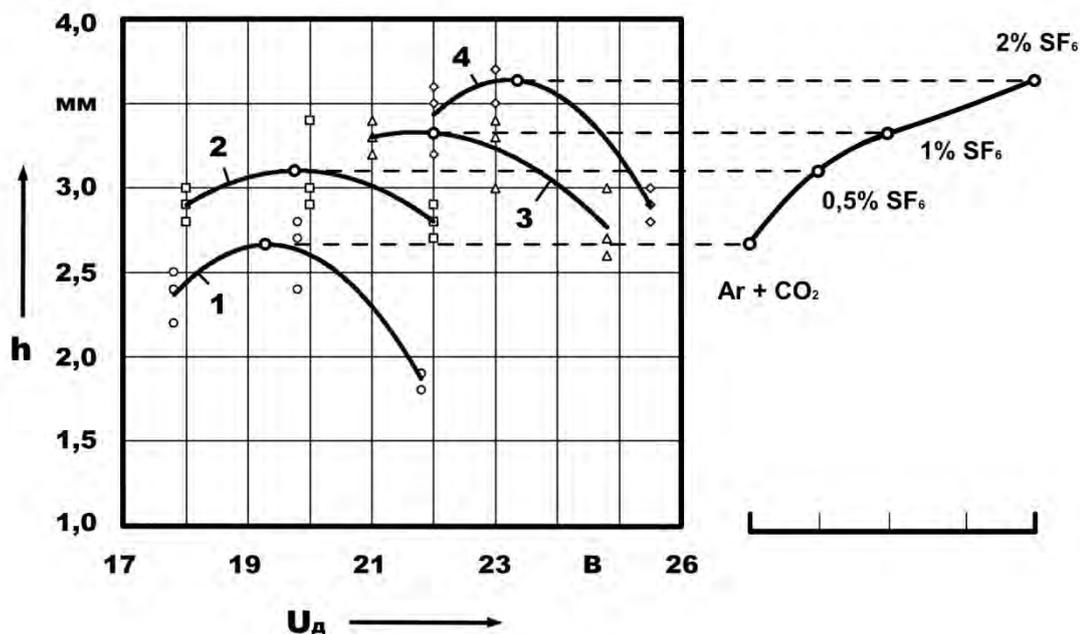


Рис. 7. Зависимость значения глубины проплавления основного металла h от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF_6 в защитную атмосферу: $a - V_{п.пр.} = 2,3$ м/мин; $б - V_{п.пр.} = 3,7$ м/мин; 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2 ; 2 – (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6 ; 3 – (Ar + CO_2) + 1 % SF_6 ; 4 – (Ar + CO_2) + 2 % SF_6

a)



б)

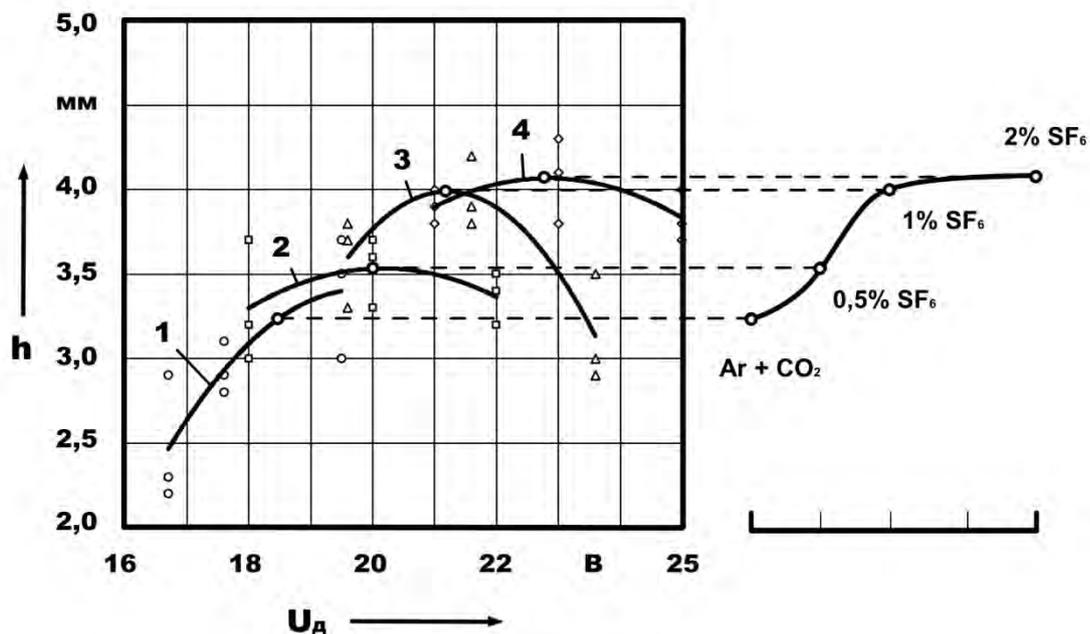


Рис. 8. Зависимость значения глубины проплавления основного металла h от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.пр.}$ и количестве вводимого SF₆ в защитную атмосферу: а - $V_{п.пр.} = 5,3$ м/мин; б - $V_{п.пр.} = 7,7$ м/мин; 1 - наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 - (Ar + CO₂) + 0,5 % SF₆; 3 - (Ar + CO₂) + 1 % SF₆; 4 - (Ar + CO₂) + 2 % SF₆

Отклонение значения напряжения на дуге от наиболее эффективного на 2...4 В приводит к снижению глубины проплавления для всех рассматриваемых случаев. Это обусловлено снижением мощности дугового разряда (в случаях пониженных значений) либо рассредоточенным вводом тепла в основной металл в случае повышения значений напряжения. Дальнейшее отклонение значений от наиболее эффективных не рассматривалось, т. к. процесс становится нестабильным и существует высокая вероятность выхода из строя токоподводящего наконечника из-за чрезмерного увеличения длины дуги. На практике такие режимы являются нежелательными в силу повышенного разбрызгивания.

При проведении экспериментальных исследований использовались диапазоны значений параметров режима, соответствующие переносу электродного металла через дуговой промежуток короткими замыканиями. Режим, характеризующийся скоростью подачи проволоки 7,7 м/мин, является переходным, что отчетливо наблюдается на графических зависимостях, отличающихся ярко выраженной чувствительностью к напряжению на дуге. Это обусловлено наличием двух областей стабилизации процесса (на повышенных и пониженных напряжениях). Повышение силы тока свыше критического значения будет способствовать получению струйного переноса металла с характерными особенностями проплавления. Особенности переноса электродного металла в этом случае описаны ранее [6].

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных исследований установлено.

1. Модификация защитной газовой атмосферы $\text{Ar} + \text{CO}_2$ газообразным галогенидным соединением SF_6 способствует повышению глубины проплавления основного металла на 20 %...30 % по сравнению с образцами, наплавленными в традиционной смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$. Установлено, что наиболее активный рост глубины проплавления наблюдается в диапазоне значений концентрации SF_6 до 1 %. Дальнейшее увеличение содержания гексафторида серы в составе защитного газа не оказывает существенного влияния на её рост. Отмечено также, что введение SF_6 в газовую атмосферу $\text{Ar} + \text{CO}_2$ воздействует на форму проплавления, делая её более вытянутой по оси наплавки у основания.

2. Результаты свидетельствуют об уменьшении ширины валика наплавленного металла с повышением концентрации SF_6 в защитной газовой среде, что, по совокупности полученных данных, говорит о более рациональном вводе тепловой энергии в основной материал. Наиболее интенсивно эффект проявляется при концентрациях SF_6 до 1 % и преобладает над эффектом повышения ширины зоны проплавления с увеличением длины дуги, вызванной ростом напряжения для стабилизации процесса. Таким образом, стабилизация наступает при большем напряжении (на 2...4 В) без повышения ширины валика наплавленного металла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фетисова, Е. А. Перспективы применения галоидных соединений в составе защитной газовой атмосферы при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // I Респ. форум молодых ученых учреждений высшего образования. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 75–76.
2. Фетисова, Е. А. Особенности дуговой сварки и наплавки с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всерос. нац. конф. молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апр. 2022 г. – Комсомольск-на-Амуре: КнаГУ, 2022. – С. 89–90.

3. **Коротеев, А. О.** Дуговая сварка с функциональной модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: материалы ГМНТК. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 112–118.

4. О потерях электродного металла при дуговой сварке с модификацией защитной атмосферы газообразными галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 2 (79). – С. 97–107.

5. Технологические особенности выбора значений параметров режима дуговой сварки в защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ / А. О. Коротеев [и др.] // Наука и техника. – 2023. – № 22 (4). – С. 269–277.

6. 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 [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2024. – № 1 (82). – С. 25–34.

7. Установка для смешивания трехкомпонентной защитной газовой среды при сварке / Е. А. Фетисова [и др.] // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 88.

Статья сдана в редакцию 19 марта 2024 года

Контакты:

fetisova9891@gmail.com (Фетисова Екатерина Анатольевна);
karatseyeu_artur@fastmail.com (Коротеев Артур Олегович);
victorialapina8@gmail.com (Пятакова Виктория Витальевна);
e_sidorova@internet.ru (Мирончик Мария Михайловна);
astainside@gmail.com (Коротеева Александра Александровна);
veronikadolgaa477@gmail.com (Долгая Вероника Дмитриевна).

***E. A. FIATSIŠAVA, A. O. KARATSEYEU, V. V. PIATAKOVA, M. M. MIRONCHIK,
A. A. KARATSEYEVA, V. D. DOUHAYA***

FEATURES OF BASE METAL PENETRATION DURING ARC SURFACING AND WELDING IN THE PROTECTIVE GAS ENVIRONMENT MODIFIED BY SF_6 HALIDE ($Ar + CO_2 + SF_6$)

Abstract

Based on experimental studies, the dependencies of the geometric characteristics of base metal penetration during surfacing in the $Ar + CO_2 + SF_6$ environment have been determined depending on the values of mode parameters and the concentration of SF_6 introduced into the protective atmosphere. It has been established that modification of the protective gas atmosphere with halides (up to 2 % SF_6) has a significant effect on the penetration depth, which, despite the «arc-suppressing» effect of the dissociation of fluorine-containing components with a high ionization potential, indicates a more efficient input of energy into the base material. The process is stabilized at increased (2...5 V) voltage values without increasing the width of the deposited metal bead.

Keywords:

sulfur hexafluoride, shielded gas arc welding, shielding gas mixtures, arc voltage, penetration depth, short circuit frequency, electrode metal transfer, bead width, modification of shielding gas atmosphere.

For citation:

Features of base metal penetration during arc surfacing and welding in the protective gas environment modified by SF_6 halide ($Ar + CO_2 + SF_6$) / E. A. Fiatsisava, A. O. Karatseyeu, V. V. Piatakova, M. M. Mironchik, A. A. Karatseyeva, V. D. Douhaya // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 2 (83). – P. 77–87.