

DOI: 10.53078/20778481_2023_2_97

УДК 621.791.763.2

Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов, А. А. Коротеева, А. А. Лопатина, В. Д. Долгая

О ПОТЕРЯХ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ С МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ АТМОСФЕРЫ ГАЗООБРАЗНЫМИ ГАЛОГЕНИДНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

E. A. Fiatsisava, A. O. Karatseyeu, V. P. Kulikov, A. A. Karatseyeva, A. A. Lapatsina, V. D. Douhaya

ON ELECTRODE METAL LOSSES DURING ARC WELDING WITH MODIFICATION OF PROTECTIVE ATMOSPHERE BY GASEOUS HALOGENIDE COMPOUNDS

Аннотация

Определены зависимости коэффициента потерь электродного металла от значений параметров режима при дуговом процессе сварки и наплавки с введением в защитную газовую атмосферу гексафторида серы SF₆. Определены области наиболее эффективных соотношений значений параметров режима при наплавке с различным типом переноса электродного металла через дуговой промежуток. Выдвинуты теоретические гипотезы и обоснования поведения компонентов защитной газовой атмосферы в высокотемпературной области дугового промежутка.

Ключевые слова:

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

Для цитирования:

О потерях электродного металла при дуговой сварке с модификацией защитной атмосферы газообразными галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов, А. А. Коротеева, А. А. Лопатина, В. Д. Долгая // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 97–106.

Abstract

The dependencies between the electrode metal loss factor and the values of mode parameters during the processes of arc welding and surfacing with the introduction of sulfur hexafluoride SF₆ into a protective gas atmosphere have been determined. The areas of the most effective ratios of the values of mode parameters during the surfacing process with different types of electrode metal transfer through the arc gap have been found. Theoretical hypotheses and substantiations of the behavior of protective gaseous atmosphere components in the high-temperature zone of the arc gap are put forward.

Keywords:

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

For citation:

On electrode metal losses during arc welding with modification of protective atmosphere by gaseous halogenide compounds / E. A. Fiatsisava, A. O. Karatseyeu, V. P. Kulikov, A. A. Karatseyeva, A. A. Lapatsina, V. D. Douhaya // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 97–106.

Активное развитие промышленности и появление новых сталей и сплавов со сложными системами легирования и упрочнения неразрывно связано с необходимостью совершенствования технологий их сварки. В последнее время при изготовлении тяжело нагруженных элементов металлоконструкций все больше используются конструкционные низколегированные низкоуглеродистые высокопрочные стали (HSLA). В исходном состоянии поставки микроструктура таких материалов представляет собой структуру игольчатого феррита, что, в отличие от средне- и высокоуглеродистых сталей, позволяет получить более высокий уровень пластичности при сохранении требуемых прочностных показателей. Мартенситное превращение у рассматриваемых материалов происходит при относительно высоких температурах (350 °C) и сопровождается сравнительно низкими напряжениями упругой деформации второго рода (связанными с упругой деформацией микрообластей), поэтому они проявляют незначительную склонность к образованию так называемых «холодных» трещин по классическому «закалочному» механизму [1–4]. Как правило, технология сварки таких сталей сводится к выбору соответствующих сварочных материалов, обеспечивающих необходимый уровень механических свойств, а также предварительному подогреву кромок свариваемых изделий в случаях сварки деталей больших толщин [5]. В некоторых случаях эффективным приемом является снижение скорости охлаждения после сварки и выдержка в течение некоторого времени сварного соединения при повышенной температуре.

Важным вопросом является выбор защитной газовой среды при сварке. Использование углекислого газа для этих целей является неэффективным, т. к. часть элементов комплексного легирования (микролегирования) неизбежно окисляется в дуговом промежутке

и для обеспечения требуемого химического состава шва необходимо повышать их содержание в присадочных материалах, что ведет к увеличению их стоимости. В связи с этим предпочтительным становится использование инертных газовых сред и смесей на их основе ($\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2$). Преимущественно инертная атмосфера позволяет предотвратить или снизить до минимума протекание нежелательных металлургических процессов, вызванных взаимодействием расплавленного металла в дуговом промежутке с продуктами диссоциации активных компонентов газовых смесей.

Тенденция перехода на использование инертных газовых сред и минимизацию взаимодействия расплавленного металла с защитной атмосферой является общей и применяется для широкого круга материалов. Это приводит к тому, что защитный газ выполняет лишь функцию вытеснения воздуха и практически не участвует в протекании физико-металлургических процессов при сварке. В таких условиях существенно возрастает чувствительность сварного соединения к диффузионному водороду, т. к. отсутствуют механизмы борьбы с ним и снижения его растворимости в металле, в отличие, например, от ручной дуговой сварки покрытыми электродами или сварки под флюсом, где наличие флюса позволяет активно проводить направленное металлургическое воздействие и связывание водорода в нерастворимые соединения.

Одним из перспективных способов решения указанной проблемы является модификация защитной атмосферы компонентами, способными связывать водород в нерастворимые или ограниченно растворимые соединения в расплавленном металле сварочной ванны и капле жидкого металла в дуговом промежутке путем введения фторсодержащих галогенидных газообразных добавок SF_6 непосредственно в струю газа (или газовой смеси), подаваемого

традиционным образом через сопло сварочной горелки в зону горения дуги [6–11]. Эффективность такого способа и технические особенности реализации были описаны ранее [7–12].

Рассмотрены особенности модификации защитной атмосферы с точки зрения воздействия на стабильность процесса горения дуги и значения коэффициента потерь электродного металла на разбрызгивание. Этот показатель позволяет не только оценить производительность способа путем определения количества наплавленного металла в единицу времени, но и свидетельствует о его стабильности в определенном диапазоне соотношения значений параметров режима. Характер изменения значений коэффициента потерь электродного металла при различном соотношении значений силы тока и напряжения на дуге при сварке и наплавке с содержанием SF_6 в составе защитной газовой атмосферы в диапазоне значений концентрации от 0 % до 4 % позволяет судить об интенсивном воздействии этого компонента на процессы плавления присадочной проволоки. Повышение концентрации гексафторида серы SF_6 в составе защитной газовой атмосферы будет изменять эффективный потенциал ионизации в области высоких температур столба дуги и способствовать интенсификации процессов дестабилизации дугового промежутка. Продукты высокотемпературной диссоциации SF_6 интенсивно участвуют в физико-металлургических процессах плавления электродной проволоки и влияют на характер перехода легирующих элементов в расплавленный металл ванны. В то же время изменение значения силы тока и напряжения на дуге оказывает непосредственное влияние на характер и форму существования дугового промежутка: его температуру, условную длину, интенсивность плавления присадочной проволоки и характер переноса электродного металла. Таким образом, существует достаточно

большое количество факторов, оказывающих непосредственное влияние на условия образования капли расплавленного металла на торце плавящейся проволоки и ее отрыва и перехода в сварочную ванну.

Для оценки значения коэффициента потерь электродного металла использовалась традиционная методика, основанная на разнице массы наплавленного и расплавленного материалов. При этом коэффициент потерь отражает потери как на разбрызгивание, так и на высокотемпературное испарение. В силу несоизмеримости данных значений для используемого сравнительного анализа этими потерями можно пренебречь, считая общие потери металла связанными исключительно с разбрызгиванием. Сущность экспериментальных исследований заключалась в наплавке на робототехническом комплексе валиков металла на пластины с последующим измерением их массы. Автоматизация процесса позволила исключить возмущающие факторы, связанные с нестабильным значением вылета электродной проволоки, углом наклона горелки, скорости наплавки и др.

Эксперименты проводились с использованием пяти различных значений скорости подачи электродной проволоки со ступенчатым изменением значения напряжения на дуге в диапазонах стабильных значений для каждого из них с шагом 2 В в ручном варианте задания параметров режима. В случае существенного нарушения стабильного процесса, о чем свидетельствовали обрывы дуги, длительные короткие замыкания дугового промежутка с «отстрелом» части сварочной проволоки на периферию из-за ее перегрева током короткого замыкания и выбросом больших объемов расплавленного металла за пределы рабочей зоны, дальнейшее снижение либо повышение значений напряжения на дуге не производилось, и такие режимы считались непригодными для использования на практике.

Экспериментальные исследования проведены в два этапа. Так как предлагаемая технология основана на введении добавки в традиционную газовую смесь $\text{Ar} + \text{CO}_2$, то для оценки ее эффективности на первом этапе определены значения коэффициента потерь для рассматриваемых соотношений значений параметров режима при наплавке в среде 82 % $\text{Ar} + 18$ % CO_2 .

В качестве основного регулируемого параметра выбрано напряжение на дуге. Это обусловлено тем, именно этот параметр оказывает непосредственное влияние на длину дугового промежутка и определяет интенсивность протекания сварочных процессов. Известно, что основные реакции взаимодействия капли расплавленного металла с омывающим потоком защитного газа происходят именно в дуговом промежутке. Капля находится в сильно перегретом состоянии и растворимость газов в ней максимальна. Таким образом, время ее существования определяет время наиболее интенсивного протекания этих реакций. При этом важно отметить, что степень такого влияния будет зависеть от скорости подачи присадочной проволоки, определяющей силу тока дугового промежутка, а также состава защитной газовой среды, т. к. дуговой промежуток существует в газовой среде и определяется ее свойствами.

Комплексность учета указанных факторов вызывает существенные затруднения при теоретическом моделировании процессов и требует проведения большого количества экспериментальных исследований. Также необходимо отметить, что газовые смеси на основе аргона (более 60 % его процентов от общего объема) позволяют получить при определенных условиях «струйный» характер переноса электродного металла, принципиально отличающийся от традиционного, в виде коротких замыканий, что оказывает существенное влияние на значение коэф-

фициента потерь и отчетливо наблюдается при анализе полученных графических зависимостей.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1 и 2 в виде графических зависимостей, а также в табл. 1.

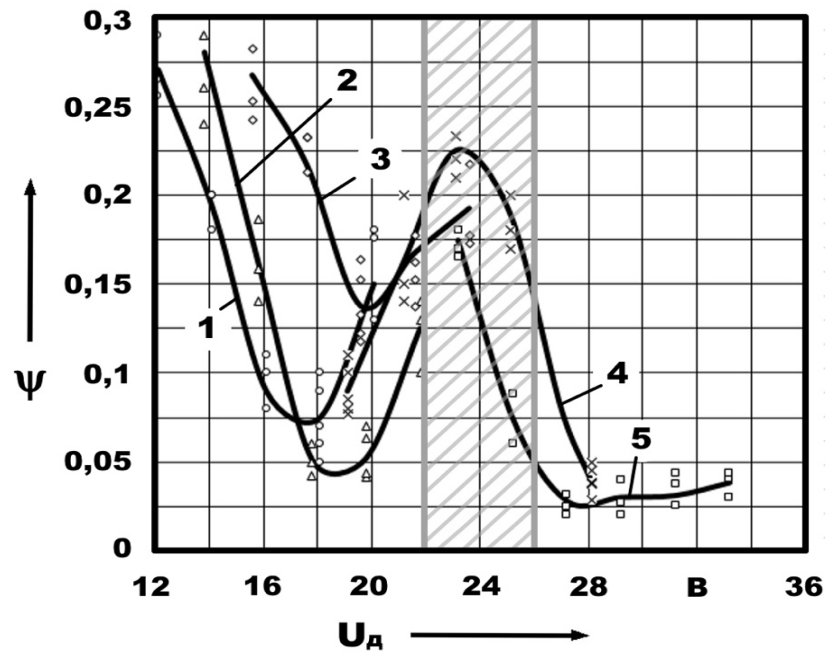
По результатам экспериментов установлены наиболее предпочтительные, с точки зрения минимизации потерь металла на разбрызгивание, соотношения между значениями скорости подачи присадочной проволоки и напряжением на дуге для различных концентраций вводимого SF_6 в защитную газовую атмосферу.

Анализ полученных результатов показал, что зависимость коэффициента потерь электродного металла от напряжения на дуге при малых значениях скорости подачи проволоки имеет три характерных участка.

Скорости подачи (2,3...5,7 м/мин) соответствуют переносу электродного металла короткими замыканиями дугового промежутка и капельному переносу с отрывом капель до замыкания дуги. В целом, следует отметить, что перенос электродного металла короткими замыканиями является наиболее распространенным и используется в подавляющем большинстве технологий управления источниками питания в составе сварочного оборудования, что обусловлено простотой отслеживания момента образования и отделения капли электродного металла от торца плавящейся проволоки по характерному резкому скачку значения силы тока короткого замыкания.

Первый участок графика характеризуется относительно большими потерями на малых значениях напряжения на дуге (до 18...19 В). В таких условиях процесс нестабилен. Отчетливо наблюдается повышенное разбрызгивание с большим количеством крупных выплесков расплавленного металла ванны и части присадочной проволоки из-за длительного короткого замыкания.

а)



б)

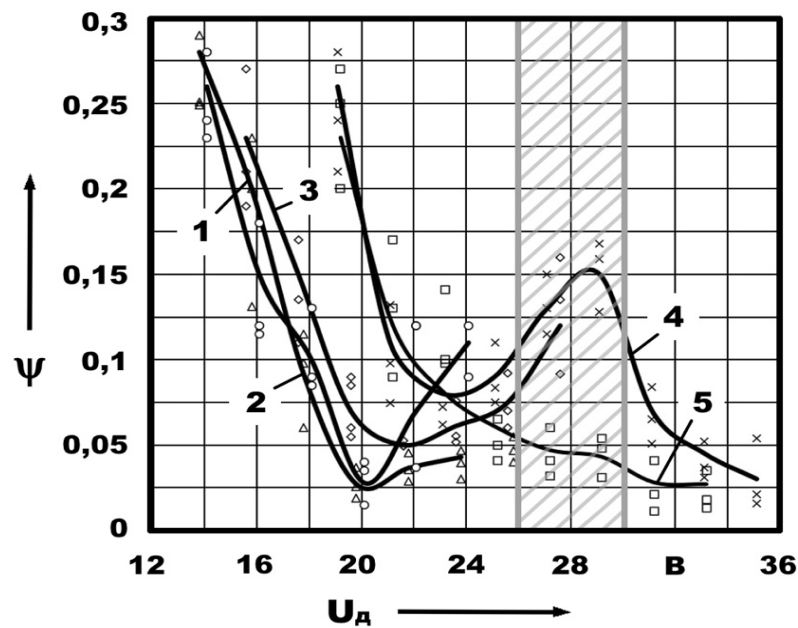
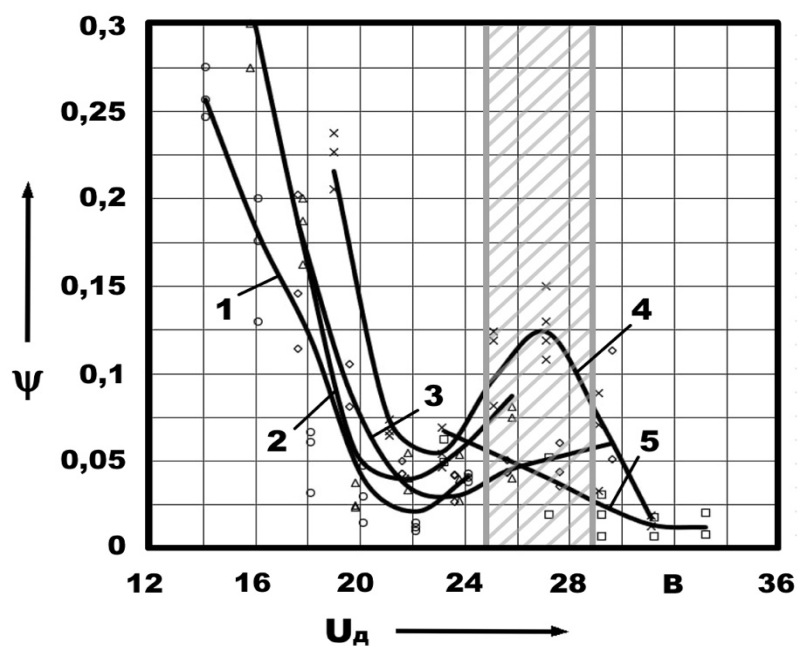


Рис. 1. Зависимость значения коэффициента потерь электродного металла ψ от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки и количестве вводимого SF₆ в защитную атмосферу: а – сварка в среде 82 % Ar + 18 % CO₂; б – 0,5 % SF₆: 1 – 2,3 м/мин; 2 – 3,7 м/мин; 3 – 5,3 м/мин; 4 – 7,7 м/мин; 5 – 9,2 м/мин

а)



б)

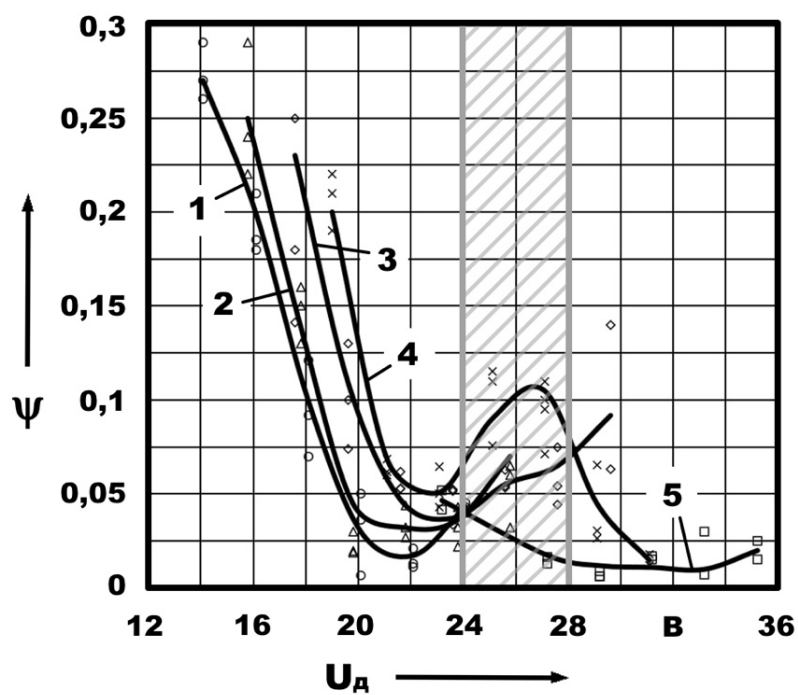


Рис. 2. Зависимость значения коэффициента потерь электродного металла ψ от напряжения на дуге U_d при различном значении скорости подачи присадочной проволоки и количестве вводимого SF_6 в защитную атмосферу: а – 1 % SF_6 ; б – 2 % SF_6 ; 1 – 2,3 м/мин; 2 – 3,7 м/мин; 3 – 5,3 м/мин; 4 – 7,7 м/мин; 5 – 9,2 м/мин

Табл. 1. Значения коэффициента потерь электродного металла при различных соотношениях значений параметров режима и количества вводимого SF₆ в состав защитной газовой атмосферы

Номер кривой на графических зависимостях (см. рис. 1 и 2)	Скорость подачи присадочной проволоки, м/мин	Количество вводимого SF ₆ , %	Ориентировочное значение силы тока, А	Наиболее эффективное значение напряжения на дуге U _о	Значение коэффициента потерь, %
1	2,3	0	98...103	17,5	3
		0,5		20,0	3
		1		22,0	2,5
		2		22,0	2
2	3,7	0	147...155	18,5	3
		0,5		20,0	3,5
		1		21,8	4,2
		2		22,0	3,2
3	5,3	0	195...202	20,0	4,5
		0,5		22,0	4,2
		1		23,0	2,8
		2		24,0	3
4	7,7	0	246...254	17,5	4,5
		0,5		20,0	4,8
		1		23,0	5,1
		2		23,0	5
5	9,2	0	293...306	28,0	3
		0,5		31,0	2,5
		1		31,5	1,2
		2		33,0	2

Наблюдаются «отстрелы» проволоки с выбросом ее частей на периферию. Соотношение значений параметров режима является нежелательным и в дальнейшем не использовалось при проведении экспериментальных исследований.

Повышение напряжения на дуге приводит к резкому снижению значения коэффициента потерь и стабилизации процесса. При этом необходимо отметить, что момент стабилизации характеризуется минимальным значением коэффициента потерь, что свидетель-

ствует о формировании благоприятных для существования дугового промежутка условий. На графике можно наблюдать резкий спад с ярко выраженным минимумом.

Дальнейшее повышение значения напряжения на дуге приводит к плавному росту коэффициента потерь. На графиках наблюдается пологий, плавно возрастающий участок, соответствующий диапазону значений напряжения шириной в 4...6 В. Такой характер зависимости объясняется ростом длины дуги и некоторым снижением её устойчи-

ности. Из-за пространственного сжатия продуктами высокотемпературной диссоциации SF_6 увеличение длины дуги неизбежно ведет к росту диаметра капли электродного металла и, как следствие, снижению частоты коротких замыканий. Это объясняется снижением эффективности разогрева торца проволоки по мере увеличения диаметра капли расплавленного металла на ней и повышенным значением реакционной силы, действующей на каплю со стороны столба дуги вертикально вверх, что приводит к затруднению ее формирования и препятствует отрыву. Это отчетливо регистрируется в процессе проведения экспериментов не только по осциллограммам напряжения и силы тока, но и по наличию характерного звукового эффекта, отражающего дискретность процесса. Рост коэффициента потерь главным образом обусловлен спецификой отрыва крупных капель электродного металла от торца присадочной проволоки и особенностями их контакта с поверхностью расплава ванны.

Следующий участок графика характеризует более интенсивный рост коэффициента потерь, т. к. увеличение длины дуги, вызванное ростом напряжения, будет усиливать эффекты «дестабилизирующего» воздействия SF_6 .

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что для большинства рассматриваемых режимов, соответствующих капельному переносу электродного металла и переносу короткими замыканиями дугового промежутка, наиболее предпочтительным является момент стабилизации при относительно низких значениях напряжения на дуге в рассматриваемом диапазоне регулирования.

Режим, соответствующий скорости подачи присадочной проволоки 7,7 м/мин (см. рис. 1 и 2, кривая 4), является нестабильным. Это обусловлено тем, что значение силы тока в этом случае близко к критическому значению силы тока струйного переноса. В реальных усло-

виях сварки и наплавки естественным является некоторая нестабильность этих значений, обусловленная колебанием вылета электродной проволоки, возмущениями, вызванными наличием загрязнений на поверхности деталей, и другими факторами. В результате этого процесс кратковременно принимает форму струйного переноса, а затем возвращается в режим капельного. Это приводит к нестабильности процесса, изменению физико-металлургических характеристик плавления проволоки. Характер зависимостей в этом случае отличается наличием ярко выраженного максимума в среднем диапазоне значений напряжения на дуге. При этом уменьшение и увеличение напряжения относительно этого значения будет способствовать уменьшению коэффициента потерь. Таким образом, существуют две области стабильности процесса: область капельного переноса металла с использованием относительно низких для данного режима напряжений на дуге 22...26 В и область струйного переноса электродного металла с использованием повышенных значений напряжения более 30 В. При этом в целом струйный характер, с точки зрения минимизации потерь на разбрызгивание, традиционно является более предпочтительным во всем диапазоне регулирования значений параметров режима.

Графические зависимости, полученные с использованием высоких скоростей подачи, характеризуются минимальными значениями коэффициента потерь, что обусловлено струйным характером переноса электродного металла во всем диапазоне регулирования значений напряжения на дуге (см. рис. 1 и 2, кривая 5).

Полученные в ходе проведения экспериментальных исследований результаты свидетельствуют об изменении наиболее эффективного соотношения между силой тока и напряжением на дуге при введении SF_6 в сторону больших значений последнего по срав-

нению с традиционной технологией в среде $\text{Ar} + \text{CO}_2$. Это объясняется необходимостью увеличения длины дуги и мощности для стабильного существования в условиях «дугоподавляющего» эффекта продуктов диссоциации SF_6 .

Результаты позволяют определить области стабильного существования процесса, что особенно важно при разработке технологий с использованием заведомо завышенных, например в случае необходимости выполнения сварки с максимальной шириной наплавленного валика, либо заниженных, в случае сварки в узкую разделку, значений напряжения на дуге. Результаты показывают, что амплитуда диапазона регулирования значений напряжения при таком раскладе не превышает 2 В. В противном случае режим теряет стабильность, что снижает эффективность технологии. Причем практически всегда снижение напряжения вызывает более резкую дестабилизацию процесса, чем его повышение. В случае же традиционной технологии с использованием защитной газовой среды 82 % $\text{Ar} + 18$ % CO_2 наблюдается некоторая симметрия в этом отношении. Это объясняется тем, что введение SF_6 позволяет при повышении напряжения предотвратить отклонение дуги и ее блуждание из-за чрезмерной длины столба посредством пространственного сжатия.

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных исследований установлено следующее.

1. Введение SF_6 в состав защитной газовой среды $\text{Ar} + \text{CO}_2$ при сварке и наплавке в количествах до 2 % сдвигает область наиболее эффективных соотношений параметров режима в сторону больших значений напряжения на дуге, что обусловлено необходимостью увеличения длины дуги и ее мощности для стабильного существования в условиях высокого значения потенциала ионизации F.

2. Для большинства рассматриваемых вариантов соотношения значений параметров режима сварки и наплавки (сила тока и напряжение на дуге) в диапазоне регулирования, соответствующих капельному переносу электродного металла и переносу короткими замыканиями, наиболее предпочтительным является момент стабилизации дугового промежутка при относительно низких значениях напряжения. Введение SF_6 позволяет при повышении напряжения предотвратить отклонение дуги и ее блуждание из-за чрезмерной длины столба посредством пространственного сжатия, что благоприятно сказывается на значении коэффициента потерь электродного металла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свариваемость высокопрочной микрелегированной стали S460M / В. Д. Позняков [и др.] // Автоматическая сварка. – 2016. – № 12. – С. 23–30.
2. Одесский, П. Д. Новые эффективные низколегированные стали для строительных металлических конструкций / П. Д. Одесский, А. Ф. Молодцов, Ю. Д. Морозов // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2011. – № 5. – С. 20–25.
3. Рыбаков, А. А. Особенности микроструктуры и ударная вязкость металла сварных соединений труб из высокопрочной стали с ниобием и молибденом / А. А. Рыбаков, Т. Н. Филиппчук, В. А. Костин // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3–4. – С. 17–24.
4. Шалобыта, Н. Н. Перспективы применения эффективных сталей в современном строительстве / Н. Н. Шалобыта, Т. П. Шалобыта // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 1. – С. 131–134.
5. Мусиянченко, В. Ф. Дуговая сварка высокопрочных легированных сталей / В. Ф. Мусиянченко, Б. С. Касаткин. – Москва: Машиностроение, 1987. – 368 с.
6. Паршин, С. Г. Исследование MIG-сварки стали S235JR с введением в аргон газообразного гексафторида серы SF_6 / С. Г. Паршин // Сварочное производство. – 2017. – № 1. – С. 9–13.

7. **Фетисова, Е. А.** Технология дуговой сварки с введением модифицирующих газовых компонентов в защитную атмосферу / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротева // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. – Брест: БрГТУ, 2022. – С. 175–178.

8. **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: сб. материалов. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 75–76.

9. **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: Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т, 2022. – С. 89–90.

10. **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.

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

12. **Фетисова, Е. А.** Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротева // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.

Статья сдана в редакцию 17 апреля 2023 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.

Валерий Петрович Куликов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

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

Арина Алексеевна Лопатина, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-256-93-38-03.

Вероника Дмитриевна Долгая, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-257-41-67-35.

Ekaterina Anatolievna Fiatsisava, post-graduate student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-44-42-82. E-mail: fetisova9891@gmail.com.

Artur Olegovich Karatseyeu, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-298-45-49-70. E-mail: karatseyeu_artur@fastmail.com.

Valery Petrovich Kulikov, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Belarusian-Russian University.

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

Aryna Alekseevna Lapatsina, student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-256-93-38-03.

Veranika Dmitrievna Douhaya, student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-257-41-67-35.