

УДК 621.791.763.2

*А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. П. Куликов*

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОЙ СВАРКИ С ДВУХСТРУЙНОЙ КОАКСИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ КОМПОНЕНТОВ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

UDC 621.791.763.2

*A. O. Koroteyev, E. A. Fetisova, V. P. Kulikov*

## TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ARC WELDING WITH DOUBLE-JET COAXIAL SUPPLY OF PROTECTIVE GAS MEDIUM COMPONENTS

### Аннотация

Исследованы технологические характеристики способа дуговой сварки с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой среды в зону горения дуги. Определены основные факторы, влияющие на частоту и характер переноса электродного металла. Даны рекомендации по выбору значенных параметров режима и областям эффективного применения предлагаемой технологии.

### Ключевые слова:

технологические характеристики, перенос электродного металла, двухструйная газовая защита, коаксиальная подача газов в зону сварки, газовые смеси.

### Abstract

Technological characteristics of the process of arc welding with a two-jet coaxial feed of components of protective gas medium into the arc burning zone have been investigated. The main factors affecting the frequency and the nature of the electrode metal transfer have been determined. Recommendations for choosing the values of welding parameters are given, as well as the areas of effective application of the proposed technology.

### Keywords:

technological characteristics, transfer of electrode metal, double-jet gas protection, coaxial gas supply to the welding zone, gas mixtures.

Дуговая сварка в среде защитных газов является самым распространенным способом, применяемым на предприятиях Республики Беларусь. В последнее время все большее количество предприятий переходит на использование для защиты зоны горения дуги и сварочной ванны вместо углекислого газа смесей на основе аргона ( $Ar + CO_2$ ). Главная причина такого перехода связана с повышением требований, предъявляемых к сварным конструкциям, а также распространением сталей, сплавов и сварочных присадочных материа-

лов зарубежного производства со сложными системами легирования и микролегирования, для которых использование чистого углекислого газа в качестве защитного при сварке является нецелесообразным вследствие окислительных реакций в зоне сварочной ванны.

Преимущества применения смесей на основе аргона заключаются в первую очередь в повышении ударной вязкости металла шва сварного соединения и его пластичности, а также снижении потерь электродного металла на разбрызгивание, обусловленном уменьшением раз-



меров капле электродного металла [1].

В общем случае, рассматривая строение защитной атмосферы при сварке, можно выделить несколько зон: зону плавления электродной проволоки, зону столба дуги, зону сварочной ванны и периферийное пространство (рис. 1). В каждой из этих зон происходят различные по своему характеру процессы, для которых наиболее эффективной является газовая среда с различным соотношением компонентов.

Для плавления сварочной проволоки, например, наиболее эффективной по ряду показателей является защитная газовая смесь с содержанием углекислого газа около 5...10 %. Такой состав будет способствовать снижению силы поверхностного натяжения расплавленного металла капли и уменьшению её размеров в связи с меньшим временем пребывания на торце электродной проволоки. Для столба дуги количество углекислого газа можно несколько увеличить по сравнению с областью плавления проволоки, что будет приводить к некоторому его сжатию и стабилизации в пространстве. Область сварочной ванны защищается традиционной смесью, состоящей из 82 % Ar и 18 % CO<sub>2</sub>.

При этом наличие аргона в пери-

ферийной части защитной газовой атмосферы, выполняющей исключительно защитную функцию вытеснения воздуха, является необязательным.

Таким образом, создание различной по своему составу защитной атмосферы в различных зонах позволит максимально эффективно использовать технологические особенности и процессы, в них происходящие. Кроме того, это даст возможность существенно снизить суммарный расход аргона в смеси Ar + CO<sub>2</sub> как наиболее дорогостоящего компонента, формирующего высокую конечную стоимость.

Одним из перспективных направлений развития способа, позволяющим не только преодолеть этот недостаток, но и существенно изменить технологические характеристики процесса, является реализация независимой коаксиальной подачи компонентов газовой защитной среды в зону сварки (рис. 2). Ранее была установлена целесообразность и эффективность такого способа [2–5]. Далее будут приведены результаты исследований технологических характеристик и, в частности, характера плавления присадочной проволоки и переноса электродного металла через дуговой промежуток в сварочную ванну.

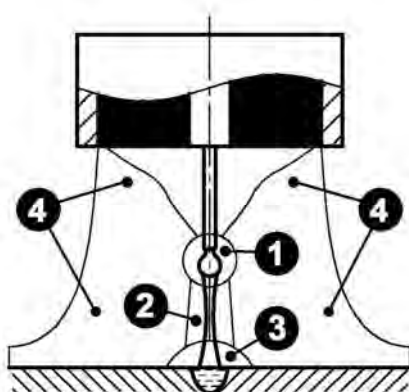


Рис. 1. Строение защитной газовой атмосферы при сварке по традиционной технологии: 1 – область плавления электродной проволоки; 2 – область столба дуги; 3 – область сварочной ванны; 4 – периферийное пространство

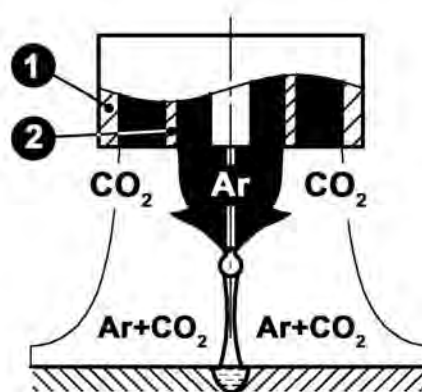


Рис. 2. Строение защитной газовой атмосферы при сварке по традиционной технологии: 1 – наружный кольцевой канал сопла сварочной горелки (для подачи углекислого газа); 2 – внутренний канал сопла горелки (для подачи аргона)



Как правило, разделяют четыре основных вида переноса электродного металла при сварке: перенос с короткими замыканиями дугового промежутка, крупнокапельный, мелкокапельный и так называемый струйный перенос. Каждый из указанных видов характеризуется своими особенностями, областью существования, потерями на разбрызгивание, воздействием на жидкую сварочную ванну и формирующийся сварной шов. Наилучшим считается струйный и мелкокапельный перенос, при котором потери электродного металла минимальны, происходит хорошее формирование шва, отсутствует грубая чешуйчатость его поверхности.

В свою очередь характер переноса электродного металла зависит от множества факторов, не последнюю роль в числе которых играет состав защитной газовой среды. В связи с этим представляют интерес исследования, позволяющие установить, как влияет двухструйная газовая защита на характер переноса электродного металла.

Как указывалось ранее, при использовании предлагаемой технологии реализации газовой защиты состав образующейся смеси  $Ar + CO_2$  формируется путем смешивания инертного ( $Ar$ ) и активного ( $CO_2$ ) газов в зоне горения дуги в отличие от традиционного варианта подачи в зону сварки смеси этих газов стабильного состава. Причем по вертикальной оси данный состав будет различен. С удалением от среза сопла количество  $Ar$  в составе образующейся смеси будет уменьшаться от 100-процентной концентрации до некоторого значения, обусловленного расходом газов, а также расстоянием от сопла до поверхности свариваемого изделия.

Наиболее информативным показателем при изучении характера переноса электродного металла является его частота, которая позволяет косвенно судить о размере капель. Для исследования характера горения дуги и переноса электродного металла в условиях двух-

струйной газовой защиты применялся метод осциллографирования электрических параметров режима в процессе наплавки в автоматическом режиме одиночного валика на пластину. По характерным участкам осциллограмм, обладающих наибольшей стабильностью процесса, фиксировались пиковые значения силы тока и напряжения на дуге, соответствующие отрыву капли электродного металла либо короткому замыканию дугового промежутка. По полученным данным строились зависимости частоты отрыва капель от силы сварочного тока и напряжения на дуге.

Наплавка осуществлялась с использованием сварочного полуавтомата FRONIUS TransSteel 3500. Для стабилизации вылета электродной проволоки и поддержания постоянства скорости наплавки горелка фиксировалась на тракторе сварочного автомата. Таким образом, процесс осуществлялся в автоматическом режиме. Расход газов перед их подачей в соответствующие каналы сопла контролировался при помощи поплавковых ротаметров. Задание значений параметров режима наплавки осуществлялось непосредственно через панель управления сварочным аппаратом, а их фактические величины фиксировались при помощи регистратора сварочных процессов РДКП -0401.

Внешний вид образцов с наплавленными валиками представлен на рис. 3. Напряжение на дуге при проведении экспериментов изменялось в диапазоне значений от 15 до 28 В в зависимости от силы сварочного тока.

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что при наплавке со значениями напряжения на дуге ( $U_d \leq 15$  В) наблюдаются длительные короткие замыкания дугового промежутка. Это способствует возрастанию потерь электродного металла на разбрызгивание. Валик наплавленного металла не является сплошным, а представляет собой цепочку отдельных закристаллизовавшихся объемов с выраженными

участками длительных коротких замыканий между ними (см. рис. 3, б). При наплавке со значением напряжения дуги ( $U_d \geq 28$  В) её длина, а также время образования и роста капли на торце электродной проволоки увеличиваются.

В случае использования относительно малых значений силы сварочного тока (до 150 А), это будет приводить к формированию валика из отдельных капель порционно, и его поверхность будет приобретать чешуйчатый вид (см. рис. 3, в).

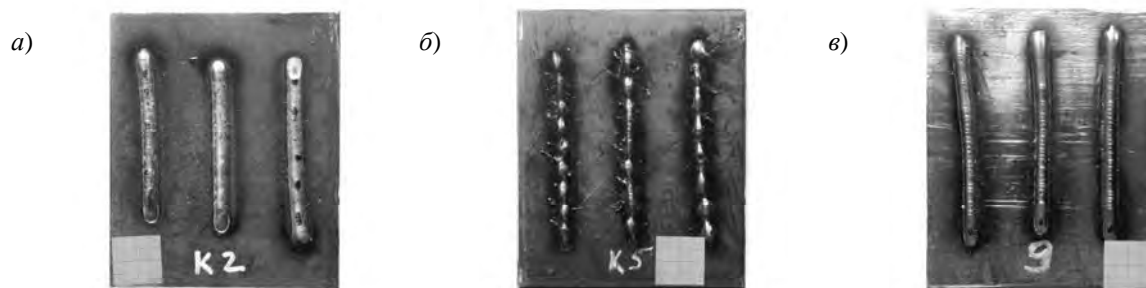


Рис. 3. Внешний вид образцов после наплавки: а –  $I_{св} = 100$  А;  $U_d = 19$  В; б –  $I_{св} = 100$  А;  $U_d = 15$  В (наплавка с низким напряжением на дуге); в –  $I_{св} = 100$  А;  $U_d = 28$  В (наплавка с крупнокапельным переносом электродного металла)

По результатам экспериментов получены осциллограммы изменения силы сварочного тока и напряжения на дуге. В качестве примера на рис. 4 и 5 представлен внешний вид осциллограмм для силы сварочного тока 150 А. Осциллограммы имеют характерный вид с повторяющимися циклами между отдельными пиковыми значениями силы тока и напряжения на дуге. Время такого цикла  $t_{ц}$  состоит из времени короткого замыкания и времени горения дуги и роста капли расплавленного металла на торце проволоки. При этом необходимо отметить, что в случаях наплавки по традиционной технологии с использованием струйной защиты смесью 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> и с двухструйной подачей компонентов защитной газовой среды, последняя характеризуется существенно меньшим значением времени цикла  $t_{ц}$  (рис. 6).

На рис. 7 изображены графики и зависимости частоты переноса электродного металла  $f_n$  от напряжения на дуге  $U_d$ . Анализ полученных данных показал, что при наплавке с двухструйной подачей газов в зону горения дуги частота переноса электродного металла при малых зна-

чениях силы тока выше в 1,5...2 раза (кривая 1, рис. 7, б). Этот диапазон значений соответствует переносу с короткими замыканиями дугового промежутка. Вместе с тем частота коротких замыканий оказывает непосредственное влияние на стабильность процесса и размер капель электродного металла, переходящих в сварочную ванну.

Повышение частоты переноса, вероятно, связано с особенностями формирования защитной атмосферы дуги и направлением газовых потоков, в результате чего восходящий турбулентный вихрь образующейся защитной газовой смеси оказывает газодинамическое воздействие на процесс плавления проволоки электродного металла, а также перераспределение теплоты в области столба дуги. При возрастании значения силы сварочного тока и, как следствие, напряжения на дуге перенос становится капельным. При этом длина дуги увеличивается. В данных условиях напряжение оказывает большее влияние на частоту переноса при двухструйной подаче газов (кривые 2, 3 и 4, рис. 7, б имеют больший угол наклона к горизонтальной оси координат). Это объяс-



няется неоднородностью атмосферы по вертикальной оси, связанной с турбулентным взаимодействием и смешива-

нием двух газовых потоков аргона и углекислого газа (рис. 8).

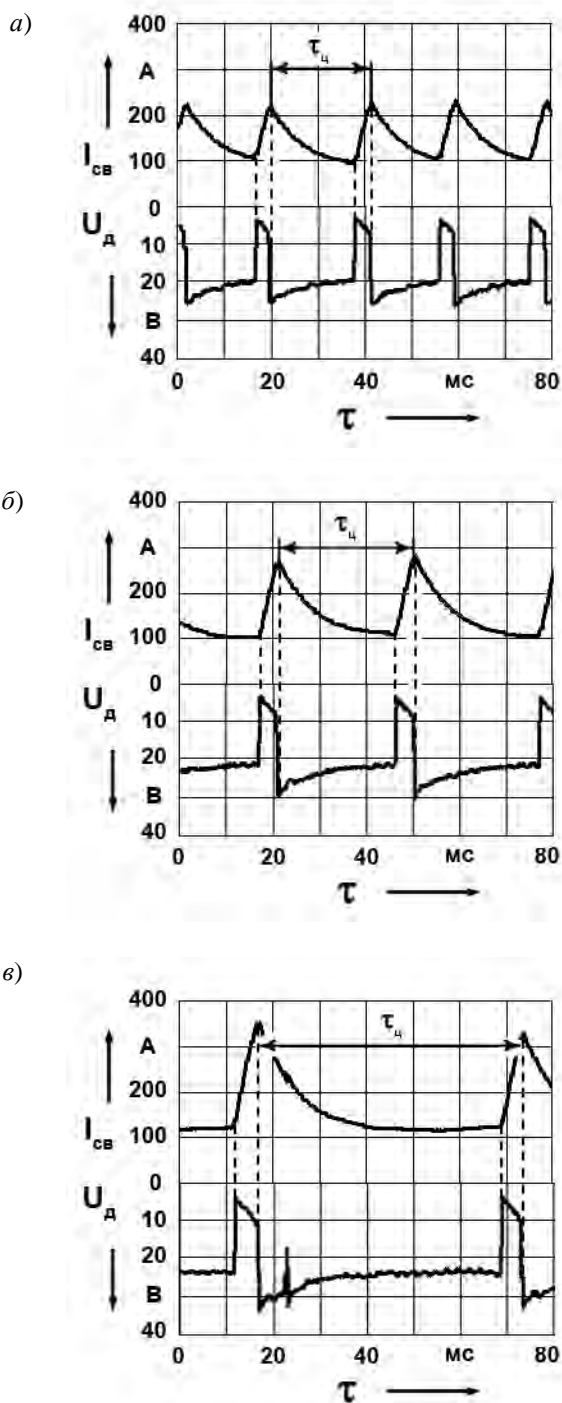


Рис. 4. Осциллограммы значений силы тока  $I_{св}$  и напряжения на дуге  $U_d$  при наплавке по традиционной технологии: а -  $U_d = 18$  В; б -  $U_d = 20$  В; в -  $U_d = 22$  В

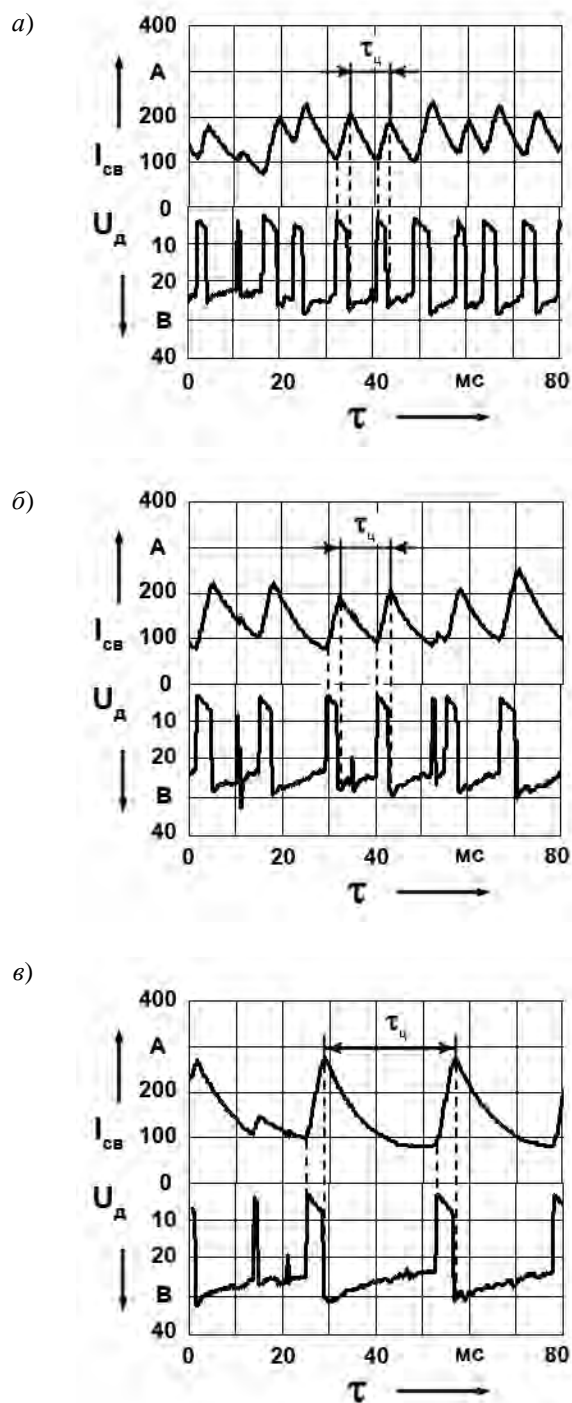


Рис. 5. Осциллограммы значений силы тока  $I_{св}$  и напряжения на дуге  $U_d$  при наплавке с двухструйной подачей газов в зону горения дуги: а -  $U_d = 18$  В; б -  $U_d = 20$  В; в -  $U_d = 22$  В



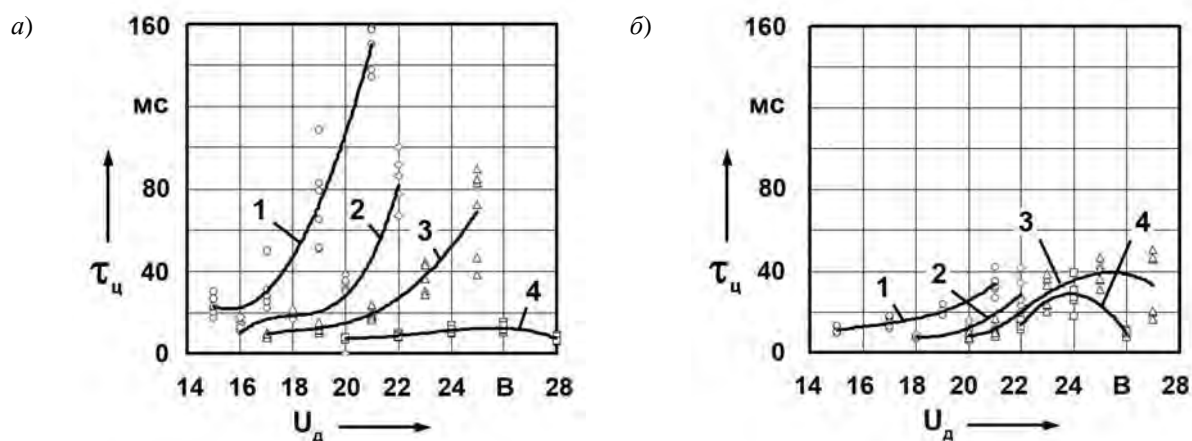


Рис. 6. Длительность цикла между короткими замыканиями и переходами каплей через дуговой промежуток: *a* – традиционная технология газовой защиты; *б* – двухструйная подача защитных газов в зону горения дуги; 1 –  $I_{cb} = 100$  А; 2 –  $I_{cb} = 150$  А; 3 –  $I_{cb} = 200$  А; 4 –  $I_{cb} = 250$  А

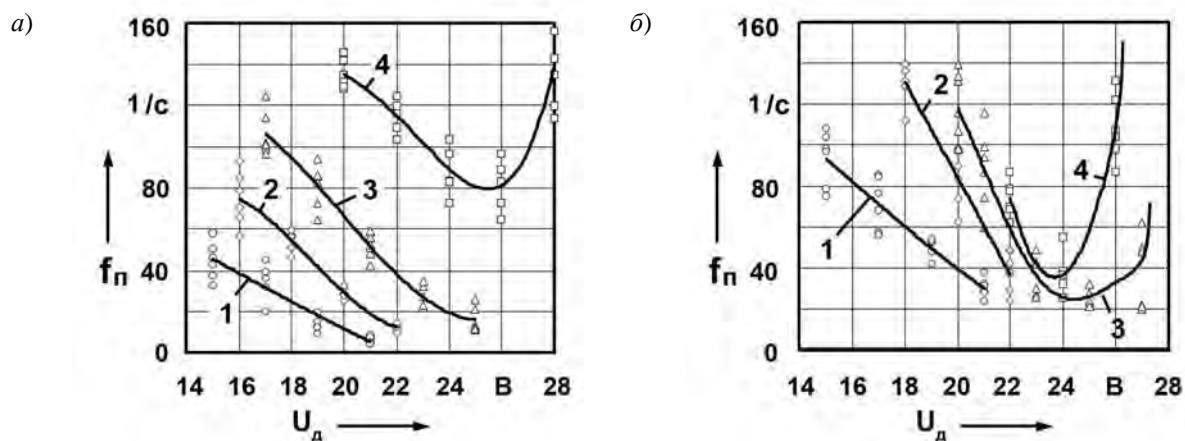


Рис. 7. Частота переноса каплей электродного металла в зависимости от напряжения на дуге  $U_d$  и силы тока  $I_{cb}$ : *a* – традиционная технология газовой защиты; *б* – двухструйная подача защитных газов в зону горения дуги; 1 –  $I_{cb} = 100$  А; 2 –  $I_{cb} = 150$  А; 3 –  $I_{cb} = 200$  А; 4 –  $I_{cb} = 250$  А

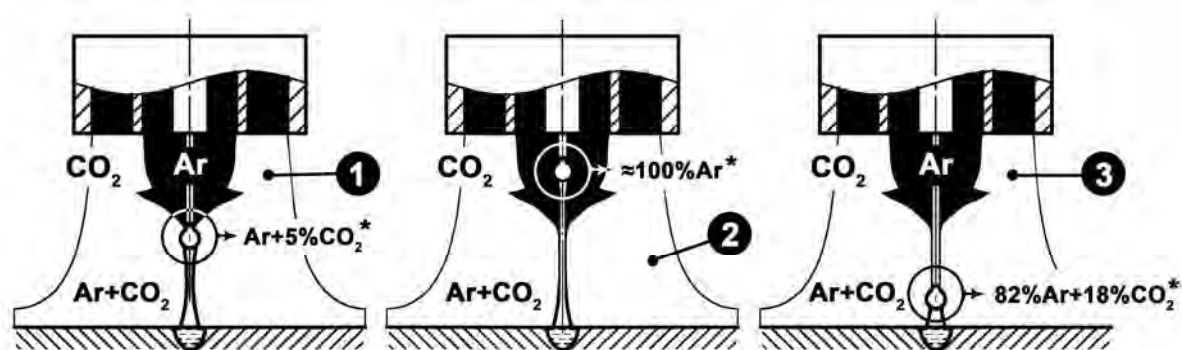


Рис. 8. Изменение состава защитной атмосферы в области торца плавящейся электродной проволоки при изменении длины дуги (\* – состав газа указан ориентировочно): 1 – сварка на средней длине дуги (оптимальное соотношение между значением напряжения и силой сварочного тока); 2 – сварка с повышенным напряжением на дуге; 3 – сварка с напряжением на дуге, существенно меньшим оптимального значения

Кривые 3 и 4, соответствующие значениям силы сварочного тока 200 и 250 А, имеют характерный участок с резким повышением частоты в области напряжений 24...26 В. Данный участок графиков свидетельствует о переходе к струйному переносу электродного металла, при котором капли имеют настолько малый размер, что визуально объединяются в сплошную непрерывную струю. При этом кривая 4, соответствующая значению силы тока 250 А, характеризуется меньшей частотой, чем при сварке по традиционной технологии, однако переход к струйному переносу наблюдается при меньших значениях напряжения на дуге (24 и 27 В для токов 250 и 270 А соответственно).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение напряжения, например, его возрастание,

будет приводить к тому, что характер плавления проволоки будет изменяться и становиться похожим на сварку в защитных смесях с большим количеством аргона либо в чистом аргоне (кривая 2, рис. 8). Это обусловлено повышением содержания аргона в защитной атмосфере при увеличении расстояния от поверхности изделия, что позволяет получить струйный перенос на меньших критических значениях силы тока и может быть использовано в некоторых случаях на практике.

Анализируя полученные данные, были определены области оптимальных значений параметров режима для процесса наплавки и сварки с двухструйной подачей защитного газа в зону горения дуги и традиционного способа сварки в среде 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> (рис. 9).

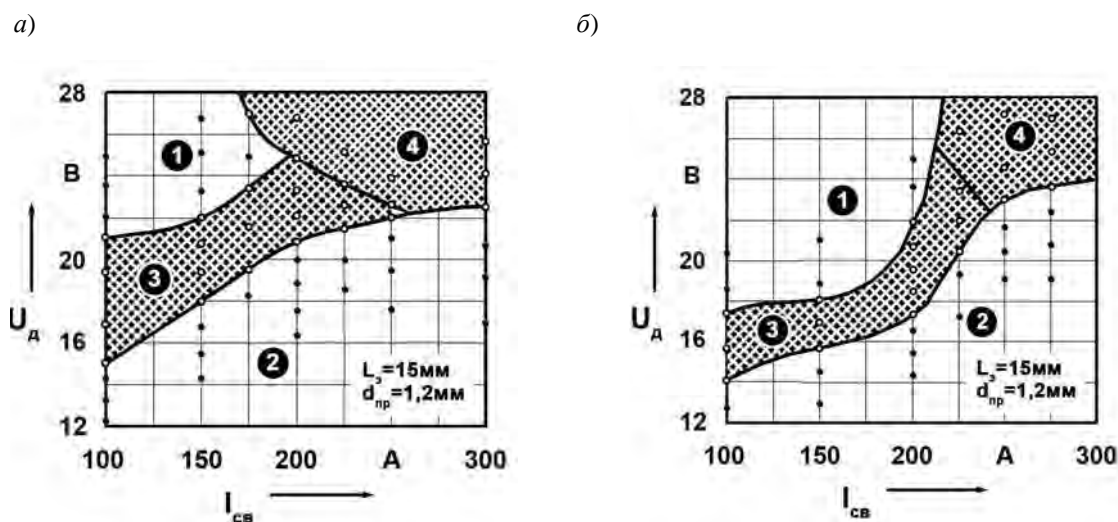


Рис. 9. Области оптимальных значений параметров режима сварки: *а* – сварка с двухструйной подачей защитных газов в зону горения дуги; *б* – сварка с использованием традиционной технологии газовой защиты смесью 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> ( $L_s = 12...15$  мм); 1 – область крупнокапельного переноса электродного металла (нестабильное горение дуги); 2 – область обрыва дуги вследствие длительных коротких замыканий дугового промежутка; 3 – область оптимальных значений параметров режима; 4 – область струйного переноса электродного металла

Полученные результаты показали, что для предлагаемой технологии рекомендуется несколько повысить напряжение в области значений силы тока 100...200 А по сравнению с традиционной. Вместе с тем использование двухструйной коаксиальной подачи га-

зов в зону горения дуги позволяет существенно расширить диапазон регулирования значений напряжения и сдвинуть область перехода к струйному характеру переноса электродного металла к более низким значениям критической силы сварочного тока.



На графиках имеется по несколько областей, характеризующихся различными условиями горения дуги и технологическими особенностями переноса электродного металла. Области 1 и 2 на рис. 9 являются диапазонами значений параметров режима с нестабильным горением дуги, её частыми обрывами вследствие коротких замыканий либо возмущений из-за крупнокапельного переноса металла. Области 3 и 4 – диапазоны оптимальных значений параметров режима, характеризующихся наибольшей стабильностью процесса. Область 4 соответствует струйному переносу электродного металла. При этом повышение значения напряжения не приводит к снижению стабильности горения дуги, но в то же время является нежелательным, т. к. процесс сварки трудноконтролируемый, особенно при небольших (12...14 мм) расстояниях от поверхности изделия до сопла сварочной горелки. Валик наплавленного металла имеет достаточно большую ширину, и тепло дуги используется менее эффективно.

Необходимо также отметить, что струйный характер переноса электродного металла можно наблюдать и на токах 170 А, что существенно меньше критического значения силы тока струйного переноса (225...250 А). Это становится возможным благодаря большим значениям напряжения на дуге. Однако такой процесс нельзя назвать стабильным, т. к. незначительные возмущения приводят к изменению характера плавления проволоки и образованию крупных капель электродного металла с последующим ростом потерь на разбрызгивание.

В результате проведенных исследований определены оптимальные значения параметров режима сварки с точки зрения стабильности процесса горения дуги, а также переноса электродного металла. При двухструйной газовой защите переход к струйному переносу наблюдается при меньших токах, что

расширяет диапазон благоприятных значений параметров режима сварки. Это объясняется повышением содержания аргона в защитной газовой среде вблизи торца плавящейся электродной проволоки при увеличении длины дуги. Причем атмосфера, в которой образуются капли электродного металла, становится более инертной. На достаточно больших токах (более 170...200 А) характер распределения действующих на каплю сил становится таким, что равнодействующая сила направлена вертикально вниз. Данное распределение обусловлено снижением степени сжатия дуги в связи с уменьшением интенсивного теплоотвода, основной причиной которого являются эндотермические процессы диссоциации  $\text{CO}_2$ . Величина направленной вертикально вверх реакционной силы давления столба дуги, затрудняющей отрыв капель электродного металла, снижается. Таким образом, более инертная смесь с этой точки зрения является предпочтительной и способствует созданию условий для возникновения струйного переноса электродного металла при сварке и наплавке на токах, значительно меньших критического тока струйного переноса в случае использования в качестве газовой защиты смесей 82 %  $\text{Ar}$  + 18 %  $\text{CO}_2$ , традиционно подаваемых в зону горения дуги.

### **Выводы**

1. В области значений напряжения на дуге 14...28 В процесс сварки с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой среды характеризуется в 1,5...2 раза большей частотой переноса электродного металла по сравнению с традиционной технологией, что объясняется изменением условий плавления присадочной проволоки и неравномерным соотношением компонентов смеси  $\text{Ar}$  +  $\text{CO}_2$  по вертикальной оси потока газа. Состав защитной среды в области образования капли ме-



талла на торце проволоки при этом будет сильно зависеть от напряжения на дуге, регулируя которое, можно воздействовать на характер её плавления.

2. При сварке с двухструйной подачей защитных газов происходит уменьшение значений критической силы сварочного тока, при которой наблюдается переход к струйному переносу электродного металла. Это объясняется снижением количества  $CO_2$

в анодной части дуги и степени её сжатия, происходящего из-за эндотермической реакции диссоциации углекислого газа. Таким образом, двухструйная коаксиальная подача защитных газов обеспечивает более широкий диапазон значений токов для струйного характера переноса электродного металла, характеризующегося минимальными потерями металла на разбрызгивание.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2016. – 463 с.: ил.
2. **Коротеев, А. О.** Особенности реализации кольцевого способа подачи защитного газа в зону горения дуги при сварке / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 23–31.
3. **Коротеев, А. О.** О потерях электродного металла при дуговой сварке в условиях комбинированной газовой защиты / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 25–34.
4. **Коротеев, А. О.** Моделирование газодинамических процессов в защитной атмосфере дуги при сварке в смеси коаксиально подаваемых газов / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. П. Долячко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3. – С. 54–64.
5. **Коротеев, А. О.** Особенности выбора сварочных проволок при дуговой сварке в среде  $Ar + CO_2$  с двухструйной коаксиальной подачей защитных газов в зону горения дуги / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. П. Долячко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3. – С. 65–73.

*Статья сдана в редакцию 20 марта 2019 года*

**Артур Олегович Коротеев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
**Екатерина Анатольевна Фетисова**, инженер, Белорусско-Российский университет.  
**Валерий Петрович Куликов**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

**Artur Olegovich Koroteyev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
**Ekaterina Anatolyevna Fetisova**, engineer, Belarusian-Russian University.  
**Valery Petrovich Kulikov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.