
УДК 621.791.763.2

А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров

О ПОТЕРЯХ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОЙ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ

UDC 621.791.763.2

A. O. Koroteyev, V. P. Kulikov, M. A. Kadrov

ON THE LOSS OF ELECTRODE METAL IN ARC WELDING WITH COMBINED GAS PROTECTION

Аннотация

Проведены экспериментальные исследования с целью определения потерь электродного металла при сварке в условиях комбинированной газовой защиты зоны горения дуги. На основании исследований разработаны рекомендации по оптимальному соотношению расходов газов, подаваемых по центральному и кольцевому каналам. Проведён сравнительный анализ коэффициента потерь в предлагаемой технологии сварки и коэффициента потерь при сварке в условиях традиционной подачи готовой смеси (82 % Ar + 18 % CO₂) в зону горения дуги, а также при сварке в чистом аргоне и углекислом газе. Показана эффективность применения предлагаемой технологии сварки.

Ключевые слова:

комбинированная газовая защита, коэффициент потерь, разбрызгивание, конструктивные параметры сопла сварочной горелки, механические свойства сварных соединений.

Abstract

Experimental studies have been done to determine losses of electrode metal in welding with combined gas protection of the combustion zone of an electric arc. Based on the studies, the recommendations have been developed for the optimal ratio of gas flow through the central and circular channels. The comparative analysis of the loss coefficient has been performed for welding with a traditional supply of ready-made mix (82 % Ar + 18 % CO₂) to the arc combustion zone, and for welding in pure argon and carbon dioxide. Based on the results obtained and the mechanical testing of welded joints, the effectiveness of the proposed technology of welding is demonstrated.

Key words:

combined gas protection, loss coefficient, spattering, design parameters of the welding torch nozzle, mechanical properties of welded joints.

Одним из направлений совершенствования процесса дуговой сварки в защитном газе является использование для защиты зоны горения дуги и сварочной ванны вместо углекислого газа смесей на основе аргона (Ar + CO₂). Это позволяет устранить ряд недостатков сварки в CO₂, таких как повышенное разбрызгивание электродного металла, низкая пластичность и ударная вязкость сварного соединения при отрицатель-

ных температурах [1]. Наряду с этим, одним из сдерживающих факторов, препятствующих переходу отечественных предприятий на использование сварки в среде Ar + CO₂, является относительно высокая стоимость аргона. В данных условиях исследования, направленные на снижение стоимости защитного газа при сохранении высоких эксплуатационных характеристик сварного соединения и технологических преиму-

шеств сварки в среде $Ar + CO_2$, являются актуальными. Одним из направлений таких исследований является реализация комбинированного способа подачи компонентов защитной газовой смеси в зону сварки.

Защитный газ при сварке выполняет, как правило, две основные функции. Первая из них связана с вытеснением атмосферного воздуха из зоны горения дуги. Это является необходимым, но недостаточным условием получения качественного соединения. Второй функцией является обеспечение стабильности горения дуги и переноса электродного металла через дуговой промежуток. Следует отметить, что для обеспечения требуемых условий расплавления проволоки и переноса электродного металла, характерных для сварки в смеси $Ar + CO_2$ и использования преимуществ такого процесса по сравнению со сваркой в углекислом газе, достаточно обеспечить защиту такой смесью непосредственно зоны дуги и активной части сварочной ванны. В связи с этим естественным является стремление разделить поток защитного газа функционально на две концентричные струи. Центральная струя определяет характер плавления электродной проволоки и переноса расплавленного металла через дуговой промежуток. Внешняя кольцевая струя защищает расплавленный металл сварочной ванны от взаимодействия с атмосферой. При таком способе защиты газовые струи могут частично перемешиваться между собой, причём степень этого перемешивания зависит от многих факторов. При этом независимая подача компонентов газовой смеси в зону горения дуги открывает новые возможности регулирования состава защитной газовой атмосферы и, как следствие, её технологических характеристик. Это и есть комбинированный способ газовой защиты [2–4].

Рассматривая процесс развития способов комбинированной независимой подачи компонентов в зону горения

дуги, можно выделить два принципиально отличающихся друг от друга подхода.

Первый подход основан на положении, что центральная струя, состоящая из чистого инертного газа (как правило, в большинстве случаев это аргон), должна защищать столб дуги и примыкающие к нему катодную и анодную области, т. е. области с наиболее интенсивно протекающими реакциями взаимодействия защитного газа с расплавленным металлом. При этом подмешивание в эту центральную струю других газов, например из кольцевого потока, является нежелательным (рис. 1, а). На основании анализа источников литературы можно предположить, что такая схема была заимствована из процессов сварки неплавящимся электродом без каких-либо принципиальных изменений. Стремление снизить расход дорогостоящего аргона при обеспечении достаточной стойкости вольфрамового электрода привело к тому, что по средствам разделения потока защитного газа расход его по центральному каналу удалось несколько снизить за счёт подачи по кольцевому коаксиально расположенному каналу углекислого газа.

Такой подход обладает рядом преимуществ, среди которых следует выделить в первую очередь наилучшую газовую защиту расплавленного металла. Инертный газ не вступает во взаимодействие с металлом, и тем самым исключается вероятность окисления и угара легирующих элементов. Однако стремление защитить инертным газом или его смесью всю центральную область приводит к тому, что напор этой центральной струи должен быть достаточно большим, а это не позволяет существенно снизить затраты на создание защитной газовой атмосферы в целом. Кроме того, процесс сварки в чистом аргоне характеризуется крупнокапельным переносом электродного металла в диапазоне малых значений силы сварочного тока.

Вторым принципиальным подходом является намеренное снижение расхода инертного газа, подаваемого по центральному каналу до предельно малых значений. Кольцевой поток в этом случае должен обладать достаточной «жесткостью» и берёт на себя функцию полной газовой защиты внутренней полости от проникновения в неё атмосферного воздуха. При этом в отличие от первого подхода, перемешивание газов является ключевым процессом формирования защитной газовой атмосферы.

Как известно из теории турбулентных затопленных струй, струя газа, истекающая из сопла сварочной горелки в атмосферу, характеризуется ядром, в котором состав газа постоянен, и переходной зоной, в которой наблюдается подсос газа из окружающей среды. Малый расход инертного газа, подаваемого по центральному каналу, будет приводить к сжатию ядра струи, т. е. к сужению области со 100-процентной концентрацией этого газа, и увеличению

переходной зоны (рис. 1, б). При этом фронт защитной газовой атмосферы будет представлять собой переменную по составу смесь компонентов. Центральная струя газа в этом случае будет инжектировать в себя часть кольцевого потока. С увеличением расстояния от сопла горелки количество подмешиваемого в центральную струю газа из кольцевого потока будет увеличиваться. При этом плавящийся торец электродной проволоки при постоянном вылете с изменением длины дуги будет находиться в областях с различной газовой атмосферой, что, в свою очередь, будет оказывать влияние на процессы плавления и переноса электродного металла. В случае подачи по центральному каналу чистого аргона, а по кольцевому каналу углекислого газа в зоне горения дуги на некотором расстоянии от сопла сварочной горелки защитная атмосфера будет представлять собой смесь аргона с углекислым газом.

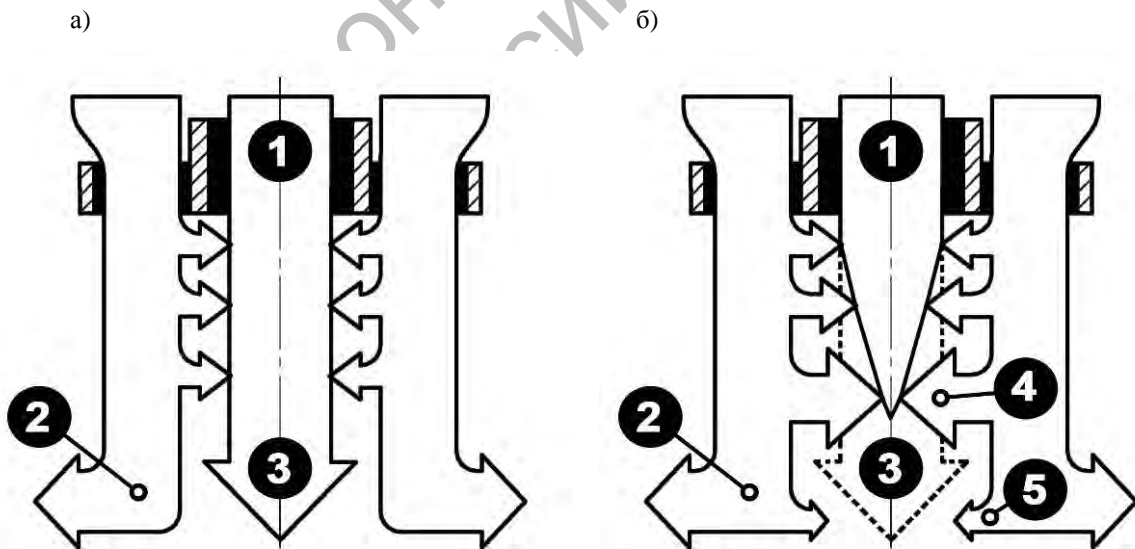


Рис. 1. Схема инжекции газа из кольцевого потока в центральный: 1 – центральный поток газа (аргон); 2 – кольцевой поток газа; 3 – зона горения дуги; 4 – боковая инжекция газа в центральную струю; 5 – инжекция газа, обусловленная отражением кольцевой струи от поверхности изделия

Известно, что присутствие окислительного компонента в газовой смеси положительно сказывается на характере переноса электродного металла и металлургических процессах, происходящих в расплавленном металле сварочной ванны. Этим объясняется применение защитных смесей инертных газов с небольшими добавками активных, как правило, углекислого газа или кислорода, даже в случаях сварки высоколегированных сталей. Кроме того, такая схема позволяет существенно по сравнению с первым подходом снизить расход аргона, поэтому, по мнению авторов, является более эффективной в большинстве случаев сварки.

Целью экспериментов, результаты которых представлены в статье, была оптимизация расхода аргона, подаваемого по центральному каналу сопла с точки зрения минимальных потерь электродного металла на разбрызгивание при сохранении механических характеристик сварного соединения. Также одной из задач являлось сравнение потерь при сварке с использованием комбинированной защиты с потерями при сварке в готовой газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂, чистом аргоне и углекислом газе.

Для подтверждения эффективности применяемой технологии проводились механические испытания сварных соединений.

Сварка осуществлялась на полуавтомате Fronius TransSteel 3500 проволокой сплошного сечения Ø 1,2 мм G4Si1 (Св08Г2С). Особенностью экспериментальной установки являлось жесткое закрепление горелки сварочного полуавтомата на сварочном тракторе, что позволило избежать нежелательных колебаний скорости сварки, вылета электродной проволоки, а также других возмущающих факторов, оказывающих существенное влияние на объективность получаемых результатов.

Принципиальная конструктивная схема экспериментального варианта сопла с комбинированной подачей компонентов газовой смеси в зону сварки, использованная при проведении экспериментов, представлена на рис. 2. Комбинированная независимая подача компонентов смеси обеспечивается наличием газоразделительного обтекателя 2. При этом аргон подаётся через ротаметр для точного контроля расхода по традиционной схеме через шланг горелки в центральный канал 6, а углекислый газ дополнительно подводится через ряд отверстий 5 во внешнем сопле 1 в кольцевой канал 7. Особенностью и преимуществом такой схемы реализации комбинированной защиты является отсутствие необходимости изготовления специальной горелки. Все элементы сопла устанавливаются непосредственно на имеющуюся горелку без изготовления специальных переходников (при соответствии посадочных диаметров сопла). Кроме того, с целью сохранения маневренности сварки габаритные размеры почти не меняются за исключением наличия трубок подвода углекислого газа к отверстиям 5 во внешнем сопле 1. Такая схема реализации комбинированной защиты позволяет организовать независимую подачу компонентов в широком диапазоне регулирования их расходов. При этом для обеспечения точности перед подачей защитного газа непосредственно к каждому из выходных каналов сопла их расход контролировался с помощью ротаметров.

Так как процесс сварки в комбинированной газовой защите отличается от традиционного способа в условиях однородного омывающего потока, авторами были проведены эксперименты по определению оптимальных соотношений параметров режима сварки (напряжения на дуге в зависимости от сварочного тока) с точки зрения стабильности горения дуги (рис. 3).

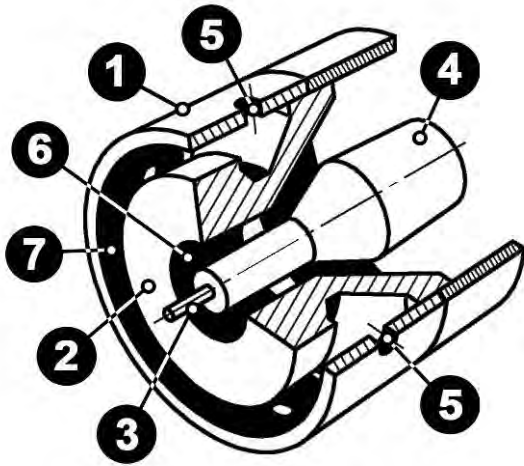


Рис. 2. Принципиальная схема сопла с комбинированной подачей компонентов газовой смеси в зону сварки: 1 – внешнее сопло; 2 – газоразделительный обтекатель; 3 – электродная проволока; 4 – токоподводящий наконечник; 5 – отверстия для подачи газа в кольцевой канал; 6 – центральный канал; 7 – кольцевой канал

В области, расположенной ниже графика (при значениях напряжения, меньших оптимальных), наблюдается процесс сварки с короткими замыканиями дугового промежутка, особенно на малых значениях сварочного тока (< 160 А). Область, расположенная над графиком, характеризуется периодическими обрывами дуги (на токах ниже критического тока струйного переноса). На режимах сварки, соответствующих струйному переносу электродного металла, повышение напряжения сверх оптимального не приводит к обрыву дуги, но оно ограничено вылетом электродной проволоки и возникновением вероятности перегрева и расплавления токоподводящего наконечника. Очевидно, что соотношение расходов защитных газов (аргона и углекислого газа) будут оказывать влияние на оптимальные значения напряжения. Поэтому полученные данные корректировались в дальнейшем с точки зрения потерь электродного металла.

В целом можно отметить, что по сравнению со сваркой в омывающем потоке напряжение на дуге рекоменду-

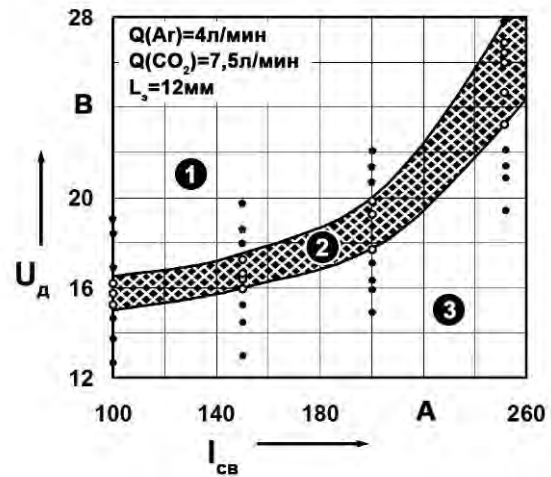


Рис. 3. Область оптимальных значений параметров режима сварки с комбинированной газовой защитой: 1, 3 – область нестабильного горения дуги; 2 – область оптимальных режимов

ется несколько повышать – это приводит к более стабильному процессу переноса металла.

Используемая авторами методика оценки потерь электродного металла была основана на наплавке валиков на пластины из низкоуглеродистой стали, определении массы пластины до и после наплавки. При этом потерями являются не только потери на разбрызгивание электродного металла, но и потери на его испарение. Косвенным образом оценивались величина брызг и степень забрызгивания сопла горелки. Расход углекислого газа, подаваемого по кольцевому каналу сварочного сопла, выбирался согласно рекомендациям, полученным ранее [5, 6]. При этом главным требованием, предъявляемым к кольцевому потоку, было обеспечение надёжной защиты центральной области (области горения дуги) от проникновения в неё атмосферных газов. Расход аргона изменялся от 1 до 8,5 л/мин.

По результатам экспериментов построены графические зависимости (рис. 4).

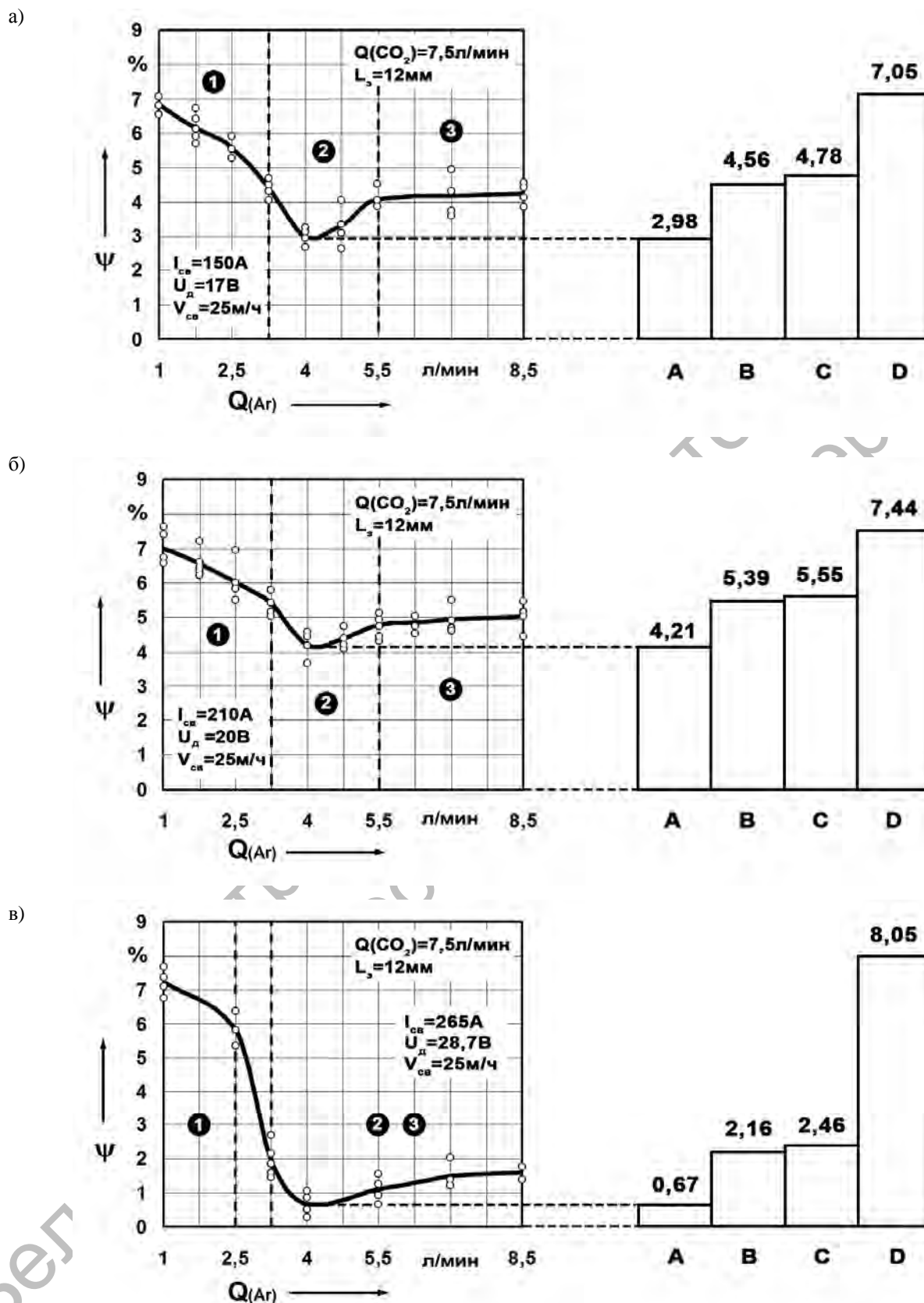


Рис. 4. Коэффициент потерь Ψ в зависимости от расхода аргона $Q(\text{Ar})$, подаваемого по центральному каналу сопла при сварке на различных режимах: А – минимальные потери при комбинированной защите; В – 82 % Ar + 18 % CO₂; С – 100 % Ar; D – 100 % CO₂

На соответствующих графиках диаграммах приведены значения коэффициента потерь, полученные для сварки в условиях защиты зоны горения дуги смесью 82 % Ar + 18 % CO₂ (B), чистым аргоном (C) и углекислым газом (D), подаваемым через обычное сопло с расходом, равным суммарному расходу компонентов комбинированной газовой защиты (12 л/мин).

Анализ результатов показал, что во всех трёх случаях (рис. 4, а...в) на графиках наблюдаются три ярко выраженные зоны. Первая характеризуется большими потерями электродного металла. На этой стадии при малых расходах аргона (< 3 л/мин) дуга горит преимущественно в парах металла в смеси с некоторым количеством углекислого газа, попадающего в центральную зону из кольцевого потока, и незначительным количеством аргона. По мере увеличения расхода аргона его доля в этой «тройной» смеси увеличивается, что сказывается на снижении коэффициента потерь. Вторая зона характеризуется минимальными потерями, связанными с формированием в зоне горения дуги газовой атмосферы с оптимальным соотношением компонентов. Количественно эта зона на всех трёх графиках совпадает и характеризуется расходом аргона от 3 до 5,5 л/мин. Дальнейшее увеличение аргона приводит к тому, что процесс начинает приближаться к сварке в чистом аргоне и смеси 82 % Ar + 18 % CO₂.

Зависимость коэффициента потерь от расхода аргона при сварке на режимах, характеризующихся большими значениями силы тока и напряжения, имеет особенный характер (см. рис. 4, в). На расходах аргона более 3 л/мин наблюдается струйный характер переноса электродного металла. При этом разбрызгивание почти отсутствует. Как видно из графика, потери при таком режиме минимальны и в случае оптимального расхода аргона (около

4 л/мин) составляют 0,6...0,7 %. Дальнейшее увеличение расхода аргона, как и в первых двух случаях, приводит к некоторому росту коэффициента потерь. Однако этот рост незначителен и обусловлен, по-видимому, повышением потерь на испарение в связи с резким увеличением температуры дуги. Области графика 2 и 3 можно объединить в одну. Также необходимо отметить, что расход аргона от 2,5 до 3 л/мин характеризуется переходным режимом, связанным с нестабильным горением дуги, и является нежелательным.

Таким образом, установлено, что соотношение расходов компонентов комбинированной защиты, характеризующееся минимальным значением коэффициента потерь, составляет 4,5 л/мин Ar и 7,5 л/мин CO₂. При этом общий расход газов (12 л/мин) будет соответствовать расходу при сварке с традиционной газовой защитой смесью, состоящей из 82 % Ar и 18 % CO₂, однако процентную долю более дорогостоящего компонента аргона в этом случае удалось снизить до 37 % от общего расхода газов.

Анализ экономической эффективности использования комбинированного способа подачи защитной газовой смеси в зону горения дуги представлен на рис. 5 в виде графика затрат на метр шва. Как видно из полученных результатов, использование предлагаемой технологии позволяет снизить затраты на защитный газ примерно на 35 % по сравнению со сваркой в готовой газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ и на 50 % по сравнению со сваркой в чистом аргоне.

Для оценки механических свойств сварных соединений, полученных с использованием комбинированной газовой защиты зоны горения дуги, были проведены механические испытания на ударный изгиб, статическое растяжение и статический изгиб образцов, вырезанных поперек шва.

В качестве основного материала

использовалась листовая горячекатаная сталь 09Г2С толщиной 10 мм. Сварка осуществлялась в нижнем положении в

автоматическом режиме. Подготовка кромок сварного соединения С21 велась согласно ГОСТ 14771-76.

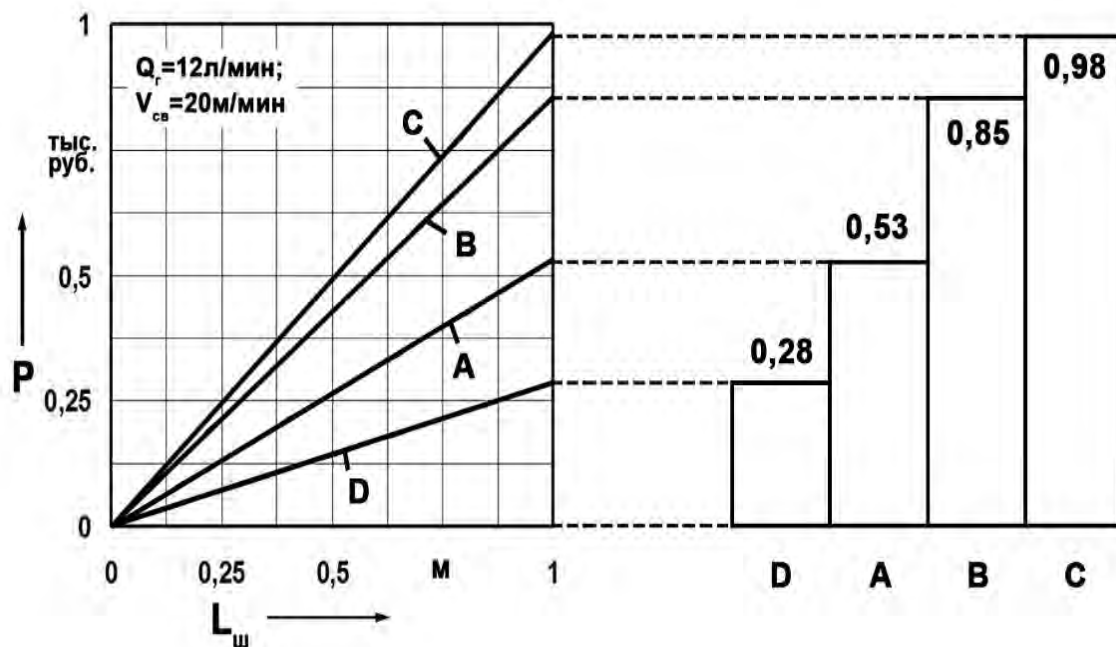


Рис. 5. Стоимость защитного газа, необходимого для сварки одного метра сварного шва: А – сварка с комбинированной газовой защитой; В – 82 % Ar + 18 % CO₂; С – 100 % Ar; D – 100 % CO₂

Результаты испытаний на статическое растяжение показали, что разрушение образцов происходит по основному металлу. При этом значение временного сопротивления разрыву соответствует сертификату на основной материал. При испытаниях на статический изгиб (боковой поверхности шва) угол загиба на всех испытуемых образцах составил 180° за вычетом упругой деформации.

Испытания на ударный изгиб проводились при температуре минус 45 °С. Для охлаждения использовалась углекислота в твердой фазе (сухой лед). Тип образца – VWT 0/1,25 согласно СТБ ЕН 875-2002. Результаты испытаний показали, что значение ударной вязкости KCV₋₄₅ почти полностью сов-

падает с аналогичным параметром при сварке традиционной газовой защитой омывающим потоком смеси 82 % Ar + 18 % CO₂. При этом повышение силы сварочного тока (от 160 до 260 А) в обоих случаях приводит к росту ударной вязкости примерно на 35 %.

Заключение

Разработана конструкция сопла сварочной горелки, обеспечивающая независимую подачу компонентов комбинированной газовой защиты в зону сварки. При этом габаритные размеры горелки не претерпели существенных изменений.

Проведённые исследования позволили установить оптимальные соотношения расходов газов, подаваемых по

центральному и кольцевому каналам комбинированного сопла (7,5...8 л/мин CO_2 , 4...5 л/мин Ar). При этом оптимизация велась преимущественно по расходу аргона.

На основании механических испытаний сварных соединений установлено, что снижение расхода центрального потока защитного газа, состоящего из аргона, открывает возможности его суще-

ственной экономии (снижение затрат на защитный газ на метр сварного шва около 35 % по сравнению со сваркой в смеси 82 % Ar + 18 % CO_2 и на 50 % по сравнению со сваркой в среде чистого аргона) и что сварные соединения не уступают по свойствам наплавленного металла сварного шва соединениям, полученным в готовой газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO_2 .

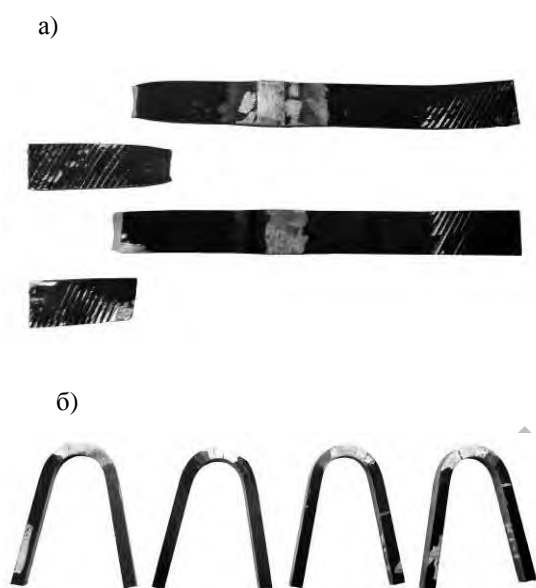


Рис. 6. Внешний вид сварных образцов после механических испытаний: а – статическое растяжение; б – статический изгиб (SBB) 180°

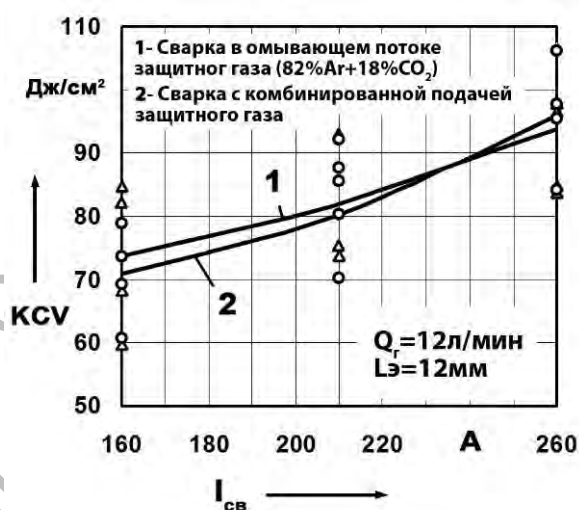


Рис. 7. Ударная вязкость металла шва сварного соединения в зависимости от силы сварочного тока: 1 – сварка с традиционной газовой защитой; 2 – комбинированная газовая защита

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов, В. П. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / В. П. Куликов. – Минск : Экоперспектива, 2003. – 415 с. : ил.
2. Сварка малоуглеродистых сталей плавящимся электродом при комбинированной защите / В. С. Лаевский [и др.] // Сварочное производство. – 1969. – № 10. – С. 21–22.
3. Грибовский, Г. Влияние двухслойного кольцевого потока защитных газов на процесс сварки плавящимся электродом / Г. Грибовский, Б. Кравчук, В. А. Ленивкин // Сварочное производство. – 1996. – № 4. – С. 6–8.
4. Римский, С. Т. Особенности истечения двух газовых потоков из сопел сварочных горелок при автоматической сварке плавящимся электродом / С. Т. Римский // Автоматическая сварка. – 2007. – № 2. – С. 37–43.
5. 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.

6. **Коротеев, А. О.** Дуговая сварка в условиях кольцевого потока защитного газа / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – Ч. 1. – С. 176–177.

Статья сдана в редакцию 5 июня 2014 года

Артур Олегович Коротеев, аспирант, Белорусско-Российский университет. E-mail: etf@bru.by.

Валерий Петрович Куликов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-222-27-37-43.

Михаил Андреевич Кадров, студент, Белорусско-Российский университет.

Artur Olegovich Koroteyev, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: etf@bru.by.

Valery Petrovich Kulikov, DSc (Engineering), Professor, Belarusian-Russian University.
Phone: +375-222-27-37-43.

Mikhail Andreyevich Kadrov, student, Belarusian-Russian University.