

УДК [621.791.754: 669.15-194.2]: 669.785

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ (Обзор)

Б. Е. ПАТОН, С. Т. РИМСКИЙ, В. И. ГАЛИНИЧ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проанализированы основные сварочно-технологические свойства защитных чистых газов и газовых смесей при сварке различных материалов плавящимся и неплавящимся электродом. Подчеркнуто, что знание свойств компонентов защитных газов позволяет сделать их рациональный выбор с точки зрения оптимизации процесса сварки, повышения показателей качества и служебных характеристик сварных изделий, улучшения условий труда и повышения его производительности, а также обеспечения экологической безопасности работ. На основании приведенных данных сделан вывод, что в ближайшем и более отдаленном будущем этот способ останется одним из ведущих технологических процессов соединения материалов. Библиогр. 34, табл. 3, рис. 3.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся и неплавящийся электроды, чистые газы, составы смесей газов, способы сварки, области применения, свариваемые материалы

Разработки дуговых способов сварки в активных защитных газах плавящимся и неплавящимся электродом начались в Институте электросварки им. Е. О. Патона в 30-х гг. прошлого века и не прекращаются до сих пор. Развитие и широкое промышленное применение сварки в активных защитных газах активизировалось после того, как в СССР впервые в мире был предложен и разработан способ сварки в углекислом газе плавящимся электродом [1]. До этого препятствием для применения углекислого газа в качестве защитной атмосферы прежде всего являлось порообразование в швах. Причиной пористости было кипение металла сварочной ванны от выделения монооксида углерода вследствие недостаточной ее раскисленности. Применение сварочных проволок с повышенным содержанием кремния типа Св-08ГС и Св-08Г2С устранило этот недостаток [2] и дало возможность широко использовать углекислый газ в сварочном производстве.

В дальнейшем работы, выполненные в ИЭС им. Е. О. Патона, позволили определить условия, обеспечивающие возможность активного воздействия на характер изменения физических процессов в разрядном промежутке. В результате был разработан новый способ импульсно-дуговой сварки (ИДС) плавящимся электродом в защитных газах с программным управлением образованием каждой капли плавящегося электрода и, как следствие, размерами и формой сварного шва во всех пространственных положениях [3, 4]. Импульсное повышение тока дуги существенно влияет на характер протекания дугового разряда и улучшает его стабильность, что позволяет значительно уменьшить нижний предел сварочного тока, под-

держивающего горение дуги. Например, при сварке алюминия в аргоне проволокой диаметром 1,6 мм устойчивый процесс ИДС можно получить при токах около 30 А вместо 110...120 А. Нижний предел тока при сварке нержавеющей стали в аргоне проволокой диаметром 2,0 мм составляет 130 А вместо 250...280 А при обычной сварке стационарной дугой. При этом во всех случаях наблюдается мелкокапельный перенос электродного металла, что не только позволяет производить сварку во всех пространственных положениях, но и упростить и облегчить сварочную аппаратуру для механизированной сварки различных материалов, снизить потери металла на угар и разбрызгивание, обеспечить высокие механические свойства металла шва и улучшить его формирование [3, 5].

Разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области дуговых способов сварки привлекают пристальное внимание ученых и практиков других стран и, в частности, являются базой для разработки рациональных составов защитных газовых сред и технологии изготовления конструкций ответственного назначения.

Развитие сварки плавлением как одного из важнейших технологических процессов в промышленности и строительстве тесно связано с разработкой способов защиты расплавленного металла от воздуха. Новые перспективы применения способа сварки сталей в активных защитных газах открыло использование смесей аргона с окислительными газами CO_2 и O_2 . Наибольшее распространение получили смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ и $\text{Ar} + \text{O}_2$. В зависимости от класса свариваемых сталей в составе смесей газов на основе аргона может присутствовать 0,5...8 % O_2 и 3...25 % CO_2 [6].

© Б. Е. Патон, С. Т. Римский, В. И. Галинич, 2014

Применение окислительных газовых смесей на основе аргона при сварке плавящимся электродом позволило устранить или свести к минимуму многие из общеизвестных недостатков, свойственных процессу сварки в чистом CO_2 , в частности, обеспечить значительное снижение разбрызгивания и набрызгивания электродного металла, улучшить формирование швов, уменьшить удельный расход электродной проволоки на единицу длины шва [7], повысить механические свойства металла шва и его стойкость к зарождению и распространению хрупких разрушений [8].

С большим успехом во многих странах применяются автоматы и полуавтоматы для сварки деталей массового производства в среде защитных газов, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона [3–5], благодаря чему производительность сварочного оборудования увеличилась в среднем в 3...4 раза и значительно повысилось качество изделий.

Промышленное применение дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах постоянно расширяется, и есть все основания полагать, что это будет происходить и в будущем. Анализ литературных данных [7, 9–13] показывает, что дуговая сварка в защитных газах доминирует среди других способов сварки плавлением, причем, сохраняется тенденция замены ручной сварки штучными электродами механизированными способами. С этой точки зрения перспективными отраслями, где осваиваются новые виды металлоемкой продукции и ожидаются связанные с этим инвестиции, являются автомобильная, авиационная промышленность, скоростной железнодорожный транспорт и, в меньшей степени, судостроение. Изменения в номенклатуре свариваемых материалов, требования к обеспечению высокого качества сварных соединений и конструкций, повышению производительности сварочных работ и приемлемых показателей сварочных процессов с точки зрения гигиены и экологии являются главными факторами, влияющими на объемы использования и ассортимент применяемых защитных газов.

Типичная структура себестоимости сварочных работ при сварке в защитных газах плавящимся электродом состоит из затрат на защитный газ (5 %) и проволоку (15 %), а оплата труда составляет 80 % [14, 15]. В связи с этим использование более дорогого защитного газа (например, смеси газов на основе аргона вместо CO_2) вполне оправдано, поскольку обеспечиваемое в результате такой замены повышение производительности труда (т. е. снижение затрат на зарплату сварщиков) компенсирует повышение стоимости защитного газа.

Наряду с технологическими и экономическими преимуществами процесс сварки в смесях газов на основе аргона характеризуется улучшенными

гигиеническими и экологическими показателями по сравнению со сваркой в CO_2 , т. к. в зоне дыхания сварщика и воздухе рабочих помещений выделяется меньше пыли и токсичных газов [16, 17]. Благодаря снижению уровня вредных выбросов при сварке и, следовательно, заболеваемости рабочих появляется возможность уменьшить интенсивность общеобменной и местной вентиляции, т. е. установленных мощностей вентиляционных установок и соответственно затрат на электроэнергию и обслуживание. Несколько более высокий уровень удельных выделений озона при сварке в аргоновых смесях не является препятствием для применения этого процесса, поскольку соблюдение оптимальных режимов сварки и использование обычных средств защиты обеспечивают концентрацию озона в зоне дыхания сварщика ниже уровня предельно допустимой концентрации [18].

Применение в качестве защитного газа смесей аргона с окислительными газами O_2 и CO_2 позволяет устранить многие технологические недостатки, присущие процессу сварки в чистом аргоне и углекислом газе, расширив тем самым область применения механизированной сварки плавящимся электродом. Опыт, накопленный в ИЭС им. Е. О. Патона и за рубежом, показывает, что такими защитными смесями являются $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2$ и $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$, которые применяются в основном при сварке сталей. Способы сварки и составы защитных газов, используемые для сварки различных материалов, приведены в табл. 1.

Указанные в этой таблице чистые газы и их смеси обладают рядом важных сварочно-технологических свойств.

Диоксид углерода долгое время преимущественно использовали в странах Восточной Европы и развивающихся странах благодаря его относительно низкой стоимости и доступности. Однако такие существенные недостатки сварки в CO_2 серийными кремнемарганцевыми проволоками, как повышенный уровень разбрызгивания и набрызгивания электродного металла, узкое и глубокое проплавление основного металла с высоким валиком, не всегда удовлетворительные механические свойства металла шва и особенно его ударной вязкости при отрицательных температурах стали причиной того, что в последнее время и в этих странах наблюдаются устойчивые тенденции к вытеснению CO_2 смесями газов на основе аргона в тех отраслях, где уделяется повышенное внимание к показателям качества металла шва и сварных соединений. Среди промышленно развитых стран только в Японии сохраняются устойчиво высокие объемы применения сварки в CO_2 (около 70 % общего объема сварочных работ, выполняемых механизированной сваркой в защит-

Таблица 1. Защитные чистые газы и газовые смеси для сварки различных материалов

Состав, об. %						Способ сварки	Область применения*	Свариваемый материал
Ar	He	CO ₂	O ₂	H ₂	N ₂			
Чистые газы								
100	-	-	-	-	-	ТИГ	●	Медь, алюминий, титан, молибден и другие цветные, активные и тугоплавкие металлы и их сплавы, низко- и высоколегированные коррозионностойкие хромоникелевые стали
				-	-	МИГ	▼	Цветные металлы и хромоникелевые стали
-	100	-	-	-	-	ТИГ	○	Медь, алюминий и другие цветные металлы и сплавы
-	-	100	-	-	-	МАГ	●	Углеродистые и низколегированные стали
				-	-		▼	Нержавеющие стали
-	-	-	-	-	100	МАГ	▼	Медь и медные сплавы
Двухкомпонентные смеси								
70	30	-	-	-	-	ТИГ	▼	Алюминий и другие цветные металлы, низко- и высоколегированные хромоникелевые стали
96...98	-	-	2...4	-	-	МАГ	▼	Низко- и высоколегированные стали
90...92	-	-	8...10	-	-	МАГ	○	Углеродистые и низколегированные стали
97...98	-	2...3	-	-	-	МАГ	●	Легированные и высоколегированные стали
75...90	-	10...25	-	-	-			Углеродистые и низколегированные стали
90...95	--	-	-	5...10	-	МИГ	▼	Высоколегированные хромоникелевые стали
85...90	-	-	-	-	10...15	МИГ	▼	Медь и медные сплавы
Трехкомпонентные смеси								
50...69	30...45	-	1...5	-	-	МАГ	▼	Высоколегированные хромоникелевые стали
55...67	30...40	3...5	-	-	-	МАГ	▼	Высоколегированные хромоникелевые стали повышенной прочности
70...87	-	10...25	3...5	-	-	МАГ	●	Углеродистые и низколегированные стали
65	25	-	-	10	-	МАГ	▼	Высоколегированные коррозионностойкие хромоникелевые стали
60	30	-	-	-	10	МИГ	▼	Медь и медные сплавы
Четырехкомпонентные смеси								
76	20	3	-	1	-	МАГ	○	Высоколегированные коррозионностойкие хромоникелевые стали
65	26,5	8	0,5	-	-	МАГ TIME	▼	Марганцовистые низколегированные мелкозернистые стали повышенной прочности и хромоникелевые стали

* ● — широко применяются; ▼ — ограничено; ○ — редко.

ных газах) [19]. Поскольку это страна с весьма ограниченными энергетическими ресурсами, то, по-видимому, повышенная энергоёмкость производства аргона по сравнению с CO₂ является основной причиной того, что работы по уменьшению недостатков процесса сварки в CO₂ в Японии ведутся в направлении совершенствования источников питания или использования новых сварочных проволок как сплошного сечения, так и порошковых [19].

Необходимо отметить, что процесс сварки в CO₂ весьма чувствителен к изменениям параметров режимов. Для удовлетворительного фор-

мирования швов и снижения потерь металла на разбрызгивание сварку в CO₂ предпочтительнее производить проволокой малого диаметра (0,8...1,4 мм) или на малых (с короткими замыканиями) и больших токах (погруженной дугой), минуя средние режимы, на которых отмечается максимальное разбрызгивание. Например, для проволоки диаметром 2,0 мм неблагоприятные режимы находятся в диапазоне $280 \text{ A} \leq I_{\text{CB}} \leq 400 \text{ A}$, $28 \text{ B} \leq U_{\text{д}} \leq 32 \text{ B}$. К сожалению, такие рекомендации трудно выполнить на практике, поскольку в производственных условиях для обеспечения высокой производительности и оптимального те-

пловложения при сварке металлов средних толщин требуются именно средние токи и проволоки диаметром 1,0...1,2 мм.

Аргон является наиболее широко используемым компонентом защитных газовых смесей преимущественно при сварке ТИГ цветных, активных и тугоплавких металлов (Cu, Al, Ni, Mo и др.) и их сплавов, а также легированных и высоколегированных сталей. Сварка МИГ в аргоне углеродистых и низколегированных сталей не находит заметного применения вследствие неудовлетворительного переноса электродного металла через дугу и образования подрезов при ее блуждании по поверхности металла. При этом сварные швы склонны к образованию пор, вызываемых азотом, водородом и окисью углерода. Низкий потенциал ионизации аргона (15,75 эВ) обеспечивает стабильное горение дуги при низком напряжении, облегчает ее возбуждение и повышает устойчивость. Плазма дуги в аргоне имеет высокоэнергетическую внутреннюю сердцевину и наружную зону с меньшим уровнем выделяемой энергии, что приводит к нежелательному образованию пальцеобразной формы проплавления (рис. 1, з) [20].

Гелий из газов, применяемых при сварке, по плотности ($0,178 \text{ кг/м}^3$) занимает второе место после водорода ($0,083 \text{ кг/м}^3$). По сравнению с аргонном ($1,784 \text{ кг/м}^3$) гелий имеет более высокую теплопроводность, что обеспечивает равномерное распределение энергии по сечению столба дуги, позволяющее получать глубокое и широкое проплавление параболической формы, небольшое усиление шва с плавным переходом к основному металлу. Из-за высокого потенциала ионизации гелия (24,58 эВ) нужно поддерживать повышенное напряжение дуги по сравнению со сваркой в аргоне при той же длине дуги и сварочном токе. Поэтому гелий, как правило, применяется в смесях с аргонном при сварке алюминия и других материалов в тех случаях, когда требуется высокая концентрация нагрева в зоне сварки.

Долгое время мировой рынок гелия был небольшим и стабильным. Однако благодаря новым разработкам технологии сварки в защитных газах открылись перспективы расширения объемов его применения. Это связано с использованием высокопроизводительных процессов сварки различных материалов в гелийсодержащих газовых смесях, например, Ar + He, Ar + He + CO₂ [9–12, 21–23], а также сварки дугой прямого действия металлическим электродом в ионизированных защитных газах с высокой плотностью энергии (процесса TIME от англ. transferred ionized molten energy) [24, 25]. Использование таких процессов, предусматривающих применение защитного газа повышенной стоимости, особенно актуально для стран

с высоким уровнем оплаты труда в промышленности, поскольку повышение стоимости защитного газа компенсируется уменьшением доли зарплаты в общей себестоимости сварочных работ за счет заметного повышения производительности труда сварщика.

Кислород как один из компонентов защитных газовых смесей используется в небольших количествах (от долей процента до нескольких процентов) для активации металлургических процессов при сварке сталей, а также может присутствовать как примесь в количестве 3...5 об.% при использовании в качестве одной из составляющих смеси т. н. сырого аргона (т. е. очищенного в достаточной степени от примеси азота и других газов в процессе производства на установке по разделению воздуха, но не очищенного от кислорода).

Смеси Ar + O₂. Улучшить процесс сварки и избавиться от некоторых недостатков, связанных с применением чистого аргона, можно путем добавки к нему кислорода. Добавка к аргону 3...5 % O₂ и применение сварочной проволоки, легированной кремнием и марганцем, позволяет повысить стойкость к образованию пор в швах на спокойной, полуспокойной и кипящей стали. Наличие в аргоне кислорода практически не изменяет форму дуги, однако значительно улучшает стабильность ее горения и благоприятно влияет на характер переноса электродного металла, а вследствие снижения его поверхностного натяжения число капель, переносимых в единицу времени, возрастает. Мелкокапельный (струйный) перенос достигается при более низком значении сварочного тока по сравнению с применением чистого аргона при практически полном отсутствии разбрызгивания.

Содержание кислорода в смеси Ar + O₂ может изменяться от 0,5 до 5,0 %. Для сварки углеродистых и низколегированных сталей оптимальное содержание кислорода в смеси составляет 3...5 %. Эта смесь обеспечивает хороший внешний вид швов и высокий уровень механических свойств металла шва, особенно ударной вязкости при отрицательных температурах. При содержании более 5 % кислорода резко возрастают потери легирующих элементов, а технологические характеристики процесса сварки остаются без изменений. Вместе с тем смесь Ar + O₂ так же, как и чистый CO₂, неприменима при сварке неплавящимся электродом ввиду разрушения последнего и загрязнения металла шва оксидами вольфрама.

Смеси Ar + O₂, содержащие минимальное количество кислорода (1...2 %), имеют ограниченное применение при сварке ферритных сталей и в основном используются для сварки аустенитных сталей. Это можно объяснить тем что, во-пер-

вых, их получают путем смешивания дорогостоящих чистых газов и, во-вторых, смеси с малым содержанием кислорода имеют те же недостатки при сварке, что и чистый аргон (узкое проплавление основного металла в корне шва, низкая стойкость швов к порообразованию, блуждание дуги по свариваемым кромкам, приводящее к подрезам и несплавлениям, интенсивное тепловое и световое излучение дуги, выделение озона в зоне дыхания сварщика выше допустимой концентрации). Все эти недостатки особенно четко проявляются при сварке со струйным переносом и достаточно длинной дугой, поэтому применение аргоно-кислородной смеси с малыми добавками кислорода для сварки углеродистых и низколегированных сталей экономически и технически не оправдано.

Смесью Ar + CO₂. Применение смесей этих газов было вызвано стремлением найти защитную среду, которая сочетала бы преимущества аргона, углекислого газа и аргоно-кислородной смеси.

Форма дуги и характер переноса электродного металла при сварке в смесях Ar + CO₂ существенно зависят от состава смеси. При одном и том же режиме сварки в смесях с различным содержанием CO₂ перенос электродного металла может быть капельным без коротких замыканий (рис. 1, а) или с короткими замыканиями дугового промежутка (рис. 1, ж), мелкокапельным (рис. 1, в) и струйным (см. рис. 1, з). При содержании 20 % CO₂ и более при токах выше критического значения форма проплавления основного металла изменяется и пальцеобразный провар (см. рис. 1, з) исчезает. При содержании в смеси свыше 35...40 % CO₂ процесс во многом похож на сварку в чистом CO₂, однако уровень разбрызгивания при этом ниже.

Улучшение формирования шва при применении смесей Ar + 20...25 % CO₂ наблюдается в широком диапазоне режимов. Высота усиления заметно меньше, чем при сварке в CO₂, валик имеет плавный переход к основному металлу, а в диапазоне токов, при которых происходит струйный (мелкокапельный) перенос, формируется мелкочешуйчатая поверхность, как на швах, сваренных под флюсом (рис. 2). Благоприятная форма шва, малая высота усиления и пониженный уровень

потерь электродного металла на разбрызгивание обеспечивают заметное уменьшение расхода электродной проволоки на единицу длины шва.

Рекомендации по оптимальному составу смесей Ar + CO₂ зарубежных фирм, производящих газовые смеси, противоречивы. По-видимому, это обусловлено в основном жесткой борьбой за рынки сбыта и патентными соображениями, а также различиями в химическом составе применяемых сталей и сварочных проволок. В Европе широко рекламируется смесь Ar + 10...15 % CO₂ [9, 11, 12]. Однако накопленный опыт показал, что оптимальной следует считать смесь Ar + 20 % CO₂, которая обладает наилучшим сочетанием технологических и металлургических свойств. При ее применении можно избежать характерной для аргона пальцеобразной формы провара, приводящей к несплавлениям и порам, а также типичного для углекислого газа узкого и глубокого провара, опасного с точки зрения образования трещин в швах.

Соединения конструкционных сталей, сваренные в защитных газовых смесях на основе аргона стандартными проволоками, обычно применяемыми для сварки в CO₂ (Св-08Г2С и Св-08ГС по ГОСТ 2246–70), отличаются высокими показателями механических свойств (табл. 2) [7]. Особенно следует отметить значения ударной вязкости металла швов при отрицательных температурах, а также показатели стойкости металла швов, сваренных в смеси Ar + CO₂, к зарождению и развитию хрупкого разрушения [8]. Улучшение механических и служебных свойств швов и соединений, выполненных в смесях на основе аргона, происходит в результате снижения содержания кислорода в швах, образования благоприятной микроструктуры металла с преобладанием игольчатого феррита и удовлетворительного формирования швов. Показатели хладо- и трещиностойкости швов на уровне значений для соединений, сваренных при повышенном удельном тепловложении с использованием аргоновых смесей, невозможно получить при сварке в CO₂ в аналогичных условиях (рис. 3) [7, 26, 27]. В целом наши данные и результаты, опубликованные другими исследователями [17, 28], свидетельствуют о том, что показатели

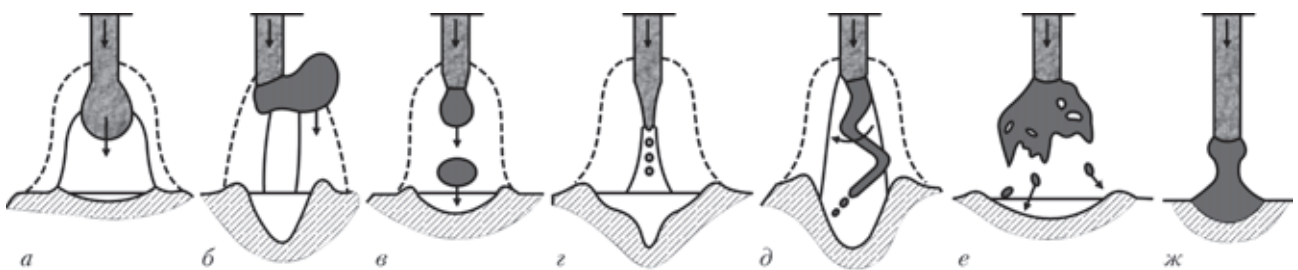


Рис. 1. Влияние типа переноса электродного металла на форму проплавления по классификации МИС [20]: а — капельный; б — крупнокапельный; в — мелкокапельный; з — струйный; д — струйно-вращательный; е — со взрывом капли; ж — с короткими замыканиями



Рис. 2. Внешний вид углового шва, выполненного в смеси Ar + 20 % CO₂ проволокой Sv-08Г2С диаметром 1,2 мм при I_{св} = 260 А, U_д = 28 В

механических свойств металла швов, выполненных в газовых смесях на основе аргона, соответствуют требованиям, предъявляемым к соединениям и конструкциям, работающим в условиях отрицательных температур, динамических нагрузок и других неблагоприятных факторов.

Недостатком смеси Ar + CO₂ является ее высокая цена по сравнению с чистым CO₂ и смесью Ar + O₂. Обусловлено это тем, что смесь получают из чистых газов и в отличие от аргоно-кислородной смеси ее нельзя получить непосредственно при разделении воздуха на воздухоразделительных установках. Технически и технологически приемлемым способом удешевления аргоновых смесей с CO₂ является использование в качестве исходного компонента «сырого аргона», содержащего до 5 % O₂.

Смеси Ar + O₂ + CO₂ получили широкое распространение в Германии и Великобритании [9, 11, 12, 14]. Смесью «Сохоген» (Ar + 5 % O₂ + 15 % CO₂) обладает меньшей окислительной способностью и лучшими технологическими свойствами, чем чистый CO₂. При сварке углеродистых и низколегированных сталей проволокой, раскисленной марганцем и кремнием, достигаются такие преимущества по сравнению со сваркой в CO₂, как меньшее разбрызгивание электродного металла, лучший внешний вид шва, пониженная склонность швов к образованию пор и горячих трещин. Механические свойства металла шва и сварного соединения такие же, как при сварке в смеси Ar +

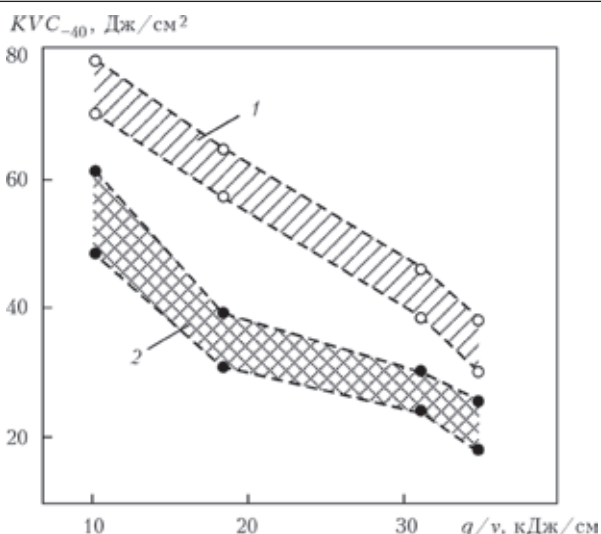


Рис. 3. Влияние погонной энергии сварки на ударную вязкость металла швов, выполненных на стали 09Г2С проволокой Sv-08Г2С в смеси Ar + 20 % CO₂ (1) и чистом CO₂ (2)

+ 20...25 % CO₂, а ударная вязкость швов, сваренных в этой смеси, выше.

В связи с тем, что сварка в защитных газах плавящимся электродом в Европе является доминирующим процессом, основное внимание уделяется проблеме выбора состава защитного газа. Критериями его оптимизации являются уровень разбрызгивания, количество приварившихся брызг и шлака на поверхности основного металла, формирование шва (форма проплавления и внешний вид). На основании этих подходов предлагается использовать для сварки углеродистых и низколегированных сталей слабоокислительные смеси на основе аргона с небольшим содержанием окислительных газов (1...4 % O₂ и до 10 % CO₂) [28]. Необходимо также учесть, что при сварке этих сталей в слабоокислительных смесях на основе аргона проявляются все недостатки чистого аргона, отмеченные выше.

Для условий промышленности Украины слабоокислительные смеси на основе аргона при сварке углеродистых и низколегированных сталей не могут быть защитными газами общего назначения, поскольку самые распространенные в стране сварочные проволоки Sv-08Г2С и Sv-08ГС имеют более высокий уровень легирования по

Таблица 2. Механические свойства соединений низколегированных конструкционных сталей, выполненных в смеси Ar + 25 % CO₂ проволокой Sv-08Г2С при различных режимах сварки [7]

Основной металл (толщина, мм)	Диаметр проволоки, мм	I _{св} , А	U _д , В	σ _р , МПа	σ _в , МПа	δ ₅ , %	ψ, %	KCV, Дж/см ² , при T, °C		
								+20	-20	-40
09Г2С (12)	2,0	400...420	30...32	390	550	26	63	145	67	47
15Г2АФ (16)	1,6	340...360	28...30	556	678	26	60	105	51	46
10ХСНД (20)	2,0	380...410	28...30	540	650	28	62	145	66	44
09Г2 (20)	1,6	360...390	28...29	486	592	29	69	153	81	57

Примечания: 1. Механизированную сварку выполняли на постоянном токе обратной полярности. 2. Расход защитного газа 18...22 л/мин. 3. Указаны средние значения по результатам испытаний 3...5 образцов.

сравнению с применяемыми в Европе проволоками аналогичного назначения (SG-1, SG-2, SG-3, DIN 8559). Кроме того, в сварочном производстве европейских стран используются проволоки малых диаметров и более умеренные режимы сварки по сравнению с применяемыми в Украине. Накопленный опыт показал, что для отечественного сварочного производства желательнее ограничивать ассортимент защитных газов одним-двумя составами универсального назначения. Такими смесями, получившими распространение, являются $Ar + 20...25\% CO_2$ и $Ar + 3...5\% O_2 + 20...25\% CO_2$. Они имеют оптимальное сочетание сварочных характеристик, умеренную стоимость и позволяют решать большинство технологических задач при механизированной сварке сталей общего назначения даже в тех случаях, когда сварщики нарушают предписанные параметры режима.

Сварка в аргоновых смесях в отличие от сварки в CO_2 дает возможность использовать импульсно-дуговой процесс [29, 30] с управляемым мелкокапельным переносом и частотой отрыва капель, соответствующей частоте наложения импульсов тока. Мелкокапельный перенос происходит при более низком среднем значении сварочного тока по сравнению с условиями без наложения импульсов (табл. 3). Применение ИДС позволяет использовать проволоку одного и того же диаметра для многих вариантов технологии, тогда как при сварке без импульсов обычно предусматривается применение проволоки различных диаметров в зависимости от толщины свариваемого металла, его теплофизических свойств, пространственного положения шва и других показателей.

По мере перехода к новым экономическим отношениям и структурам и их развития в промышленности Украины будут расширяться области применения механизированной сварки плавящимся электродом в окислительных смесях на основе аргона взамен чистого CO_2 . Однако данные по применению газовых смесей при сварке сталей разрознены, и ими трудно руководствоваться в практической деятельности. В связи с этим необходимые данные о применении наиболее распространенной смеси $Ar + CO_2$ при механизированной сварке сталей сведены в рекомендательные таблицы [31].

Наибольший технико-экономический эффект сварка сталей в защитных смесях на основе аргона обеспечивает в следующих областях:

- производство металлоконструкций, которые по условиям работы не должны иметь приваренных брызг;
- производство металлоконструкций ответственного назначения, эксплуатируемых при от-

Таблица 3. Критический сварочный ток перехода к струйному переносу электродного металла при сварке в смеси $Ar + 20\% CO_2$ проволокой Св-08Г2С

Диаметр проволоки, мм	$I_{св}, A$		
	Обратная полярность	Прямая полярность	ИДС
1,0	240	-	160
1,2	260	350	180
1,4	280	380	210
1,6	340	420	240
2,0	400	460	-

рицательных температурах и знакопеременных динамических нагрузках;

- многопроходная сварка стыковых и угловых соединений толстолистового металла;
- сварка швов малого сечения на повышенной скорости;
- сварка изделий на поточных автоматизированных линиях с использованием роботов и автоматов.

Смесью $Ar + He + CO_2$, в которых аргон является основным компонентом, используются при сварке стационарной и импульсной дугой, а смеси с преобладающим (60...80 %) содержанием гелия — при сварке с короткими замыканиями. В зарубежных публикациях [21–23, 32] рассматриваются различные составы газовых смесей с гелием (об. %: (69...55)Ar + (40...30)He + (3...5)CO₂), обеспечивающие хорошие технологические показатели, в частности, повышение производительности при сварке толстого металла, широкое и глубокое проплавление основного металла, улучшение формирования и внешнего вида швов. Основная особенность сварки в защитных смесях $Ar + He + CO_2$ — это высокая производительность процесса на режимах со струйно-вращательным переносом электродного металла (см. рис. 1, д). Такой перенос происходит при применении сварочной проволоки диаметром 1,0...1,2 мм, механизма ее подачи со скоростью до 50 м/мин и источника питания с хорошими динамическими характеристиками [22, 33].

Смесью $Ar + He + CO_2 + O_2$ требуют особой технологии, источников питания и механизмов подачи проволоки. Так, для TIGE-процесса [24, 25, 33] используется смесь газов (об. %: 65Ar + 26,5He + 8CO₂ + 0,5O₂), обеспечивающая высокую скорость плавления проволоки (до 25 кг/ч) при скорости ее подачи до 50 м/мин на сварочном токе около 600 А. Известны также такие высокопроизводительные способы, как Rapid Arc и Rapid Melt [10, 11, 32], которые выполняются в защитных смесях с гелием (об. %: (65...60)Ar + (25...30)He + 10CO₂), при использовании которых скорости подачи проволоки превышают классический предел 20 м/мин и обеспечиваются различ-

ные виды переноса электродного металла включая струйно-вращательный (см. рис. 1, д).

Строгие ограничения на состав защитной среды, предусмотренные технологическими рекомендациями разработчиков TIG-процесса [24, 33], необоснованы, поскольку близкие показатели производительности и качества можно получить при использовании более дешевых и простых в изготовлении газовых смесей на основе аргона без гелия, например, $Ar + CO_2 + O_2$, и тщательном подборе и корректировании параметров режима [11, 14, 34].

В настоящее время известно много различных способов дуговой сварки в защитных газах, с помощью которых можно выполнить одну и ту же работу. Однако получаемые при этом технико-экономические результаты будут различными в зависимости от условий производства и особенностей конструкций. Каждый из способов сварки имеет определенные технологические возможности и применим для конкретного вида сварочных работ, поэтому при выборе оптимального состава защитного газа и способа сварки необходимо иметь полное представление об особенностях и возможностях каждого из способов и учитывать их, исходя из конкретных условий производства. Большое влияние при этом могут оказывать варианты механизации и автоматизации сварочных процессов, особенно при широком наборе существующих в настоящее время типов манипуляторов и позиционеров, а также роботов и систем регулирования с компьютерным управлением.

1. Любавский К. В., Новожилов Н. М. Сварка плавящимся электродом в атмосфере защитных газов // Автоген. дело. – 1953. – № 1. – С. 4–8.
2. Новожилов Н. М., Соколова А. М. Разработка электродных проволок для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей в углекислом газе // Свароч. пр-во. – 1958. – № 7. – С. 10–14.
3. Патон Б. Е., Потапьевский А. Г., Подола И. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса // Автомат. сварка. – 1964. – № 1. – С. 1–6.
4. Патон Б. Е., Воронин Н. М., Бучинский В. Н. и др. Управление процессом дуговой сварки путем программирования скорости подачи электродной проволоки // Там же. – 1977. – № 1. – С. 1–5, 15.
5. Патон Б. Е., Лебедев А. В. Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе // Там же. – 1988. – № 11. – С. 1–5.
6. А. с. 448106 СССР, В 23 к 35/38. Защитная газовая смесь / Б. Е. Патон, А. В. Кирсанов, В. В. Подгаецкий и др. – Приор. 26.06.72. Оpubл. 30.10.74; Бюл. № 40.
7. Свецицкий В. Г., Римский С. Т., Галинич В. И. Сварка сталей в защитных газовых смесях на основе аргона в промышленности Украины // Автомат. сварка. – 1994. – № 4. – С. 41–44.
8. Свецицкий В. Г., Римский С. Т., Кирьян В. И. Оценка вязкости разрушения швов, сваренных в защитных газах и под флюсом // Там же. – 1982. – № 8. – С. 16–19.

9. Lucas W. Choosing a shielding gas. Pt 2 // Weld. and Metal Fabr. – 1992. – № 6. – P. 269–276.
10. Dilthy U., Reisgen U., Stenke V. et al. Schutzgase zum MAGM — Hochleistungsschweißen // Schweissen und Schneiden. – 1995. – 47, № 2. – S. 118–123.
11. Dixon K. Shielding gas selection for GMAW of steels // Weld. and Metal Fabr. – 1999. – № 5. – P. 8–13.
12. Salter G. R., Dye S. A. Selecting gas mixtures for MIG welding // Metal Constr. and Brit. Weld. J. – 1971. – 3, № 6. – P. 230–233.
13. Cresswell R. A. Gases and gas mixtures in MIG and TIG welding // Weld. and Metal Fabr. – 1972. – 40, № 4. – P. 114–119.
14. Ameye M. Einfluss der verschiedenen Schutzgase im Zusammenwirken mit Schweißverfahren und Werkstoffen // Der Praktiker. – 2011. – № 7. – S. 271–273.
15. Кайдалов А. А., Гаврик А. Н. Эффективность применения защитных газовых смесей при дуговой сварке сталей // Сварщик. – 2011. – № 4. – С. 28–31.
16. Press H., Florian W. Formation of toxic substances in gas welding. Pt 2: Amount of toxic substances formed in the gas shielded welding processes MAG, MIG and GTA // IIW Doc. VIII-880-80. – 10 p.
17. Haas B., Pomaska H. U. Influence of process specific welding parameters on fume generation in solid wire GMA (MAG) welding // Proc. of IIW Col. on Welding and Health (Estoril, Portugal, 8 July 1980). – P. 8.
18. Левченко О. Г. Влияние состава защитного газа и режимов сварки на валовые выделения сварочного аэрозоля // Автомат. сварка. – 1986. – № 1. – С. 73–74.
19. Косииси Ф. Перспективные сварочные материалы // Журн. Японского сварочн. о-ва. – 2007. – 76, № 1. – С. 61–64.
20. Stenbacka N., Persson K.-A. Shielding gases for gas metal arc welding // Welding J. – 1989. – № 11. – P. 41–47.
21. Lytle K., Stapon G. Simplifying shielding gas selection // Practical Welding Today. – 2005. – № 1. – P. 22–25.
22. Ernst M. Lichtbogen stabil gehalten // Produktion. – 1999. – № 8. – S. 23.
23. Urmston S. Quality – all things to all welders // Weld. and Metal Fabr. – 1996. – 64, № 4. – P. 150–152.
24. Pat. 4.463.143 USA. Welding system / J. G. Charch. – Publ. July, 1984.
25. Lahnsteiner P. T.I.M.E.-Prozess ein neues MAG-Schweißverfahren // Schweißtechnik. – 1991. – № 12. – S. 182–186.
26. Римский С. Т. Управление свойствами металла шва путем урегулирования уровня окисленности сварочной ванны при сварке в защитных газах // Автомат. сварка. – 2011. – № 12. – С. 20–23.
27. Рошупкин Н. П., Близнец Н. А., Свецицкий В. Г. и др. Опыт производственного применения защитных газовых смесей на основе аргона заводами ВО «Союзстальконструкция» // Там же. – 1984. – № 3. – С. 51–53.
28. SAGOS 3: Ein Schutzgas fuer zwei Werkstoffgruppen // Stahlmarkt. – 2001. – 51, № 11. – S. 66.
29. Pfeiffer G. Zuend- und Spritzeruntersuchungen beim MAG-Impulsschweißen // ZIS-Mitteilungen. – 1989. – 31, № 6. – S. 545–549.
30. Римский С. Т., Свецицкий В. Г., Шейко П. П. и др. Импульсно-дуговая сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом // Автомат. сварка. – 1993. – № 2. – С. 38–41.
31. Римский С. Т. Руководство по технологии механизированной сварки в защитных газах. – Киев: Экотехнология, 2006. – 60 с.
32. Das Schutzgas macht's // Blech. Rohre Profile. – 2005. – 52, № 8/9. – S. 28–30.
33. Church J. G., Imaizumi H. Welding characteristics of a new welding TIG-process // IIW Doc. XII-1199.
34. Oeteren K.-A. «Neues Schutzgas» metal-aktivgasgeschwift – ein wirtschaftlicher Vorteil? // Der Praktiker. – 1992. – № 2. – S. 90–94.

Поступила в редакцию 11.04.2014