

МАШИНОСТРОЕНИЕ . МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК621.791

В. М. Белоконь, канд. тех. наук, доц.

КАЧЕСТВО СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ ПРИ РАЗНЫХ СОСТАВАХ ЗАЩИТНОГО ГАЗА И СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

В статье показано влияние состава газовой защиты и содержания углерода в проволоке на процесс и качество сварки в защитном газе. Добавка кислорода в защитный газ, уменьшение количества углерода в сварочной проволоке влияют на поверхностное натяжение жидкого металла. Содержание углерода в проволоке сказывается на частоте переноса капель электродного металла в сварочную ванну. Уменьшение количества углерода в проволоке рациональнее легирования. Предложена математическая формула для определения коэффициента наплавки, при котором отсутствуют дефекты формы швов.

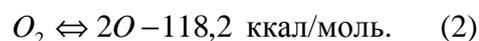
Работами отечественных и зарубежных исследователей проведены обширные исследования по сварке в смесях газов. При этом основное внимание обращалось на обеспечение хорошего внешнего вида швов, формирование обратного валика, производительность процесса сварки и т. д. Между тем мало уделялось внимания качественному составу защитной атмосферы, составу сварочной проволоки при высокой температуре и влиянию его на перенос металла, формирование швов. В связи с этим нами проведены исследования сварки в смесях углекислого газа с кислородом, аргоном, аргона с кислородом проволокой диаметром 1,6 мм. Эти способы количественно и качественно сопоставляли со сваркой в углекислом газе на обратной полярности.

При проведении исследований сварки в смеси углекислого газа и кислорода содержание кислорода изменялось от 0 до 57 %. При этом установлено, что добавление небольших количеств кислорода вызывает повышение устойчивости горения дуги, измельчение капель расплавленного металла, хороший внешний вид сварных швов. Объяснить наблюдающиеся качественные изменения позволяет рассмотрение физико-химических процессов, протекающих при сварке.

Известно, что углекислый газ при высокой температуре диссоциирует:



Подвергается диссоциации и кислород, дополнительно подаваемый в зону дуги:



Уравнения (1) и (2) показывают, что в случае одинаковых объемов расход тепла на диссоциацию смеси углекислого газа и кислорода будет меньше, чем чистого углекислого газа. И эта разница будет тем заметнее, чем больше кислорода в смеси. Следовательно, изменяется степень сжатия дуги. Дуга охватывает большую поверхность основного металла, более устойчива. Одновременно добавка в защитную атмосферу кислорода уменьшает силы поверхностного натяжения.

Капля электродного металла на торце электрода имеет на поверхности температуру, близкую к кипению, и соприкасается со слоем газа, нагретого до температуры 3000° . При этой температуре в результате диссоциации углекислого газа образуется смесь газов, состав которой приведен в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что с металлом соприкасается относительно небольшая концентрация кислорода в виде O_2 и O . Выгорание углерода небольшое и коэффициент перехода из проволоки в шов составляет не менее 0,9. Дополнительное введение в защитный газ O_2 интенсифицирует выгорание углерода в поверхностном слое, т. к. состав

газа, соприкасающегося с поверхностью металла, изменяется в сторону увеличения кислорода. Снижение же углерода в металле уменьшает величину поверхностного натяжения, что приводит к измельчению переноса электродного металла, изменению условий формирования швов.

Табл. 1. Состав продуктов диссоциации CO_2 при 3000⁰

Газ	CO_2	O_2	CO	O
Процентное содержание	70	9	20	1

Увеличение количества кислорода в газе повышает его растворимость в поверхностном слое металла. Силы связи между частицами кислорода меньше, чем силы связи между частицами жидкого металла. Это еще в большей степени способствует уменьшению сил поверхностного натяжения, оказывающих влияние на перенос металла, формирование швов.

Исследованиями установлено, что на качество шва благоприятно действует добавка к углекислому газу 15–20 % кислорода. Увеличение содержания кислорода до 57 % вызывает пористость шва, появление наплывов, образование значительной шлаковой корки на поверхности шва, повышенный угар металла.

В [1] и др. указывается, что изменение содержания кислорода в смеси влияет на производительность процесса сварки. Наши исследования при нормальных вылетах электродной проволоки данное явление не подтвердили. Коэффициенты расплавления и наплавки практически незначительно зависят от содержания кислорода в исследованных пределах в смеси углекислого газа и кислорода. Все экспериментальные точки, полученные при сварке в различных средах, хорошо укладываются на одну кривую. Как при сварке в чистом углекислом газе, так и при сварке в смеси его с кислородом коэффициенты расплавления и наплавки зависят от величины сварочного тока. С ростом

тока они значительно повышаются.

Потери электродного металла на разбрызгивание несколько сокращаются по сравнению со сваркой в чистом углекислом газе. Однако одновременно примерно в той же степени растут потери на угар. Поэтому коэффициенты потерь на угар и разбрызгивание в сумме имеют практически одинаковое значение при сварке в углекислом газе и при сварке его в смеси с кислородом.

При токе 450–550 А наблюдается минимум потерь (8–9 %). При дальнейшем росте тока происходит увеличение потерь на испарение, что выявляется по появлению на поверхности рядом со швом налета окислов и увеличению концентрации аэрозолей окислов в окружающей атмосфере.

Применение смеси $CO_2 + O_2$ вместо CO_2 позволяет обеспечить легкую отделимость брызг электродного металла от поверхностей свариваемых изделий и деталей сварочных горелок. Брызги электродного металла при сварке в $CO_2 + O_2$ покрыты более толстой пенкой шлака, что затрудняет их адгезию с твердым металлом.

Исследования по сварке на обратной полярности тока и смеси углекислого газа и аргона показали, что при небольших добавках аргона к углекислому газу он мало изменяет характер процесса сварки. При количестве аргона в смеси

более 50 % процесс сварки приближается к сварке в чистом аргоне. При этом улучшается внешний вид швов, потери электродного металла на угар и разбрызгивание уменьшаются. Вследствие уменьшения тепла на диссоциацию повышается стабильность горения дуги, ее устойчивость, увеличивается охват дугой основного металла. Так, если при сварке в CO_2 возможны швы недостаточной для получения глубины проплавления ширины, то при сварке в смеси углекислого газа и аргона (при содержании аргона 20–30 %) обеспечивается более широкая форма провара. Это способствует получению швов с плавным переходом от основного к наплавленному металлу, лучшей дегазации сварочной ванны.

Сварка в смеси аргона и кислорода на обратной полярности тока по внешнему виду лучше, чем сварка в углекислом газе. Небольшая добавка кислорода к аргону (5 %) непосредственно и косвенно изменяет соотношение сил, действующих на жидкий металл, перенос металла, и облегчает переход его в струйный. Чрезмерное повышение содержания кислорода в смеси (более 20 %) приводит к интенсивному выгоранию железа и легирующих элементов, сжатию дуги. Качественные швы были получены при содержании кислорода до 30 % в смеси.

При сварке в смеси аргона с кислородом на прямой полярности тока уменьшается разбрызгивание, повышается стабильность горения дуги, улучшается внешний вид соединений по сравнению со сваркой в углекислом газе. Вследствие больших затрат тепла на плавление электродной проволоки глубина проплавления основного металла уменьшается.

Особенностью сварки в смеси аргона с кислородом на прямой полярности тока являются незначительное разбрызгивание электродного металла, более широкий диапазон режимов, чем при сварке в углекислом газе – колебания тока и напряжения в значительных пределах не приводят к нарушению процесса.

Проведенные исследования под-

твердили, что за счет дополнительного введения в защитную атмосферу кислорода или аргона появляется возможность улучшения формирования швов и снижения потерь электродного металла. Выбор защитного газа должен осуществляться с учетом состава, концентрации его при высокой температуре, степени диссоциации.

Улучшение процесса сварки возможно за счет изменения состава сварочной проволоки. В литературе приводятся данные по влиянию добавок в проволоку титана, никеля, циркония, молибдена и других элементов. Между тем особый эффект следует ожидать от содержания углерода в проволоке. Известно, что углерод влияет на поверхностное натяжение жидкого металла [2]. Данных по влиянию углерода на поверхностное натяжение с этой точки зрения в литературе приводится мало.

Изучение влияния углерода в проволоке осуществлялось экспериментальными проволоками диаметром 1,6 мм на токе 300 А, скорости сварки 7 м/ч в среде аргона и углекислого газа при расходе 15 л/мин. Содержание углерода в проволоке изменялось в пределах 0,035–0,15 %.

При сварке в CO_2 опытными проволоками с содержанием углерода 0,10–0,15 % получены осциллограммы с относительно редкими короткими замыканиями. В секунду имеет место 25–35 коротких замыканий, продолжительность которых составляет сотые и тысячные доли секунды. Перед короткими замыканиями наблюдается некоторое увеличение тока, вызываемое приближением капли расплавленного металла к сварочной ванне. Соответственно снижается напряжение дуги.

Сварка проволоками с содержанием углерода 0,035–0,07 % характеризовалась более частыми замыканиями дугового промежутка.

Для объяснения влияния углерода на размер капли проведен теоретический анализ. Радиус капли определялся

по формуле [2]

$$r_k = \alpha_3 \sqrt{\frac{3 \sigma' r_3}{2 g \gamma}}, \quad (3)$$

где α – поправочный коэффициент, учитывающий часть жидкого металла, остающегося на электроде; r_3 – радиус электрода, см; σ' – условное поверхностное натяжение, дин/см, определяющееся по формуле

$$\sigma' = \sigma - \frac{\left[A \left(1 + 2,31 \lg \frac{i_3}{i_c} \right) - B_2 \right] I_D^2}{2\pi r_3}, \quad (4)$$

Табл. 2. Расчет размера и средней частоты переноса капель в зависимости от содержания углерода в сварочной проволоке

С, %	0,035	0,05	0,10	0,15
Поверхностное натяжение, дин/см	1145	1175	1250	1300
Условное поверхностное натяжение, дин/см	168	198	273	323
d_k , см	0,1926	0,206	0,2294	0,238
Средняя расчетная частота переноса капель в секунду	51	40	32	27
Экспериментальные данные по частоте переноса капель в секунду	47	41	35	31

Диаметр капель и средняя частота переноса капель зависят от содержания углерода в проволоке.

Установлена зависимость коэффициента потерь электродного металла от содержания углерода в проволоке. С понижением поверхностного жидкого металла низкоуглеродистых проволок потери электродного металла снижаются с 10–11 до 7–9 %.

При сварке в аргоне Ст. 3 проволоками с содержанием углерода 0,35; 0,05; 0,07 % перенос металла осуществляется в мелкокапельной форме, а при сварке проволоками с содержанием углерода 0,10; 0,12; 0,15 % – в капельной форме. Значение тока перехода к мелкокапельному переносу по мере уменьшения содержания

углерода в проволоке приведено в [5].

где A – коэффициент, равный 0,005 дин/А; i_3 – плотность тока в электроде, А/см²; i_c – плотность тока в столбе дуги А/см²; B_2 – коэффициент, равный для случая сварки в СО₂ на обратной полярности 0,003 дин/А.

Расчет проведем для содержания углерода в проволоке 0,035; 0,05; 0,10; 0,15.

Необходимые данные и результаты расчета приведены в табл. 2.

Результаты расчета объясняют, что изменение характера переноса металла при сварке опытными проволоками происходит за счет снижения поверхностного натяжения.

углерода в проволоке приведено в [5].

Снижение поверхностного натяжения положительно отражается на формировании сварных швов.

При анализе влияния поверхностного натяжения на формирование сварных швов жидкий металл в поперечном сечении можно рассматривать как каплю, лежащую на подложке со смачиваемой зоной, равной ширине шва. Тогда форма усиления в поперечном сечении определяется соотношениями, приведенными в [4]. После упрощения этих соотношений с учетом начальных условий получаем

$$H = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}}; \quad (5)$$

$$x_6 = \frac{F_n}{2H}, \quad (6)$$

где F_n – площадь наплавки; H – максимальная высота усиления шва; x_6 – половина ширины шва, равная половине провариваемой зоны.

Ширина провариваемой зоны [6]

$$b = 2 \sqrt{\frac{2q_3}{\pi \cdot e \cdot c \gamma \cdot V_{св} \cdot T_{пл}}}, \quad (7)$$

где q_3 – эффективная тепловая мощность источника тепла; $V_{св}$ – скорость сварки; $T_{пл}$ – температура плавления металла; $c\gamma$ – объемная теплоемкость.

Количество наплавленного металла, ширина провариваемой зоны определяют наличие или отсутствие подрезов, наплывов при сварке. Особое значение может иметь величина поверхностного натяжения.

1. Если $x_6 < \frac{b}{2}$, то форма шва определяется соотношением между величинами поверхностного натяжения на границах твердого, жидкого и газообразного веществ.

2. Если $x_6 > \frac{b}{2}$, то форма шва определяется поверхностным натяжением на границе газ–металл. Поэтому стремление к повышению производительности процесса за счет увеличения объема наплавки может привести к ухудшению формирования шва и появлению наплывов.

Предельное условие получения швов без наплывов определяется по формуле

$$2x_6 = b. \quad (8)$$

Количество наплавленного металла в этом случае

$$F_n = \frac{\alpha_{кр} \cdot I_{св}}{3600 \cdot \gamma \cdot V_{св}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{кр}$ – критическое значение коэффициента наплавки, при котором шов еще не имеет наплывов.

Решим совместно уравнения (5)–(9) относительно $\alpha_{кр}$:

$$\alpha_{кр} = \frac{14400}{I_{св}} \sqrt{\frac{2q_3 \cdot V_{св} \cdot \sigma}{\pi e \cdot c \cdot T_{пл}}}. \quad (10)$$

Снижение $\alpha_{кр}$ и σ не означает, что с ростом тока на практике увеличивается коэффициент наплавки. Выражение (10) указывает на возможность получения наплывов и непроваров с уменьшением поверхностного натяжения и скорости сварки. К этому же может привести изменение сварочного тока, влияющего на ширину провариваемой зоны, соотношение наплавленного и проплавленного металлов.

Для режимов сварки $I_{св} = 300$ А, $U_d = 30$ В, $V_{св} = 7$ м/ч, $\eta_u = 0,7$ и постоянных $c\gamma = 4,7$ Дж/(см³·град), $T_{пл} = 1530$ °С критическое значение коэффициента наплавки равно 29,6 г·А/ч. Критическое значение коэффициента наплавки α_n является предельным для данных условий сварки, отсутствует наплавка электродного металла на достаточно прогретый основной металл. При $\alpha_n < \alpha_{кр}$ сварной шов имеет чрезмерное усиление, но без наплывов. Форма сварного шва в значительной степени определяется поверхностным натяжением.

Аналогичное влияние на форму шва оказывает поверхностное натяжение σ и при оптимальном коэффициенте наплавки α_n [6]. Улучшение смачивания при одном и том же физико-химическом средстве между свариваемым и наплаваемым металлами способствует получению швов хорошего внешнего вида. В связи с этим швы, выполненные проволокой с содержанием углерода 0,035; 0,05; 0,07 %, имеют плавный переход к основному металлу, меньшую высоту усиления. Увеличение содержания углерода в проволоке отрицательно отражается на этих показателях.

С целью полноты оценки влияния углерода на процесс сварки определены прочностные характеристики сварных швов, выполненных опытными про-

локами. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Изменение содержания углерода в сварочной проволоке от 0,035 до 0,015 % повышает предел прочности наплавленного металла с 47,0 до 52,6 кг мм при одновременном незначительном снижении от-

носительного удлинения. Поэтому реализация положительного эффекта снижением содержания углерода в проволоке требует компенсации падения прочности, например, дополнительным легированием кремнием и марганцем.

Табл. 3. Механические свойства металла, наплавленного опытными проволоками

Содержание углерода в проволоке, %	Предел прочности, кг/мм ²	Предел текучести, кг/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
0,035	47,0	30,8	34,1	64,2
0,05	48,1	30,4	32,1	63,8
0,07	49,6	30,1	30,9	63,4
0,10	50,1	30,2	30,5	62,9
0,12	51,9	30,5	30,6	61,8
0,15	52,6	30,5	28,5	61,6

Кремний и марганец являются легирующими элементами сварочной проволоки, предназначенной для сварки сталей малоуглеродистых и низколегированных сталей в среде защитных газов. Кремний в количестве 0,17–0,5 % снижает, а в других – увеличивает поверхностное натяжение. Влияние марганца на поверхностное натяжение выражается кривой с максимумом при 0,8 %. Однако изменение содержания кремния и марганца ограничивается. Их соотношение и количество определяют металлургические процессы, протекающие при сварке, качество сварных швов.

Возможно легирование сварочной проволоки титаном, никелем, молибденом и т. д., что позволяет стабилизировать горение дуги, повысить эксплуатационные характеристики сварных узлов. Однако это удорожает сварочную проволоку, требует затрат дефицитных материалов.

Легирование возможно нанесением элементов-активаторов на поверхность сварочной проволоки. К таким элементам относятся соли бария, калия, лития и др. Щелочные и щелочно-земельные металлы обладают способностью ослаблять связи на поверхности жидкости. Резко

изменяется эмиссия с катода, увеличивается площадь активного пятна, снижается плотность тока. Это явление уменьшает отталкивающее действие электромагнитной силы, осевая составляющая которой начинает способствовать отрыву капли. Скорость расплавления электрода снижается. Это объясняется тем, что элементы-активаторы, снижая работу выхода электронов, обеспечивают образование перед катодом электронного облака. Положительные ионы, сталкиваясь с облаком электронов, нейтрализуют электроны. Одновременно уменьшается количество тепла, выделяющегося на катоде. Положительный эффект от применения наблюдается при использовании элементов-активаторов при сварке на прямой полярности сварочного тока. Сварка при обратной полярности не позволяет получить положительный эффект.

Исследования позволяют предложить способ улучшения формирования швов и снижения потерь электродного металла при сварке в углекислом газе. Этот эффект может дать снижение содержания углерода в проволоках

Св.08ГС и Св.08Г2С до уровня 0,04–0,05 % вместо 0,10–0,11 % применением защитных газов, содержащих углекислый газ и кислород, аргон в смеси с кислородом или углекислым газом.

Выводы

1. Сварка в смеси газов имеет преимущества перед сваркой в углекислом газе. Изменение степени диссоциации защитного газа влияет на стабильность горения дуги, ее форму. Дополнительное введение в защитный газ кислорода интенсифицирует выгорание углерода в поверхностном слое металла, снижает силы поверхностного натяжения, измельчает перенос электродного металла и способствует улучшению формирования швов.

2. Изменением состава защитной атмосферы и режимов сварки можно воздействовать на качественные показатели – формирование швов, перенос металла и разбрызгивание. Минимальные и примерно равные потери металла наблюдаются в широком диапазоне оптимальных соотношений тока и напряжения на дуге.

3. Исследовано влияние состава сварочной проволоки на процесс сварки в защитных газах. Показано существенное влияние содержания углерода в проволоке на перенос металла и разбрызгивание. Определена математическая зависимость критического значения коэффициента наплавки, при котором шов не имеет наплывов.

4. Уменьшение содержания углерода в сварочной проволоке Св.08Г2С с 0,10–0,11 до 0,06–0,07 % при сварке в защитных газах приводит к измельчению переноса электродных капель, увеличению скорости плавления, уменьшению потерь электродного металла на разбрызгивание и улучшению качества формирования сварных швов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сварка в смеси активных газов / А. Е. Аснис [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1982. – 206 с.
2. Филиппов, С. И. Теория металлургических процессов / С. И. Филиппов. – М. : Металлургиздат, 1969. – 206 с.
3. Белоконь, В. М. Влияние содержания углерода в проволоке Св.08Г2С на процесс сварки и свойства швов / В. М. Белоконь, С. К. Павлюк // Автоматическая сварка. – 1974. – № 10. – С. 73–74.
4. Лессиг, Е. Н. Листовые металлические конструкции / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Липеев, А. Г. Соколов. – М. : Изд-во литературы по строительству. – 1970. – 270 с.
5. Павлюк, С. К. О возможности улучшения процесса сварки в углекислом газе за счет снижения содержания углерода в проволоке / С. К. Павлюк, В. М. Белоконь // Сварочное производство. – 1976. – № 2. – С. 75–76.
6. Дюргеров, Н. Г. Уменьшение разбрызгивания и стабилизация процесса сварки короткой дугой / Н. Г. Дюргеров // Автоматическая сварка. – 1972. – № 6. – С. 48–49.
7. Куликов, В. П. Технология и оборудование сварки и термической резки / В. П. Куликов. – Минск : Экоперспектива. – 2003. – 412 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 02.04.2008

V. M. Belokon
Quality of fusion welding by various compositions of shielded gas and welding wire

The paper shows the effect of gas shielded composition and carbon proportion in wire on the process and welding quality. The oxygen addition to the shielded gas, the decrease in carbon amount in welding wire have an effect on the surface tension of molten metal. The carbon proportion in the wire has an effect on the frequency of the drop transfer of the electrode metal into a weld pool. The reduction of carbon proportion in wire is more efficient than alloying. A mathematical formula for determining of the surfacing coefficient, at which there are no defects in the form of the weld is offered.