



УДК 621.791.754.048:621.791.755

ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ ФЛЮСОВ И АКТИВНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДУГОВОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, **М. М. САВИЦКИЙ**, **В. С. ГВОЗДЕЦКИЙ**,

И. В. КРИВЦУН, доктора техн. наук, **А. М. САВИЦКИЙ**, канд. техн. наук, **Ю. Е. ГОДЛИС**, **А. Ф. ЛУПАН**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены возможные причины повышения глубины проплавления при плазменной и дуговой сварке плавящимся и неплавящимся электродами с использованием активирующих флюсов. Показано, что глубокое проплавление металла обусловлено сжатием дуги и повышением концентрации теплового и механического воздействия плазмы на металл при одновременном снижении его поверхностного натяжения в присутствии элементов, имеющих высокую поверхностную активность и склонность к образованию отрицательных или положительных ионов.

Ключевые слова: плазменная и дуговая сварка в инертном газе, активирующие флюсы, плавящийся и неплавящийся электроды, давление дуги, поверхностное натяжение, проплавление, механические свойства, сварное соединение

Перспективным направлением развития сварки является активация микродозами химических элементов тех процессов, которые происходят в сварочной ванне и дуге, горящей в инертных газах [1–3]. Так, введение в зону сварки 0,10...0,01 % (от массы расплавляемого металла) элементов, имеющих высокую поверхностную активность и склонность к образованию отрицательных или положительных ионов, позволяет варьировать в широких пределах значения коэффициента формы шва без изменения режима сварки. Например, при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом можно получать узкие швы с глубоким (до 12 мм) либо широкие швы с малым (около 1...2 мм) проплавлением [4].

Основанные на этом принципе технологии аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом сталей и сплавов титана, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона, с 1970 г. широко применялись в авиа- и ракетостроении, атомной энергетике и других отраслях промышленности Советского Союза. Некоторые из них после тестирования под общим названием сварка АТИГ, проведенного в 1993–1995 гг. Британским институтом сварки [5], стали предметом для изучения и применения в различных странах Европы, Азии и Америки. В США и Японии работы по адаптации указанных технологий к местным условиям и их совершенствованию в разное время были включены в перечень приоритетных направлений развития сварки [6, 7].

Анализ, изложенный в работе [8], показал, что единое мнение по этому вопросу в настоящее время отсутствует. Существующие гипотезы условно можно разделить на две основные группы. К первой относятся те, в которых отдается предпочтение металлургическим и тепловым процессам в жидком и твердом металле; ко второй — гипотезы, предполагающие, что первостепенными являются физические процессы в сварочной дуге.

Однако наиболее типичной является ситуация, при которой действуют обе группы процессов, но в зависимости от условий одни преобладают над другими. Так, при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом установлено, что существует определенная корреляция изменения коэффициента поверхностного натяжения σ жидкой стали и ширины шва b , а также плотности тока j в активном пятне на аноде и глубины проплавления h в зависимости от суммарного содержания серы и кислорода в стали или в стали и защитном газе (рис. 1). Эти элементы, как известно, обладают высокими поверхностной активностью и энергией сродства к электрону, т. е. они могут одновременно инициировать металлургические процессы в сварочной ванне и физические процессы в дуге.

Из рисунка видно, что с увеличением суммарной массовой доли C этих элементов в стали в пределах 0,010...0,014 % значительно уменьшаются коэффициент поверхностного натяжения и ширина шва, при этом плотность тока и глубина проплавления возрастают. Дальнейшее повышение суммарного

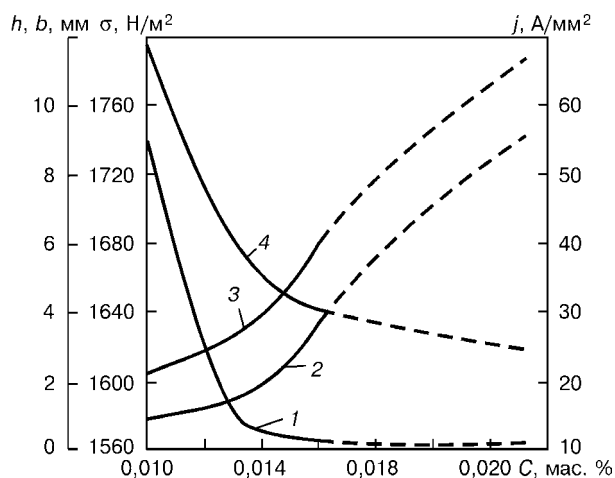


Рис. 1. Влияние суммарного содержания C серы и кислорода в стали (сплошные кривые), а также серы и кислорода в стали и защитном газе (штриховые кривые) на σ (1), j (2), h (3) и b (4) при аргонодуговой сварке

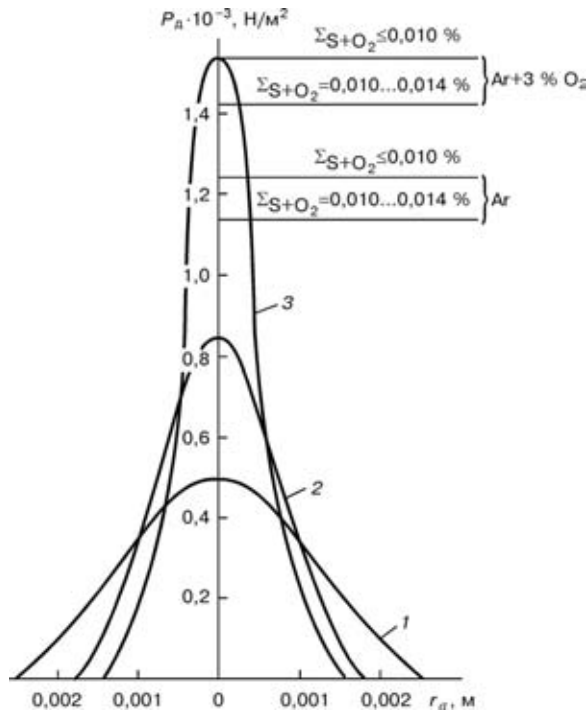


Рис. 2. Распределение избыточного давления дуги на анод при аргодуговой сварке стали с $\Sigma_{S+O_2} \leq 0,010$ (1), $\Sigma_{S+O_2} = 0,010 \dots 0,014$ (2) и $\Sigma_{S+O_2} \geq 0,014$ % (3): горизонтальные линии — уровни сопротивления металла погружению дуги, обусловленные поверхностным натяжением $P_{\text{н.н}}$ и гидростатическим $P_{\text{г}}$ давлением металла при сварке в аргоне и смеси $Ar + 3\% O_2$; r_a — радиус анодного пятна

содержания серы и кислорода в стали либо дополнительное введение кислорода в защитный газ, увеличивающее суммарное содержание этих элементов в зоне сварки до 0,02 % массы расплавленного металла, влияет на коэффициент поверхностного натяжения и ширину шва меньше, чем на плотность тока и глубину проплавления стали.

Таким образом, можно предположить, что при незначительном (до 0,014 %) содержании серы и кислорода в стали в зоне сварки преобладают металлургические процессы. При массовой доле указанных элементов более 0,014 % активизируются физические процессы в дуге, вызывающие увеличение плотности тока и глубины проплавления металла, очевидно, вследствие более интенсивного теплового и механического воздействия дуги на сварочную ванну.

Давление дуги P_d на поверхность сварочной ванны при сварке вольфрамовым электродом объясняется взаимодействием двух сил. Действие одной из них обусловлено торможением вблизи поверхности анода плазменного потока, формирующегося в столбе дуги в результате взаимодействия электрического тока дуги с собственным магнитным полем [9], а второй — реактивным давлением струи паров металла, истекающих из анодного пятна дуги [10]. Экспериментальные и расчетные данные свидетельствуют о том, что обе составляющие давления дуги являются функцией плотности тока j , а поскольку распределение плотности тока в анодном пятне описывается кривой с максимумом в центре [11], то и давление дуги имеет аналогичное распределение (рис. 2). Как

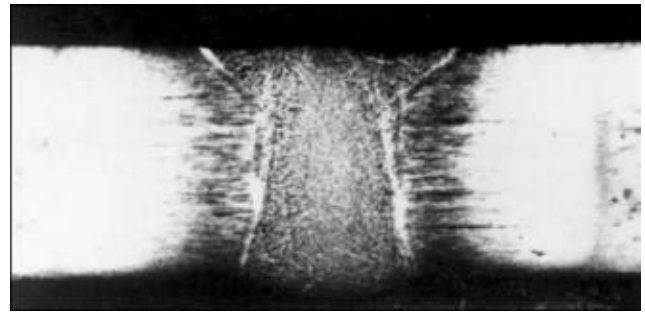


Рис. 3. Макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного аргодуговой сваркой вольфрамовым электродом с активацией на стали толщиной 6 мм

показали эксперименты, с увеличением содержания серы и кислорода в стали давление дуги на металл возрастает, а после дополнительной активации кислородом его значение становится соизмеримым со значением поверхностного натяжения (ср. рис. 1 и рис. 2).

Сжатие дуги активаторами и уменьшение поперечных размеров поверхности сварочной ванны, казалось бы, должно привести к увеличению сопротивляемости жидкого металла погружению дуги. Однако действие этого фактора компенсируется снижением поверхностного натяжения металла на границе металл-шлак.

Если при сварке вольфрамовым электродом преобладает первая составляющая давления дуги, то в металле образуется кратер, в котором плазменный поток подвергается дополнительному сжатию вытесненным из кратера металлом. При этом происходит «запирание» парового потока, что вызывает увеличение кинетической энергии потока, а следовательно, и проникающей способности дуги.

Геометрические размеры шва и характеристики плазменного потока изменяются аналогично. На макрошлифе поперечного сечения шва, представленном на рис. 3, видно, что при погружении в металл зона проплавления сначала сужается, а затем плавно расширяется. Если при этом дно кратера прорывается, то в металле образуется канал, в котором формируется вторичный плазменный поток. Этот процесс аналогичен происходящему в плазматроне [12, 13]. Изложенное выше, вероятно, является тем обстоятельством, которое сближает по энергетическим и технологическим характеристикам плазменные потоки, формируемые активированной дугой и плазматроном.

Следует отметить, что в процессе плазменной сварки при выходе из сопла плазматрона поток плазмы в результате падения давления быстро расширяется, что обычно ведет к снижению интенсивности нагрева и проникающей способности плазмы. У поверхности свариваемого металла к этому добавляется еще воздействие легкоионизируемых элементов, содержащихся в парах основного металла, которые также способствуют расширению потока плазмы и увеличению сопротивления металла погружению плазмы в сварочную ванну вследствие высокого поверхностного натяжения жидкого металла в аргоне. Для поддержания значений необходимых характеристик плазмы обычно увеличивают сварочный ток, расход формирующей

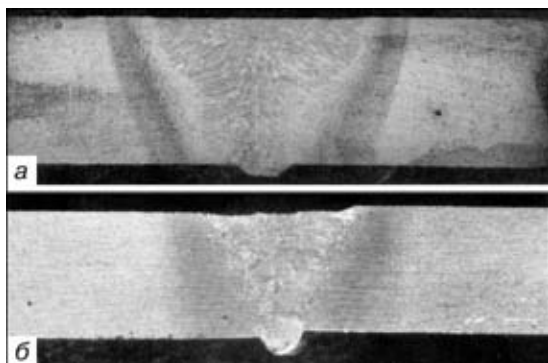


Рис. 4. Макрошлифы швов, выполненных на стали толщиной 6 мм плазменной сваркой без активации (а) и с активацией (б)

щего газа и контрагирование плазмы с помощью водорода, а также уменьшают расстояния между соплом и изделием [13]. Действию легкоионизируемых и поверхностно-активных элементов при плазменной сварке пока уделяется мало внимания. Результаты исследований [4] свидетельствуют о том, что учет этих факторов открывает возможности дальнейшего повышения эффективности этого способа сварки. Макрошлифы швов, выполненных плазменной сваркой на стали толщиной 6 мм без активации и с активацией, приведены на рис. 4 на режимах, указанных в табл. 1. Как видно из рис. 4, применение активирующего флюса, содержащего вещества с повышенной поверхностной активностью и сродством к электрону, позволяет осуществить дополнительное сжатие потока плазмы в прианодной области и в 1,5...2,0 раза увеличить его проникающую способность при сварке на малых токах. В этом случае улучшаются механические свойства сварных соединений и обеспечивается равнопрочность соединений.

Интересные результаты были получены также при сварке плавящимся электродом проволокой Св-08Г2С в аргоне, углекислом газе или их смеси (85 % Ar + 15 % CO₂) с использованием активирующих флюсов или без них. В качестве основного металла применяли пластины из стали ВСтЗкп толщиной 10 мм [14].

Таблица 1. Параметры режимов дуговой и плазменной сварки с активацией

Способ сварки	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$v_{св}$, м/ч
АТИГ с флюсом ВС-2э	165	10	6
Плазменная:			
с флюсом ВС-2э	110	22	12
без флюса	150	22	12

Таблица 2. Влияние активатора на глубину проплавления*

Процесс сварки	Защитная среда	Глубина проплавления, мм
Без активатора	Ar	3,8
	85 % Ar + 15 % CO ₂	4,5
	CO ₂	4,5
С активатором	Ar	7,0
	85 % Ar + 15 % CO ₂	6,8
	CO ₂	4,8

* Использовали следующий режим сварки: $I_{св} = 280$ А; $U_{д} = 28$ А; $v_{св} = 25$ м/ч.

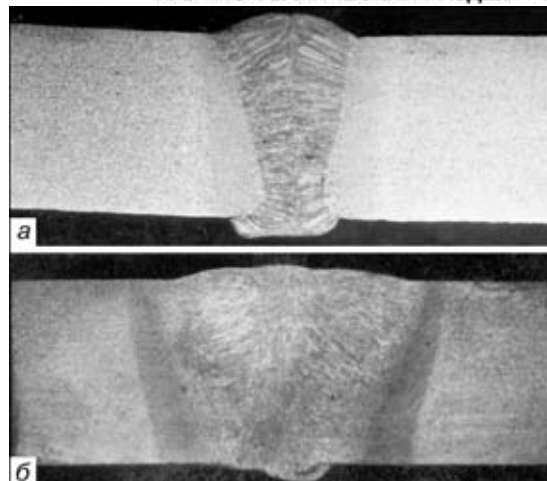


Рис. 5. Макрошлифы швов, выполненных плавящимся электродом на стали ВСтЗкп толщиной 10 мм в углекислом газе (а) и аргоне с активацией (б)

Эффект увеличения глубины проплавления в большей мере проявляется при сварке в чистом аргоне. Как показали результаты проведенных исследований (табл. 2), применение активатора в этом случае позволяет увеличивать глубину проплавления почти в 1,6 раза, по сравнению со сваркой в углекислом газе и смеси 85 % Ar + 15 % CO₂, и в 1,8 раза, по сравнению со сваркой в аргоне без активатора. При этом изменяется также форма сварного шва. Пальцеобразное проплавление, характерное для сварки в чистом аргоне, под действием активатора становится клинообразным (рис. 5).

Сравнение технологических возможностей сварки в аргоне с активатором и углекислом газе без активатора показало, что при односторонней сварке с полным проплавлением металла одинаковой толщины в первом случае погонная энергия q/v примерно в 2,6 раза меньше, чем во втором (табл. 3).

Данное обстоятельство является одной из вероятных причин улучшения механических свойств сварных соединений. Это прослеживается на примере изменения ударной вязкости при испытании образцов металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) с острым надрезом (по Шарпи) при -20 °С (табл. 4).

Установлено, что по мере понижения температуры значения ударной вязкости основного металла и металла ЗТВ имеют тенденцию к монотонному снижению, ударная вязкость металла шва при этом практически не изменяется (рис. 6).

В заключение отметим, что активация микродозами химических элементов физико-химических процессов, происходящих при дуговой сварке неплавящимся и плавящимся электродами и плазменной сварке создает предпосылки для более эффективного использования энергии дуги и осу-

Таблица 3. Влияние активатора на энергетические параметры режимов сварки в защитных газах из стали ВСтЗкп толщиной 10 мм

Процесс односторонней сварки	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$v_{св}$, м/ч	q/v
В аргоне с активатором	400	34	40	8654
В углекислом газе без активатора	550	40	25	22190



Таблица 4. Влияние активатора на механические свойства сварного соединения

Процесс сварки	Участок сварного соединения	σ_T , МПа	σ_B , МПа	KCV , Дж/см ²	
				+20 °С	-20 °С
В аргоне с активатором	Шов	510	680	79	70
	ЗТВ	Не опр.	Не опр.	74	74
В углекислом газе без активатора	Шов	368	570	61	33
	ЗТВ	Не опр.	Не опр.	80	75

Примечание. Сварку выполняли на металле со следующими механическими свойствами: $\sigma_T = 349$ МПа; $\sigma_B = 476$ МПа; $KCV_{20} = 71$ и $KCV_{-20} = 37$ Дж/см².

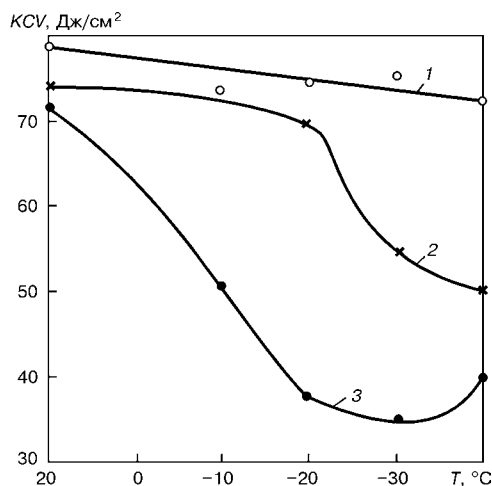


Рис. 6. Температурная зависимость ударной вязкости металла различных участков сварочного соединения, полученного при сварке плавящимся электродом с активацией: 1 — шов; 2 — ЗТВ; 3 — основной металл

ществления сварки с пониженной погонной энергией, а также для управления процессами плавления и кристаллизации металла швов и кинетикой структурных превращений в ЗТВ с целью повышения механических и служебных свойств сварных соединений. Кроме того, существенно улучшится культура сварочного производства и его экологическая безопасность.

1. *Свариваемость* конструкционных сталей, подвергающихся рафинирующему переплаву / Б. Е. Патон, А. М. Макара, Б. И. Медовар и др. // Автомат. сварка. — 1977. — № 6. — С. 1-4.

2. *Влияние* рафинирования на проплавление металла при дуговой сварке / А. М. Макара, М. М. Савицкий, Б. Н. Кушниренко и др. // Там же. — 1977. — № 9. — С. 7-10.

3. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Гуревич С. М.* Влияние состава флюса на процесс сварки неплавящимся электродом // Там же. — 1977. — № 3. — С. 49-71.

4. *Савицкий М. М., Лесков Г. И.* Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавляющую способность дуги с вольфрамовым катодом // Там же. — 1980. — № 9. — С. 17-22.

5. *ATIG welding of carbon-manganese and stainless steel* / K. A. Jushchenko, M. M. Savitsky, O. V. Kovalenko // Proc. of conf. «Weld. Technology of Paton Institute», Cambridge, Abington, Oct., 1993. — Cambridge: Abington publ., 1993. — P. 21-24.

6. *Gordon J. R.* Perspectives on welding research and development in the USA // Welding Review International. — 1995. — August. — P. 95-106.

7. *Технологии* сварки и соединений в XXI веке // Jap. Weld. Soc. — 2001. — 70, № 3. — P. 6-18.

8. *Савицкий М. М., Кушниренко Б. Н., Олейник О. И.* Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (АТИГ-процесс) // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 20-29.

9. *Воропай Н. М., Кривцуц И. В.* Газодинамические характеристики пламенных потоков в сварочных дугах // Магнитная гидродинамика. — 1978. — № 1. — С. 132-136.

10. *Контракция* дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом в аргоне / Б. Е. Патон, В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 1. — С. 1-8.

11. *Плотность* тока в анодном пятне при сварке обычных и рафинированных сталей / М. М. Савицкий, В. С. Гвоздецкий, В. И. Скрышник, Н. И. Варенко // Там же. — 1979. — № 7. — С. 17-20.

12. *Особенности* формирования шва при сварке по активирующему флюсу / М. М. Савицкий, Б. Н. Кушниренко, А. Ф. Лунац, А. Д. Мельник // Там же. — 1981. — № 2. — С. 18-21.

13. *Микроплазменная* сварка / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1979. — 245 с.

14. *Дудко Д. А., Савицкий А. М., Савицкий М. М.* Сварка плавящимся электродом в защитных газах с применением активирующего флюса // Автомат. сварка. — 1996. — № 10. — С. 54-55.

Considered are the probable causes of increase in the penetration depth in plasma and arc welding by the MIG or TIG method using activating fluxes. It is shown that deep penetration of metal is caused by constriction of the arc and increase in the concentration of thermal and mechanical effects exerted by the plasma on metal, as well as simultaneous decrease in its surface tension at the presence of elements characterised by a high surface activity and susceptibility to formation of negative or positive ions.

Поступила в редакцию 17.10.2002