

УДК 621.791.55

А. М. Савицкий, канд. техн. наук
М. М. Савицкий, докт. техн. наук
Ю. Н. Шкрабалюк

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
(г. Киев, e-mail: sam@paton.kiev.ua)

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРКИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ ЗА СЧЕТ АКТИВАЦИИ ДУГИ

Приведены результаты исследования влияния активации на технологические и экологические характеристики дуги при сварке в инертных газах. Показано, что она способствует уменьшению выделения вредных веществ, повышая этим экологическую чистоту сварки неплавящимся и плавящимся электродами. Активация улучшает и технологические характеристики дуги, увеличивая в 2÷4 раза глубину проплавления при одновременном повышении механических свойств металла сварных соединений.

Наведені результати дослідження впливу активації на технологічні і екологічні характеристики дуги під час зварювання в інертних газах. Показано, що вона сприяє зменшенню виділення шкідливих речовин, підвищуючи цим екологічну чистоту зварювання неплавким і плавким електродами. Активація покращує і технологічні характеристики дуги, збільшуючи в 2÷4 рази глибину проплавлення з одночасним підвищенням механічних властивостей металу зварних з'єднань.

Введение

Углеродистые стали являются основным конструкционным материалом современности и ближайшего будущего, а дуговая сварка – основным техническим процессом получения неразъемных соединений указанных сталей.

В настоящее время одним из важнейших показателей любого технологического процесса является его экологическая чистота. И хотя дуговая сварка в инертных газах весьма перспективна с экономической, технологической и экологической точек зрения, исследования, однако, показали [1, 2], что дефицит активных составляющих в инертной атмосфере способствует повышению активности примесей, содержащихся в основном и электродном металлах. Обладая повышенной химической и поверхностной активностью, некоторые из них при весьма низком среднем содержании в металле, могут образовывать на поверхности жидкого металла достаточно высокие концентрации [3]. Это вызывает изменения свойств поверхности жидкого металла, характера испарения и состава паров, что также приводит к существенному изменению технологических характеристик дуги [4].

Поэтому целью настоящей работы является изучение влияния активации дуги на ее технологические и экологические характеристики при сварке в защитных газах.

Основная часть

Испарение – процесс избирательный. При нагревании многокомпонентных расплавов в первую очередь выкипают ингредиенты с низкими температурами кипения и теплотами испарения [5]. Эта закономерность сохраняется и при дуговой сварке. Многочисленные наблюдения свидетельствуют, что примеси, содержащиеся в защитном газе, основном и электродном металлах, могут существенно изменять технологические характеристики дуги, влияя на состав плазмы, формирующейся из защитного газа и паровой фазы.

Примером являются результаты, полученные при сварке вольфрамовым электродом в аргоне (TIG-сварка) стали типа 30ХГСА (табл. 1) на токе 150А и в аргоне с добавкой в ка-

честве активатора кислорода (АТIG-сварка). Исследовалось содержание в спектрах дуги Fe, Mn и Ca. Было установлено, что при TIG-сварке количества испарившихся Fe и Mn на порядок, а Ca на два порядка больше, чем в случае применения АТIG-сварки (табл.2).

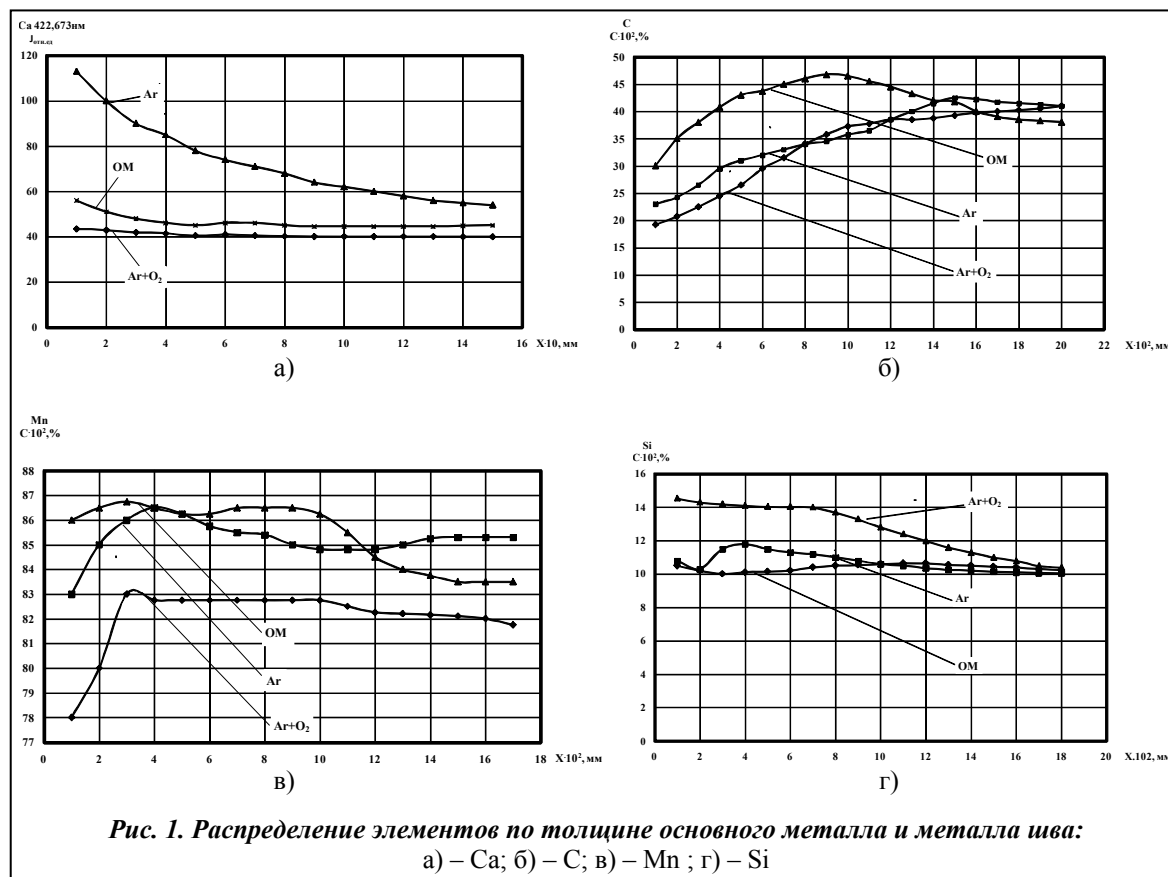
Таблица 1. Химический состав стали

Содержание элементов, %									
C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Ca	P	S	O ₂
0,39	0,32	1,08	1,20	0,35	0,29	0,008	0,011	0,007	0,005

Таблица 2. Содержание элементов в сварочной ванне и парах стали

Способ сварки	Размеры зоны проплавления м·10 ⁻³		Масса расплавленного металла, кг·с ⁻¹	Массы элементов в сварочной ванне, кг			Массы испарившихся элементов, кг·с ⁻¹			Массовые доли испарившихся элементов, %		
	b	h		Fe	Mn	Ca	Fe	Mn	Ca	Fe	Mn	Ca
TIG	5·10 ⁻³	1,3·10 ⁻³	1,67·10 ⁻⁴	1,6·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻⁶	0,98·10 ⁻⁸	1,9·10 ⁻⁹	2,9·10 ⁻⁹	1,2·10 ⁻¹⁰	1,2·10 ⁻³	2,4·10 ⁻¹	1,2·10 ⁻¹
АТIG	3,2·10 ⁻³	4,5·10 ⁻³	3,7·10 ⁻⁴	3,5·10 ⁻⁴	2,6·10 ⁻⁶	2,2·10 ⁻⁸	4,7·10 ⁻¹⁰	3,9·10 ⁻¹⁰	3,3·10 ⁻¹²	1,8·10 ⁻⁴	1,5·10 ⁻²	1,5·10 ⁻²

Послойный спектральный анализ металла шва показал, что в поверхностных слоях шва, выполненного TIG-сваркой, содержание Ca и Si увеличивается, а C и Mn – плавно снижается (рис. 1). Исследование изломов металла засвидетельствовало накопление у поверхности шва крупных неметаллических включений, содержащих Ca (рис. 2).



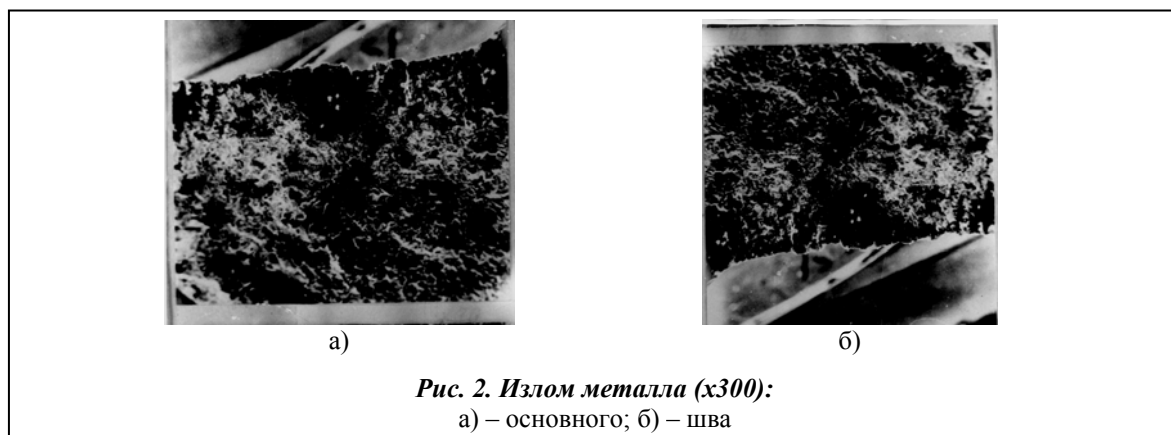


Рис. 2. Излом металла (x300):
а) – основного; б) – шва

Кроме этого изменяются геометрические и технологические характеристики дуги, а также размеры швов (рис. 3). При TIG-сварке столб сварочной дуги имеет дополнительную оболочку с меньшей яркостью, чем у ядра, которая увеличивает поперечные размеры дуги (рис. 3, а). Шов формируется большей ширины и с меньшей глубиной проплавления (рис. 3, б). Активация окислительных процессов кислородом (ATIG-процесс) при прочих равных условиях приводит к устранению дополнительной оболочки (рис. 3, в). В результате ширина шва уменьшается, а глубина проплавления увеличивается (рис. 3, г) в 2÷3 раза по сравнению с TIG-процессом.

При сварке в защитных газах плавящимся электродом активация также увеличивает глубину проплавления в 1,8÷4 раза по сравнению с традиционным способом. Это позволяет сваривать металл одинаковых толщин на меньших токах и с меньшим тепловложением в сварное соединение (табл. 3). В табл. 4 приведены результаты механических испытаний сварных соединений, выполненных с активацией дуги и традиционным способом. Химический состав основного металла и сварочной проволоки представлен в табл. 5.

В табл. 6 приведены данные по выделению вредных веществ при сварке низкоуглеродистых сталей проволокой Св08Г2С традиционным способом и с активацией дуги. Они

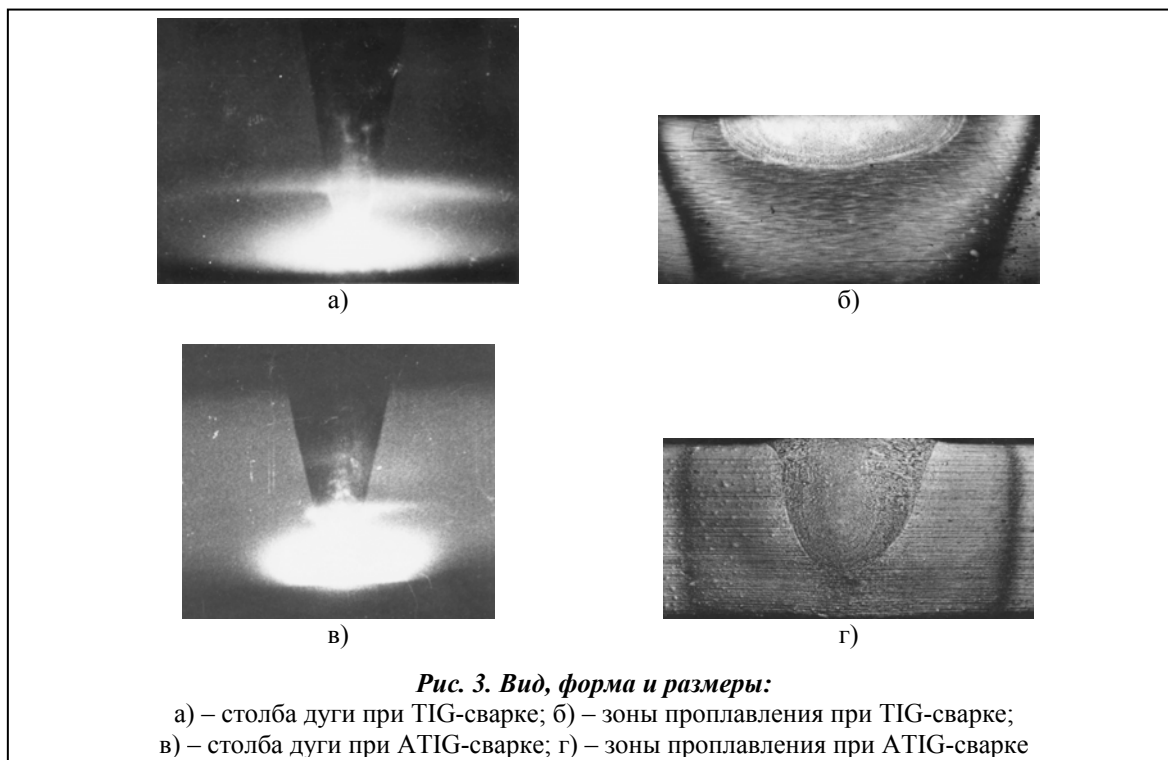


Рис. 3. Вид, форма и размеры:
а) – столба дуги при TIG-сварке; б) – зоны проплавления при TIG-сварке;
в) – столба дуги при ATIG-сварке; г) – зоны проплавления при ATIG-сварке

свидетельствуют, что активация дуги при сварке плавящимся электродом позволяет снизить выделение окиси марганца и окиси хрома в 1,6÷4 раза, а окиси углерода – в 1,8÷2,8 раза, по сравнению со сваркой традиционным способом.

Таблица 3. Режимы сварки при сварке плавящимся электродом в защитном газе

Способ сварки	Проплавляющая способность дуги	Толщина свариваемого металла, мм	I, А	U, В	V _{св} , м/ч	Погонная энергия сварки, q/V, Дж/см
без активации дуги	1	10	550	42	25	24964
с активацией дуги	1,8÷2,0	10	400	34	40	9189
с активацией дуги	2,0÷2,5	10	300	30	30	8103
с активацией дуги	3,0÷4,0	10	220	25	36	4400

Таблица 4. Механические свойства сварных соединений, выполненных сваркой плавящимся электродом в защитном газе

Способ сварки	Участок сварного соединения	σ _т , МПа	σ _в , МПа	KCV, Дж/см ²				
				+20 °C	-10 °C	-20 °C	-30 °C	-40 °C
–	Основной металл	349	476	71,4	50,0	37,5	35,0	–
с активацией дуги	Шов	510	680	78,7	72,5	70,2	75,2	72,5
	ЗТВ	–	–	74,0	73,5	74,0	55,0	49,0
без активации дуги	Шов	368	569	61,0	–	33,0	–	–
	ЗТВ	–	–	79,0	–	75,0	–	–

Таблица 5. Химический состав свариваемого металла и сварочной проволоки

Материал	Содержание элементов, %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	As
основной (свариваемый) металл	0,14÷0,22	0,40÷0,65	0,12÷0,30	0,040	0,050	0,30	0,30	0,30	0,08
сварочная проволока – Св08Г2С	0,05÷0,11	1,80÷2,10	0,70÷0,95	0,030	0,025	0,20	0,25	–	–

Таблица 6. Удельные выделения вредных веществ при сварке плавящимся электродом в защитных газах

Способ сварки	Проплавляющая способность дуги	Удельные выделения вредных веществ, кг·с ⁻¹		
		Окись марганца	Окись хрома	Окись углерода
без активации дуги	–	4,2·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁵
с активацией дуги	1,8÷2,0	2,6·10 ⁻⁶	1,0·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻⁵
с активацией дуги	2,0÷2,5	1,1·10 ⁻⁶	4,4·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁻⁵
с активацией дуги	3÷4	1,06·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁸	1,06·10 ⁻⁵

Обсуждение результатов работы

Интенсивное испарение Са (табл. 2) при TIG-сварке можно было бы считать закономерным, если бы он находился в стали в свободном состоянии. Температура кипения Са достигает 1760 К [6], а средняя температура сварочной ванны при TIG-сварке 1800±40 К. Однако Са, как показали наши исследования, присутствует в стали в виде включений оксидного и сульфидного типов с более высокими температурами плавления и кипения [7, 8]. В этой связи правомочно предположение, что интенсивное испарение Са обусловлено его восстановлением до свободного состояния. Поскольку по энергии сродства к кислороду и сере он значительно превосходит другие, входящие в состав стали элементы, то его восстановление, как показали термодинамические расчеты энергии Гиббса, наиболее вероятно в случае

выноса серы и кислорода из реакционной зоны за счет образования летучих соединений с другими элементами. Этот процесс под названием «химический транспорт» используется в спектроскопии [5]. Одной из наиболее вероятных, по-видимому, является реакция восстановления Ca углеродом, содержащимся в сталях:



Данная реакция может протекать по всему объему сварочной ванны, причем с увеличением температуры она интенсифицируется вследствие увеличения сродства углерода к кислороду. При достижении температуры 2700 К углерод по этому показателю превосходит даже Ca.

Менее динамичными в условиях сварочной ванны являются реакции



Средняя температура жидкой стали в сварочной ванне недостаточна для выноса серы из зоны реакции. Поэтому в данных условиях можно ожидать достижения динамического равновесия, при котором реакции (2) и (3) с одинаковой вероятностью протекают вправо и влево. Преимущественное смещение их влево могут обусловить высокая поверхностная активность серы, кислорода [3] и температура, которая на поверхности сварочной ванны достигает ~3343 К [9]. Это предположение подтвердилось при послыйном спектральном анализе металла шва, который показал, что в поверхностных слоях шва, выполненного TIG-сваркой, концентраций Ca, C и Mn изменяется (рис. 1, а, б, в). Содержание здесь Ca по сравнению с внутренними слоями возрастает в несколько раз. Причиной данной неоднородности является накопление у поверхности шва крупных неметаллических включений, содержащих Ca (рис. 2, а, б). Вероятно, по этой причине увеличивается и концентрация кремния у поверхности шва (рис. 1, г).

Дополнительное введение в зону сварки кислорода в количестве около 0,015–0,020% от массы расплавленного металла (ATIG-процесс) позволяет создать избыточную концентрацию данного элемента в реакционной зоне. Это изменяет характер и направление химических реакций: над процессами восстановления начинают превалировать процессы окисления. Возможно, что из-за образования на поверхности расплавленного металла и в атмосфере дуги термически стойких оксидов [8] содержание в спектрах плазмы свободных Ca, Mn и Fe резко снижается (табл. 2). Поэтому изменяются геометрические и технологические характеристики дуги и размеры швов (рис. 3). При ATIG-сварке устраняется дополнительная оболочка (рис. 3, в), характерная для TIG-процесса (рис. 3, а), а глубина проплавления увеличивается (рис. 3, б, и 3, в).

О резком уменьшении количества паров в дуге свидетельствуют и спектры сварочной дуги (рис. 4). При TIG-сварке количество, интенсивность и яркость спектральных линий значительно больше, чем при ATIG-процессе. Это означает, что в столбе дуги уменьшается количество паров элементов, входящих в состав свариваемого металла.

Приведенные данные соответствуют современным представлениям о влиянии компонентов плазмы на эффективный потенциал ионизации газов, особенно если это происходит в отдельных участках дугового промежутка. Наличие свободных Ca, Mn и Fe с относительно низкими потенциалами (6,1 эВ; 7,4 эВ и 7,8 эВ соответственно) повышает проводимость периферийных участков дуги, что приводит к уменьшению плотности тока и, следовательно, концентрации теплового и силового воздействия дуги на металл. Интенсификация окислительных процессов в зоне сварки снижает содержание в плазме свободных элементов с относительно низкими потенциалами ионизации, связывая их в термически стойкие соединения, для испарения, диссоциации и ионизации которых требуются значительно большие затраты энергии, чем для ионизации аргона (15,7 эВ). Поэтому проводимость периферии дуги снижается, а плотность тока повышается, увеличивая концентрацию энергии в токопроводящем канале при неизменной величине сварочного тока.

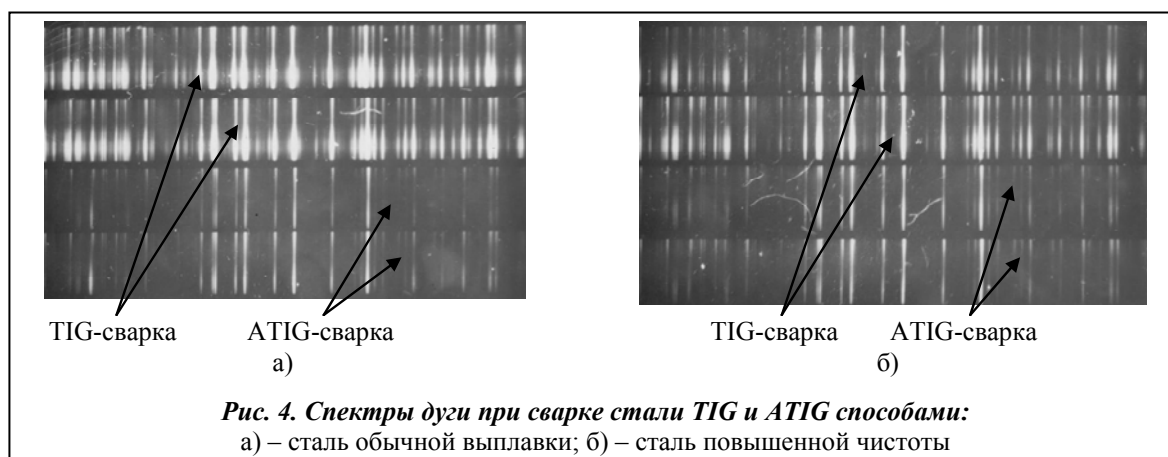


Рис. 4. Спектры дуги при сварке стали TIG и ATIG способами:

а) – сталь обычной выплавки; б) – сталь повышенной чистоты

Необходимо отметить, что образование термически стойких оксидов уменьшает вероятность испарения только свободных элементов. Что касается их соединений, то в случае образования на поверхности жидкого металла они подвергаются также достаточно высокому термическому воздействию и могут испаряться в виде химических комплексов. Однако на периферии столба дуги может оказаться недостаточно энергии дуги для поддержания этих соединений в диссоциированном и ионизированном состояниях. Поэтому наиболее вероятным их состоянием является состояние аэрозолей. Причем при ATIG-сварке на токе 150 А, $U_d = 10$ В, $V_{св} = 12$ м/ч выделяется около $2,1 \cdot 10^{-6}$ кг/с аэрозоля, а при TIG-сварке эти выделения составляют $1,4 \cdot 10^{-6}$ кг/с. В первом случае основную долю аэрозолей составляют оксиды железа. Оксиды хрома, титана и кремния содержатся в небольших количествах (табл. 7). Марганец присутствует в виде свободного элемента и оксида в обоих случаях.

Таблица 7. Химический состав ТССА

Наименование вредных веществ	Массовая доля, % мас	Удельные выделения, кг·с ⁻¹
хрома оксид (по Cr)	3,6	$2,3 \cdot 10^{-9}$
хроматы, бихроматы (по CrO ₃)	не обнаружены	–
марганец	2,9	$0,92 \cdot 10^{-9}$
титан (по TiO ₂)	5,2	$1,2 \cdot 10^{-9}$
кремний (по SiO ₂)	5,1	$3,2 \cdot 10^{-9}$
железо (по Fe ₂ O ₃)	76,8	$1,3 \cdot 10^{-9}$

Аналогично ATIG-процессу, при механизированной сварке в защитных газах плавящимся электродом активация дуги также позволяет существенно улучшить ее технологические и экологические характеристики. Прежде всего, влияние активации проявляется в повышении проплавляющей способности дуги, что обеспечивает увеличение глубины проплавления в 1,8÷4 раза по сравнению с традиционным способом. Это позволяет выполнять сварку одинаковых толщин на меньших токах и с меньшим тепловложением в сварное соединение. Результаты исследований, приведенные в табл. 4, свидетельствуют, что для однопроходной сварки с полным проплавлением углеродистой стали толщиной 10 мм традиционным способом необходима погонная энергия 24964 Дж/см. Если за счет активации дуги увеличить глубину проплавления в 2 раза, то для однопроходной сварки указанной толщины уже достаточно 9189 Дж/см, а при 3÷4-кратном увеличении глубины проплавления погонная энергия снижается до 4400 Дж/см.

Уменьшение тепловложения в сварное соединение, обеспечиваемое активацией дуги, оказывает положительное влияние на свойства сварных соединений. Результаты механических испытаний (табл. 4) свидетельствуют, что по прочностным характеристикам сварное соединение превосходит основной металл и сварное соединение, выполненное традиционным способом. Кроме этого, ударная вязкость по KCV металла шва, сваренного с активаци-

ей дуги при +20 °С (293 К) составляет 78,7 Дж/см² и при отрицательных температурах (вплоть до –40 °С (233 К) практически не снижается, колеблясь в пределах 70÷75 Дж/см². Ударная же вязкость металла шва, сваренного традиционным способом при –20 °С (253 К) снижается почти в 2 раза по сравнению с +20 °С (293 К).

Как свидетельствуют данные табл. 3, при сварке плавящимся электродом активация дуги обеспечивает резкое снижение сварочного тока и увеличение скорости сварки по сравнению с традиционным процессом. В результате этого уменьшается количество расплавленного металла и интенсивность испарения элементов, входящих в его состав. Это сопровождается снижением вредных выделений окиси хрома в 1,6÷4 раза, а окиси углерода в 1,8÷2,8 раза (табл. 6) по сравнению со сваркой традиционным способом.

Выводы

1. Активация дуги при сварке в защитных газах неплавящимся и плавящимся электродами не только расширяет технологические возможности указанных способов, но и улучшает свойства сварных соединений, а также экологические характеристики указанных процессов сварки.

2. Условия формирования многокомпонентной плазмы при сварке неплавящимся и плавящимся электродами отличаются. Поэтому здесь необходимы дополнительные исследования состава и характеристик плазмы при сварке плавящимся электродом.

Литература

1. *Savitskiy M. M.* The Effect of electrically negative Elements of the Penetration of Steel in Argon ARC Welding / M. M. Savitskiy, G. I. Leskov // USSR National Weldings Comitees, Iiw – 1980. – Doc XII. – P. 1–3.
2. *Paton B. E.* Application of active Fluxes and aktiv Gases to increase efficiency of ARC and Plasma Welding/ B. E. Paton, M. M. Savitskiy, V. S. Gvozdetsky, u. a. // The Paton Weld. Journ. – 2003.– № 5. – P. 2–5.
3. *Явойский В. И.* Роль поверхностных явлений в черной металлургии / В. И. Явойский // Поверхностные явления в металлургических процессах. – М.: Металлургиздат, 1963. – С. 23–24.
4. *Савицкий М. М.* Плотность тока в анодном пятне при сварке обычных и рафинированных сталей / М. М. Савицкий, В. С. Гвоздецкий, В. И. Скрыпник, Н. И. Варенко // Автомат. сварка. – 1979. – № 7. – С. 17–20.
5. *Русанов А. К.* Основы количественного спектрального анализа руд и минералов / А. К. Русанов. – М.: Недра, 1971. – 360 с.
6. *Термодинамические свойства индивидуальных веществ:* в 2-х т. – М.: АН СССР, 1962. – Т. 1. – 1162 с.; Т. 2. – 916 с.
7. *Белов Ю. М.* Свойства короткой аргоновой дуги и ее взаимодействие с плавящимся электродом/ Ю. М. Белов, Г. А. Блохина, В. М. Гольдфарб и др. // Физика и техника низкотемпературной плазмы. – Алма-Ата: А-АГУ, 1970. – С. 31–35.
8. *Куликов И. С.* Термическая диссоциация соединений / И. С. Куликов. – М.: Металлургиздат, 1969. – 574 с.
9. *Самсонов Г. В.* Физико-химические свойства элементов: Справочник / Г. В. Самсонов. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.

Поступила в редакцию
13.10.11