

4. *Кравченко, О. В.* Физико-химические преобразования углеводородных соединений с использованием новых кавитационных устройств / О. В. Кравченко // *Авиац.-космич. техн. и технология.* – 2007. – Вып. 1 (37). – С. 65–69.
5. *Кравченко, О. В.* Получение водорода в процессах гидрокавитационной обработки воды и водосодержащих суспензий и эмульсий / О. В. Кравченко // *Пробл. машиностроения.* – 2007. – Т. 10, № 2. – С. 103–110.
6. *Дискретно-импульсный* ввод энергии в теплотехнологиях / А. А. Долинский, Б. И. Басок, С.И. Гулый. и др. – Киев: Науч. кн., 1996. – 208 с.
7. *Федоткин, И. М.* Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. (Теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Ч.1. / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. – Киев: Полиграфкнига, 1997. – 840 с.
8. *Федоткин, И. М.* Интенсификация процессов смешения диспергирования гидродинамической кавитацией / И. М. Федоткин, И. С. Гулый, В. В. Боровский. – Киев: Артур-А, 1998. – 128 с.
9. *Пат. 79617*, Украина, МПК (2006) С10G 15/00. Способ кавитационной гидрогенизации и гидролиза углеводородов и устройство для его осуществления / И. И. Мирошниченко, Ю. М. Мацевитый, И. И. Мирошниченко, О. В. Кравченко, А. А. Тарелин; заявитель и патентодержатель Ин-т проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины. – № а 2005 00188; заявл. 10.01.2005; опубл. 10.07.07, Бюл. № 10.

Поступила в редакцию 03.2014

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

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

Ключові слова: активация дуги, плавкий электрод, защитный газ, сварка.

УДК 621.789

ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ ЗА СЧЕТ АКТИВАЦИИ ДУГИ

Викладено результати застосування активуючих флюсів при зварюванні плавким електродом в захисних газах. Показано, що активуючі флюси забезпечують збільшення в 2–3 рази глибини проплавлення та підвищення продуктивності зварювання порівняно з традиційним способом. Крім цього, застосування активуючих флюсів забезпечує зменшення погонної енергії зварювання, що позитивно впливає на властивості зварних з'єднань, підвищуючи їх холодостійкість.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития сварки является повышение ее производительности. Об этом свидетельствует возникновение и развитие гибридных сварочных процессов, таких, как лазер-дуга, обеспечивающих повышение производительности сварки и качества сварных соединений. Аналогичная проблема стоит и перед традиционными способами дуговой сварки, что обусловлено подавляющими объемами их применения в различных отраслях производства.

Традиционное решение данной проблемы предполагает увеличение количества металла, наплавляемого в единицу времени [1, 2]. Это обусловлено ограниченной проплавляющей способностью дуги, в результате чего толщины, начиная с 3 мм, рекомендуется сваривать с предварительной разделкой кромок [1–3], которую необходимо заполнять. Поэтому технологи-сварщики стараются увеличивать количество наплавленного металла.

Наиболее простым и доступным путем решения данной задачи при дуговой сварке является увеличение скорости плавления электрода за счет повышения сварочного тока. Однако при этом увеличивается тепловложение в сварное соединение, что даже при сварке низкоуглеродистых сталей, отличающихся высокими показателями свариваемости, может привести к перегреву металла, росту аустенитного зерна и повышению хрупкости сварного соединения [1]. При сварке сталей, склонных к закалке, это сопровождается еще и снижением стойкости к образованию трещин [4]. Следовательно, данное направление имеет существенные ограничения по сварочному току и по области применения.

© А. М. Савицкий, М. М. Савицкий, Ю. Н. Шкрабалуок, 2014

Попытки увеличить производительность сварки за счет добавления железного порошка в обмазку электродов и шихту порошковых проволок дали некоторый положительный результат, однако он весьма ограничен.

При сварке в среде защитных газов увеличение количества наплавленного металла на 8–10% достигается путем уменьшения разбрызгивания.

Попытки решить проблему за счет применения прямой полярности при сварке плавящимся электродом дали весьма ограниченный эффект. Данный способ может применяться при дуговой сварке под флюсом, а при сварке в защитных газах на токах более 140–160 А проволокой диаметром 1,2 мм резко ухудшается перенос капель металла, возрастает разбрызгивание и из-за повышенной пористости резко ухудшается качество сварного соединения.



Рис. 1. Зависимость глубины проплавления (H) от диаметра электродной проволоки (dэ)

Все приведенное выше свидетельствует, что повышение производительности сварки за счет увеличения количества наплавленного металла имеет ограниченные перспективы. Для решения данной задачи требуется принципиально иной подход. Таким направлением является увеличение глубины проплавления. Достичь этого можно путем повышения проплавляющей способности дуги за счет уменьшения диаметра электродной проволоки либо применения активирующих флюсов (активация дуги). Поэтому, с учетом изложенного выше, целью данной работы являлось исследование особенностей влияния диаметра проволоки и активирующих флюсов при сварке плавящимся электродом на глубину проплавления, производительность сварки, погонную энергию сварки и свойства металла сварных соединений.

Основная часть

Увеличение глубины проплавления возможно за счет уменьшения диаметра электрода. В этом случае плотность тока в дуге возрастает, что приводит к повышению ее газодинамического давления на сварочную ванну и, как следствие – увеличению глубины проплавления.

Для оценки влияния диаметра электрода на глубину проплавления целесообразно использовать расчетную методику [2]. Результаты расчетов приведены в табл. 1 и на рис. 1. Данные табл. 1 демонстрирует зависимость плотности сварочного тока от диаметра электрода, а рис. 1 – влияние диаметра электрода на глубину проплавления при сварочном токе 300 А.

Таблица 1. Зависимость плотности тока от диаметра электродной проволоки

Сварочный ток, I, А	Диаметр электродной проволоки, dэ, мм	Плотность тока, j, А/мм²
300	2,0	95
300	1,6	150
300	1,4	195
300	1,2	265
300	1,0	382

Эти данные свидетельствуют, что за счет уменьшения диаметра электродной проволоки можно добиться существенного увеличения глубины проплавления. Однако, как показали результаты экспериментов, практическая реализация данного способа увеличения проплавляющей способности дуги связана с рядом трудностей.

Вторым направлением решения проблемы увеличения проплавляющей способности дуги является активация термохимических реакций в ней. Ее применение при сварке вольфрамовым электродом (АТIG-способ) обеспечило увеличение глубины проплавления в 2–3 раза по сравнению с традиционным способом без изменения сварочного тока. Это позволяет сваривать металл толщиной до 12 мм за один проход без предварительной разделки кромок и присадочной проволоки.

Активирующий флюс, который вводится в зону сварки, инициирует сжатие дуги и повышение плотности тока в ней. В результате повышается концентрация нагрева и увеличивается газодинамическое давление дуги на сварочную ванну, что сопровождается увеличением проплавляющей способности дуги и глубины проплавления [5□7].

Периодически предпринимались попытки применить данный метод при сварке плавящимся электродом. Однако это не дало ожидаемого результата, хотя и наблюдалось некоторое увеличение глубины проплавления. В основном активация дуги при сварке плавящимся электродом в защитных газах применялась для улучшения условий переноса электродного металла, снижения разбрызгивания и улучшения формирования сварных швов.

Исследования, выполненные под руководством М. М. Воропая [8□10], свидетельствуют, что в случае сварки специальными активированными проволоками не менее чем на 30% увеличиваются коэффициенты расплавления проволоки и наплавки. За счет уменьшения поверхностного натяжения измельчаются капли электродного металла и повышается частота их переноса. Уменьшается (до 3□5%) разбрызгивание при сварке в CO₂. Применение активированных проволок улучшает формирование сварных швов, что проявляется в уменьшении высоты их усиления, плавных переходах к основному металлу и отсутствии подрезов.

С учетом полученных результатов сварочные проволоки активировались преимущественно соединениями на основе щелочных и щелочно-земельных металлов, которые уменьшают поверхностное натяжение жидкого металла. Задача увеличения глубины проплавления при сварке плавящимся электродом практически не решалась.

Систематические исследования в направлении увеличения проплавляющей способности дуги при сварке плавящимся электродом начались с 1996 года в ИЭС им. Е. О. Патона. Уже первые результаты исследований в этом направлении показали, что активация дуги позволяет в 2–2,5 раза увеличивать глубину проплавления без увеличения сварочного тока или уменьшать погонную энергию при сварке металла одинаковой толщины. Результаты этих исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние активирующих флюсов на проплавляющую способность дуги и погонную энергию сварки плавящимся электродом в защитных газах

Способ сварки	Проплавляющая способность дуги	δ , мм	I , А	U , В	$V_{св}$, м/ч	Тепловая мощность дуги, q , Вт	Погонная энергия сварки, $q/V_{св}$, Дж/см
традиционный	1	10	550	40□42	25	17325	24964
с активирующим флюсом	2□2,5	10	300	30	30	6750	8103

Если проплавляющую способность дуги при сварке традиционным способом принять за 1, то применение активирующего флюса позволяет увеличить ее в 2□2,5 раза (табл. 2). Поэтому для однопроходной сварки с полным проплавлением металла толщиной 10 мм при традиционном способе необходима погонная энергия 24694 Дж/см. Увеличение проплавляющей способности дуги до 2,5 раз сопровождается снижением погонной энергии, необходимой для сварки металла толщиной 10 мм до 8103 Дж/см.

Обсуждение результатов

Приведенные в табл. 1 и на рис. 1 результаты свидетельствуют об эффективности увеличения проплавляющей способности дуги за счет уменьшения диаметра электродной проволоки. Например, при токе 300 А диаметр электрода 2,0 мм обеспечивает плотность тока 95 А/мм² и глубину проплавления 3,1 мм. Уменьшение диаметра электрода в 2 раза □ до 1,0 мм сопровождается увеличением плотности тока в 4 раза (до 382 А/мм²), а глубины проплавления до 6 мм – практически в 2 раза.

Однако, как показали результаты экспериментов, для достижения сварочного тока 300 А проволоку диаметром 1,0 мм необходимо подавать в зону горения дуги со скоростью 1100□1200 м/час. При таких скоростях подача электрода диаметром 1,0 мм крайне затруднена. Из-за низкой жесткости проволока периодически сминается в канале между механизмом подачи и сварочной горелкой и заклинивает. По мере увеличения длины канала и скорости подачи возрастает вероятность смятия и

заклинивания проволоки в нем, т.е. практическая реализация данного направления увеличения проплавляющей способности дуги и производительности сварки крайне затруднена. С учетом этого дальнейшие исследования в данном направлении были признаны нецелесообразными.

В настоящий момент более перспективны активирующие флюсы.

При традиционном способе сварке в защитных газах для выполнения за один проход сварного соединения толщиной 10 мм необходима погонная энергия 24694 Дж/см (табл. 2). Применение активирующего флюса позволяет увеличить проплавляющую способность дуги в 2,5 раза и уменьшить погонную энергию, необходимую для однопроводной сварки металла толщиной 10 мм до 8103 Дж/см, т.е. в 3 раза. Отличие в интенсивности влияния активирующих флюсов на повышение проплавляющей способности дуги и снижение погонной энергии сварки, как показали результаты исследований, связаны с теплофизическими характеристиками свариваемого металла.

На рис. 2 приведены термические циклы в сварных соединениях, выполненных традиционным способом и с активирующим флюсом. Они свидетельствуют, что применение активирующего флюса при сварке плавящимся электродом способствует сокращению продолжительности пребывания металла сварного соединения в области высоких температур (выше $A_{с3}$ и, следовательно, температуры солидус). А это, как свидетельствуют результаты исследований, приведенных в работах [11–13], положительно влияет на свойства металла сварных соединений.

Данные табл. 2 свидетельствуют, что применение активирующего флюса при однопроводной сварке плавящимся электродом с полным проплавлением обеспечивает повышение скорости сварки с 25 до 30 м/ч, а это увеличение ее производительности. Если сварку металла толщиной 10 мм выполнять традиционным способом с предварительной разделкой кромок, то погонная энергия уменьшится до 8000–10000 Дж/см, но количество проходов со скоростью 25–30 м/ч увеличится до 3–4. Следовательно, производительность сварки с применением активирующих флюсов в этом случае возрастает в 3–4 раза.

На данный момент разработаны активирующие флюсы и техника сварки, которые позволяют увеличивать глубину проплавления в 3 раза по сравнению с традиционным способом, а скорость однопроводной сварки металла толщиной 10 мм до 37–40 м/ч. При этом погонная энергия сварки составляет 4500–5000 Дж/см.

Повышение проплавляющей способности дуги при сварке с активирующим флюсом изменяет условия формирования сварных швов. Швы формируются узкими и глубокими, клинообразной формы (рис. 3). Отношение ширины к глубине (коэффициент формы) в таких швах меньше единицы. Для случая, приведенного на рис. 3, он составляет 0,78.

Такие швы, выполненные традиционными способами сварки, характеризуются минимальной устойчивостью против образования горячих трещин. Однако результаты многочисленных экспериментов свидетельствуют, что при сварке с активацией дуги горячие тре-

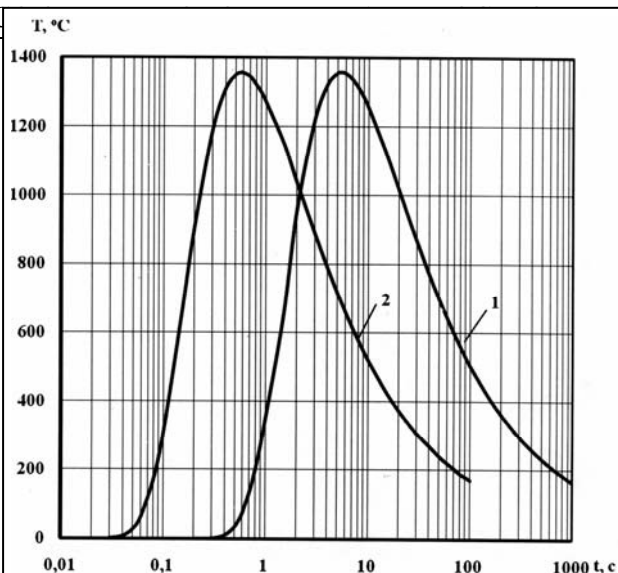


Рис. 2. Термические циклы в сварном соединении при однопроводной сварке металла толщиной 10 мм плавящимся электродом в защитных газах:
1 — традиционным способом на погонной энергии 24694 Дж/см; 2 — с активирующим флюсом на погонной энергии 8103 Дж/см

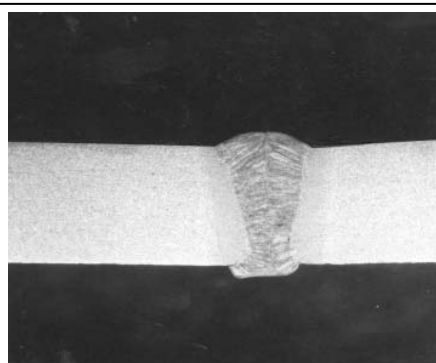


Рис. 3. Макрошлиф однопроходного сварного соединения металла толщиной 10 мм, выполненного плавящимся электродом в защитных газах с активирующим флюсом

щины не образуются.

Накопленный в области сварки углеродистых сталей опыт свидетельствует, что образование горячих (кристаллизационных) трещин тесно связано с тепловым воздействием на металл. Результаты исследований, приведенные в работах [1, 4, 14, 15], свидетельствуют, что склонность металла шва к образованию горячих трещин возрастает по мере увеличения продолжительности его пребывания в твердожидком состоянии или в температурном интервале кристаллизации [1]. Температурные пределы этого интервала зависят от химического состава металла [16], а продолжительность пребывания металла в этом интервале определяется количеством тепла, аккумулированного жидкой сварочной ванной. Количество тепла, которое вводится в сварное соединение, определяется погонной энергией, и чем она больше, тем продолжительнее будет кристаллизация сварочной ванны, и тем больше вероятность образования горячих трещин в шве. Поэтому одним из широко известных методов повышения стойкости сварных соединений против образования горячих трещин является ускорение кристаллизации жидкого металла [1, 4] за счет уменьшения погонной энергии сварки. Это позволяет выдвинуть предположение, что именно уменьшение погонной энергии сварки предотвращает образование горячих трещин в швах при сварке с активирующим флюсом. Однако данный вопрос требует специальных исследований, что является задачей дальнейшей работы.

В табл. 3 приведены результаты механических испытаний металла сварных соединений стали толщиной 10 мм с содержанием углерода 0,22%. Сварка выполнялась без активации дуги и с активацией с полным проплавлением за один проход.

Эти данные свидетельствуют, что наиболее ярко положительное влияние активации дуги проявляется на ударной вязкости металла шва при отрицательных температурах. Так, при температуре испытания +20 °С основной металл имеет максимальное значение ударной вязкости 71,4 Дж/см². По мере снижения температуры испытаний до -30 °С его ударная вязкость постепенно уменьшается до 35,0 Дж/см². При сварке традиционным способом ударная вязкость металла шва составляет 61,0 Дж/см², а при -20 °С снижается почти в два раза до 33,0 Дж/см². С учетом этих данных исследование механических свойств металла зоны термического влияния (ЗТВ) при традиционном способе сварки было признано нецелесообразным.

Таблица 3. Механические свойства сварных соединений, выполненных плавящимся электродом в защитных газах традиционным способом и с активацией дуги

Способ сварки	Участок сварного соединения	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	KCV , Дж/см ²				
				+20 °С	-10 °С	-20 °С	-30 °С	-40 °С
–	Основной металл	349	476	71,4	50,0	37,5	35,0	□
традиционный	Шов	368	569	61,0	□	33,0	□	□
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

Ударная вязкость металла шва, выполненного с активацией дуги, составляет 78,7 Дж/см² при +20 °С. При минусовых температурах она практически не снижается до -40 °С и колеблется в пределах 75,2□70,2 Дж/см². При сварке с активирующим флюсом ударная вязкость металла ЗТВ в температурном интервале испытаний от +20 °С до -20 °С колеблется в пределах 74,0□73,5 Дж/см². При температуре -30 °С она снижается до 55,0 Дж/см² и до 49,0 Дж/см² при -40 °С.

Таким образом, результаты механических испытаний свидетельствуют, что активация дуги повышает холодостойкость металла сварных соединений. Это происходит, как показали результаты проведенных исследований, за счет того, что активация обеспечивает резкое уменьшение погонной энергии сварки, необходимой для выполнения сварных соединений.

Приведенные результаты свидетельствуют, что применение активирующих флюсов при сварке плавящимся электродом в защитных газах, так же, как и при аргоно-дуговой сварке неплавящимся электродом, обеспечивает увеличение производительности сварки при одновременном уменьшении ее энергоемкости и улучшении свойств сварных соединений.

Выводы

1. Активация дуги при сварке плавящимся электродом в защитных газах позволяет увеличить проплавляющую способность дуги и повысить производительность сварки на пониженных токах.
2. По сравнению с традиционным способом применение активирующих флюсов обеспечивает увеличение глубины проплавления в 2–3 раза (при одинаковой погонной энергии) или уменьшение погонной энергии при однопроходной сварке металла одинаковой толщины.
3. Уменьшение погонной энергии сварки, которое достигается за счет активации дуги, способствует сокращению продолжительности пребывания металла сварного соединения в температурном интервале кристаллизации и при температурах выше A_{c3} , что способствует улучшению механических свойств сварного соединения, особенно при минусовых температурах.

Литература

1. Патон, Б. Е. Технология электрической сварки плавлением / Б. Е. Патон. □ М.: Машиностроение, 1974. □ 768 с.
2. Акулов, А. И. Технология и оборудование сварки плавлением / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. □ М.: Машиностроение, 1977. □ 432 с.
3. ГОСТ 14771–76 взамен ГОСТ 14771-69 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. □ 37 с.
4. Макара, А. М. Сварка высокопрочных сталей / А. М. Макара, Н. А. Мосендз. □ К.: Техніка, 1971. □ 140 с.
5. Савицкий, М. М. Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавляющую способность дуги с вольфрамовым катодом / М. М. Савицкий, Г. И. Лесков // Автомат. сварка. – 1980. – № 9. – С. 17–22.
6. Савицкий, М. М. Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами / М. М. Савицкий, Б. Н. Кушниренко, О. И. Олейник // Автомат. сварка. – 1999. □ № 12. – С. 20–28.
7. Савицкий, М. М. Технологии сварки высокопрочных сталей в ракетостроении / М. М. Савицкий // Автомат. сварка. – 1999. □ № 8. – С. 30–36.
8. Воропай, Н. М. Механизированная сварка в CO_2 активированной проволокой диаметром 3...4 мм / Н. М. Воропай, Л. М. Бельфор // Автомат. сварка. □ 1981. □ № 10. □ С. 51–54.
9. Воропай, Н. М. Влияние состава активированной проволоки на характеристики процесса сварки в углекислом газе / Н. М. Воропай, Н. И. Костенюк // Автомат. сварка. □ 1986. □ № 7. □ С. 2–5.
10. Воропай, Н. М. Особенности и технологические возможности процесса сварки в защитных газах активированным плавящимся электродом / Н. М. Воропай // Свароч. пр-во. □ 1994. □ № 4. □ С. 13–19.
11. Особенности структуры и свойств в сварных соединениях, формируемых с термоциклированием / Д. А. Дудко, А. М. Савицкий, В. Г. Васильев, Д. П. Новикова // Автомат. сварка, 1996. □ № 2. □ С. 6–7.
12. Шоршоров, М. Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке / М. Х. Шоршоров, В. В. Белов. □ М.: Наука, 1972. □ 220 с.
13. Физические основы электротермического упрочнения стали / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкардеров, В. И. Трефилов. □ Киев Наук. думка, 1973. □ 336 с.
14. Стеренбоген, Ю. А. Влияние температурного интервала кристаллизации на склонность сталей к образованию кристаллизационных трещин при сварке / Ю. А. Стеренбоген, П. Ф. Петров // Автомат. сварка. □ 1979. □ № 7. □ С. 10–13.
15. Демянцевич, В. П. Металлургические и технологические основы дуговой сварки / В. П. Демянцевич. – М.: Машгиз, 1965. □ 269 с.
16. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. □ М.: Металлургия, 1966. □ 680 с.

Поступила в редакцию 06.07.13