



## ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА НА РАЗМЕРЫ СТЫКОВОГО ШВА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В СМЕСИ $Ar + 25\% CO_2$ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

И. Ф. КОРИНЕЦ, канд. техн. наук, ЦЗИ ЧЖЕНЬ ЧУН, магистр (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Установлена зависимость формы шва от величины зазора при дуговой сварке в смеси  $Ar + 25\% CO_2$  плавящимся электродом бескосного стыкового соединения и разработана детерминированно-статистическая модель формы шва с учетом влияния зазора. Разработанную модель рекомендуется применять при создании программного обеспечения системы адаптивного управления дуговой сваркой стыковых соединений с нестабильным зазором.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, плавящийся электрод, защитная смесь, стыковое бескосное соединение, зазор, размеры шва, математическая модель

Дуговая сварка в углекислом газе и в смеси  $Ar + 25\% CO_2$  находит широкое применение при сварке конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. При сварке металла малых и средних толщин наиболее распространенными являются одно- и двусторонние однопроходные угловые и стыковые швы. Как правило, в этом случае применяют заготовки без скоса кромок, которые на стыковых соединениях собирают с обязательным зазором. Известно, что в стыковых соединениях из листовых и трубных заготовок зазор существенно влияет на размеры и качество формирования шва как при сварке на весу, так и при сварке на подкладке. Стабильный зазор в стыке практически невозможно обеспечить даже при условии высокой точности подготовки кромок и сборки, поскольку в процессе сварки плавлением неизбежны деформации кромок. В этих условиях зазор является одним из основных технологических факторов, влияющих на формирование стыкового шва.

Первые закономерности по влиянию зазора на формирование шва были получены в условиях дуговой сварки под флюсом [1–3]. Эти результаты не потеряли научной и практической ценности до настоящего времени. Однако использовать их непосредственно для дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах не представляется возможным. Ряд исследователей учитывали влияние зазора на форму шва наряду с другими факторами при разработке математических моделей формирования шва, создании расчетных методов определения и оптимизации режима дуговой сварки в углекислом газе [4–6]. Другие данные о влиянии зазора на форму шва в условиях дуговой сварки в защитных газах плавящимся электродом нами не обнаружены. Однако в настоящее время в связи с созданием адаптивных систем управления дуговой сваркой, которые должны реагировать в режиме реального времени на случайные отклонения подготовки кромок, в том числе на отклонения зазора в стыке, исследования по влиянию зазора

на формирование шва не потеряли своей актуальности.

Поэтому цель работы — исследование влияния зазора на формирование шва при дуговой сварке в смеси  $Ar + 25\% CO_2$  плавящимся электродом и разработка математической модели формы шва с зазором в стыке.

**Разработка детерминированно-статистической модели формы шва.** Математическая модель формы шва должна устанавливать зависимость размеров стыкового шва ( $h$  — глубина проплавления,  $e$  — ширина шва,  $g$  — высота выпуклости шва) и его формы ( $\psi_{II}$  — коэффициент формы проплавления,  $\psi_{III}$  — коэффициент формы валика) от параметров режима сварки ( $d$  — диаметр электродной проволоки,  $I$  — сварочный ток,  $v$  — скорость сварки,  $v_{II}$  — скорость подачи электродной проволоки,  $U$  — напряжение сварки,  $L$  — вылет электродной проволоки,  $q$  — расход и состав защитного газа) и величины зазора  $b$  (рис. 1).

Известно, что параметры сварки в различной степени влияют на размеры и форму шва. В наименьшей мере на размеры шва влияет расход защитного газа и вылет электродной проволоки, который поддерживают постоянным и равным  $L = 10d$ . Сварочный ток и скорость подачи электродной проволоки являются зависимыми между собой параметрами и поэтому один из них можно

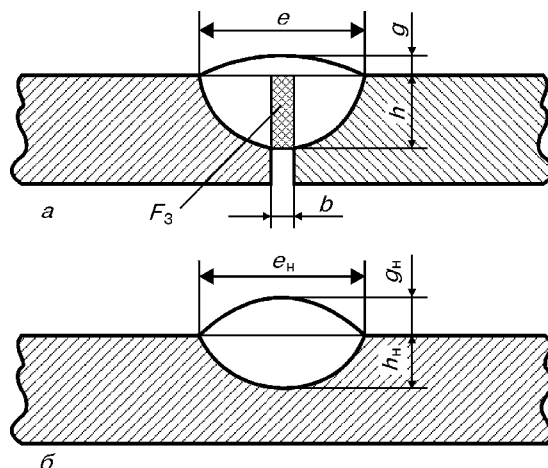


Рис. 1. Размеры стыкового шва (а) и наплавленного валика (б)



исключить, например, скорость подачи электродной проволоки. Если учесть то обстоятельство, что в мировой практике преимущественно находят применение электродные проволоки диаметром 1,0 и 1,2 мм, то на первом этапе исследования влияние диаметра электродной проволоки на форму шва можно также исключить из рассмотрения. Напряжение сварки существенно влияет на ширину шва. Однако оптимальная величина напряжения связана со сварочным током и не изменяется в широком пределе. Если принять, что оптимальное напряжение зависит от сварочного тока, то его влияние на форму шва будет автоматически учитываться в модели через сварочный ток. Этот анализ дает основание для уменьшения в модели количества параметров режима сварки, которые оказывают влияние на формирование шва, т. е. учета прежде всего сварочного тока и скорости сварки.

Для решения поставленной задачи применяем предложенный в работе [7] метод детерминированно-статистического моделирования, при котором зависимость размеров шва от параметров сварки и величины зазора представляются в виде произведения степенных функций, а коэффициенты определяются в результате статистической обработки экспериментальных данных.

Выполненные исследования позволяют предложить несколько вариантов моделей, которые отличаются различным представлением зависимости размеров шва от зазора. В первом варианте модели зависимость размеров шва от зазора имеет вид степенной функции:

$$h = 0,595 \frac{I^{0,531}}{V^{0,486}} b^{0,176}, \quad (1)$$

$$e = 0,069 \frac{I^{1,051}}{V^{0,324}}, \quad (2)$$

$$g = 1,465 \frac{I^{0,295}}{V^{0,679}} \frac{1}{b^{0,129}}. \quad (3)$$

Однако в случае нулевого зазора в стыке и при наплавке глубина проплавления и высота выпуклости равняются нулю, что противоречит реальному процессу. Обращает на себя внимание выражение (2), показывающее, что ширина шва от зазора не зависит.

Во второй модели отсутствует недостаток первого варианта модели:

$$h = 0,042 \frac{I^{0,950}}{V^{0,496}} (1 + b)^{0,658}, \quad (4)$$

$$g = 1,047 \frac{I^{0,413}}{V^{0,638}} \frac{1}{(1 + b)^{0,453}}. \quad (5)$$

Возможен и третий вариант модели, в котором зависимость размеров шва от зазора представляется в виде показательной функции:

$$h = 0,020 \frac{I^{1,094}}{V^{0,409}} 1,284^b, \quad (6)$$

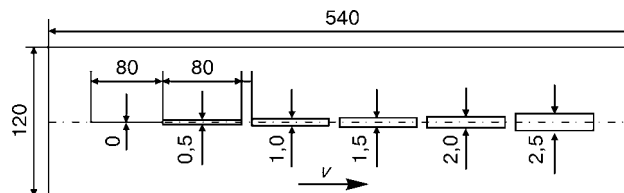


Рис. 2. Образец-имитатор стыкового соединения с переменным зазором

$$g = 1,062 \frac{I^{0,469}}{V^{0,778}} 0,692^b. \quad (7)$$

**Проверка адекватности моделей.** Определение коэффициентов в уравнениях (1)...(7) и проверка адекватности моделей выполнена при сварке серии образцов-имитаторов стыкового соединения с зазором (рис. 2). Образцы-имитаторы из стали ВСтЗсп представляли собой пластины толщиной 5 мм, в которых фрезой прорезаны щели со ступенчатым изменением зазора. Небольшая длина прорезей и наличие перемычек между ними гарантируют стабильность зазора. Дуговую сварку в смеси  $Ag + 25\% CO_2$  выполняли омедненной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Режим сварки изменяли в следующих пределах: сварочный ток — 140, 180 и 220 А, напряжение сварки — 24, 26 и 27 В, скорость сварки — 5,7, 7,6, 10,2, 12,8, 15,0 и 17,6 мм/с, расход смеси — 10...12 л/мин. Сварку выполняли на медной подкладке. При зазоре 2,5 мм на всех режимах дуга погружалась в зазор и не было получено качественного формирования шва. После сварки были вырезаны поперечные темплеты, протравлены и выполнены обмеры швов. Результаты расчетных и экспериментальных данных по третьей модели представлены на рис. 3.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что средняя относительная погрешность при определении глубины проплавления составила 10, 7,2 и 6,9 % соответственно по 1-й, 2-й и 3-й модели, выпуклости шва — соответственно 6,9, 5,9 и 5,7 % и ширины шва — 8 % для всех моделей. Наиболее высокую точность дает 3-я модель.

**Обсуждение результатов.** В рассматриваемых условиях сварки можно выделить три варианта формирования соединения: с выпуклым швом; с вогнутым швом и со швами, имеющими непровары кромок. В первом случае имеет место стабильный процесс сварки с частично погруженной в основной металл дугой. Во втором также наблюдается стабильный процесс, но с дугой, полностью погруженной в основной металл. Зазор не заполняется наплавленным металлом. В третьем случае дуга полностью погружена в основной металл, процесс сварки нестабильный, дуга хаотично перемещается по толщине металла вверх-вниз и перескакивает с одной кромки на другую. Формирование шва не происходит.

Результаты исследований подтверждают существенное влияние зазора на глубину проплавления. Так, глубина проплавления при зазоре 2 мм может превышать глубину проплавления при наплавке



$h, e, g, \text{ мм}$

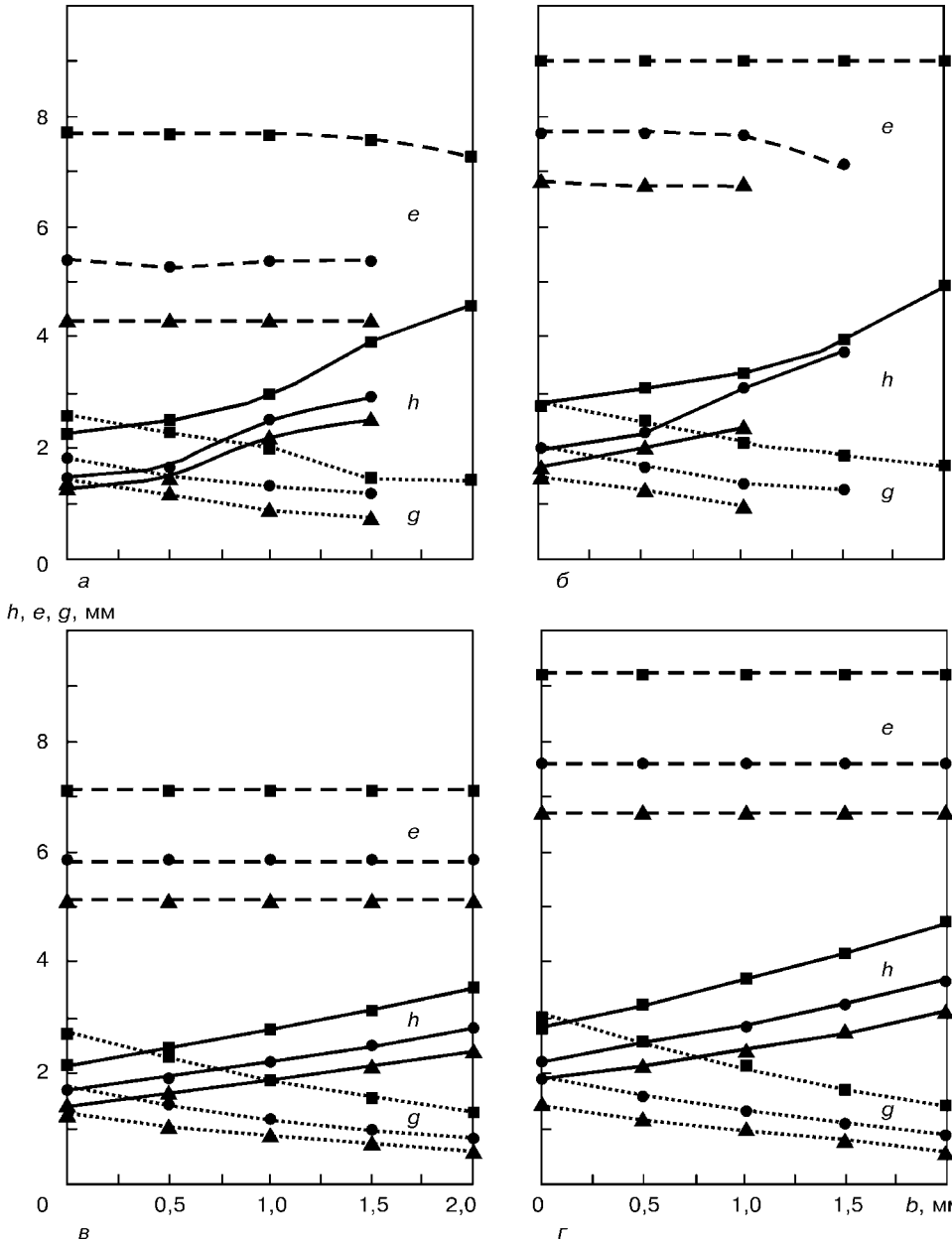


Рис. 3. Влияние зазора и режима дуговой сварки в  $\text{Ar} + 25\% \text{CO}_2$  на размеры шва: а, б — экспериментальные данные при  $I = 140$  и  $180 \text{ А}$ ; в, г — расчетные при  $I = 140$  и  $180 \text{ А}$ ; ■  $v = 5,7$ ; ● —  $10,2$ ; ▲ —  $15,0 \text{ мм/с}$

(стык без зазора) в 2 раза (рис. 3). С увеличением зазора выпуклость шва снижается и при больших зазорах переходит на вогнутость. Ширина шва практически не зависит от зазора до тех пор, пока не происходит полное погружение дуги в основной металл. В случае погружения дуги в основной металл ограничиваются блуждающие отклонения дуги, холодный металл ее сжимает, и ширина шва уменьшается. На погружение дуги в зазор, очевидно, оказывают влияние соотношения между длиной дуги и величиной зазора, что должно быть предметом дальнейших исследований.

При создании расчетных методов определения режима сварки представляет интерес зависимость между размерами шва при сварке стыка с зазором и размерами валика при наплавке (см. рис. 1). Так, зависимости между фактическими размерами шва  $h$  и  $g$  с учетом величины зазора  $b$  и размерами валика при наплавке  $h_{\text{н}}$  и  $g_{\text{н}}$  имеют вид

$$h = h_{\text{н}} + 0,8b^{1,024}, \quad (8)$$

$$g = g_{\text{н}} - 0,5b^{0,9}, \quad (9)$$

или с учетом площади заполнения зазора  $F_3$  наплавленным металлом (см. рис. 1):

$$h = h_{\text{н}} + 0,4(bh)^{0,844}, \quad (10)$$

$$g = g_{\text{н}} - 0,382(bh)^{0,486}. \quad (11)$$

### Выводы

1. При дуговой сварке в защитных газах плавящимся электродом зазор является одним из наиболее существенных технологических факторов, оказывающих влияние на глубину проплавления и высоту выпуклости (вогнутости) стыкового шва. Ширина шва не зависит от величины зазора при неполном погружении дуги в основной металл.



2. Разработана математическая модель формы бескосного стыкового шва с учетом величины зазора. Показана целесообразность учета в модели двух основных параметров сварки: сварочного тока и скорости сварки.

3. Разработанная модель может применяться при создании программного обеспечения системы адаптивного управления дуговой сваркой стыковых соединений с нестабильным зазором.

4. Целесообразно продолжить исследования поведения дуги в зазоре и найти оптимальное соотношение между длиной и напряжением дуги и величиной зазора в стыке.

1. *Островская С. А.* Сварка стыковых швов без разделки кромок с обязательным зазором // Автомат. сварка. — 1950. — № 2. — С. 2–8.

Dependence of the shape of the weld upon the size of the gap in MIG square butt welding in the Ar + 25 % CO<sub>2</sub> mixture was established, and the deterministic-statistical model of the weld shape, allowing for the gap effect, was developed. The model is recommended for development of software for the system of adaptive control of arc butt welding of joints with the unstable gap.

2. *Донченко В. Ф.* Влияние зазора в стыке на размеры поперечного сечения стыкового шва при автоматической сварке под флюсом // Свароч. пр-во. — 1964. — № 9. — С. 24–27.
3. *Донченко В. Ф.* Обоснование параметров режима автоматической сварки под флюсом стыковых соединений по зазору // Там же. — 1965. — № 5. — С. 25–28.
4. *Дубовецкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О. Г.* Оптимизация режима сварки в CO<sub>2</sub> // Автомат. сварка. — 1980. — № 12. — С. 30–34.
5. *Бабкин А. С., Кривошея В. Е.* Разработка алгоритма расчета параметров режима сварки в углекислом газе на микро-ЭВМ // Свароч. пр-во. — 1985. — № 4. — С. 3–5.
6. *Попков А. М.* Расчет параметров шва при сварке в углекислом газе стыковых бескосных соединений // Там же. — 1986. — № 9. — С. 21–22.
7. *Корищев И. Ф., Цзи Чжэнь Чуи.* Детерминированно-статистическая модель формы шва при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 1–7.

Поступила в редакцию 27.09.2001

## УКРАИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ВАГНОСТРОЕНИЯ

*Главная научная организация в Украине по проблемам подвижного состава магистрального и ведомственного железнодорожного транспорта, стандартизации продукции этой отрасли, орган по сертификации продукции вагоностроения и вагонного литья. В структуре института — единственный в Украине испытательный центр, аккредитованный на право проведения сертификационных испытаний как в системе УкрСЕПРО, так и системе сертификации продукции железнодорожного транспорта МПС Российской Федерации. Проводит работы и по диагностированию грузовых и пассажирских вагонов эксплуатационного парка с целью продления срока их службы.*

*С 2000 г. институт возглавляет Анатолий Владимирович Донченко — кандидат технических наук, номинант издания «Золотая книга деловой элиты Украины», награжден в 2002 г. Грамотой Кабинета Министров Украины. Научные работники организации плодотворно работают над созданием новых пассажирских вагонов европейского уровня, в том числе для скоростных поездов; вагонов электро- и дизель-поездов, метро и трамваев; вагонов типа «Восток-Запад», предназначенных для беспрепятственной перевозки пассажиров и грузов между странами СНГ и Европы. Институт имеет для этого современную экспериментальную базу, в том числе скоростную вагон-лабораторию (до 200 км/ч), высококвалифицированный персонал, уникальный многолетний опыт в области вагоностроения.*

**Мы стремимся найти партнеров для эффективного сотрудничества в области создания конкурентоспособной продукции для железнодорожного транспорта.**

Наш адрес: 39621, г. Кременчуг, ул. И. Приходько, 33  
тел.: (05366) 623-32, факс: (05366) 6-10-36