

УДК 621.791.754.6

СИНТЕЗ ДЕТЕРМИНИРОВАННО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМЫ ШВА ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

В.В. Мюллер^{1,2}, К.Н. Омеляненко³

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²ООО «Велдинг Групп Самара»
Россия, 443070, г. Самара, ул. Дзержинского, 46Д

³ООО «ГК Инфопр»
Россия, 443063, г. Самара, ул. Нововокзальный тупик, 21/36

Приведены результаты исследования существующих детерминированно-статистических моделей формы шва при дуговой сварке. На основе существующих моделей были синтезированы модели формы шва, учитывающие специфические параметры режима аргонодуговой сварки. При экспериментальной проверке с применением метода регрессивного анализа были выявлены статистические коэффициенты моделей. Анализ погрешности моделей позволяет сделать вывод о возможности их использования в реальном сварочном производстве.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, неплавящийся электрод, дуговой промежуток, математическая модель, высокопрочный стальной сплав 30ХГСН2А-ВД, форма сварного шва, размеры сварного шва.

Введение

В современном сварочном производстве широко распространена аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. Но на сегодняшнем этапе развития сварочного производства не решена проблема воспроизводимости качественных характеристик сварного шва. Для решения указанной проблемы необходимо получить математические инструменты, учитывающие влияние на формообразование сварного шва не только режима сварки, но и значительного возмущения, такого как изменение длины дугового промежутка.

Целью данной работы является синтез детерминированно-статистических математических моделей формы сварного шва, полученных при автоматической аргонодуговой сварке стали 30ХГСН2А-ВД и учитывающих возмущения процесса сварки, которые не носят динамического характера. Синтезируемые математические модели в дальнейшем послужат основой для построения динамических моделей сварного шва.

В связи с тем, что на современном этапе технического развития промышленности получены многочисленные результаты по моделированию формы шва при дуговой сварке, в данной работе необходимо произвести выбор уже существующей модели, адаптировать ее под аргонодуговую сварку неплавящимся

Виктор Викторович Мюллер, аспирант кафедры «Автоматика и управление в технических системах», главный сварщик ООО «Велдинг Групп Самара».

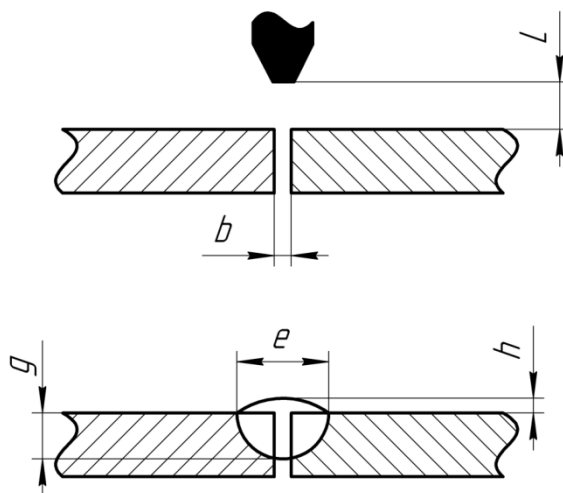
Константин Николаевич Омеляненко (к.т.н.), старший специалист ООО «ГК Инфопр».

вольфрамовым электродом с учетом особенности сварки стали, а затем синтезировать метод математического моделирования.

Анализ моделей формы сварного шва

При исследовании процесса формирования шва учитывалось влияние следующих параметров режима сварки: I – сила сварочного тока; U – напряжение на дуге; L_d – длина дуги ($L_d = L_d + f_d$, где f_d – возмущающие воздействия по длине дуги, вызванные особенностями конструкции свариваемых изделий); V – скорость сварки; $V_{\text{пн}}$ – скорость подачи присадочной проволоки; $d_э$ – диаметр вольфрамового электрода; $d_{\text{пн}}$ – диаметр присадочной проволоки.

Для получения аналитических зависимостей формы шва и математической модели обозначим размеры поперечного сечения сварного шва (см. рисунок): e – ширина сварного шва, h – высота сварного шва, g – глубина проплавления.



Размеры собранного под сварку соединения и сварного шва:

b – зазор, L – величина дугового промежутка (длина дуги), e – ширина сварного шва, g – глубина проплавления, h – высота сварного шва

В последнее время разработаны и широко применяются детерминированно-статистические модели формы шва для механизированной сварки в защитных газах плавящейся присадочной проволокой [1–4].

В работе [1] приведено теоретическое обоснование необходимости применения подобных математических инструментов и разработаны три модели для сварки плавящейся электродной проволокой в CO_2 . Для проволоки диаметром 2 мм модели имеют вид:

– Модель М1:

$$h = 0,07 \frac{I^{1,415}}{d_{\text{пн}}^{0,337} U^{0,262} V^{0,289}}, \quad (1)$$

$$e = 0,063 \frac{d_{\text{пн}}^{0,020} I^{0,297} U^{1,513}}{V^{0,812}}, \quad (2)$$

$$g = 0,954 \frac{I^{1,141}}{d_{\text{ш}}^{0,593} U^{1,251} V^{0,399}}. \quad (3)$$

– Модель М2:

$$h = 0,007 \frac{I^{1,444}}{U^{0,339} V^{0,342}}, \quad (4)$$

$$e = 0,313 \frac{I^{0,082} U^{1,453}}{V^{0,886}}, \quad (5)$$

$$g = 0,609 \frac{I^{0,792}}{U^{0,649} V^{0,401}}. \quad (6)$$

- Модель М3:

$$h = 0,005 \frac{I^{1,308}}{V^{0,398}}, \quad (7)$$

$$e = 0,354 \frac{U^{1,554}}{V^{0,889}}, \quad (8)$$

$$g = 0,410 \frac{I^{1,499}}{V^{0,469}}. \quad (9)$$

Авторы работы [2] продолжили и вывели универсальные модели, учитывающие влияние зазора на форму шва при сварке плавящимся электродом в смеси газов Ar + 25 % CO₂:

– Модель 1:

$$h = 0,595 \frac{I^{0,531}}{V^{0,486}} b^{0,176}, \quad (10)$$

$$e = 0,069 \frac{I^{1,051}}{V^{0,324}}, \quad (11)$$

$$g = 1,465 \frac{I^{0,295}}{V^{0,679}} \frac{1}{b^{0,129}}. \quad (12)$$

– Модель 2:

$$h = 0,042 \frac{I^{0,950}}{V^{0,496}} (1+b)^{0,658}, \quad (13)$$

$$g = 1,047 \frac{I^{0,413}}{V^{0,638}} \frac{1}{(1+b)^{0,453}}. \quad (14)$$

– Модель 3:

$$h = 0,020 \frac{I^{0,094}}{V^{0,409}} 1,284^b, \quad (15)$$

$$g = 1,062 \frac{I^{0,409}}{V^{0,778}} 0,692^b. \quad (16)$$

Из данных моделей была получена [3] адаптированная модель для сварки с управляемым каплепереносом в смеси газов $Ar + 30\% CO_2$, осуществляемым за счет импульсной подачи присадочной электродной проволоки:

$$h = \frac{I^{3,752} U^{3,245} f^{-0,53} 1,373^b}{L^{4,439} V^{2,383}}, \quad (17)$$

$$e = \frac{I^{3,597} U^{3,828} f^{-0,278} 0,69^b}{L^{4,614} V^{2,344}}, \quad (18)$$

$$g = \frac{I^{4,353} U^{4,65} f^{-0,579} 0,616^b}{L^{5,659} V^{2,845}}, \quad (19)$$

где L – расстояние между захватами механизма подачи электродной проволоки;

f – частота импульсного перемещения проволоки.

Впоследствии [4] данные модели приняли вид:

$$h = 0,0034 \frac{I^{0,942} U^{0,045} f^{0,29} 1,373^b}{V^{0,09}}, \quad (20)$$

$$e = 0,015 \frac{I^{0,679} U^{0,71} f^{0,298} 0,69^b}{V^{0,134}}, \quad (21)$$

$$g = 0,025 \frac{I^{0,95} f^{0,125} 0,616^b}{U^{0,23} V^{0,194}}. \quad (22)$$

Синтез математической модели

При адаптации существующих моделей к аргонодуговой сварке неплавящимся электродом необходимо включить в них специфические параметры режима сварки и учесть влияние режима на форму сварного шва.

Для модели высоты сварного шва (23) в числитель модели необходимо поместить скорость подачи присадочной проволоки ($V_{\text{пн}}$) и диаметр присадочной проволоки ($d_{\text{пн}}$), т. к. при увеличении этих параметров высота сварного шва растет. В знаменатель следует поместить скорость сварки (V), диаметр вольфрамового электрода (d_3), силу сварочного тока (I) и длину дуги ($L_{\text{д}}$), т. к. с увеличением этих параметров высота шва падает:

$$h = \frac{V_{\text{пн}}^x d_{\text{пн}}^y}{V^o d_3^e I^j L_{\text{д}}^n}. \quad (23)$$

В модели ширины сварного шва (24) параметры силы сварочного тока (I) и длины дуги ($L_{\text{д}}$) следует поместить в числитель – с их увеличением возрастает ширина шва:

$$e = \frac{I^j L_d^n V_{\text{пн}}^x d_{\text{пн}}^y}{V^o d_3^e} \quad (24)$$

Для модели глубины проплавления (25) величину длины дуги (L_d) необходимо поместить в знаменатель – при ее увеличении происходит резкое падение глубины проплавления:

$$g = \frac{I^j V_{\text{пн}}^x d_{\text{пн}}^y}{V^o d_3^e L_d^n} \quad (25)$$

В ходе проверки адекватности данных моделей из накопленных экспериментальных данных будут определены числовые значения коэффициентов x, y, o, e, j и n .

Проверка адекватности моделей

Сварка производилась на автомате для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом кольцевых швов УСК-400 с подачей присадочной проволоки Св18ХМА диаметром 3 мм. В качестве источника питания был использован EWM Tetrix 451 AC/DC Synergic FW.

Для проведения эксперимента были изготовлены трубные образцы диаметром 108 и толщиной 9 мм, которые сваривались с изменением силы сварочного тока (I), длины дугового промежутка (L_d), скорости сварки (V) и скорости подачи присадочной проволоки ($V_{\text{пн}}$) в следующем порядке:

Опыт № 1: $I = 155$ А, $L_d = 3$ мм, $V = 2,78$ мм/с, $V_{\text{пн}} = 6$ мм/с, $d_3 = 2,5$ мм, $d_{\text{пн}} = 3$ мм;

Опыт № 2: $I = 185$ А, $L_d = 3$ мм, $V = 2,78$ мм/с, $V_{\text{пн}} = 6$ мм/с, $d_3 = 2,5$ мм, $d_{\text{пн}} = 3$ мм;

Опыт № 3: $I = 215$ А, $L_d = 3$ мм, $V = 2,78$ мм/с, $V_{\text{пн}} = 6$ мм/с, $d_3 = 2,5$ мм, $d_{\text{пн}} = 3$ мм;

Опыт № 4: $I = 215$ А, $L_d = 5$ мм, $V = 2,78$ мм/с, $V_{\text{пн}} = 6$ мм/с, $d_3 = 2,5$ мм, $d_{\text{пн}} = 3$ мм;

Опыт № 5: $I = 215$ А, $L_d = 7$ мм, $V = 2,78$ мм/с, $V_{\text{пн}} = 6$ мм/с, $d_3 = 2,5$ мм, $d_{\text{пн}} = 3$ мм;

Опыт № 6: $I = 215$ А, $L_d = 3$ мм, $V = 4,2$ мм/с, $V_{\text{пн}} = 6$ мм/с, $d_3 = 2,5$ мм, $d_{\text{пн}} = 3$ мм;

Опыт № 7: $I = 215$ А, $L_d = 3$ мм, $V = 4,2$ мм/с, $V_{\text{пн}} = 9$ мм/с, $d_3 = 2,5$ мм, $d_{\text{пн}} = 3$ мм.

Во время опытов 3, 4 и 5 были произведены замеры величины напряжения дуги (12,5 В; 14,5 В и 15,5 В соответственно).

Геометрические размеры сварного шва определялись в среде программного обеспечения «Компас 3D-V13» по методу, изложенному в работе [5].

Ниже приведены (26), (27) и (28) модели формы сварного шва, полученные после статистической обработки экспериментальных данных методом регрессивного анализа с помощью ПО Microsoft Excel и ПО Matlab Simulink.

$$h = \frac{V_{\text{пн}}^{1,465} d_{\text{пн}}^{0,92}}{V^{1,9} d_3^{0,078} I^{0,12} L_d^{0,05}}, \quad (26)$$

$$e = \frac{I^{0,584} L_d^{0,433} V_{\text{пн}}^{0,095} d_{\text{пн}}^{0,010}}{V^{0,832} d_3^{0,782}}, \quad (27)$$

$$g = \frac{I^{0,659} V_{\text{пш}}^{0,247} d_{\text{пш}}^{0,02}}{V^{0,851} d_3^{2,587} L_d^{0,415}}. \quad (28)$$

Наиболее хорошее совпадение расчетных и экспериментальных размеров швов дает модель по высоте сварного шва (26). Среднее значение относительной погрешности составляет 6,45 %.

Среднее значение относительной погрешности модели по ширине сварного шва (27) составляет 7,27 %.

Наибольшее среднее значение относительной погрешности показывает модель по глубине проплавления (28) – 11,8 %.

Анализ полученных моделей в форме степенных выражений показывает, что они отражают детерминированные зависимости размеров шва от основных режимов аргонодуговой сварки и не противоречат существующим представлениям о формировании шва. Комбинируя параметры режима в моделях, можно получить зависимости, отражающие сущность физических процессов с хорошей точностью.

Выводы

1. Синтезированы детерминированно-статистические математические модели взаимосвязи геометрических размеров шва и основных режимов сварки, учитывающие возмущение по длине дуги, которое влияет на процесс формирования сварочного шва.

2. Средняя погрешность моделей составила 8 %, что позволяет применять их в условиях реального сварочного производства для прогнозирования формы шва.

3. Полученные результаты послужат исходными данными для создания системы автоматической стабилизации процесса ручной аргонодуговой сварки по длине дугового промежутка и системы предварительного моделирования формы шва.

4. Целесообразно продолжить исследования на предмет влияния величины зазора на форму сварного шва, а также получить модели для сварки с импульсной подачей энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коринец И.Ф., Цзи Чжень Чун.* Детерминированно-статистическая модель формы шва при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 2001. – № 10. – С. 44–50.
2. *Коринец И.Ф., Цзи Чжень Чун.* Влияние зазора на размеры стыкового шва при дуговой сварке в смеси Ag+CO₂ плавящимся электродом // Автоматическая сварка. – 2002. – № 8. – С. 16–19.
3. *Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А.* Детерминированно-статистическая модель формы шва // Сварка и диагностика. – 2011. – № 6. – С. 31–35.
4. *Павлов Н.В.* Применение методов математического моделирования для определения технологических параметров процесса сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси защитных газов: Автореф. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2012. – 20 с.
5. *Крамтит А.Г., Крамтит Н.Ю.* Методика определения геометрических размеров и площади сварного шва // Сварочное производство. – 2012. – № 10. – С. 40–42.

Статья поступила в редакцию 7 июня 2017 г.

SYNTHESIS OF DETERMINATED-STATISTICAL MODELS FORM OF A WELDED SEAM FOR ARGON-ARC WELDING WITH A NON-CONSUMABLE ELECTRODE

V.V. Myuller^{1,2}, K.N. Omelyanenko³

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

² Welding Group Samara, LLC
46D, Dzerzhinskogo st., Samara, 443070, Russian Federation

³ GC Infopro, LLC
21/36, Novovokzalnii typik st., Samara, 443063, Russian Federation

In this article, a study is made of the existing deterministic-statistical models of the shape of a weld during arc welding. On the basis of existing models, seam shape models have been synthesized that take into account specific parameters of the argon-arc welding regime. Under experimental verification, using the regression analysis method, statistical coefficients of the models were revealed. An analysis of the error in the models allows us to conclude that they can be used in real welding production.

Keywords: Argon-arc welding, non-consumable electrode, arc gap, mathematical model, high-strength steel alloy 30XГСН2А-ВД, form of a welded seam, sizes of a welded seam.