

УДК 621.791.754.6

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМЫ СВАРНОГО ШВА ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

К.Н. Омеляненко³, В.В. Мюллер^{1,2}

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

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

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

Проведены исследования существующих динамических моделей формы шва при дуговой сварке, используемых при построении алгоритмов автоматического управления. На основе проведенных исследований синтезированы модели формы шва при аргонодуговой сварке, учитывающие динамический характер протекания процесса сварки в реальном времени. При экспериментальной проверке выполнено сравнение переходных процессов детерминированно-статистических моделей и динамических моделей с аperiodическим звеном первого порядка. Анализ погрешности моделей по времени позволяет сделать вывод о возможности их использования для прогнозирования процесса сварки в условиях реального сварочного производства.

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

Введение

Данная статья является логическим завершением разработки математического инструмента прогнозирования формы шва при аргонодуговой сварке, начатой в работе [1], так как модели, полученные методом регрессионных зависимостей, не учитывают изменения формы проплавления сварного шва во времени.

Целью данного этапа разработки является получение моделей формы шва, учитывающих динамический характер протекания процесса сварки в реальном времени.

Динамические математические модели связи геометрических характеристик сварного шва с параметрами процесса сварки получают, используя методы расчета тепловых процессов при сварке или экспериментально [2]. Эти модели обычно представляют собой уравнения связи геометрических характеристик поперечного сечения сварного шва с параметрами процесса сварки, которые делятся на контролируемые fK и неконтролируемые возмущения fH , а также управляющие параметры u . Контролируемые возмущения и управляющие параметры обычно объединяют и называют вектором режима $R = u \cup fK$ [3]. Контролируемые возмущения, т. е. параметры сварочного процесса, измеряемые непосред-

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

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

ственно в ходе сварки, для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом, как правило, включают скорость сварки, напряжение дуги и толщину свариваемого материала. В качестве управляющего параметра, т. е. параметра, который в ходе процесса может быть целенаправленно изменен, используют сварочный ток, длину дуги или скорость сварки [4–7].

Неконтролируемые возмущения включают не поддающиеся непосредственному измерению изменения характеристик сварочного источника нагрева и свариваемого материала. В основном это возмущения, связанные с изменениями геометрии электрода, расхода и свойств защитного газа, эффективного КПД, степени распределенности сварочного источника теплоты, а также отклонениями от номинальных значений теплофизических коэффициентов свариваемого материала [8]. Также неконтролируемые возмущения возникают при изменениях вектора режима [9].

Анализ связей геометрических размеров сварного шва с параметрами режима сварки, используемыми при построении алгоритмов автоматического управления

Наиболее перспективными для построения алгоритмов управления являются аналитические методы решения модельных задач распространения теплоты в телах различной формы. Эти модели позволяют учесть действие неконтролируемых возмущений и обладают достаточной точностью при учете нескольких ограничений [10]. Первые аналитические модели распределения температуры для подвижного источника теплоты в модельных телах были получены еще в середине XX века Н.Н. Рыкалиным [11]. Исходя из набора входных данных эти модели позволяют сравнительно быстро построить изотерму плавления, на основе которой возможно определить ширину и глубину шва. Погрешность точности расчета по этой чисто теплопроводной модели может превышать 30 % за счет неучтенности непостоянности термических свойств сварного узла и пренебрежения явлением течения жидкого металла в сварочной ванне. Главным недостатком этой модели является фиксированный коэффициент формы шва: отношение ширины (e_1) к глубине проплавления (h_1) – $e_1/h_1 = 2$.

В работах отечественных авторов Н.Н. Рыкалина, В.А. Петруничева и американских ученых А. Ньюнза, К. Цая, Т. Игера аналитическая теория была развита, но наиболее полно – для распределенных источников теплоты. В работе [9] предложена модель с объемным источником теплоты с гауссовым распределением, которое соответствует реальному распределению, создаваемому дугой в зоне сварки. Модель с распределенным источником нагрева (электрической дуги) наилучшим образом подходит для разработки алгоритмов автоматической стабилизации, так как она детально разработана, достаточно точна, не обладает существенной зависимостью от предварительных эмпирических данных и предусматривает возможность изменения отношения ширины сварочной ванны к ее глубине [12]. Аналитическое решение в работе [9] доведено до выражения (1), по которому рассчитывают безразмерную температуру $\theta = (T - T_0)/(T_{пл} - T_0)$, где T – расчетная температура, T_0 – начальная температура, T_0 – температура плавления:

$$\theta(X, Y, Z) = \frac{n}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{v^2 t} \frac{t^{-\frac{1}{2}}}{t + u^2} \exp\left(-\frac{X^2 + YY^2 + 2X \times Xt}{2(t + u^2)} + \frac{ZZ^2}{2t}\right) dt. \quad (1)$$

В выражении:

$$n = QV / [4\pi a^2 \rho c (T - T_0)];$$

$$Q = IU\eta;$$

$$XX = (V / 2a) \times (X - Vt);$$

$$YY = (V / 2a)Y;$$

$$ZZ = (V / 2a)Z;$$

$$u = V\sigma 2a,$$

где X, Y, Z – пространственные координаты;

t – текущее время;

σ – коэффициент распределенности теплового потока;

V – объем пластины;

a – коэффициент теплопроводности материала;

τ – число Фурье;

p – оператор Лапласа;

η – эффективный КПД процесса;

c – теплоемкость.

Характерной особенностью приведенной модели является то, что основными параметрами теплового источника являются безразмерные величины u и n : u определяет степень распределенности источника теплоты, а n – величину тепловложения. В этой же работе приведены характерные значения u и n для широкого диапазона технологических процессов сварки и различных материалов, например для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом без присадочной проволоки нержавеющей стали $u = 0,1 - 1$, $n = 0,5 - 4$, а величина σ изменяется от 1,6 до 4 мм.

Изменение параметров режима процесса сварки существенно влияет на характеристики дуги и на размеры шва. Повышение напряжения увеличивает количество тепла, поступающего в сварной узел, и мало влияет на эффективность дуги. При этом возрастание напряжения приводит к увеличению ширины шва e и к значительному увеличению отношения e/h .

Увеличение силы тока несущественно сказывается на σ , вследствие чего оказывает незначительное влияние на отношение e/h , пропорционально увеличивая размеры шва.

Увеличение скорости сварки уменьшает размер e и увеличивает отношение e/h . Это происходит в основном из-за уменьшения количества тепла, поступающего через единицу площади поверхности в свариваемое изделие. Экспериментальная проверка модели [9, 10] показывает совпадение эффекта изменения параметров с расчетными, модель хорошо прогнозирует относительные влияния изменения входных параметров на геометрические параметры качества шва. Геометрические параметры шва по данным работы [10] могут быть рассчитаны с точностью около 30 %, точность расчета значительно улучшена по сравнению с предшествующими моделями.

Авторы рассматриваемой работы объясняют достаточную сходимость результатов расчетов по описанной модели, не учитывающей конвекцию и излучение теплоты, зависимость свойств материала от температуры и фазовые превращения, с экспериментом ссылаясь на работы [13–16], в которых оценивается влияние приведенных выше физических процессов и отмечена их незначительная роль на ряде

практических примеров. Недостатком этой модели является то, что в ней не учитывается конечная толщина кромок, что значительно ухудшает результаты при расчете режима сварки тонколистовых материалов. Основным достоинством модели с движущимся распределенным источником теплоты является то, что она дает высокую точность функциональной зависимости между параметрами режима и материала, обеспечивает правильную оценку влияния относительных изменений параметров сварочного процесса на геометрию сварного шва [17, 18].

При необходимости более глубокого анализа процесса аргонодуговой сварки как объекта автоматического управления используют модель процесса (2) распространения теплоты от быстро движущегося нормально-эллиптического источника в плоском слое [6, 19], отражающую тепловое и механическое воздействия дуги большой мощности, а также позволяющую учесть распределенность теплового потока дуги, ее углубление в основной металл, теплофизические свойства свариваемого материала и ограниченность изделия по толщине:

$$T(Y, Z, t) = \frac{2W}{VC_y D} \times \frac{\exp\left[-\frac{Y^2}{4a(t+t_{01})}\right]}{\sqrt{4\pi a(t+t_{01})}} \times \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{\pi n Z}{D} \exp\left[-(t+t_{02})a\left(\frac{\pi n}{D}\right)^2\right] \right\}, \quad (2)$$

где W – эффективная тепловая мощность дуги;
 C_y – коэффициент объемной теплоемкости материала;
 D – толщина слоя;
 t_{01} и t_{02} – постоянные времени, выражающие степень распределенности источника теплоты по осям Y и Z .

Электрическая дуга формирует в материале свариваемого узла поле температур $T(X, Y, Z)$ и размеры сварного шва: глубину проплавления g , ширину обратного валика (при полном проплавлении). Автор работы [19] объясняет, что модель (2) позволяет учесть влияние на величину глубины проплавления контролируемых возмущений по изменению параметров режима, определяющих величину тепловложения, по изменению толщины свариваемого материала, а также неконтролируемых параметров источника нагрева и теплофизических констант материала.

В работе [7] из уравнений теплопроводности было получено аналитическое решение в виде выражения (3), по которому с помощью численной процедуры рассчитывают безразмерную температуру $\theta = (T_{\text{и}} - T_{\text{оС}})/(T_{\text{М}} - T_{\text{оС}})$, где $T_{\text{и}}$ – температура в изделии, $T_{\text{оС}}$ – температура окружающей среды, $T_{\text{М}}$ – базовая температура:

$$\theta(\xi, \eta) = q_0 \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + 4\mu\tau} \exp\left\{-\mu \frac{(\xi - \text{Pe}\tau)^2 + \eta^2}{1 + 4\mu S} - \text{Bi}\tau\right\} d\tau, \quad (3)$$

где q_0 – плотность теплового пятна;
 μ – коэффициент сосредоточенности;
 Bi – число Био;
 Pe – число Пекле;

$\eta = Y/l$, $\xi = X/l$, l – некоторый характерный размер;

S – толщина изделия.

Для представления выражения (3) в качестве передаточной функции А.С. Исаков проанализировал температурное поле, возбуждаемое импульсным (во времени) источником тепла:

$$q = q_0 e^{-\mu(\xi^2 + \eta^2)} \delta(\tau), \quad (4)$$

где δ – функция Дирака.

Общее выражение для импульсной характеристики приведено в виде

$$\theta(\xi, \eta, \tau) = \frac{q_0 H(\tau)}{1 + 4\mu\tau} \exp \left\{ -\mu \frac{(\xi - \text{Pe}\tau)^2 + \eta^2}{1 + 4\mu S} - \text{Bi}\tau \right\}, \quad (5)$$

где $H(\tau) = \begin{cases} 0, \tau < 0 \\ 1, \tau > 0 \end{cases}$.

Изображение по Лапласу отклика (5) является искомой передаточной функцией объекта с выходом по температуре и входом в виде мощности источника тепла, вводимой в зону сварки. Аналитический вид ее неудобен для практических целей, поэтому в работе [7] была рассмотрена возможность аппроксимации данной передаточной функции с помощью элементарных динамических звеньев. Показано, что для такой цели с удовлетворительной точностью подходит апериодическое звено второго порядка:

$$W_o(p) = \frac{K_o}{(1 + T_o p)^2}, \quad (6)$$

где

$$K_o \approx \frac{1}{\sqrt{\pi\delta\lambda\text{Pe}}} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\mu} + 4\frac{\xi}{\text{Pe}}}}, \left[\frac{\text{K}}{\text{Вт}} \right];$$

$$T_o = \left\{ \sqrt{\frac{4}{\text{Pe}^2} + \left(\frac{\xi}{\text{Pe}} + \frac{1}{4\mu} \right)^2} - \left(\frac{2}{\text{Pe}^2\mu} \right) \right\} \frac{l^2}{a}, [\text{с}],$$

где λ – удельная теплота плавления.

В [20] указано, что любой параметр сварного шва, количественно связанный с отклонениями тока сварки, напряжения дуги и скорости сварки, может быть также описан апериодическим звеном, но первого порядка, например температура шва:

$$T(p) = \frac{1}{T_{\text{и}}p + 1} (K_{\text{т}} \times I(p) + K_{\text{д}} \times U(p) - K_{\text{с}} \times V(p)), \quad (7)$$

где T – температура сварного шва;

U – напряжение дуги;

I – ток дуги;

V – скорость сварки;

$T_{\text{и}}$ – постоянная времени проплавления данной толщины материала;

$K_{\text{т}}$ – коэффициент провара по току дуги;

$K_{\text{д}}$ – коэффициент провара по напряжению дуги;

K_C – коэффициент провара по скорости сварки.

Синтез динамической математической модели

В соответствии с результатами и рекомендациями [20] авторами было предложено полученные ими в [1] модели сварного шва дополнить аperiodическим звеном первого порядка:

$$h = \frac{1}{T_{иp}p + 1} \cdot \frac{V_{пп}^{1,465} d_{пп}^{0,92}}{V^{1,9} d_{э}^{0,078} I^{0,12} L_{д}^{0,05}} [\text{мм}], \quad (8)$$

$$e = \frac{1}{T_{иp}p + 1} \cdot \frac{I^{0,584} L_{д}^{0,433} V_{пп}^{0,095} d_{пп}^{0,010}}{V^{0,832} d_{э}^{0,782}} [\text{мм}], \quad (9)$$

$$g = \frac{1}{T_{иp}p + 1} \cdot \frac{I^{0,659} V_{пп}^{0,247} d_{пп}^{0,02}}{V^{0,851} d_{э}^{2,587} L_{д}^{0,415}} [\text{мм}], \quad (10)$$

где $V_{пп}$ – скорость подачи присадочной проволоки;
 $d_{пп}$ – диаметр присадочной проволоки;
 $L_{д}$ – длина дуги;
 $d_{э}$ – диаметр электрода;
 e – ширина сварного шва;
 g – глубина проплавления;
 h – высота сварного шва.

В пакете Matlab Simulink было выполнено сравнение переходных процессов детерминировано-статистических моделей и моделей с аperiodическим звеном первого порядка.

Переходные процессы математических моделей сварного шва при $I = 155 \text{ А}$, $\Delta I = 75 \text{ А}$, $L_{д} = 3 \text{ мм}$, $V = 2,78 \text{ мм/с}$, $V_{пп} = 6 \text{ мм/с}$, $d_{э} = 2,5 \text{ мм}$ и $d_{пп} = 3 \text{ мм}$ изображены на рис. 1.

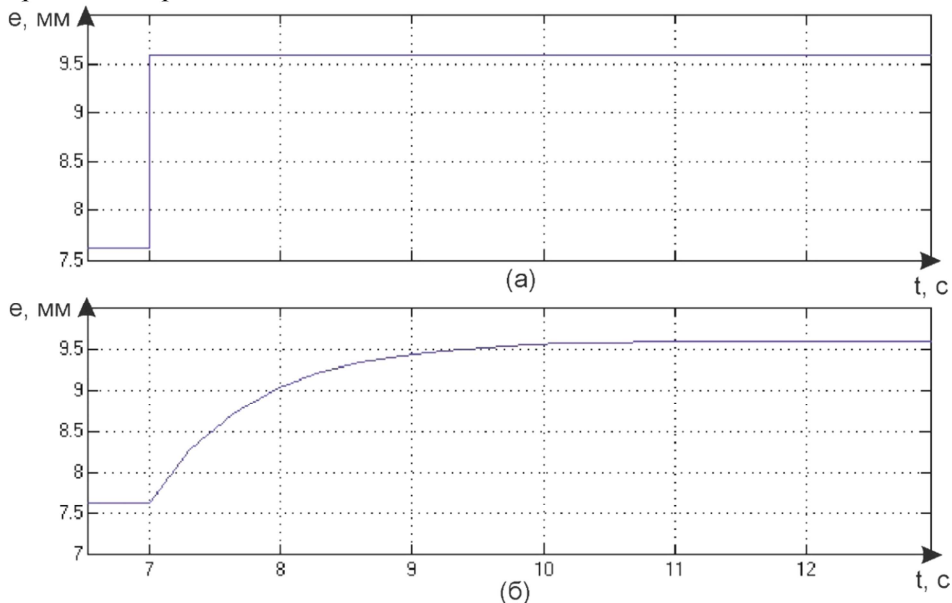


Рис. 1. Переходный процесс математических моделей (9) сварного шва:
 а – модели детерминированно-статистической;

b – модели с аperiodическим звеном первого порядка

Проверка адекватности моделей

Численное значение постоянной времени модели (9) было определено в условиях, полностью идентичных реальному производственному процессу, на трубных образцах диаметром 108 и толщиной 9 мм из материала 30ХГСН2А-ВД. Сварка производилась на автомате для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом кольцевых швов УСК-400 с подачей присадочной проволоки марки Св18ХМА. В качестве источника питания был использован EWM Tetrix 451 AC/DC Synergic FW.

Для сравнения реальных и расчетных размеров шва сварка производилась в режиме: $I = 155\text{А}$, $L_d = 3\text{ мм}$, $V = 2,78\text{ мм/с}$, $V_{\text{пп}} = 6\text{ мм/с}$, $d_3 = 2,5\text{ мм}$ и $d_{\text{пп}} = 3\text{ мм}$.

Постоянные времени $T_{\text{И}}$ приближенно определялись по отклонению ширины шва, так как в работах [21–23] показано, что в качестве параметра, пропорционального температуре металла сварочной ванны, можно принять ширину шва. Все размеры зоны проплавления изменяются практически одновременно, поэтому постоянную времени проплавления изделия по глубине провара также принимают равной $T_{\text{И}}$. Исследования производились по методике, изложенной в работе [20].

Для нахождения $T_{\text{И}}$ в процессе сварки на номинальном режиме подавался скачок ΔI по току дуги (величина скачка $0,5I_{\text{И}}$). Для получения скачка по току в сварочную цепь параллельно дуге было подключено балластное сопротивление. Штангенциркулем измеряли отклонение ширины шва e ; отсчитывая $0,63\Delta e$ и зная скорость сварки, нашли $T_{\text{И}} = 8,68\text{ с}$ (рис. 2).

Из диаграммы, приведенной на рис. 2, видно, что общая погрешность расчета (Δe) при определении ширины шва составила 2,02 % (реальная ширина шва – 9,59 мм, полученная по модели – 9,4 мм). График сплошной линией – ширина шва, полученная в пакете Matlab Simulink. График пунктирной линией – реальная ширина шва.

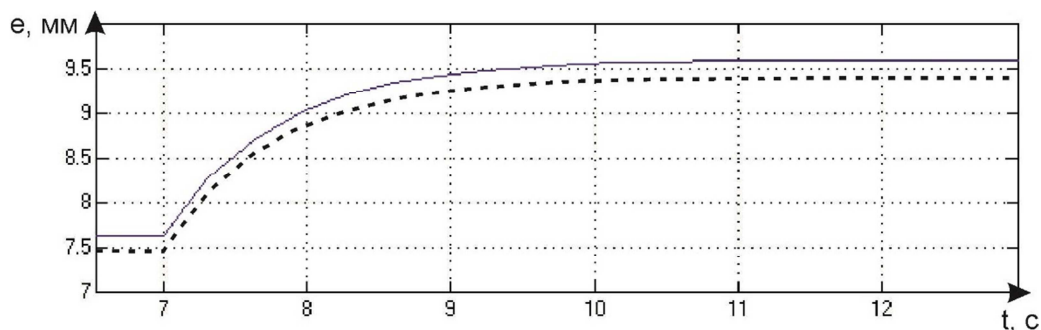


Рис. 2. Сравнительная диаграмма переходных процессов формирования шва

Для определения погрешности по времени (Δt) на сравнительной диаграмме переходных процессов формирования шва (см. рис. 2) была визуально отложена проекция вектора точек $0,63\Delta e$ графика на ось ординат. Получены значения $T_{\text{И}}$ для реального процесса и процесса, построенного в ПО Matlab Simulink, – 0,76 с и 0,8 с соответственно. В результате погрешность $T_{\text{И}}$ составляет 5,3 %.

Выводы

1. Синтезированы динамические модели с учетом влияния основных режимов сварки на геометрические размеры шва, характеризующие протекание процесса сварки в реальном времени.

2. Построена диаграмма переходного процесса математической модели, которая учитывает формирование сварного шва в реальном времени.

3. Погрешность модели сварного шва по времени составляет 5,3 % (в точках 0,63 от Δe), что позволяет применять ее для прогнозирования процесса сварки в условиях реального производства.

4. Полученные результаты послужат исходными данными для создания алгоритмов автоматической стабилизации аргонодуговой сварки по длине дугового промежутка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мюллер В.В., Омеляненко К.Н.* Синтез детерминированно-статистических моделей формы шва при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – № 3(55). – С. 161–167.
2. *Mcglone I.C.* Weld bead geometry prediction // Metal Construction, 1982. – Vol. 14, № 7. – P. 378–384.
3. *Гладков Э.А., Сас А.В., Ширковский Н.А.* Управление сваркой плавлением по идентифицируемым моделям // Изв. вузов. Машиностроение. – 1983. – № 7. – С. 101–107.
4. *Бутаков Г.А.* Моделирование и управление процессом дуговой сварки: дис. ... канд. техн. наук. – Киев., 1984. – 146 с.
5. *Гладков Э.А., Сас А.В., Киселев О.Н.* Информационно-измерительная система технологического процесса сварки труб на станах аргонодуговой сварки // Сварочное производство. – 1984. – № 2. – С. 25–27.
6. *Гладков Э.А.* Управление процессами и оборудованием при сварке: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений – М.: Академия, 2006. – 432 с.
7. *Искаков А.С.* Алгоритмизация автоматического управления процессом аргонодуговой сварки оболочек кабеля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Куйбышев, 1975. – 30 с.
8. *Селиванов А.Г.* Повышение стабильности проплавления при аргонодуговой сварке конструкций из коррозионностойких сталей: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2012. – 19 с.
9. *Eagar T.W., Tsai N.S.* Temperature fields produced by travelling distributed heat sources // Welding Journal, 1983. – Vol. 62, № 12. – P. 346–354.
10. *Bates B.E., Hardt D.E.* A real time calibrated thermal model for closed-loop weld bead geometry control // Journal of dynamic systems, Measurement and Control, 1985. – Vol. 107, № 3. – P. 25–33.
11. *Рыкалин Н.Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: МАШГИЗ, 1951. – 296 с.
12. *Ширковский Н.А.* Стабилизация проплавления при сварке на повышенных скоростях труб на станах АДС с использованием адаптивной микрокомпьютерной системы управления: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1987. – 141 с.
13. *Dreper C., Eagar T.W., Szekely I.* Convection in arc weld pools // Welding Journal. – 1983. – Vol. 62, № 11. – P. 307–312.
14. Transient thermal phenomena and weld geometry in GTAW / N.D. Mulmuth, W.F. Hall, B.T. Dans et al. // Welding Journal. – 1974. – Vol. 5, № 9. – P. 388–400.
15. *Рыкалин Н.Н., Бекетов А.И.* Расчеты плоского температурного поля вблизи изотермы плавления по очертанию сварочной ванны // Труды Ленингр. политехн. ин-та. – 1967. – № 283. – С. 22–29.
16. *Гладков Э.А., Гуслистов И.А., Сас А.В.* Динамические процессы в сварочной ванне при вариации действующих сил // Сварочное производство. – 1974. – № 4. – С. 5–6.
17. *Ширковский Н.А., Гладков Э.А., Киселев О.Н.* Адаптивная АСУ процесса аргонодуговой сварки труб // Сварочное производство. – 1986. – № 11. – С. 1–3.
18. *Львов В.Н., Кричевский Е.М., Войцеленок С.Л. и др.* Влияние параметров аргонодуговой сварки неплавящимся электродом на коррозионные свойства и структуру сварных швов из стали 12Х18Н10Т // Сварочное производство. – 1977. – № 1. – С. 26–28.
19. Процессы плавления основного металла при сварке / Под ред. Н.Н. Рыкалина. – М.: Издательство АН СССР, 1960. – 96 с.

20. Сварка в машиностроении / под ред. Ю.Н. Зорина. – М.: Машиностроение, 1979. Т. 4. – 512 с.
21. Гуслистов И.А., Гладков Э.А., Львов В.Н. Устройство для контроля проплавления при аргонодуговой сварке // Сварочное производство. – 1973. – № 2. – С. 46–47.
22. Лебедев В.К., Панчевцев Ю.А., Драгомерецкий Е.С. Исследование возможности применения фотоэлектрического датчика // Автоматическая сварка. – 1973. – № 2. – С. 25–27.
23. Перковский Р.А. Разработка физико-математических моделей и микропроцессорных систем контроля и управления процессом аргонодуговой сварки тонкостенных изделий ответственного назначения: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 139 с.

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2017 г.

DYNAMIC MODEL FORM OF A WELDED SEAM FOR ARGON-ARC WELDING WITH NON-MATCHED ELECTRODE

K.N. Omelyanenko³, V.V. Myuller^{1,2}

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 typlik st., Samara, 443063, Russian Federation

In this article, a study is made of the existing dynamic models of the shape of the weld during arc welding used in the construction of automatic control algorithms. On the basis of the studies carried out, models of the shape of the weld during argon-arc welding were synthesized, taking into account the dynamic nature of the process of welding in real time. Under experimental verification, the transient processes of deterministic-statistical models and dynamic models with an aperiodic link of the first order were compared. An analysis of the error of the models over time 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 30XГЧ2А-ВД, form of a welded seam, sizes of a welded seam.*