



УДК 621.791.75.01

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАПАЗДЫВАНИЙ В АСУ ФОРМИРОВАНИЕМ СВАРНОГО ШВА

**В. В. ДОЛИНЕНКО**, канд. техн. наук, **В. А. КОЛЯДА**, **Т. Г. СКУБА**, инженеры, **Е. В. ШАПОВАЛОВ**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена методика определения транспортных запаздываний в контуре обратной связи автоматической системы управления процессом формирования усиления шва при сварке МАГ. Исследован механизм возникновения двух различных транспортных запаздываний — формирования высоты и ширины усиления шва, которые обнаруживаются при измерениях их геометрических параметров с помощью лазерно-телевизионного сенсора. Для получения оценок транспортных запаздываний предложено использовать регрессионные формулы, составленные на основе результатов вычислительных экспериментов. В качестве объекта вычислительных экспериментов использована математическая модель сварочной ванны, полученная для условий нагрева изделия подвижным нормально-круговым источником тепла.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварные соединения, форма шва, АСУ, транспортное запаздывание, лазерно-телевизионный сенсор

Задача замкнутого управления формированием сварного шва при дуговой сварке давно привлекает внимание специалистов в области автоматизации сварочных процессов. Одной из основных проблем при решении данной задачи является реализация обратной связи по параметрам, определяющим форму сварного шва. В работе [1] для замкнутого управления процессом формирования сварного шва предлагается использовать наблюдение за сварочной ванной с помощью специального сенсора, функционирование которого основано на методе двухцветной пирометрии. Такой подход позволяет получать только косвенные оценки параметров сварного шва, которые могут существенно отличаться от действительных значений. Большой интерес представляет способ, предложенный в работе [2], где для реализации обратной связи предложено использовать непосредственное измерение геометрических параметров усиления сварного шва с помощью лазерно-телевизионного сенсора (ЛТС). К недостаткам известных схем замкнутого управления формированием сварного шва можно отнести то, что не учитывается наличие нескольких транспортных запаздываний между ЛТС и участками сварочной ванны. Поэтому при изменении параметров режима сварки устойчивость управления может ухудшаться.

В данной работе предлагается методика оценки транспортных запаздываний для систем автоматической системы управления (АСУ) сваркой МАГ, обратная связь в которых обеспечивается с помощью ЛТС [3].

Из теории сварочных процессов известно, что ширина и высота валика соответствует фронту затвердевания ванны в ее средней и хвостовой части [4]. На рис. 1 представлена схема образования двух транспортных запаздываний в АСУ при использовании ЛТС (отдельно для измерений высоты  $g$  и ширины  $e$  усиления шва). Штриховой линией обозначен контур воображаемой сварочной ванны в момент времени, когда проекция оси электрода находилась в точке  $O$ . Форма сварочной ванны соответствует направлению сварки слева направо. Точкой  $A$  обозначена крайняя точка фронта затвердевания хвостовой части сварочной ванны. Ее координата по оси абсцисс определяет начало формирования высоты усиления шва. Точками  $B$  и  $B'$  обозначены точки фронта затвердевания сварочной ванны в средней части. Их координаты по оси абсцисс определяют начало формирования ширины усиления шва. Расстояние между электродом (осью сварочной горелки) и световым следом ЛТС  $L_{TV}$  определяет базовую величину транспортного запаздывания при измерении параметров валика. Расстояние между точкой  $A$  ( $B$ ) и точкой  $O$  вдоль оси абсцисс составляет  $L_g$  ( $L_e$ ). Таким образом, величины отрезков тран-

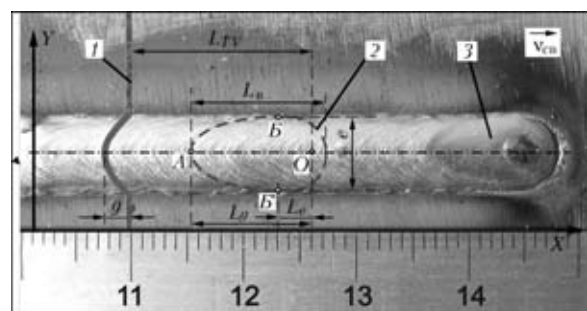


Рис. 1. Схема возникновения транспортных запаздываний между сварочной ванной и ЛТС при сварке МАГ: 1 — световой след ЛТС; 2 — воображаемый контур сварочной ванны; 3 — поверхность затвердевшей сварочной ванны



спортивных запаздываний наблюдения ширины  $\Delta L_e$  и высоты  $\Delta L_g$  валика шва рассчитываются следующим образом:  $\Delta L_e = (L_{TV} - L_e)$ ,  $\Delta L_g = (L_{TV} - L_g)$ . Отсюда формулы расчета временных параметров транспортных запаздываний записываются в следующем виде:

$$\tau_g = \frac{L_{TV} - L_g}{v_{CB}}, \quad \tau_e = \frac{L_{TV} - L_e}{v_{CB}}, \quad (1)$$

где  $\tau_e, \tau_g$  — временные параметры транспортных запаздываний измерений соответственно ширины и высоты валика, с;  $v_{CB}$  — скорость сварки, см/с.

Из рисунка видно, что для определения значения транспортных запаздываний между сварочной ванной и световым следом ЛТС необходимо знать координаты точек  $A, B$  и  $B'$  относительно текущей координаты проекции оси электрода  $O$ . Однако для симметричной формы валика абсциссы точек  $B$  и  $B'$  равны, поэтому расчет требуется выполнить только для точек  $A$  и  $B$ .

Для решения данной задачи синтезирована математическая модель, позволяющая рассчитывать геометрические параметры сварочной ванны на основе теплопереноса в свариваемых изделиях. Уравнение, описывающее процесс распространения тепла в полубесконечном теле при нагреве его подвижным нормально-круговым источником [5], имеет вид

$$T(x, y, z, t) = \frac{2q}{c\gamma(4\pi a)^{3/2}} \exp\left(-\frac{v_{CB}x}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{\sqrt{t''(t_0+t'')}} \times \exp\left[-\frac{z^2}{4at''} - \frac{r^2}{4a(t_0+t'')} - \frac{v_{CB}^2}{2a}(t_0+t'')\right], \quad (2)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$ , см<sup>2</sup>;  $x, y, z$  — координаты текущей расчетной точки температурного поля, см;  $a = \lambda/c\gamma$  — коэффициент теплопроводности, Дж/м<sup>2</sup>;  $c\gamma$  — объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $q = 0,24\eta U_d I_{CB}$  — эффективная тепловая мощность, Дж/м;  $U_d, I_{CB}$  — средние значения напряжения и тока сварки;  $t_0 = 1/(4ak_t)$  — длительность распространения фиктивного источника, с;  $k_t$  — коэффициент тепловой сосредоточенности дуги, см<sup>-2</sup>;  $t$  — промежуток времени действия непрерывного подвижного источника тепла, с;  $t'' = t - t', c; t'$  — вспомогательный момент времени, в который источником было введено тепло на начальном участке его движения, с.

Численное решение выполняли с шагом дискретизации 0,01 см. К недостаткам такого решения можно отнести то, что не учитываются процессы массопереноса в сварочную ванну.

Для уточнения значений основных энергетических параметров тепловой модели были прове-

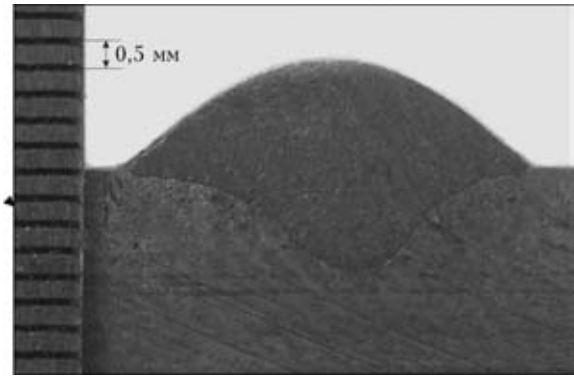


Рис. 2. Макрошлиф сварного шва ( $U_d = 19$  В,  $I_{CB} = 160$  А,  $v_{CB} = 0,75$  см/с)

дены сварочные эксперименты. Сварку проводили на обратной полярности в защитном газе (85 % Ar + 15 % CO<sub>2</sub>) в нижнем положении. Сваривали пластины углеродистой стали толщиной 0,8 см (сварка без зазора) электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 0,12 см. Номинальные параметры режима сварки:  $I_{CB} = 160$  А,  $U_d = 19$  В,  $v_{CB} = 7,5$  см/с. На рис. 2 показан макрошлиф валика шва, который использовали для проверки адекватности тепловой модели. По результатам сварочных экспериментов уточнены значения параметров тепловой модели: эффективного КПД сварки  $\eta = 0,75$  и коэффициента сосредоточенности теплового воздействия дуги  $k_t = 8,3$  см<sup>-2</sup>. Другие параметры тепловой модели имеют следующие значения:  $a = 0,0718$  Дж/м<sup>2</sup>,  $c\gamma = 0,975$  Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Вычислительный эксперимент выполнен в соответствии с полным факторным планом экспериментов второго порядка [6]. Рассмотрены следующие переменные:  $U_{CB} = 17...21$  В,  $I_{CB} = 145...175$  А и  $v_{CB} = 0,5...1,0$  см/с. Выполнен расчет таких параметров сварочной ванны, как

**Матрица вычислительного эксперимента и результаты расчета**

№ п/п	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$U_d$ , В	$I_{CB}$ , А	$v_{CB}$ , см/с	$L_g$ , см	$L_e$ , см
1	0	0	0	19,0	160	0,75	1,08	0,59
2	-1	-1	-1	17,8	151	0,60	0,95	0,48
3	-1	-1	1	17,8	151	0,90	1,04	0,57
4	-1	1	-1	17,8	169	0,60	1,02	0,47
5	-1	1	1	17,8	169	0,90	1,11	0,68
6	1	-1	-1	20,2	151	0,60	1,04	0,51
7	1	-1	1	20,2	151	0,90	1,13	0,59
8	1	1	-1	20,2	169	0,60	1,13	0,48
9	1	1	1	20,2	169	0,90	1,22	0,68
10	-1,68	0	0	17,0	160	0,75	0,99	0,59
11	0	-1,68	0	19,0	145	0,75	1,01	0,60
12	0	0	-1,68	19,0	160	0,50	0,99	0,50
13	1,68	0	0	21,0	160	0,75	1,16	0,51
14	0	1,68	0	19,0	175	0,75	1,16	0,63
15	0	0	1,68	19,0	160	1,00	1,14	0,65



ширина  $e$  сварочной ванны, глубина максимального проплавления  $h$ , длина сварочной ванны  $L_B$ , расстояния  $L_e$  и  $L_g$ . Получены следующие диапазоны варьирования параметров:  $h = 0,15...0,25$  см,  $e = 0,7...0,91$  см,  $L_B = 0,98...1,22$  см, что соответствует сварочному эксперименту. Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице. Нормализованные факторы  $x_1, x_2$  и  $x_3$  соответствуют факторным переменным  $U_d, I_{св}$  и  $v_{св}$ .

Получены следующие регрессионные формулы:

$$L_g = -0,69 + 0,041U_d + 0,0048I_{св} + 0,3v_{св} \text{ (см)}, \quad (3)$$

$$L_e = 0,08 + 0,004U_d + 0,0016I_{св} + 0,4v_{св} \text{ (см)}. \quad (4)$$

Среднеквадратическая ошибка аппроксимации для регрессионной модели (3), (4) не превышает 5 %.

В соответствии с предложенной методикой на основании априорной информации о величине  $L_{TV}$  и диапазонах изменений сварочных переменных  $I_{св}, U_d$  и  $v_{св}$  рассчитывают диапазоны изменений расстояний  $L_e$  и  $L_g$ , а затем по формуле (1) вычисляют минимальные и максимальные оценки транспортных запаздываний  $\tau_e$  и  $\tau_g$ .

Рассмотрим в качестве примера практический случай с  $L_{TV} = 7,5$  см. Сравним максимальные изменения транспортных запаздываний для постоянной и изменяющейся скорости сварки при варьировании режима сварки в диапазоне:  $U_d = 17...21$  В и  $I_{св} = 145...175$  А. В первом случае для  $v_{св} = 0,75$  см/с расчет дает диапазон изменений

$\tau_e = 9,0...9,1$  с (относительное изменение составляет 1 %) и  $\tau_g = 8,4...8,8$  с (5 %). Во втором случае для диапазона варьирования  $v_{св} = 0,5...1,0$  см/с изменения транспортных запаздываний следующие:  $\tau_e = 6,7...13,8$  с (относительное изменение 78 %) и  $\tau_g = 6,2...13,3$  с (83 %). Таким образом, во втором случае модель объекта управления представляет собой нестационарную динамическую систему, для которой потребуются более сложные алгоритмы управления.

Предложенная методика расчета транспортных запаздываний в АСУ формированием усиления шва с обратной связью позволяет корректно выбрать временные параметры и тип автоматического регулятора.

1. Zhang H., Pan J., Lao B. The real-time measurement of welding temperature field and closed-loop control of isotherm width // Sci. in China Press. — 1999. — 21, N 2, Apr. — P. 129–135.
2. Doumanidis C., Kwak Y.-M. Multivariable adaptive control of the bead profile geometry in gas metal arc welding with thermal scanning // Intern. J. of Pressure Vessels and Piping. — 2002. — 79. — P. 251–262.
3. Кисилевский Ф. Н., Коляда В. А. Система лазерного слежения за валиком усиления сварного шва // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 60–62.
4. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
5. Рыкалин Н. Н., Углов А. А. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
6. Джонсон И., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы планирования эксперимента / Пер. с англ. — М.: Мир, 1981. — 520 с.

Method is suggested for determination of transportation lags in feedback circuit of the automatic system for control of the weld reinforcement formation process in MAG welding. The mechanism of emergence of two different transportation lags, i.e. formation of height and width of the bead, which are revealed by measurements of geometric parameters of the weld bead using the laser-TV sensor, has been investigated. To estimate the transportation lags, it is suggested to use the regression formulae derived on the basis of computational experimental results. A mathematical model of the weld pool developed for conditions of heating a workpiece with the movable normal heat source has been used as an object of the computational experiments.

Поступила в редакцию 14.07.2009

## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины**  
**А. В. Яровицын** (ИЭС им. Е. О. Патона) защитил 10 декабря 2009 г. кандидатскую диссертацию на тему «Микроплазменная порошковая наплавка жаропрочных никелевых сплавов с содержанием  $\gamma'$ -фазы 45...65 %».

Диссертация посвящена исследованию энергетических, тепловых и технологических особенностей микроплазменной порошковой наплавки с целью разработки промышленной технологии

для ремонта лопаток жаропрочных никелевых сплавов.

Обоснованы требования к сварочному источнику тепла для микроплазменной порошковой наплавки. Показано, что сочетание низких удельных тепловложений 100...650 Вт, низкой плотности тепловой энергии в эквивалентном пятне нагрева 150...1500 Вт/см<sup>2</sup> и малых скоростей перемещения микроплазменной дуги обеспечивает медленное охлаждение основного металла в температурных интервалах хрупкости со скоростями до 3...10 °С/с. В этом случае темп нарастания деформаций не превышает критических значений,