

УДК 621.791.72

Ластовири В. Н.

**УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ПРОПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ КАК СИСТЕМЕ «ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ – ПАРОГАЗОВЫЙ КРАТЕР»**

Одним из недостатков электронно-лучевой сварки (ЭЛС) является нестабильность геометрической формы зоны проплава. Взаимодействие сварочного электронного пучка с металлом сопровождается образованием парогАЗОВОГО кратера, динамикой его формы и течением жидкого металла, а также действием на этот процесс неконтролируемых возмущений. Форма проплава сварного шва при ЭЛС в первом приближении определяется формой парогАЗОВОГО кратера. Нестабильность формы наблюдается как вдоль сварного шва, так и от изделия к изделию, что недопустимо при сварке конструкций ответственного назначения.

Мероприятия по стабилизации параметров режима сварки, таких как ускоряющее напряжение, тока пучка, тока фокусирующей системы, скорости сварки, улучшают ситуацию в целом, но не решают проблему флуктуации глубины проплава, которая даже в этом случае может превышать 10 %.

Нестабильность формы при несквозном проваре проявляется в двух основных видах: пилообразность (спайкинг) проплава, который снижается технологическими приемами [1], и тренд геометрической формы проплава вдоль сварного шва – ее устойчивое систематическое изменение в течение длительного времени. В отличие от пилообразности в корне шва, тренд является следствием дрейфа условий выполнения сварочного процесса и энергетических характеристик электронного пучка как источника энергии [2]. Для улучшения ситуации требуется непрерывное наблюдение проплавления свойств источника энергии и параметров формы проплава и их стабилизация путем управления в темпе с процессом сварки.

Целью данной работы является рассмотрение возможностей управления формой проплава в процессе электронно-лучевой сварки.

С позиций пространства состояний [3] процесс ЭЛС как объект управления характеризуется четырьмя группами переменных: управлениями  $u(t)$ , возмущениями  $w(t)$ , состояниями  $x(t)$  и выходами  $y(t)$  (рис. 1). Для управления процессом ЭЛС необходима его наблюдаемость. В понятие «наблюдаемость» вкладывается смысл непосредственного измерения текущих значений состояния процесса  $x(t)$  или определения его оценок  $\hat{x}(t)$  косвенным образом, на основе измерения выходов  $y(t)$  и использования уравнения связи:

$$y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где  $C$  – матрица коэффициентов, полученная априори.

Для этого в состав современной замкнутой системы автоматического управления (САУ) технологическим процессом вводят устройство для оценивания состояния процесса по зашумленным наблюдениям выходов и уравнению связи (см. рис. 1). Устройство управления на основе математической модели процесса формирует вектор управляющих воздействий, используя для этого текущие оценки состояния процесса.

Будем считать, что наблюдаемость координат вектора состояния  $x(t)$  обеспечивается с помощью уравнения связи (1). Тогда, при управлении в приращениях, динамику многомерного объекта можно описать линейным дифференциальным уравнением состояния [3] вида:

$$\left( \frac{dx}{dt} \right) = Ax + Bu = Dw, \quad (2)$$

где  $A, B, D$  – матрицы коэффициентов.

Тогда решение уравнения состояния, то есть текущее состояние процесса ЭЛС будет определяться выражением:

$$x(t) = \Phi(t)x(0) + \int_0^t \Phi(t-\tau)[Bu(\tau) + Dw(\tau)]d\tau, \quad (3)$$

где  $\Phi(t)$  – переходная матрица процесса;

$x(0)$  – начальное состояние процесса в момент  $t = 0$ .

Из правой части выражения (3) видно, что во второе слагаемое, определяющее вынужденное изменение состояния, помимо вектора управлений  $u$  (параметры режима процесса) входит вектор неконтролируемых возмущений  $w$  (нестабильности генерации пучка и проплавления металла). Следовательно, состояние процесса будет изменяться в силу наличия возмущений. Таким образом, в рамках САУ (рис. 1), текущие значения параметров формы кратера, как переменные состояния, определяющие форму проплава, будут оценены с ошибкой. На первый взгляд, кажется, что поскольку текущее состояние наблюдаемо, то ошибка будет скомпенсирована за счет отрицательной обратной связи. Однако это не так. Следует помнить, что уравнение связи (1) получено при начальном векторе возмущений  $w_0(t)$ , действующим на момент идентификации матрицы связи  $C$ . Однако в ходе сварки условия по возмущению меняются, и матрица связи, используемая для оценки вектора состояния, в этом случае должна быть нестационарной. Это требует непрерывной ее адаптации к изменяющимся условиям протекания процесса, что является неоправданным усложнением задачи.

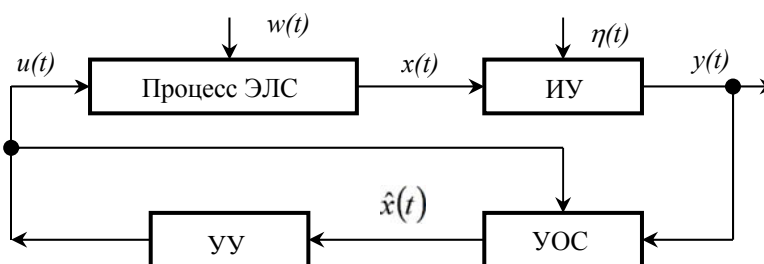


Рис. 1. Структура основного контура САУ процессом ЭЛС:

УОС – устройство оценки состояния процесса; УУ – устройство управления;  $\hat{x}(t)$  – вектор оценок состояния процесса ЭЛС

Более того, при значительном уровне неконтролируемых возмущений, что характерно для процесса сварки, нарушается адекватность модели процесса, матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $D$  также оказываются нестационарными. Возникает задача адаптации динамической модели процесса.

Разумный выход в этой ситуации – перевод части неконтролируемых возмущений в разряд контролируемых. Основная часть возмущений [4] действует на электронный пучок как источник энергии. Следовательно, наблюдение источника энергии обеспечит контроль основной части возмущений  $w_1(t)$ , действующих при ЭЛС на процесс генерации пучка.

ЭЛС можно представить в виде двух составляющих процессов. Во-первых, процесса формирования источника энергии (ПФИ) – электронного пучка с заданными проплавающими свойствами, то есть пространственными и энергетическими характеристиками. Во-вторых, процесса формирования парогазового кратера (ПФК), то есть образования и существования движущегося в металле кратера заданной геометрической формы.

Тогда, при условии обязательного наблюдения источника энергии, процесс ЭЛС целесообразно представить в виде единой системы двух объектов: «источник энергии – парогазовый кратер» (рис. 2). При этом состояние  $q(t)$  источника энергии, является управлением по отношению к ПФК и воздействует на состояние кратера  $x(t)$ , формируя соответствующую для данных условий форму парогазового кратера, обеспечивающую заданную форму проплава шва.

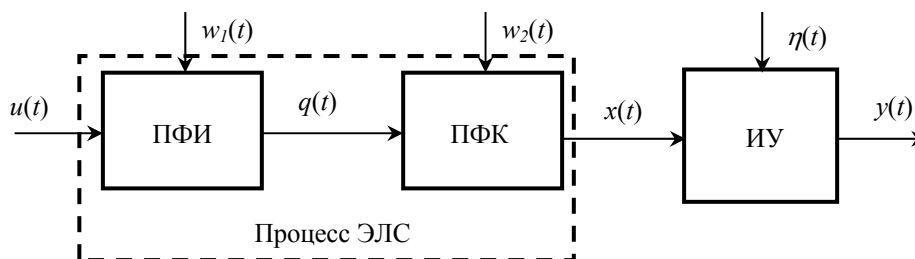


Рис. 2. Представление процесса ЭЛС единой системой объектов «источник энергии – парогазовый кратер»:

$w_1, w_2$  – возмущения, действующие на объекты;  $\eta$  – шум измерений

Основными параметрами, которые характеризуют проплавливающие свойства пучка, являются его мощность и диаметр в области взаимодействия. Совокупность энергетического и геометрического параметров позволяет определить другой весьма существенный распределенный параметр – это плотность мощности в пятне нагрева. При этом подразумевается, что плотность мощности распределена равномерно по круговому сечению пучка. Таково распределение в идеальной электронной пушке с катодом, работающим в режиме ограничения тока эмиссии пространственным зарядом, принято в теоретических работах.

Эксперименты показывают, что в фокальной плоскости магнитной фокусирующей линзы распределение плотности мощности близко к гауссовому [5]. Строго говоря, понятие диаметра как характеристики линейного размера пучка приемлемо только для равномерного кругового распределения и неприемлемо для нормального распределения, края которого уходят в бесконечность. В общем случае для аксиального конического пучка будем иметь двухпараметрическое распределение в функции координат  $r$  и  $z$  цилиндрической системы:

$$q(r, z) = q_0(z) \exp(-r^2/r_3^2(z)), \quad (4)$$

где при  $z = \text{const}$  для данного сечения пучка параметрами являются  $q_0$  – плотность мощности на оси пучка и  $r_3$  – радиус эквивалентного (по мощности) кругового пучка с равномерным распределением, который может быть принят в качестве оценки радиуса реального пучка [6].

Хорошую оценку значения  $r_3$  дает метод прямого края. Причем, измерение радиуса возможно осуществить непосредственно в ходе процесса сварки [6]. Другой параметр –  $q_0$  находится по известной мощности пучка. Таким образом, полагая, что пучок в фокальном сечении имеет нормальное распределение плотности мощности с двумя параметрами  $q_0$  и  $r_3$ , можем ввести его вектор состояния в виде:

$$q(t) = \begin{pmatrix} q_0(t) \\ r_3(t) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Аналогично, форму кратера, эквивалентную действующему источнику можно описать в поперечном стыку сечении, параболой  $s(r, z)$  [7, 8], определяемой двумя параметрами, которые можно принять в качестве компонент вектора состояния парогазового кратера:

$$s(t) = \begin{pmatrix} H(t) \\ R(t) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $H$  и  $R$  – глубина и радиус кратера. Подобный подход позволяет перейти от распределенного объекта к объекту с сосредоточенными параметрами, состояниями которого являются двумерные векторы (5), (6).

В этом случае схема САУ (рис. 3) имеет два контура управления. Контур, управления ПФИ, для чего введено два дополнительных блока: ИУ<sub>1</sub> и УОС<sub>1</sub>, которые осуществляют измерение выходов ПФИ и оценку компонент его вектора состояния:  $q_0$  и  $r_z$ , что обеспечивает наблюдаемость источника энергии. Используя полученные оценки, УУ формирует управляющие воздействия на ПФИ, которые корректируют параметры распределения плотности мощности электронного пучка как компоненты его вектора состояния, обеспечивая стабильность их во времени.

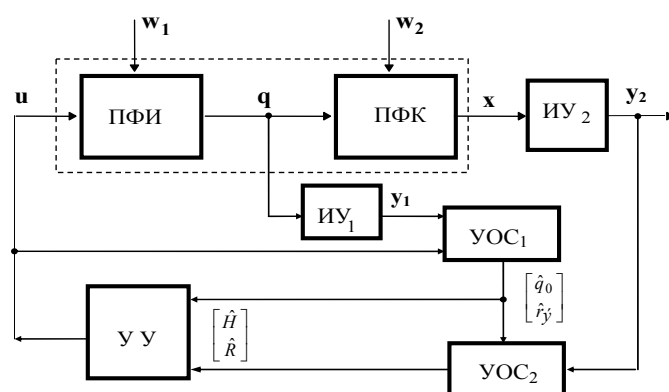


Рис. 3. Двухконтурная САУ процессом ЭЛС как системы «источник энергии – парогазовый кратер»:

ИУ – измерительное устройство; УОС – устройство оценки состояния; УУ – управляющее устройство;  $\hat{\phantom{x}}$  – символ оценки переменной

Управление источником энергии можно осуществить как известными способами развертки пучка и сканирования его фокуса, с целью обеспечить требуемое распределение, так и независимым управлением температурой катода и потенциалом управляющего электрода в генераторе электронного пучка. В большинстве технологий ЭЛС этого будет достаточно, чтобы обеспечить постоянство формы проплава даже без второго контура управления.

Второй контур управления, образованный цепочкой ИУ<sub>2</sub> и УОС<sub>2</sub>, охватывает собственно процесс формирования парогазового кратера. При этом на вход УУ поступают оценки компонент вектора состояния формы кратера, которые получены в условиях стабильного источника энергии. В такой ситуации значительно упрощается математическая модель для процедуры оценки состояния ПФК (матрица  $C$  в уравнении (1)).

Невозможность измерения глубины кратера, приводит к попыткам ее оценки по уравнению связи. Его можно получить на основе энергетического баланса пучка [7, 8], который определяется формой поверхности кратера и представлен двумя компонентами: мощностью поглощаемой изделием и мощностью излучаемой из парогазового кратера. На основе измерений сигналов данных компонент можно оценить глубину и радиус последнего [8, 9], при  $H/2R \leq 5$ .

С целью определения уравнения связи для оценки параметров формы проплава в ходе сварки было проведено сравнение модельных оценок с реальными значениями глубины проплава. Для чего массив зарегистрированных значений переменных процесса ЭЛС, содержащий параметры режима: ток пучка ( $i_n$ ), ток фокусировки ( $i_\phi$ ), скорость сварки ( $v_{св}$ ) и выходные переменные: яркость парогазового факела ( $UF$ ) и ток изделия ( $IS$ ), дополнялся столбцами координаты точки сварного шва и соответствующей ей глубины проплава. Поэтому с образца, который использовался при регистрации процесса сварки, изготавливался продольный шлиф. По фотографии шлифа осуществлялась «сколка» изменений глубины провара вдоль сварного шва с вводом в компьютер значений координаты и соответствующей ей глубины.

Поскольку, процесс проплавления зашумлен случайной составляющей, то формировался отдельный массив усредненных данных регистрации. Значения всех переменных, усреднялись вдоль шлифа на участках длиной  $\Delta l$ , соответствующих временному интервалу

$T = 1,28$  с. При этом, если исходный массив регистрации формировался с интервалом дискретизации  $\Delta t = 0,01$  с, то усреднение переменных выполнялось по 128 точкам, что является достаточной выборкой.

Уравнения связи представлялись линейными выражениями:

$$H_1 = b_0 + b_1 i_n + b_2 v_{св} + b_3 i_\phi ; \quad (7)$$

$$H_2 = a_0 + a_1 IS + a_2 UF. \quad (8)$$

Проверка проводилась для АМгб (на режиме:  $U_y = 75$  кВ;  $I_n = 40$  мА;  $I_\phi = 0,98 I_{ext}$ ;  $V_{св} = 4$  мм/с). Причем, на первом этапе выполнялась идентификация коэффициентов как для линейного регрессионного уравнения (7) по параметрам режима, так и для уравнения связи (8) в функции выходных переменных. В последнем случае использовались непосредственно выходные переменные  $IS$  и  $UF$ , которые регистрировались с датчиков: шунта и фотозлектронного умножителя.

В условиях постоянства значений параметров режима, оценка глубины проплава  $H_1$  по выражению (7) постоянна и совпадает со значением коэффициента  $b_0$ . Предварительно определённые коэффициенты уравнений составили  $b_0 = 13,9$ ;  $b_1 = 0,72$ ;  $b_2 = -0,46$ ;  $b_3 = 1,43$ ;  $a_0 = 6,08$ ;  $a_1 = 0,49$ ;  $a_2 = -3,5$ . Затем выполнялся контрольный шов в условиях роста температуры образца, что вызывало в ходе сварки соответствующий рост реальной глубины проплава  $H$  при постоянных параметрах режима. Нестационарностью температуры вводилось систематическое, трендовое возмущение глубины проплава, что значительно увеличивает требования к адекватности оценочных моделей.

Видно (рис. 4), что оценка  $H_1$  не способна учитывать возмущения систематического характера, в этом случае не работоспособна. Оценка же  $H_2$ , использующая выходные переменные, отражающие энергетический баланс пучка, вполне адекватна. С ростом уровня возмущения, ошибка оценки растет, оставаясь в пределах допустимого (6,5 %).

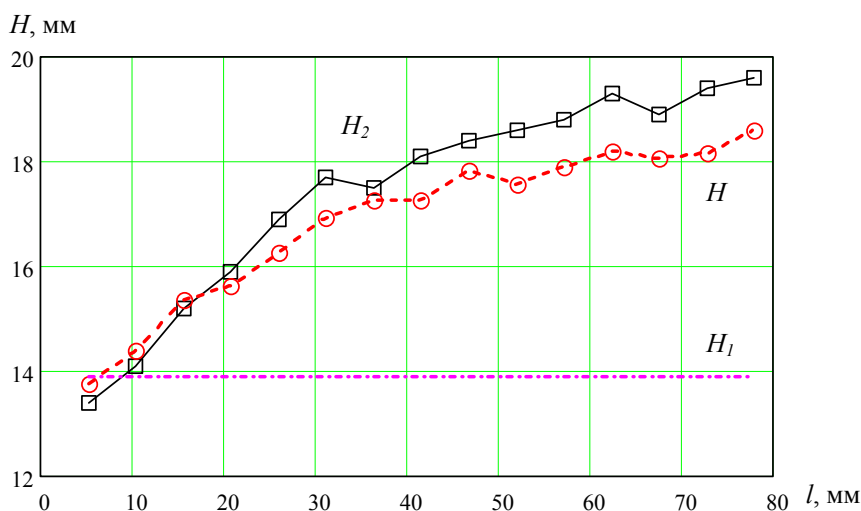


Рис. 4. Зависимость реальной нестационарной глубины проплава вдоль сварного шва в АМгб ( $h$ ) и ее оценок  $H_1$  и  $H_2$

## ВЫВОДЫ

ЭЛС – прогрессивный технологический процесс, имеющий определенную, расширяющуюся область применения в промышленности. Его слабым местом является недостаточная стабильность и повторяемость результатов в случае сварки изделий ответственного назначения, в силу чего развитие электронно-лучевого оборудования имеет тенденция на автоматизацию процесса.

Основным сдерживающим моментом в обеспечении стабильности формы провара при ЭЛС является отсутствие математического обеспечения для оценки состояния процесса и управления им на основе полной информации об объекте. Это требует дальнейших исследований ЭЛС как объекта управления, разработки математических моделей для обеспечения наблюдаемости и оценки состояния процесса.

Анализ ЭЛС как объекта управления показывает, что наличие значительного уровня неконтролируемых возмущений, которые усложняют оценку состояния процесса и управление им. Причем, основным возмущениям подвержены: характер распределения плотности мощности в пучке; диаметр пучка; эмиссионная способность катода и геометрия конструкции генератора, которые определяют собственно источник энергии.

Разумным выходом в этой ситуации является представление ЭЛС в виде единой системы двух объектов: «источник энергии – парогазовый кратер». Обеспечение наблюдаемости первого из них – источника энергии, переводит основную часть возмущений в разряд контролируемых. Это повышает управляемость и способствует решению задачи по оценке состояния формы кратера и стабилизации формы проплава сварного шва.

Учитывая аксиальную форму генераторов сварочных пучков, распределение плотности мощности для пространственного источника энергии можно принять в виде нормального закона. Причем, в фокальном сечении распределение полностью определяется двумя параметрами: значением плотности на оси пучка и его радиусом, за который разумно принять радиус эквивалентного по мощности пучка с равномерным круговым распределением.

Между множеством нормальных кривых распределения плотности мощности для источника энергии и соответствующим множеством форм парогазовых кратеров существует взаимно однозначное соответствие. Поскольку первым членом разложения нормальной кривой в ряд Тейлора является парабола, то форму кратера можно считать параболоидом вращения, который однозначно определяется двумя параметрами: глубиной  $H$  и радиусом полости  $R$ . Такое определение формы кратера хорошо согласуется с практикой задания геометрических параметров для формы провара на производстве.

Оценку текущих параметров формы проплава для случая  $(H/2R) \leq 5$  можно выполнять по уравнению связи параметров состояния парогазового кратера с сигналами компонент энергетического баланса пучка на передней стенке кратера, как выходными переменными процесса ЭЛС.

В качестве таких сигналов можно использовать яркость парогазового факела над кратером (для излучаемой доли мощности) и ток изделия (для поглощаемой доли мощности). Такое уравнение связи позволяет отслеживать трендовые изменения параметров формы проплава.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Электронно-лучевая сварка* / [Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Ковбасенко С. Н. и др.] ; под ред. Б. Е. Патона. – Киев : Наукова думка, 1987. – 256 с.
2. Iria H. *Relation between beam properties and shape of fusion zone in electron beam welding* / H. Iria, S. Tsukamoto, M. Inagaki // *Transac. of Nat. Res. Ins. For Metal.* – 1984. – Vol. 26, № 4. – P. 25–33.
3. *Справочник по теории автоматического управления* / под ред. А. А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 712 с.
4. Ластовирия В. Н. *Принципы управления формой проплава в технологическом процессе электронно-лучевой сварки* / В. Н. Ластовирия // *Машиностроение и инженерное образование.* – 2008. – № 3. – С. 12–17.
5. Карамонов К. Е. *Экспериментальное исследование структуры электронных пучков* / К. Е. Карамонов // *Физика и химия обработки материалов.* – 1971. – № 2. – С. 63–68.
6. Ластовирия В. Н. *Система оперативного контроля проплавающих свойств пучка в ходе сварочного процесса* / В. Н. Ластовирия, Н. В. Полянский // *Сварочное пр-во.* – 1990. – № 8. – С. 25–26.
7. Lastoviryia V. N. *The Method of Welding Joint's Form Description During the Process of Beam Welding on the Base of and Gas Canal* / V. N. Lastoviryia // *4 conf. on electron beam technologies and materials: EBT'94.* – Varna, 1994. – P. 119–122.
8. Ластовирия В. Н. *Идентификация связи формы проплава с энергетическим балансом пучка при электронно-лучевой сварке* / В. Н. Ластовирия // *Машиностроение и инженерное образование.* – 2007. – № 3. – С. 17–22.
9. Ластовирия В. Н. *Экспериментальная методика идентификации уравнений связи для оценки формы проплава в ходе ЭЛС* / В. Н. Ластовирия // *Заготовительное производство в машиностроении.* – 2010. – № 3. – С. 19–24.