

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ПРОПЛАВА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

В.Н. Ластовиря



**ЛАСТОВИРЯ
Вячеслав
Николаевич**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования и технологии сварочного производства Московский Государственный индустриальный университет (МГИУ). Специалист в области автоматизации сварочных процессов. Автор более 100 научных трудов, изобретений и учебных пособий.

Введение

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) является высокоэффективным и прогрессивным технологическим процессом за счет комплексной экономии многих видов ресурсов, экологической чистоты процесса и высокого качества получаемого сварного соединения. С этих позиций ЭЛС является идеальным способом сварки, который более 45 лет остается незаменимым технологическим процессом в ряде отраслей промышленности, таких как атомная, авиационно-космическая, тяжелая, судостроительная и др. [1].

Высокие качественные показатели и широкий спектр технологических возможностей

электронного пучка как инструмента для обработки материалов подтверждаются его преимуществами в сравнении с другими способами обработки [2]:

- высоким общим и эффективным КПД нагрева (0,9–0,98);
- большой концентрацией мощности в пятне нагрева (до 10^8 Вт/см²);
- хорошей управляемостью при высоком быстродействии: мощностью, распределением плотности мощности в пятне нагрева и положением самого пятна;
- вакуумной защитой зоны обработки.

Особенно наглядно технико-экономическое преимущество ЭЛС проявляется в случае изделий большой толщины, когда за счет малого тепловложения обеспечиваются незначительные деформации.

Дальнейшее совершенствование и повышение надежности ЭЛС можно обеспечить автоматизацией процесса, поэтому мировая тенденция развития ЭЛС направлена на компьютерное управление процессом с целью достижения гарантированно стабильного уровня качества сварного шва.

Однако ЭЛС имеет и недостатки, одним из которых является нестабильность геометрической формы зоны проплава. Взаимодействие сварочного электронного пучка с металлом сопровождается образованием парогазового кратера, изменением его формы и течением

жидкого металла, а также влиянием на этот процесс неконтролируемых возмущений.

Форма проплава сварного шва 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. Кроме того, неопределенность формы парогазового канала в данный момент времени диктует необходимость периодической сварки образцов-свидетелей для контроля флуктуаций формы проплава, что снижает эффективность технологии ЭЛС.

Мероприятия по стабилизации параметров режима сварки, таких как ускоряющее напряжение (до 0,5 – 1%); тока пучка (до 3 – 5%); тока фокусирующей системы (до 0,05 – 0,1%); скорости сварки (до 3%) 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 формах: пилообразности (спайкинга) проплава, т.е. колебательного характера изменения глубины проплава, и тренда геометрической формы проплава вдоль сварного шва – устойчивого систематического изменения в течение длительного времени.

Снижение пилообразности достигается посредством уменьшения неравномерности процессов плавления и испарения в парогазовом кратере, что улучшает условия формирования шва. Последнее достигается технологическими приемами [1], которые способствуют повышению устойчивости кратера благодаря увеличению радиуса его корневой части за счет развертки и двойного преломления пучка.

В отличие от пилообразности в корне шва, тренд является следствием дрейфа условий выполнения сварочного процесса и энергетических характеристик электронного пучка как источника энергии [3].

Для улучшения ситуации требуется непрерывное наблюдение проплавления свойств

источника энергии и параметров формы проплава, а еще лучше их стабилизация за счет управления одновременно с процессом сварки.

Описание ЭЛС с позиций пространства состояний

Рассмотрим модель процесса ЭЛС как многомерного объекта с позиций пространства состояний [4], под которым будем понимать n -мерное арифметическое (евклидово) пространство $\mathbf{R}^n$. Пусть в этом пространстве определена некоторая его область $\mathbf{X} \subset \mathbf{R}^n$, каждый элемент $\mathbf{x}$ которой (вектор-столбец) полностью определяет состояние процесса. Поскольку процесс ЭЛС является открытой системой, то для отражения воздействий внешней среды необходимо дополнительно ввести области пространства управлений $\mathbf{X} \subset \mathbf{R}^m$ и возмущений $\mathbf{W} \subset \mathbf{R}^k$ соответствующих размерностей. Размеры областей введенных пространств определяются ограничениями, которые накладываются соответственно на значения векторов состояния, управления и возмущения, а их размерность – числом компонент соответствующих векторов.

Кроме того, если дополнить объект измерительным устройством переменных состояния, то как отображение области состояний $\mathbf{X}$ получим область $\mathbf{Y}$ пространства $\mathbf{R}^p$ с элементами $\mathbf{y} = [y^1, y^2 \dots y^p]^T$ – векторами выхода, которые определяются согласно уравнению связи:

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad (1)$$

где $\mathbf{C}$ – матрица коэффициентов размера $p \times n$, полученная априори, например на основании метода энергетического баланса пучка [5].

Тогда процесс ЭЛС как объект можно представить в схематичном виде (рис. 1). В зависимости от поставленной задачи размерности n , m , k , и p введенных векторных переменных будут различными. Возможные компоненты векторов – переменных состояния, управления и возмущения для ЭЛС приведены в табл. 1.

Для управления процессом ЭЛС необходимо чтобы он был наблюдаемым. В понятие "наблюдаемость" вкладывается смысл непосредственного измерения текущих значений состояния процесса $\mathbf{x}(t)$ или определения его оценок $\hat{\mathbf{x}}(t)$ кос-

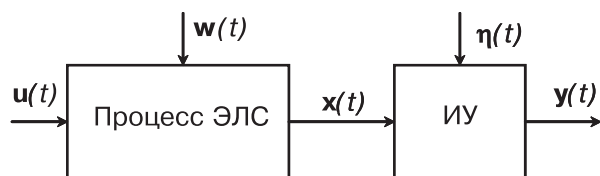


Рис. 1. Представление процесса ЭЛС с позиций пространства состояний:

$u(t)$ – вектор управлений; $w(t)$ – вектор возмущений; $x(t)$ – вектор состояний; $y(t)$ – вектор выходов; $\eta(t)$ – вектор шума измерения; ИУ – измерительное устройство

венным образом на основе измерения векторов $u(t)$, $y(t)$ и использования априорной информации о процессе. Для этого в состав современной замкнутой системы автоматического управления (САУ) технологически вводят устройство для оценки состояния процесса по зашумленным наблюдениям $y(t)$, $u(t)$ и математической модели процесса (рис. 2). Устройство управления формирует вектор управляющих воздействий $u(t)$, используя для этого текущие оценки состояния процесса.

Следует иметь в виду, что не все перемен-

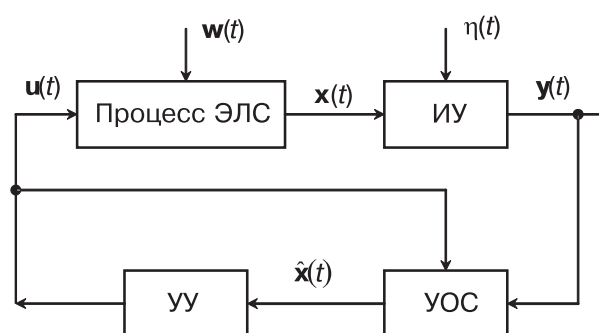


Рис. 2. Структура основного контура САУ процессом ЭЛС:

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

ные состояния (см. табл. 1) можно измерить, т.е. определить из выражения (1). В силу этого не все компоненты состояния могут быть непосредственно управляемы на основе классического принципа обратной связи. В этом случае, прежде чем приступить к реализации управления, необходимо решить задачу наблюдаемости состояния процесса ЭЛС.

Таблица 1

Классификация возможных переменных процесса ЭЛС с позиций пространства состояний

Управления $u(t)$	Возмущения $w(t)$	Состояния $x(t)$	Выходы $y(t)$
Ускоряющее напряжение Ток пучка Ток фокусирующей магнитной линзы Скорость сварки Давление в вакуумной камере Потенциал управляющего электрода Ток накала или ток бомбардировки катода Токи отклоняющих катушек Сварочная дистанция и пр.	Параметры распределения плотности мощности в пучке Диаметр пучка в фокальной плоскости Угловая апертура пучка в фокусе Потеря эмиссии накаливого катода Нестабильность геометрических параметров генератора пучка Смещение стыка Неоднородность условий теплоотвода вдоль стыка и пр.	Параметры формы парогазового кратера Температурное поле области взаимодействия пучка с металлом Параметры динамики расплава в кратере Поток энергии, излучаемой из кратера во внешнее пространство Давление паров внутри кратера Температура поверхности сварочной ванны Толщина жидкой прослойки и пр.	Диаметр горловины кратера Ширина кристаллизующегося шва Токи эмиссии электронов и ионов из кратера Ток изделия и сквозной ток Яркость свечения парогазового факела Параметры электромагнитного излучения Интенсивность рентгеновского излучения Сигнал акустической эмиссии и пр.

Будем считать, что наблюдаемость координат вектора состояния $\mathbf{x}(t)$ обеспечивается с помощью уравнения связи (1). При управлении в приращениях динамику многомерного объекта можно описать линейным дифференциальным уравнением состояния [4]:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{w}, \quad (2)$$

где $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{D}$ – матрицы коэффициентов.

Тогда решение уравнения состояния, т.е. текущее состояние процесса ЭЛС будет определяться выражением:

$$\mathbf{x}(t) = \Phi(t)\mathbf{x}(0) + \int_0^t \Phi(t-\tau)[\mathbf{B}\mathbf{u}(\tau) + \mathbf{D}\mathbf{w}(\tau)]d\tau, \quad (3)$$

где $\Phi(t) = e^{\mathbf{A}t}$ – переходная матрица процесса; $\mathbf{x}(0)$ – начальное состояние процесса в момент $t=0$.

Из правой части выражения (3) видно, что во второе слагаемое, определяющее вынужденное изменение состояния, помимо вектора управлений $\mathbf{u}$ входит вектор неконтролируемых возмущений $\mathbf{w}$. Следовательно, даже в отсутствие управления состояние процесса будет изменяться в силу наличия возмущений. Таким образом, в рамках САУ (см. рис. 2), текущие значения параметров формы кратера как переменные состояния, определяющие геометрическую форму проплава, будут оценены с ошибкой. Так, при наличии возмущений, глубина проплава изменится во времени при стабильных параметрах режима сварки:

$$H(t) = \bar{H} + \xi(t),$$

где $\bar{H}$ – значение глубины, определяемое установленным режимом сварки ($\mathbf{u} = \text{const}$); $\xi(t)$ – изменение глубины за счет действия неконтролируемых возмущений.

На первый взгляд кажется, что поскольку текущее состояние наблюдаемо, то ошибка $\xi(t)$ будет скомпенсирована за счет отрицательной обратной связи, однако это не так. Следует помнить, что уравнение связи (1) получено при начальном векторе возмущений $\mathbf{w}_0(t)$, действующим на момент идентификации матрицы связи $\mathbf{C}$. Однако в ходе сварки условия по возмущению меняются, и матрица связи, используемая для оценки вектора состояния, в этом случае должна быть нестационарной ($\mathbf{C} = \mathbf{C}(t)$). Это требует непрерывной ее адаптации к из-

меняющимся условиям протекания процесса ЭЛС, что является неоправданным усложнением задачи.

Более того, при значительном уровне неконтролируемых возмущений, что характерно для процесса сварки, нарушается адекватность модели процесса (2): матрицы $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{D}$ также оказываются нестационарными. Возникает еще задача адаптации динамической модели процесса.

Разумный выход в этой ситуации – перевод части неконтролируемых возмущений в разряд контролируемых. Основная часть возмущений (см. табл. 1) действует на электронный пучок как источник энергии. Следовательно, наблюдение источника энергии обеспечит контроль основной части возмущений $\mathbf{w}_1(t)$, действующих в процессе ЭЛС.

Любой процесс сварки плавлением можно представить в виде двух составляющих процессов: во-первых, процесса формирования источника энергии (ПФИ) с заданными проплавающими свойствами, т.е. пространственными и энергетическими характеристиками, во-вторых, процесса формирования парогазового кратера (ПФК), т.е. 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», которые определяются соответственно ПФИ и ПФК (рис. 3). При этом состояние $\mathbf{q}(t)$ источника энергии является управ-

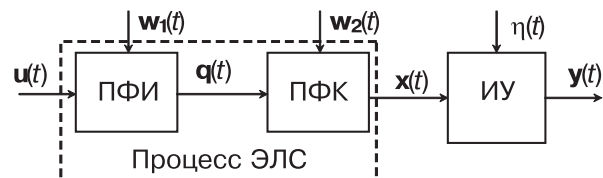


Рис. 3. Представление процесса ЭЛС единой системой объектов «источник энергии – парогазовый кратер»: ПФИ – процесс формирования источника энергии; ПФК – процесс формирования парогазового кратера; $\mathbf{w}_1$, $\mathbf{w}_2$ – возмущения, действующие на объекты

лением по отношению к ПФК и воздействует на состояние кратера $\mathbf{x}(t)$, формируя соответствующую для данных условий его форму, обеспечивающую заданную форму проплава шва.

Таким образом, подход к процессу ЭЛС при управлении может быть двояким: как к целному или как к составному объекту. Выбор варианта представления процесса определяет структуру САУ, технические средства ее реализации и алгоритм управления.

Описание состояния источника энергии

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

Однако сварочная пушка, как правило, проектируется и настраивается лишь на обеспечение заданного первеанса и прохождения тока через анодное отверстие, поэтому aberrации в пушке выражены весьма сильно. Эксперименты показывают, что в фокальной плоскости магнитной фокусирующей линзы распределение плотности тока близко к гауссовому [6].

Строго говоря, понятие диаметра как характеристики линейного размера пучка приемлемо только для равномерного кругового распределения и неприемлемо для нормального распределения (рис. 4), края которого уходят в бесконечность.

В общем случае для аксиального конического пучка будем иметь двухпараметрическое распределение в функции координат r и z цилиндрической системы:

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

где параметрами являются $q_0(z)$ – плотность

мощности на оси пучка и $r_3(z)$ – радиус эквивалентного (по мощности) кругового пучка с равномерным распределением.

Выражение (4) может служить обобщенной энергетической характеристикой электронного пучка как технологического инструмента. Для сечения $z = \text{const}$ из эквивалентности следует равенство для выражений мощностей реального и эквивалентного пучков:

$$P = 2\pi \int_0^\infty q(r) r dr = \pi r_3^2 q_0, \quad (5)$$

определяемых через нормальное распределение плотности (кривая 1), не имеющее четкой границы, и равномерное распределение в круге радиуса r_3 . При этом в пределах этого круга будет заключено 62% полной мощности реального пучка. Действительно, на основании (5):

$$P_r = 2\pi q_0 \int_0^{r_3} e^{-r^2/r_3^2} r dr = 0,62\pi r_3^2 q_0. \quad (6)$$

За пределами круга радиуса r_3 расположен ореол пучка с малым уровнем плотности мощности (см. рис. 4), который в силу недостатка концентрации оказывает незначительное влияние на процесс сварки. Следовательно, данный параметр может быть принят в качестве радиуса реального пучка. Хорошую оценку значения r_3 дает метод прямого края. Причем измерение радиуса возможно осуществить непосредственно в ходе процесса сварки [7]. Другой параметр – q_0 , определяющий состояние источника энергии (4), находится из выражения (5) при известной мощности пучка.

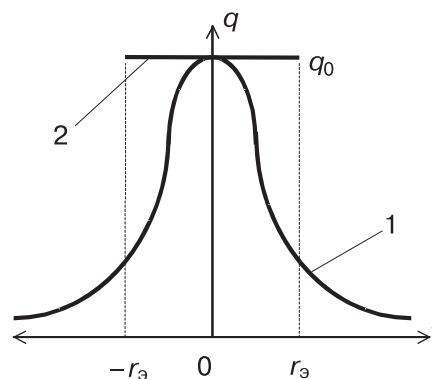


Рис. 4. Распределение плотности мощности в заданном сечении пучка $z = \text{const}$: 1 – нормальное, для реального; 2 – равномерное, для эквивалентного кругового пучка

Таким образом, полагая что пучок в фокальном сечении имеет распределение плотности мощности, которое описывается нормальным законом с двумя параметрами q_0 и r_3 , можем ввести его вектор состояния в виде:

$$\mathbf{q}(t) = \begin{bmatrix} q_0(t) \\ r_3(t) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Описание состояния формы парогазового кратера

Форма проплава шва при ЭЛС является важной характеристикой, определяющей качество получаемого соединения. В первом приближении можно считать, что форма проплава определяется формой парогазового кратера, возникающего при действии пучка на материал, точнее, его головной частью, где влияние гидродинамики сварочной ванны минимально.

Наличие потоков перегретого металла, которые выбрасываются в хвостовую часть сварочной ванны при движении кратера, приводит к различию поперечных сечений парогазового кратера и расплавленной зоны. Последняя приобретает вид гриба за счет плавления приповерхностного слоя теплом, содержащимся в перемещаемом жидком металле.

Как правило, форму проплава в поперечном сечении аппроксимируют кривой нормального распределения, которая имеет «крылья», уходящие в бесконечность. Принимая во внимание наличие вторичного переплава приповерхностного слоя, можно утверждать, что подобная аппроксимация в верхней части в минимальной степени свойственна самому кратеру.

С этих позиций в случае осесимметричного пучка с нормальным распределением плотности мощности целесообразно аппроксимировать форму кратера параболоидом вращения. В силу осевой симметрии параболоид полностью определяется своим меридиональным сечением, которое при переходе к полярным координатам можно задать параболой $s(r, z)$ [8].

Основными геометрическими параметрами кратера, обуславливающими форму сечения проплава, можно считать глубину H и радиус R головной части кратера. Эти же пара-

метры: глубина и ширина $B=2R$ являются основными, применяемыми в производстве для характеристики формы шва.

Тогда параболу $s(r, z)$ удобно описать уравнением в относительных переменных, представляющих отношение соответствующей независимой переменной к введенным геометрическим параметрам:

$$\frac{z}{H} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2, \quad (8)$$

где H и R – параметры, определяющие конкретную форму параболы (8).

Подобный подход позволяет перейти от распределенного объекта $s(r, z)$ к объекту с сосредоточенными параметрами, а его состояниями являются двумерные векторы:

$$\mathbf{s}(t) = \begin{bmatrix} H(t) \\ R(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Оценка вектора состояния формы кратера $\mathbf{s}(t)$ сводится к оценке его компонент $R(t)$ и $H(t)$ – радиуса и глубины.

Правомерность представления сечения кратера параболой подтверждается также тем, что разложение в ряд Тейлора в окрестности начала координат гауссовой кривой вида $z/H = \exp(-r/R)^2$ в первом приближении выражается параболической зависимостью:

$$e^{-\left(\frac{r}{R}\right)^2} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(r/R)^{2n}}{n!} \cong 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2.$$

Ряд равномерно сходится на любом конечном промежутке, и при $r < R$ очередной член ряда $(r/R)^4$ и все последующие (учитывая чередование знаков) могут быть отброшены.

Таким образом, в пределах ширины кратера оба представления равноправны и определяются двумя геометрическими параметрами, которые можно принять за параметры состояния парогазового кратера.

Особенности управления процессом ЭЛС как системой «источник энергии парогазовый кратер»

Итак, из анализа объекта в пространстве состояний следует, что при создании системы управления процессом ЭЛС можно придерживаться двух подходов: либо однообъектного,

либо двухобъектного, когда процесс ЭЛС представлен единой системой двух процессов – ПФИ и ПФК. Во втором случае управлением для процесса формирования кратера является вектор $\mathbf{q}(t)$, характеризующий источник энергии – электронный пучок, который, в отличие от первого подхода, в данном случае должен быть наблюдаемым. Это, с одной стороны, предполагает определенное усложнение САУ в смысле технической и алгоритмической реализации, а, с другой стороны, повышает управляемость процессом и снижает уровень неконтролируемых возмущений, что предполагает более высокое качество управления.

Действительно, хорошо известно, что между источником энергии и формой пароговзого кратера существует взаимно однозначное соответствие, т.е. каждому источнику, при прочих равных условиях, соответствует единственная форма проплава, и наоборот. Тогда подобное соотношение эквивалентности как объективное отображение между множеством источников и множеством форм кратеров можно установить и для введенных векторов состояний ПФИ и ПФК:

$$q(r, z) \Leftrightarrow s(r, z) \Rightarrow \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_0 \\ r_{\text{э}} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} H \\ R \end{bmatrix} = \mathbf{s}.$$

Откуда следует, что вектор состояний ПФИ $\mathbf{q}$, являясь управлением для ПФК, определяет вектор состояния пароговзого кратера $\mathbf{s}$, т.е. глубину и радиус кратера. Следовательно, наблюдение $\mathbf{q}$ позволяет не только улучшить оценку $\mathbf{s}$, но и выполнить эту оценку более простыми математическими средствами.

Кроме того, появляется возможность организовать дополнительный контур – контур управления источником энергии, что, в свою очередь, открывает перспективу стабилизации проплавающих свойств источника. Это создает весьма благоприятную обстановку для управления формой проплава ввиду снижения уровня возмущений за счет их части, действующей на процесс ЭЛС в тракте ПФИ. Наличие двух объектов во втором подходе приводит к двум контурам в структурной схеме САУ (рис. 5).

На схеме одноконтурной САУ (см. рис. 2)

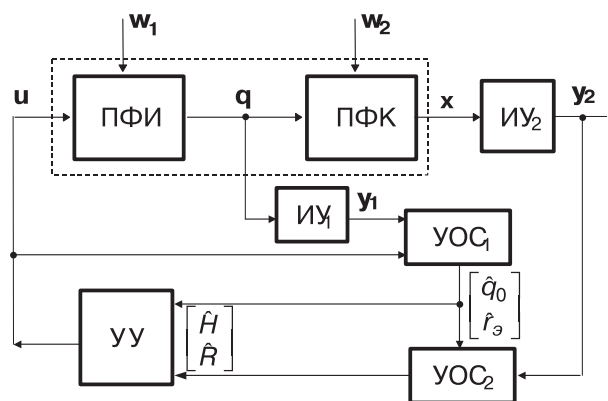


Рис. 5. Двухконтурная САУ процессом ЭЛС как системы «источник энергии – пароговзого кратер»:
ИУ – измерительное устройство;
УОС – устройство оценки состояния;
УУ – управляющее устройство;
^ – символ оценки переменной

компонентами вектора управления $\mathbf{u}$ являются параметры режима ЭЛС, устанавливаемые с помощью электронно-лучевой установки (ускоряющее напряжение, ток пучка, ток фокусирующей катушки, скорость сварки и пр.). Устройство оценки состояния дает текущую оценку компонент $\hat{H}$, $\hat{R}$ вектора состояния формы кратера в условиях действия полного вектора возмущений, действующих как в тракте ПФИ – $\mathbf{w}_1$, так и в тракте ПФК – $\mathbf{w}_2$.

По полученным оценкам устройство управления в соответствии с алгоритмом, реализующим цель управления, формирует вектор управления, который обеспечивает коррекцию хода процесса ЭЛС в нужном направлении. Например, компенсирует отклонение параметров формы кратера в случае стабилизации. Значительный уровень возмущений, действующий на процесс, делает его нестационарным объектом управления со всеми вытекающими последствиями. Управление выполняется более простыми средствами по сравнению со схемой, изображенной на рис. 5, но сварка проводится в условиях ненаблюдаемости источника энергии и, соответственно, незнания свойств инструмента обработки – электронного пучка. Результат будет существенно зависеть от стабильности источника энергии.

Схема двухконтурной САУ (см. рис. 5) имеет контур, охватывающий ПФИ, для чего было вве-

дено два дополнительных блока: ИУ₁ и УОС₁, которые осуществляют измерение выходов процесса формирования источника и оценку компонент его вектора состояния: q_0 и r_3 , что обеспечивает наблюдаемость источника энергии. Данный контур является контуром управления ПФИ. Используя полученные оценки, УУ формирует управляющие воздействия на ПФИ, которые корректируют параметры распределения плотности тока электронного пучка как компоненты его вектора состояния, обеспечивая стабильность их во времени.

Управление источником энергии можно осуществить как известными способами развертки пучка и сканирования его фокуса с целью обеспечения требуемого распределения, 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 [10].

Следует заметить, что необходимым условием этого будет достаточно малый уровень возмущений в тракте ПФК, что зависит от вида технологического процесса сварки. Но в любом случае данная задача при наличии контура управления ПФИ уже решена наполовину, поскольку существенная часть возмущений w_1 оказывается компенсированной, и управление ПФК проходит на фоне меньшего уровня возмущений.

Второй контур управления, образованный цепочкой ИУ₂ и УОС₂, охватывает собственно процесс формирования парогазового кратера. При этом на вход УУ поступают оценки компонент вектора состояния формы кратера, которые получены в условиях как минимум контроля источника энергии или как максимум его стабильности. В такой ситуации значительно упрощается алгоритм и процедура оценки состояния ПФК и повышается качество управления параметрами формы проплава.

Выбор стратегии управления ЭЛС

Выбор стратегии необходимо осуществлять, опираясь на знание свойств используе-

мого сварочного оборудования и, в частности, конструкции катодного узла электронно-лучевой пушки, а также назначения и степени ответственности свариваемого изделия. Это связано с тем, что оборудование определяет свойства источника энергии и изменение их во времени, что приносит основную часть возмущений (см. табл. 1), а изделие определяет требования гарантированного качества проведения технологического процесса. Из этих соображений можно рассмотреть три варианта изменения параметров состояния источника энергии во времени:

1) стабильный источник (идеализированный случай), характеризуемый постоянством свойств во времени $q(t)=q^0=\text{const}$;

2) детерминировано нестабильный источник, характеризуемый изменением свойств во времени по известному закону:

$$q(t)=q^0 + q^1(t),$$

где $q^1(t)$ – известная вектор-функция времени;

3) стохастический нестабильный источник, характеризуемый случайным изменением свойств во времени:

$$q(t)=q^0 + q^1(t) + \xi(t),$$

где $\xi(t)$ – случайная вектор-функция времени с нормальным распределением плотности вероятностей.

Примером стабильного источника может служить электронный пучок, сформированный трехэлектродной прямонакальной пушкой со стабилизацией тока пучка по току накала катода (ленточного, например) или пучок массивного катода на некотором интервале времени, меньшем времени наступления заметных изменений его свойств.

Такая стабилизация тока в большей степени обеспечивает неизменную амплитуду q_0 кривой распределения плотности мощности (см. рис. 4.). Но по истечении некоторого критического интервала времени кривая распределения в силу потери эмиссии катода будет заметно отличаться от исходной. Стабильный источник позволяет использовать однообъектный подход и более простую схему системы управления (см. рис. 2). Это возможно по при-

чине малого уровня возмущений в тракте источника энергии процесса ЭЛС.

Детерминированная нестабильность источника является весьма распространенным явлением в ЭЛС и объясняется характерным изменением его свойств в ходе эксплуатации и повторением закона нестабильности при смене катода электронной пушки. Хорошо известно, что потеря эмиссии катода приводит к изменению характеристик электронного пучка, в частности его тока по экспоненциальному закону: $I(t) = I_m \exp(-kt)$, где k – коэффициент спада тока. Определяют этот процесс множество факторов, включая степень вакуума в области генерации, состав остаточных газов, материал катода и пр.

Компенсация потерь тока обычно осуществляется увеличением потенциала на управляющем электроде пушки, что приводит к ее «отпиранию» и соответствующему увеличению диаметра пучка за счет увеличения площади участка катода, с которого отбираются электроны. В этом случае вместе с током изменяются и условия формирования пучка, а также его характеристики.

В данном случае в зависимости от требований к системе и целей управления возможны оба подхода: как однообъектный, для чего необходимо идентифицировать зависимость $q^1(t)$, так и двухобъектный. Но в производственных условиях однообъектный подход требует высокой культуры производства и хорошего технического оснащения. Известно, что например при смене катода могут быть допущены неточности установки, вызывающие скачкообразные изменения характеристик пучка. Поэтому для этих целей применяют специальные приспособления, а катоды изготавливают на специальных штампах.

Наиболее реальным представляется третий вариант источника энергии, особенно если учесть, что генерация пучка связана с высокими температурами нагрева и изменениями геометрии не только катода, но и прилегающих элементов конструкции. Это связано с деформацией и нарушением юстировки электронно-оптической системы, приводящей к непредсказуемым, случайным изменениям свойств пучка.

Таким образом, наибольшие перспективы

использования принадлежат двухобъектному подходу, потому что только при такой стратегии управления достижима полная управляемость процессом сварки и контроль источника энергии, вкуче обеспечивающие гарантированное качество сварного шва.

Заключение

1. ЭЛС является прогрессивным технологическим процессом, имеющим определенную, расширяющуюся область применения в промышленности. Его слабым местом является недостаточная стабильность и повторяемость результатов в случае сварки ответственных изделий, в силу чего развитие электронно-лучевого оборудования имеет четкую тенденцию 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.

2. Анализ ЭЛС как объекта управления показывает, что наличие значительного уровня неконтролируемых возмущений усложняет 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 которых 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.

3. В общем случае электронный пучок как источник энергии и форма парогазового канала

описываются четырехмерной функцией пространственных координат и времени, что соответствует распределенным переменным состояниям данных объектов.

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 удобно 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 и радиусом полости. Такое определение формы кратера хорошо согласуется с практикой задания геометрических параметров для формы провара на производстве.

4. Из возможности представления ЭЛС единой системой двух объектов следует два стратегических подхода к управлению процессом: однообъектный, когда источник энергии не вычленяется из процесса ЭЛС, и двухобъектный, когда это осуществляется. Первый подход имеет смысл для случая стабильного во времени источника, и он приводит к одноконтурной системе управления. Второй – в случае нестабильного источника энергии приводит к двухконтурной системе управления с обязательной наблюдаемостью источника.

Применение второго подхода существенно снижает уровень неконтролируемых возмущений, действующих на процесс сварки, упрощает вид используемых моделей и алгоритмов, но увеличивает сложность аппаратного состава и организации системы управления ЭЛС.

Список 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. Ластовирия В. Н. Оборудование для обработки материалов электронным пучком. Учеб. пособ. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 132 с.
3. Iria H., Tsukamoto S., Inagaki M. Relation between beam properties and shape of fusion zone in electron beam welding // Transac. of Nat. Res. Ins. For Metal. 1984. Vol. 26. № 4. P. 25–33.
4. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
5. Lastovirya V. N. The Method of Welding Joint's Form Description During the Process of Beam Welding on the Base of and Gas Canal // 4 conf. on electron beam technologies and materials: EBT'94. – Varna, 1994. P. 119 – 122.
6. Карамонов К. Е. Экспериментальное исследование структуры электронных пучков // Физ. и хим. обраб. материалов. 1971. № 2. С. 63–68.
7. Ластовирия В. Н., Полянский Н. В. Система оперативного контроля проплавления свойств пучка в ходе сварочного процесса // Сварочное производство. 1990. № 8. С. 25–26.
8. Ластовирия В. Н. Идентификация связи формы проплава с энергетическим балансом пучка при электронно-лучевой сварке // Машиностроение и инженерное образование. 2007. № 3. С. 17 – 22.
9. Ластовирия В. Н. Процесс электронно-лучевой сварки как объект управления формой провара // Сварочное производство. 1997. № 5. С. 2 – 5.
10. Ластовирия В. Н. Концепция организации энергоблока для ЭЛС со стабилизацией параметров нормального распределения плотности мощности в пучке/ Сварка и контроль // ВНТК к 150-летию Н.Г. Славянова: Сб. докл. Т. 1. Пермь, 2004. С. 12–46.