



СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

К. С. АКОПЬЯНЦ, канд. техн. наук, чл.-кор. НАН Украины О. К. НАЗАРЕНКО, В. В. ГУМОВСКИЙ, инж.,
В. П. ЧЕРНЯКИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано, что система дает продольное изображение луча с распределением плотности мощности. Определены положение фокуса с точностью ± 1 мм, минимальный радиус, максимальная плотность тока, угол сходимости. Сделан вывод о работоспособности катода пушки. С помощью системы определен ток магнитной фокусирующей линзы с точностью 0,5...0,7 %, необходимый для фокусировки луча на требуемом расстоянии относительно изделия.

Ключевые слова: электроно-лучевая сварка, воспроизводимость швов, диагностика луча, положение фокуса, минимальный радиус луча, распределение мощности, метод «края пластины», использование в установках, погрешность измерения

Введение. В большинстве промышленных установок для электронно-лучевой сварки (ЭЛС) воспроизводимость швов обеспечивается за счет контроля основных параметров процесса: тока луча, тока магнитной фокусирующей линзы, рабочего расстояния пушка–изделие, ускоряющего напряжения, скорости сварки. О работоспособности катода судят по суммарному времени его работы. Однако перед сваркой не контролируются пространственно-энергетические параметры луча (положение фокуса относительно поверхности изделия, минимальный диаметр, угол сходимости, максимальная плотность тока и ее распределение в луче).

В работах [1, 2] описано применение проводящего вращающегося зонда для определения геометрии электронного луча. Более точно структура луча, контур и положение фокуса устанавливаются при помощи датчика с радиально расположенными щелями [3] или, как в системе диагностики луча DIABEAM [4], пластины с отверстием малого диаметра (0,1 мм). Чтобы с помощью этих систем определить форму луча в продольном направлении, нужно перемещать датчик вдоль оси пучка, что усложняет работу оператора-сварщика. Предельно допустимая мощность исследуемого пучка электронов ограничена несколькими киловаттами из-за теплового разрушения датчиков.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ с учетом потребностей производства была разработана компьютеризированная система диагностики электронного луча, предназначенная для комплектации современных электронно-лучевых сварочных установок с мощностью пучка электронов до 100 кВт [5]. Система снабжена дружественным экраным интерфейсом, облегчающим ее использование.

Принцип работы системы. Устройство диагностики расположено в специально отведенном месте сварочной камеры (в стороне от свариваемого изделия). Перед началом работы электронная пушка перемещается в положение выше датчика и мишени (рис. 1, см. вклейку). Диагностику луча

производят методом «края пластины» [6]. Электронный луч отклонен большую часть времени на мишень и только кратковременно — в противоположном направлении. При этом луч пересекает край датчика, соединенного с «землей» через сопротивление утечки. В цепи датчика протекает импульс тока, по крутизне фронта нарастания которого рассчитывается распределение плотности тока в поперечном сечении луча. Импульс нормируется согласующим усилителем и далее передается в компьютер через быстродействующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Измерения производятся при изменении тока фокусирующей линзы. В результате компьютерной обработки полученного массива данных рассчитываются пространственное распределение мощности в луче, положение фокуса, минимальный радиус и т. д. Соответствующие расчеты выполняются при допущении, что электронный луч имеет осевую симметрию, полностью справедливым для сварочных пушек, использующих шайбовые или стержневые катоды с круговой симметрией. Если же в электронной пушке используется катод, изготовленный из проволоки или ленты, то осевая симметрия в луче может нарушаться, а точность измерений будет снижена.

Методика измерений. Рассмотрим особенности работы системы и процедуры измерений.

Чтобы от времени нарастания импульса перейти к единицам длины, в системе предусмотрена процедура калибровки скорости движения луча относительно датчика. Для этого в конструкции датчика имеется реперный элемент с известным размером в направлении движения луча. При пересечении лучом этого элемента измеряется длительность импульса тока. Отсюда определяется скорость движения луча:

$$v = \frac{s}{\tau},$$

где s — длина элемента, τ — длительность импульса. Калибровка скорости осуществляется на двух крайних расстояниях датчика от пушки — минимальном и максимальном. В последующем при установке датчика в какое-либо промежуточное положение относительно пушки скорость движения луча относительно датчика автоматически

пересчитывается по линейной зависимости с использованием двух калибровочных значений.

Принцип построения профиля луча в продольном осевом сечении R, Z поясним с помощью рис. 2. На рис. 2, а показано исходное положение S измерительной пластины относительно фокуса пучка, расположенного на расстоянии b от средней плоскости фокусирующей линзы. Для исследования параметров пучка вдоль его оси перемещают датчик с шагом ΔZ и производят замеры на каждом шаге (рис. 2, б) [1–4]. Мы предложили при неизменном исходном положении измерительной пластины исследование пучка осуществлять за счет пошагового изменения фокусировки луча на величину Δb (рис. 2, в).

В исходном состоянии (рис. 2, а) в плоскости датчика луч имеет радиус r_s и угол сходимости α :

$$\alpha = \frac{R_0}{b}; r_s = Z_f \alpha = Z_f \frac{R_0}{b},$$

где R_0 — радиус луча в средней плоскости линзы; Z_f — расстояние от плоскости датчика до фокуса.

В случае изменения положения датчика на величину ΔZ луч будет иметь в этом месте радиус r_1 (рис. 2, б):

$$r_1 = r_s + \Delta Z \alpha = Z_f \frac{R_0}{b} + \Delta Z \frac{R_0}{b} = \frac{Z_f R_0 + \Delta Z R_0}{b}. \quad (1)$$

Если же изменять фокусировку луча на величину Δb , а положение датчика оставить прежним (рис. 2, в), то в плоскости датчика радиус луча будет r_2 ; при этом несколько изменяется угол сходимости α_2 :

$$\alpha_2 = \frac{R_0}{b + \Delta b}; r_2 = (Z_f + \Delta b) \alpha_2 = \frac{Z_f R_0 + \Delta b R_0}{b + \Delta b}. \quad (2)$$

Сравним выражения (1) и (2). Очевидно, что если в знаменателе выражения (2) $\Delta b \ll b$, а $\Delta Z = \Delta b$, то $r_1 \approx r_2$ и вместо того, чтобы варьировать положение датчика, можно изменять фокусировку луча. Соотношение $\Delta b \ll b$ полностью справедливо для случая исследования луча вблизи его фокуса. Для оценки точности определения конфигурации пучка на значительном удалении от плоскости расположения фокуса логарифмируем, а потом дифференцируем выражение (2):

$$\ln r = \ln(Z_f R_0 + \Delta b R_0) - \ln(b + \Delta b);$$

$$\Delta r / r \approx - \Delta b / b.$$

Из последней формулы следует, что если радиус луча рассчитывается в области, расположенной ближе к пушке, чем датчик (в нашем случае это соответствует уменьшению степени фокусировки луча, т. е. фокус опускается ниже, расстояние b возрастает и при этом $\Delta b > 0$ (рис. 2, в), то получаются заниженные значения радиуса (погрешность $\Delta r < 0$). Если же вычисляется радиус

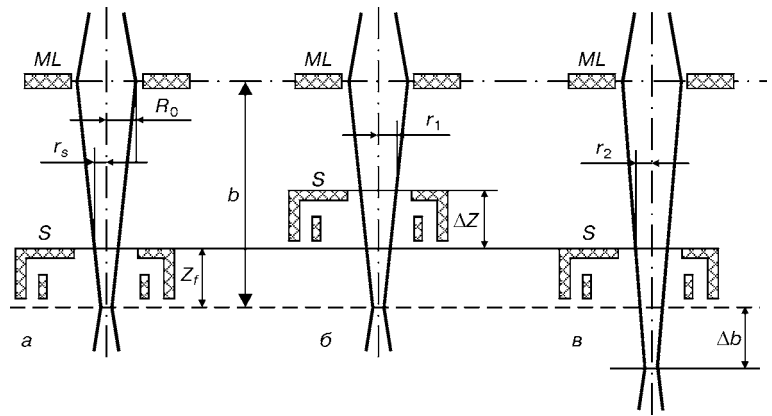


Рис. 2. Схема получения данных для построения профиля луча с распределением плотности тока в продольном осевом сечении R, Z : а — исходное положение датчика; б — смещение датчика на ΔZ при обычном способе построения зависимости $R(Z)$; в — изменение фокусировки луча на Δb при предложенном способе построения зависимости $R(Z)$; ML — средняя плоскость магнитной фокусирующей линзы

для расстояний больших, чем до датчика (в нашей схеме измерений это соответствует тому, что фокус поднялся, т. е. b уменьшилось и $\Delta b < 0$), то значения радиуса завышены ($\Delta r > 0$). Чтобы исключить ошибки в определении $r(Z)$, значения r следует умножить на поправочный коэффициент, учитывающий знак Δb :

$$k = \left(1 + \frac{\Delta b}{b_s}\right),$$

где b_s — расстояние от средней плоскости линзы до датчика. Эта поправка предусмотрена в алгоритме работы системы диагностики.

Для нахождения значения Δb при изменении тока магнитной линзы на ΔI_f производят два измерения. При одном измерении определяется ток фокусирующей линзы I_{f1} , соответствующий «острой» фокусировке луча на датчике при его близком положении z_{s1} относительно пушки. В ходе другого таким же образом определяется ток линзы I_{f2} при дальнем положении Z_{s2} датчика. Рассчитывается коэффициент чувствительности магнитной линзы:

$$\frac{\partial b}{\partial I_f} = \frac{Z_{s1} - Z_{s2}}{I_{f1} - I_{f2}}.$$

Отметим, что $\partial b / \partial I_f < 0$, поскольку с уменьшением тока линзы расстояние b увеличивается.

Значение $\partial b / \partial I_f$ определяется в первую очередь свойствами линзы (количеством витков, конструкцией магнитопровода и ускоряющим напряжением). От размеров электронного луча, в частности R_0 , $\partial b / \partial I_f$ не зависит (в первом приближении, если не учитывать aberrации).

В последующих расчетах текущая координата Z определяется выражением

$$Z = Z_s + \frac{\partial b}{\partial I_f} \Delta I_f.$$

Распределение плотности тока в поперечных сечениях луча рассчитывается численными мето-



дами следующим образом. Все сечение луча разбивается на N колец. В пределах каждого кольца плотность тока J_N принимается постоянной. Система из N линейных алгебраических уравнений для нахождения неизвестных J_N может быть записана в матричном виде:

$$SJ = A,$$

где

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \dots S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} \dots S_{2N} \\ \dots & \dots \dots \dots \\ S_{N1} & S_{N2} \dots S_{NN} \end{pmatrix}$$

— квадратная матрица размерности $N \times N$, ее члены пропорциональны площади участков колец, на которые приходятся разные значения плотности тока;

$$J = \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \dots \\ J_N \end{pmatrix}$$

— вектор N -го порядка, его составляющие — искомые значения плотности тока для каждого кольца;

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_N \end{pmatrix}$$

— также вектор N -го порядка, его составляющие — ординаты фронта импульса.

Для каждого отдельного измерения можно вывести на дисплей изображение фронта импульса (рис. 3, левая половина, см. вклейку). По его виду предварительно судят о радиусе луча и ходе процесса измерений. Крутизна фронта импульса обратно пропорциональна радиусу луча. Плавный фронт импульса, без выбросов, свидетельствует об отсутствии помех при измерении или сбоях в работе АЦП при регистрации импульса. Длительность импульса во времени пересчитывается в единицы длины за счет умножения на скорость движения луча. Центр луча определяется как абсцисса фронта импульса на половине его амплитуды.

По вычисленным значениям J_N строится распределение плотности тока для каждого поперечного сечения луча (рис. 3, правая половина, см. вклейку). Распределение с наибольшей плотностью тока на оси $J = J_{\max}$ соответствует острой фокусировке луча на датчике; значение J_{\max} выводится как характерный параметр луча (рис. 4, 5, см. вклейку). Как отмечается в работе [7], точность расчета распределения плотности тока зависит от погрешности измерений координат фронта импульса. Поэтому в расчетах предусмотрена процедура статистического сглаживания данных измерений. Ширина окна сглаживания вы-

брана равной x_{ϕ}/N , где $x_{\phi} = v\tau_{\phi}$ (τ_{ϕ} — длительность фронта импульса).

Для каждого распределения также рассчитывается усредненный эффективный радиус луча R в предположении, что распределение можно аппроксимировать законом Гаусса [3]. В пределах этого радиуса проходит 63 % всего тока луча. Можно показать, что этот радиус вычисляется из фронта импульса следующим образом:

$$R = [x(A_1 = 0,8) - x(A_2 = 0,2)]0,84,$$

где $A_1 = 0,8$ и $A_2 = 0,2$ — ординаты фронта импульса, равные соответственно 0,8 и 0,2 амплитуды.

Из всех распределений (для данной серии измерений) выбирается наименьший эффективный радиус луча R_{\min} , что соответствует острой фокусировке луча на датчике. Эта величина также выводится в информационной строке (рис. 4, 5, см. вклейку).

Полученные распределения плотности тока в поперечных сечениях луча (при разных расстояниях Z) используются для построения профиля луча с пространственным распределением плотности тока в продольном осевом сечении R, Z (рис. 4, см. вклейку). На этом изображении области разного цвета показывают распределение плотности тока в луче: желтым цветом обозначена область 75...100 % максимальной плотности тока J_{\max} ; красному цвету соответствует 50...75 %, белым обозначена область 25...50 %, синим — менее 10 % и голубым — контур луча. На этом же изображении серым цветом представлено задаваемое оператором положение изделия относительно пушки (его поперечное сечение).

Результаты измерений. Оператор-сварщик, глядя на изображение, прежде всего видит, как относительно поверхности и толщины изделия расположен фокус луча, зона его наибольшей плотности мощности (наиболее «горячее» место) при заданном токе фокусирующей линзы, каким образом нужно изменить фокусировку, чтобы поместить минимальное сечение луча на требуемый уровень относительно поверхности изделия.

На изображении луча представлены следующие размеры: по горизонтальной оси указывается расстояние от нижнего торца электронной пушки в миллиметрах (ось Z), по вертикальной оси — радиус луча в миллиметрах (ось R).

В информационных строках отображаются величины, задаваемые оператором: ток луча I_b , ток фокусирующей линзы I_f , рабочее расстояние WD (working distance) от торца пушки до поверхности изделия и толщина изделия TH (thickness). Здесь же приводятся величины, рассчитываемые системой диагностики луча: расстояние от торца пушки до фокуса луча Z_{\min} , эффективный минимальный радиус луча в фокусе R_{\min} , максимальная плотность тока J_{\max} , угол сходимости луча (половинный). Положение фокуса Z_{\min} определяется с погрешностью ± 1 мм в области рабочих расстояний $WD = 100...200$ мм.

В этом же окне дается график зависимости $R(Z)$: изменение эффективного радиуса луча вдоль

оси для конкретной фокусировки (рис. 4, нижняя половина, см. вклейку).

Системой диагностики достаточно наглядно отображаются любые изменения качества электронного луча. Для количественного отображения этих изменений система диагностики позволяет сравнивать результаты двух измерений, например для электронного луча в начальном состоянии (пушка с новым катодом) и в некотором другом (рис. 5, см. вклейку). В нижней половине рис. 5 (см. вклейку) представлено пространственное распределение плотности тока и приведены параметры луча для катода, проработавшего в пушке длительное время. По сравнению с эталонными результатами (рис. 5, верхняя половина, см. вклейку), луч изменился: увеличился минимальный эффективный радиус R_{\min} , уменьшилась максимальная плотность тока J_{\max} ; в распределении плотности мощности нет зоны, составляющей 75... 100 % первоначальной максимальной плотности.

В каждой конкретной промышленной установке для ЭЛС заключение о сохранении работоспособности пушки или о необходимости замены катода определяется технологическими условиями на ЭЛС конкретного изделия. В технологической карте должны быть указаны допустимые отклонения положения фокуса луча Z_{\min} , минимального радиуса луча R_{\min} , угла сходимости α , плотности тока J_{\max} . В случае недопустимо большого отклонения какого-либо параметра луча системой диагностики выдается заключение о плохом состоянии катода пушки и необходимости его замены («герлазе cathode»).

Расчетную погрешность определения тока магнитной фокусирующей линзы, требуемого для фокусировки луча с половинным углом сходимости α на заданном рабочем расстоянии, можно записать в следующем виде:

$$\frac{\Delta I_f}{I_{f\min}} = \frac{R_{\min}}{\alpha I_f} \frac{\partial I_f}{\partial b} \sqrt{2 \left(\frac{\Delta R}{R} \right)},$$

где $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \tau}{\tau} + \frac{\Delta v}{v} = 4\%$ — погрешность определения радиуса луча; $\Delta \tau / \tau_{\phi} = 1 / (f_{\text{пр}} \tau_{\phi}) = 2\%$ ($f_{\text{пр}}$ —

It is shown that system provides a longitudinal imaging of beam with a distribution of power density. Focus position with an accuracy ± 1 mm, minimum radius, maximum current density and convergence angle are determined. Conclusion about the gun cathode performance was made. Using the system, the current of a magnetic focusing lens with 0.5...0.7 % accuracy, necessary for beam focusing at a required distance from a workpiece, was determined.

частота преобразования применяемого АЦП, определяющая точность установления длительности импульса). Расчетное и экспериментально полученное значения необходимого тока магнитной линзы составляют 0,5... 0,7 %.

Техническая характеристика системы

Амплитуда импульса тока отклонения, А	.....5
Частота отклоняющих импульсов, Гц	.....3
Длительность импульса отклонения, мкс	.....30...50
Расстояние от датчика до оси отклоненного луча, мм	.....20
Среднее расстояние от нижнего торца пушки до датчика, мм	.....150
Средняя скорость движения луча относительно датчика, м/с	.....1000
Частота преобразования АЦП, МГц	.....40
Точность преобразования, разряд	.....8
Диапазон мощности исследуемых пучков, кВт	.....1...100
Точность определения положения фокуса пучка, %	.....0,5...0,7

Таким образом, система диагностики представляет собой автономный программно-аппаратный комплекс, выполненный на базе промышленного или персонального компьютера. Встраивание его в любую компьютеризированную сварочную установку не представляет трудностей.

1. Sanderson A. Electron beam delineation and penetration // British Welding J. — 1968. — 15, № 10. — P. 509–523.
2. Назаренко О. К., Локиши В. Е., Аковьянц К. С. Измерение параметров мощных электронных пучков методом вращающегося зонда // Электрон. обраб. материалов. — 1970. — № 1. — С. 87–90.
3. Elmer J. W., Teruya A. T. An enhanced Faraday cup for rapid determination of power density distribution in electron beams // Weld. J. — 2001. — № 12. — P. 288–295.
4. Dilthey U., Weiser J. Study of the «Tool» electron beam. Pt. 1. Comparison between the arata beam test and diaphragm beam measurement // Welding and Gutting. — 1995. — № 5. — P. 82–84.
5. Патон Б. Е. Современные электронно-лучевые технологии Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины // Автомат. сварка. — 2001. — № 2. — С. 3–8.
6. Зинченко Н. С. Курс лекций по электронной оптике. — Харьков: ХГУ, 1961. — 362 с.
7. Лакин Ю. Н. Точность экспериментальной оценки распределения плотности тока по сечению электронного пучка // Автомат. сварка. — 1984. — № 4. — С. 69–70.

Поступила в редакцию 17.06.2002