УДК 621.791.72

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННОГО ТОКА И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ ЛУЧА ОТНОСИТЕЛЬНО СТЫКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

© 2016 В.Я. Браверман

Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

Статья поступила в редакцию 28.09.2016

Произведен анализ зависимостей вторично-эмиссионного тока и рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка свариваемых деталей при электроннолучевой сварке однородных и разнородных материалов. Установлена идентичность этих характеристик. Характеристики имеют экстремальный характер. При сварке однородных материалов минимум зависимостей соответствует точному совпадению положений луча и стыка. При сварке разнородных материалов минимум вторично-эмиссионного тока смещается в сторону материала с меньшим коэффициентом вторичной эмиссии, а минимум рентгеновского излучения в сторону материала с меньшим атомным номером. Идентичность характеристик обусловлена тем, что явления вторичной эмиссии и рентгеновского излучения являются следствием взаимодействия электронного луча с материалом свариваемых деталей. В связи с этим для анализа рассматриваемых зависимостей может быть применен одинаковый математический аппарат, а реализация устройств слежения за стыком может быть осуществлена унифицированными аппаратными и программными средствами.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, вторично-электронная эмиссия, рентгеновское излучение, позиционирование электронного луча по стыку

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) широко применяется для получения неразъемных соединений в агрегатном и корпусном производствах изделий аэрокосмической отрасли. Сложность и многофакторность процесса ЭЛС приводит к проблеме воспроизводимости качества сварных швов и к необходимости управления процессом. Вопросы обеспечения точного позиционирования луча по стыку свариваемых деталей остаются актуальными, особенно при сварке протяженных стыков крупногабаритных конструкций. Допустимая погрешность совмещения луча со стыком обычно не превышает 0,2 мм. Такая точность обусловливает необходимость применения устройств автоматического наведения луча на стык.

В качестве источника информации о положении луча относительно стыка применяют тормозное рентгеновское излучение (РИ) и вторично-электронную эмиссию, сопутствующие процессу ЭЛС. На рис. 1 представлены схемы приема вторичных электронов и РИ. Датчиком вторичных электронов является алюминиевая пластина с пролетным отверстием (рис. 1а). В качестве рентгеновского датчика используют, например, сцинтиллятор на основе кристалла *NaJ* (рис. 1б). На рис. 2 приведены примеры расположения датчика вторичных электронов (рис. 2а) и датчика рентгеновского излучения (рис. 2б) [1]. Ток вторичных электронов *I*₆₀ может быть представлен следующим образом [2]:

$$I_{\rm B3} = k_{\rm BJ} \cdot \varphi \cdot I_{\rm A} \tag{1}$$

где I_n – ток луча; $k_{\text{вд}}$ – коэффициент, учитывающий количество вторичных электронов, попадающих на датчик; φ – коэффициент вторичной эмиссии свариваемых материалов; I_n – ток электронного луча.



Рис. 1. Схемы приема сигналов: ЭЛП – электронно-лучевая пушка; ЭЛ – электронный луч; КВЭ – коллектор (датчик) вторичных электронов

Браверман Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: bravermanvladimir@rambler.ru



Рис. 2. Расположение датчиков

Интенсивность *J* рентгеновского излучения определяется выражением [3]:

$$J = C \cdot k_{\rm pg} \cdot U^2 \cdot Z \cdot I_{\pi} \tag{2}$$

где C – коэффициент пропорциональности ($C \approx 10^{-9}$, V^{-1} [3]); k_{pq} – коэффициент, учитывающий долю излучения, приходящего на поверхность датчика; U– ускоряющее напряжение; Z – атомный номер свариваемого материала.

Выражения (1) и (2) показывают, что $I_{в_9}$ и J с точностью до коэффициентов определяются током луча I_{π} . Можно предположить, что и зависимости I_{κ_B} и J от положения луча относительно стыка имеют одинаковый характер. А это позволяет использовать один и тот же математический аппарат для исследования этих зависимостей.

Формализация задачи. Плотность тока в пучке электронов неодинакова по его сечению и носит вероятностный характер, поэтому ток луча I_{π} представляют через функцию распределения электронов по соответствующим осям [4], и выражения (1) и (2) можно записать в следующем виде:

$$I_{\rm KB} = k_{\rm B9} I_{\rm J} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x, y) j(x, y) dx dy \qquad (3)$$

$$J = C k_{p,\mu} U^2 I_{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Z(x, y) j(x, y) dx dy$$
(4)

где *j*(*x*,*y*) – плотность распределения тока пучка электронов в координатах *x*, *y*, причем

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}j(x,y)dxdy = 1$$

Плотность j(x,y) представляют нормальным законом распределения [4]:

$$j(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \times \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(y - \varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

где σ_x , σ_y – среднеквадратические отклонения электронов от оси пучка по соответствующим осям; ε_x , ε_y – математические ожидания – положение оси луча в координатах *x*, *y* (рис. 3).



Рис. 3. К расчету *I*_{вэ} и *J*

В пределах пятна нагрева поверхность свариваемых деталей можно считать однородной в направлении оси *OY* (вдоль стыка). Тогда $I_{\text{вэ}}$ и *J* не зависят от у. Учитывая, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(y-\varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] dy = 1$$

как интеграл от плотности распределения в бесконечных пределах [5], запишем выражения для $I_{\rm в9}$ и *J*:

$$I_{\rm B3} = \frac{k_{\rm B3}I_{\rm I}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)exp\left[-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right]dx$$

$$J = \frac{Ck_{\rm pg}U^2I_{\rm I}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} Z(x)exp\left[-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right]dx$$
(6)

Последние соотношения свидетельствуют об одинаковой (экстремальной) зависимости вторично-эмиссионного тока и рентгеновского излучения от положения є электронного луча относительно стыка, и зависимости *I*_{вэ} и *J* при одной и той же плотности распределения электронов в луче определяются соответствующими постоянными коэффициентами и природой рассматриваемого явления, определяемого переменными коэффициентами $\varphi(x)$ и Z(x).

Частные случаи.

1. Если осуществляется сварка однородных материалов, то φ и *Z* не зависят от *x*, и с учетом того, что вторичная эмиссия и рентгеновское излучение из зазора в стыке отсутствуют, рассматриваемые соотношения (5), (6) примут вид:

$$I_{B3} = k_{B3}I_{\Pi}\phi \left\{ 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} exp \left[-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2} \right] dx \right\},$$

$$J = C k_{pd}U^2 I_{\Pi}Z \left\{ 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} exp \left[-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2} \right] dx \right\},$$
(8)

где Δ - зазор в стыке (рис. 3).

На рис. 4 представлены графики зависимости функции *F* от положения є луча относительно стыка при ЭЛС однородных материалов:



Рис. 4. Расчетные зависимости *F* от положения луча относительно стыка:

a) $-\sigma = const = 0,1$ mm, $\Delta = var; 1 - \Delta = 0,01$ mm; $2 - \Delta = 0,05$ mm; $3 - \Delta = 0,1$ mm; $4 - \Delta = 0,3$ mm; $6) - \Delta = const = 0,1$ mm, $\sigma = var; 1 - \sigma = 0,25$ mm; $2 - \sigma = 0,15$ mm; $3 - \sigma = 0,1$ mm; $4 - \sigma = 0,05$ mm.

Для получения абсолютных значений достаточно ординаты графиков умножить на соответствующие коэффициенты:

$$I_{B3} = k_{B3} \cdot I_{\pi} \cdot \varphi \cdot F;$$
$$J = C \cdot k_{n\pi} \cdot U^2 \cdot I_{\pi} \cdot Z \cdot F.$$

Из соотношений (7), (8) и графиков видно, что минимум рассматриваемых зависимостей

при сварке однородных материалов соответствует совпадению координат луча и стыка. При этом уменьшение зазора в стыке (рис. 4,а) или увеличение среднеквадратического отклонения электронов от оси луча (рис. 4,б) приводит к уменьшению относительного изменения этих зависимостей. Последнее может служить критерием для оценки точности определения координат луча.

2. При ЭЛС разнородных материалов необходимо учитывать зависимости $\varphi(x)$ и Z(x). Например, при сварке меди (Z_{Cu} =29) и стали (Z_{Fe} =26) выражение (6) для J в относительных единицах примет вид:

$$J_{\text{OTH.}} = Z_{Cu} \int_{-\infty}^{-\Delta/2} exp \left[-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2} \right] dx + Z_{Fe} \int_{-\infty}^{-\Delta/2} exp \left[-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2} \right] dx$$
, (9)

где

$$V_{\rm OTH.} = \frac{J\sigma\sqrt{2\pi}}{Ck_{\rm pd}U^2I_{\rm d}}$$

На рис. 5а приведены результаты расчета по формуле (9). На рис. 5б показана зависимость *J*_{отн}/*Z*_{*Cu*}.



Рис. 5. Зависимость интенсивности РИ от положения луча относительно стыка при ЭЛС разнородных материалов.

Из графиков видно, что при ЭЛС разнородных металлов ветви характеристик имеют разные наклоны. Металлу с большим атомным номером соответствует больший наклон (интенсивность РИ пропорциональна атомному номеру). По этой же причине значения насыщения интенсивности при полном выходе луча на одну из деталей отличаются на величину, зависящую от атомного номера материала. В относительных единицах эти значения для *Cu* и *Fe* равны их атомным номерам – 29 и 26, соответственно (рис. 5а).

Другой особенностью этих характеристик является смещение экстремума в сторону материала с меньшим атомным номером. Это связано с тем, что координата экстремума определяется равенством излучения с соответствующих поверхностей, которое пропорционально току пучка электронов, а, следовательно, и площади части пятна, находящейся на данном металле. Так, как $Z_{Cu}>Z_{Fe}$, то для выполнения названного равенства необходимо, чтобы площадь пятна на стальной детали была больше площади пятна на медной детали. В связи с этим луч оказывается смещенным в сторону стальной детали. Следовательно, положение стыка не совпадает с положением экстремума характеристики, что необходимо учитывать при ЭЛС разнородных материалов.

Характер смещения экстремума при различном зазоре Δ представлен на рис. 6. Графики построены в соответствии с уравнением (9).



Рис. 6. Зависимости интенсивности РИ от положения луча относительно стыка при ЭЛС разнородных металлов: $\sigma = 0,1$ мм; $1 - \Delta = 0,02$ мм; $2 - \Delta = 0,05$ мм; $3 - \Delta = 0,1$ мм; $4 - \Delta = 0,15$ мм; $5 - \Delta = 0,2$ мм

Видно, что заметные рассогласования положений экстремума характеристик и стыка проявляются при отношении $\Delta/\sigma \leq 1$. Такой случай является наиболее распространенным на практике и еще раз подтверждает необходимость учета этого рассогласования. Дифференцируя уравнение (9) по є, и приравнивая производную нулю, можно найти ε_0 – абсциссу экстремума ε_0 и зависимость ее от зазора в стыке Δ :

$$\frac{d J_{\text{OTH.}}}{d\varepsilon} = 0$$

Решением оказывается следующее соотношение:

(10)

$$\varepsilon_0 \approx \frac{\alpha(\sigma)}{\Delta} = 0$$

где α – параметр, зависящий от σ (табл. 1).

Таблица 1. Изменение α в зависимости от σ

σ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
α	0,0011	0,0044	0,0098	0,017	0,027

На рис. 7 представлены графики зависимости положения ε_0 экстремума зависимости $J(\varepsilon)$ от зазора в стыке для различных σ . Из графиков видно, что при малых зазорах в стыке (что является характерным для ЭЛС) ε_0 может иметь значения, превышающие допустимую погрешность совмещения луча со стыком свариваемых деталей. При реализации устройств автоматического слежения за стыком с использованием экстремальной зависимости *J* от положения луча относительно стыка необходимо учитывать поправку в соответствии с выражением (10).



Рис. 7. Зависимость положения ε_0 экстремума от зазора Δ в стыке при ЭЛС разнородных материалов

Аналогичные результаты получены при анализе зависимостей вторично-эмиссионного тока от положения луча относительно стыка. При ЭЛС разнородных материалов смещение экстремума зависимости *I*_{кв} от є происходит в сторону материала с меньшим коэффициентом вторичной эмиссии (в рассматриваемом случае – в сторону медной детали).

Функциональная схема устройства слежения за стыком. Устройство реализовано по классической схеме управления с отрицательной обратной связью (рис. 8) [6]. Если координаты луча x_{π} и стыка x_{cr} не совпадают, устройство управления формирует сигнал, который с помощью отклоняющей системы электронно-лучевой пушки преобразуется в перемещение луча до устранения рассогласования.





В качестве датчиков положения луча относительно стыка могут использоваться как датчик, так и вторично-эмиссионный датчик. Экстремальный характер рассмотренных зависимостей предполагает возможность реализации устройств слежения за стыком известными методами поиска экстремума (метод накопления, автокорреляционный прием, когерентный прием и т.д.[7]). В устройстве предусмотрена возможность компенсации погрешности совмещения луча со стыком при ЭЛС разнородных материалов. Для этой цели формируется сигнал уставки в соответствии с выражением (10), который суммируется с сигналом управления.

Устройство испытано при ЭЛС штатных узлов. Погрешность совмещения луча со стыком не превышает 0,1 мм и 0,15 мм при сварке деталей из однородных и разнородных материалов, соответственно.

Выводы:

1. Идентичность зависимостей вторичноэмиссионного тока и РИ от положения луча относительно стыка обусловлена тем, что явления вторичной эмиссии и РИ являются следствием взаимодействия электронного луча с материалом свариваемых деталей.

2. При ЭЛС однородных материалов минимум зависимостей соответствует точному совпадению положений луча и стыка. При сварке разнородных материалов минимум вторичноэмиссионного тока смещается в сторону материала с меньшим коэффициентом вторичной эмиссии, а минимум рентгеновского излучения в сторону материала с меньшим атомным номером.

3. Для анализа рассматриваемых зависимостей может быть применен одинаковый математический аппарат, а реализация устройств управления может быть осуществлена унифицированными аппаратными и программными средствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. Браверман, В.Я. Вопросы управления формированием сварного шва при электронно-лучевой сварке / В.Я. Браверман, В.С. Белозерцев, В.П. Литвинов, О.В. Розанов // Вестник СибГАУ. 2008. №5. С. 148-152.
- Бронштейн, И.М. Вторичная электронная эмиссия / И.М. Бронштейн, Б.С. Фрайман. – М.: Наука, 1969. 408 с.
- Хараджа, Ф.Н. Общий курс рентгенотехники. М.: Энергия, 1966. 568 с.
- 4. Башенко, В.В. Электронно-лучевые установки. Л.: Машиностроение, 1975. 168 с.
- 5. *Вентцель, Е.С.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
- Бессекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бессекерский, Е.П. Попов – М.: Наука, 1966. 992 с.
- Харкевич, А.А. Борьба с помехами. М.: Наука, 1965. 384 с.

ANALYSIS OF THE SECONDARY EMISSION CURRENT AND X-RAY RADIATION DEPENDENCY ON THE BEAM'S POSITION ALONG THE JOINT DURING ELECTRON BEAM WELDING

© 2016 V.Ya. Braverman

Siberian State Aerospace University, named after acad. M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk

We analyzed secondary emission current and X-Ray radiation dependency on the beam's position along the joint during Electron Beam Welding of similar and dissimilar materials. We established that those characteristics were identical. The characteristics are of extreme nature. We can use the same mathematical tool to analyze the dependencies and joint tracking devices can be designed with unified hardware and software applications. During the welding of similar materials, the dependency minimum corresponds with the precise alignment of the beam's position and the joint. During the welding of dissimilar materials, the minimum of the secondary emission current shifts towards the material with the lowest coefficient of the secondary emission and the X-ray radiation shifts towards the material with the lowest atom number.

Key words: electron beam welding, secondary electron emission, X-rays, electron beam positioning on the joint

Vladimir Braverman, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: braverman-vladimir@rambler.ru