

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО СТЫКУ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ КОМПЕНСАЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Дружинина А.А.

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79), druzhininasasha@rambler.ru

Разработана методика расчета отклонений электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванных действием магнитных полей, при электронно-лучевой сварке изделий с остаточной намагниченностью, позволяющая оценить возможность получения качественных сварных соединений. Предложен метод автоматической компенсации влияния магнитных полей на точность позиционирования электронного пучка по стыку соединения при электронно-лучевой сварке. Метод предусматривает контроль отклонения электронного пучка от оптической оси пушки под действием продольной составляющей магнитной индукции поля остаточной намагниченности по рентгеновскому излучению из зоны сварки и введение в свариваемое изделие компенсирующего поля, равного по величине и имеющего обратную направленность. Представлена структурная схема системы автоматической компенсации магнитных полей. Произведен расчет динамической погрешности метода компенсации магнитных полей при электронно-лучевой сварке. Ошибка компенсации в корне шва не превышает допустимых значений.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка (ЭЛС), магнитное поле, остаточная намагниченность.

ANALYSIS OF THE POSITIONING ACCURACY ALONG THE JOINT CONNECTION IN ELECTRON BEAM WELDING IN THE CONDITIONS OF COMPENSATION OF MAGNETIC FIELDS

Druzhinina A.A.

Siberian Federal University (79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation), druzhininasasha@rambler.ru

The author has developed a methodology for calculating the deflection of the electron beam from the optical axis of the electron beam gun, caused by the action of magnetic fields in electron beam welding products with residual magnetization. The developed methodology allows to evaluate the possibility of obtaining high-quality welded joints. We propose a method of automatic compensation of the effect of magnetic fields on the positioning accuracy of the electron beam along the joint connection in electron beam welding. The method provides the monitoring of deflection of the electron beam from the optical axis of the gun caused by the action of the longitudinal component of the magnetic induction and introduction to the welded products compensating magnetic field. This method uses the X-ray sensor for monitoring deflection of the electron beam from the optical axis of the gun. The compensating magnetic field should be equal to the magnetic field of interference and have the opposite direction. Structural diagram of the system of automatic compensation of magnetic fields is presented. We have calculated the dynamic error of compensation method of magnetic fields in electron beam welding. The error of position of electron beam in the weld root does not exceed permissible values.

Keywords: electron-beam welding (EBW), magnetic field, residual magnetization.

Малая ширина сварного шва и большое отношение глубины и ширины шва при электронно-лучевой сварке требуют точного совмещения пучка электронов с плоскостью стыка свариваемых деталей. Погрешность позиционирования не должна превышать 0,1...0,3 мм.

Влияние магнитных полей, наводимых в свариваемом изделии, является одной из главных причин отклонения электронного пучка при электронно-лучевой сварке. Во многих

случаях это влияние настолько сильно, что не позволяет осуществлять сварку без проведения дополнительных работ по размагничиванию.

Зависимость между отклонением пучка электронов от оси пушки и вызывающим это отклонение магнитным полем описывается уравнением [5]

$$x = \frac{e}{mV} \int_0^z \int_0^z B(z) dz dz, \quad (1)$$

где x – отклонение пучка электронов от оптической оси пушки, м; $B(z)$ – закон распределения по оси Z продольной составляющей индукции магнитного поля; m – масса электрона, кг; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ – заряд электрона, Кл; V – скорость движения электронов, м/с.

При сварке изделий из магнитных материалов имеют место поля остаточной намагниченности. Закон распределения продольной составляющей магнитной индукции поля остаточной намагниченности в рабочем пространстве пушка – свариваемое изделие (по оси Z) может быть с достаточной точностью описан уравнением [1]

$$B(z) = B_0 \frac{\frac{\delta}{2}}{\frac{\delta}{2} + (l - z)}, \quad (2)$$

где B_0 – величина магнитной индукции на поверхности свариваемого изделия вблизи стыка и в свариваемом изделии, Тл; δ – толщина изделия, м; l – расстояние от электронно-лучевой пушки до свариваемого изделия, м.

Даже при точном совмещении электронного пучка со стыком на поверхности свариваемых деталей могут возникнуть отклонения в корне шва, зависящие от угла ψ наклона касательной к траектории пучка, определяемого выражением [5]

$$\psi = \frac{e}{mV} \int_0^z B(z) dz. \quad (3)$$

Отклонение электронного пучка в корне шва может быть рассчитано по формуле

$$\varepsilon_{\hat{e}} = \psi \cdot \delta. \quad (4)$$

Подставляя выражение (2) в формулы (3) и (1) и интегрируя по z , получим выражения для определения угла наклона ψ траектории пучка и отклонения x пучка электронов от оси электронно-лучевой пушки при сварке изделий с остаточной намагниченностью:

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{e}{mV} \int_0^z B(z) dz = \frac{e}{mV} \int_0^z B_0 \frac{R}{R + (l - z)} dz = \\ &= \frac{e}{mV} B_0 R [\ln(R + l) - \ln(R + (l - z))], \end{aligned} \quad (5)$$

$$x = \frac{e}{mV} \int_0^z \int_0^z B(z) dz dz = \frac{e}{mV} \int_0^z \int_0^z B_0 \frac{R}{R + (l - z)} dz dz =$$

$$= \frac{e}{mV} B_0 R [z + (R + l - z) \ln(R + l - z) + (z - R - l) \ln(R + l)]. \quad (6)$$

Зная величину отклонения пучка от оси электронно-лучевой пушки, нетрудно рассчитать значение индукции поля намагниченности на поверхности изделия вблизи стыка.

Используя формулы (5) и (4), были рассчитаны углы наклона касательной к траектории пучка электронов и отклонения ϵ_k в корне шва при сварке деталей различной толщины в условиях действия магнитных полей (таблица 1).

Таблица 1

Отклонения электронного пучка при сварке изделий с остаточной намагниченностью

δ , мм	50		100		150	
B_0 , мТл	ψ , рад	ϵ_k , мм	ψ , рад	ϵ_k , мм	ψ , рад	ϵ_k , мм
0,94	0,0662	3,3	0,099	9,9	0,1215	18,2
0,5	0,0352	1,8	0,0526	5,3	0,0646	9,7
0,4	0,0282	1,4	0,0421	4,2	0,0517	7,8

Результаты расчетов показывают, что полученные отклонения в корне шва не позволяют производить электронно-лучевую сварку без принятия мер по предотвращению влияния на электронный пучок полей остаточной намагниченности свариваемых деталей.

Для устранения влияния магнитных полей на электронный пучок в процессе электронно-лучевой сварки предложена система автоматической компенсации магнитных полей в зоне обработки. Система предусматривает измерение отклонения пучка электронов от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванное продольной составляющей индукции магнитного поля в пространстве электронно-лучевой пушки – свариваемое изделие, и введение компенсирующего поля встречной направленности в свариваемое изделие с помощью электромагнитных устройств. Для контроля отклонения электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки используется коллимированный рентгеновский датчик, размещенный на электронно-лучевой пушке. Выходной сигнал датчика обрабатывается по методу синхронного детектирования. Для этого используется технологическое сканирование электронного пучка поперек стыка [2].

Структурная схема системы автоматической компенсации магнитных полей, действующих на электронный пучок, представлена на рисунке 1. Передаточная функция системы имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{1 + W_{\text{иу}}(p) \cdot W_{\text{и}}(p) \cdot W_{\text{эм}}(p)}. \quad (7)$$

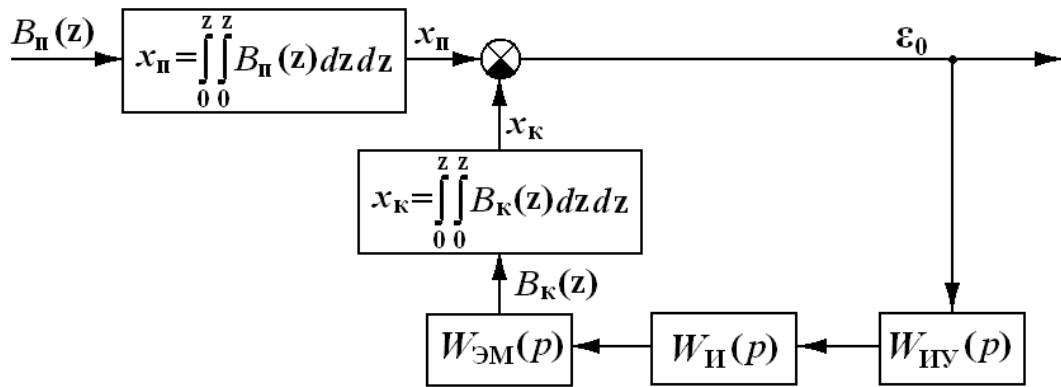


Рис. 1. Структурная схема системы автоматической компенсации: $W_{ИУ}(p)$ – передаточная функция измерительного устройства; $W_{И}(p)$ – передаточная функция интегратора; $W_{ЭМ}(p)$ – передаточная функция электромагнита; $B_{\Pi}(z)$ – магнитная индукция поля помехи, направленная вдоль стыка; $B_K(z)$ – компенсирующее магнитное поле; ϵ_0 – отклонение пучка электронов от оптической оси электронно-лучевой пушки; x_{Π} – отклонение пучка, вызванное действием магнитного поля помехи; x_K – отклонение пучка, вызванное действием компенсирующего магнитного поля

Передаточная функция разомкнутой системы представляет собой последовательное соединение измерительного устройства, интегратора и электромагнита:

$$W_{\text{раз}}(p) = W_{ИУ}(p) \cdot W_{И}(p) \cdot W_{ЭМ}(p). \quad (8)$$

Передаточная функция измерительного устройства, состоящего из рентгеновского датчика, избирательного усилителя, настроенного на частоту сканирования $\omega_{\text{ск}}$ по координате x , и демодулятора, $W_{ИУ}(p)$ может быть представлена в виде [3]:

$$W_{ИУ}(p) = \frac{K_{ИУ}}{2 \prod_{i=1}^n (T_i p + 1)}, \quad (9)$$

где $K_{ИУ}(p)$ – общий коэффициент усиления измерительного устройства; n – число резонансных каскадов избирательного усилителя; T_i – постоянная времени i -го каскада избирательного усилителя:

$$T_i = \frac{2Q_i}{2\omega_{\text{ск}}},$$

где Q_i – добротность i -го резонансного каскада усилителя.

Полоса пропускания избирательного усилителя, настроенного в резонанс на частоте сканирования $\omega_{\text{ск}}$, выбирается такой, чтобы все остальные составляющие, кратные частоте сканирования, подавлялись с коэффициентом ослабления не менее 40 дБ [5]. Принимая

число избирательных каскадов усилителя $n = 2$ при $T_1 = T_2$ и добротность каждого каскада $Q = 100$, получим передаточную функцию измерительного устройства

$$W_{\text{иу}}(p) = \frac{K_{\text{иу}}}{2(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} = \frac{K_{\text{иу}}}{2(T_1 p + 1)^2}. \quad (10)$$

Передаточная функция электромагнита представляет собой инерционное звено первого порядка

$$W_{\text{эм}}(p) = \frac{K_{\text{эм}}}{T_{\text{эм}} p + 1}, \quad (11)$$

где $K_{\text{эм}}$ – коэффициент передачи электромагнита; $T_{\text{эм}}$ – постоянная времени электромагнита.

Передаточные функции интегратора имеет вид:

$$W_{\text{и}}(p) = \frac{K_{\text{и}}}{p}. \quad (12)$$

Подставив (10), (11), (12) в (8), получим передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{K_{\text{иу}} \cdot K_{\text{эм}} \cdot K_{\text{и}}}{2p(Tp + 1)^2(T_{\text{эм}}p + 1)}, \quad (13)$$

где $\frac{K_{\text{иу}} \cdot K_{\text{эм}} \cdot K_{\text{и}}}{2} = K$ – общий коэффициент усиления системы.

Коэффициент K определяется, исходя из требований к точности управления: максимальная ошибка следящей системы (максимальное допустимое отклонение луча от оптической оси пушки) $x_{\text{max}} \leq 0,1$ мм; максимальная амплитуда входного сигнала $\varepsilon_{\text{max}} = 15$ мм при максимальной частоте $\omega_{\text{max}} = 0,1$ рад/с.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) $L(\omega)$ системы в области низких частот должна быть расположена не ниже контрольной точки A_k с координатами:

$$\omega_k = \omega_{\text{max}}, \quad L(\omega_k) = 20 \lg \frac{\varepsilon_{\text{max}}}{x_{\text{max}}}. \quad (14)$$

Координаты контрольной точки A_k согласно выражению (14):

$$\omega_k = 0,1 \text{ рад/с}, \quad L(\omega_k) = 20 \lg \frac{15}{0,1} \approx 43,5218 \text{ дБ}.$$

Построим низкочастотный участок логарифмической амплитудно-частотной характеристики (рисунок 2), проходящей выше контрольной точки A_k с наклоном -20 дБ/дек.

Коэффициент усиления системы K определяется по формуле:

$$K = 10^{\frac{L(1)}{20}}, \quad (15)$$

где $L(1)$ – значение ЛАЧХ при частоте $\omega = 1$ рад/с.

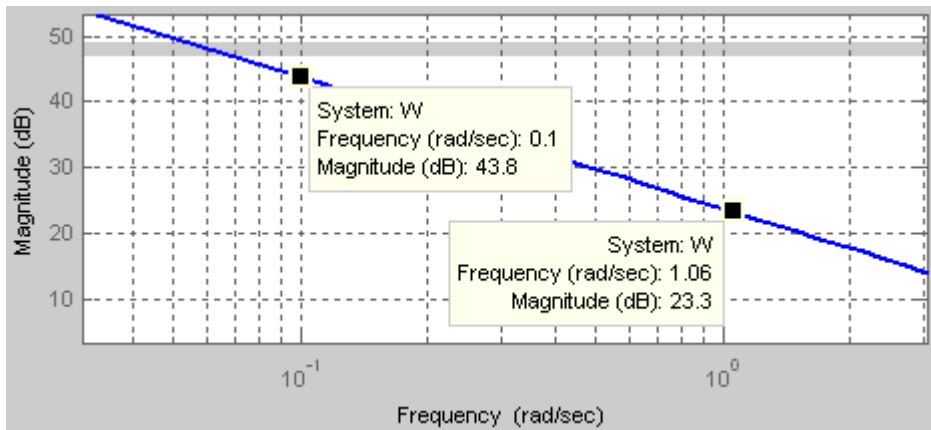


Рис. 2. К определению коэффициента усиления системы

Значение ЛАЧХ при частоте $\omega = 1$ рад/с $L(1) \approx 23,8$ дБ. Подставляя $L(1)$ в (15), определим коэффициент усиления системы:

$$K = 10^{\frac{23,8}{20}} = 15,4882 \approx 15,5.$$

Определим динамическую ошибку по формуле:

$$\varepsilon_v = \frac{v_{\max}}{K},$$

где v_{\max} – максимальная скорость изменения входного сигнала; K – коэффициент усиления системы.

В условиях сварочного производства возможны критические магнитные поля, при которых отклонение пучка электронов от оптической оси пушки составляет до 15 мм [4]. При скорости сварки 30 м/ч и длине шва 500 мм частота магнитного поля помехи равна $\omega_{\pi} = 0,1$ рад/с.

Если на вход системы поступает воздействие $x_{\pi}(t) = \varepsilon_{\max} \sin \omega_{\pi} t$, то скорость $v = \frac{dx_{\pi}(t)}{dt} = \varepsilon_{\max} \omega_{\pi} \cos \omega_{\pi} t$, а максимальная скорость $v_{\max} = \varepsilon_{\max} \omega_{\pi}$.

Динамическая ошибка составит:

$$\varepsilon_v = \frac{\omega_{\pi} \varepsilon_{\max}}{K} = \frac{0,1 \cdot 15}{15,5} = 0,0968 \text{ мм.}$$

Такая ошибка возникает при полной компенсации магнитного поля помехи, то есть в центре канала проплавления (на глубине $\delta/2$). Учитывая форму и размеры канала проплавления, в неблагоприятном случае полная компенсация возможна на глубине канала проплавления, равной $\delta/3$. Угол отклонения пучка электронов от оптической оси пушки, приводящий к такому смещению, равен:

$$\psi = \varepsilon_v \frac{3}{\delta} = \frac{0,0968 \cdot 3}{\delta} = \frac{0,2904}{\delta}.$$

В корне шва такой угол вызовет ошибку, равную

$$\varepsilon_m = \psi \cdot \delta = 0,2904 \text{ мм.}$$

Таким образом, ошибка метода составляет $0,2904 \leq 0,3$ мм и не превышает допустимого отклонения электронного пучка от плоскости стыка.

Магнитное поле помехи, приводящее к отклонению электронного пучка от оптической оси пушки, будет уменьшено за счет компенсации в $15/0,2904 \approx 50$ раз.

В таблице 2 приведены углы наклона касательной к траектории пучка электронов и отклонения ε_k в корне шва при компенсации влияния поля остаточной намагниченности свариваемых деталей различной толщины.

Таблица 2

Отклонения пучка от стыка в условиях автоматической компенсации магнитных полей

δ , мм	50		100		150	
	ψ , рад	ε_k , мм	ψ , рад	ε_k , мм	ψ , рад	ε_k , мм
0,94	0,0013	0,066	0,0020	0,198	0,0024	0,3645
0,5	0,0007	0,035	0,0011	0,105	0,0013	0,1939
0,4	0,0006	0,028	0,8423	0,084	0,0010	0,1551

Как видно из полученных результатов, для большинства случаев электронно-лучевой сварки деталей с остаточной намагниченностью применение системы автоматической компенсации магнитных полей позволяет получить качественные сварные соединения с погрешностью в корне шва, не превышающей 0,3 мм.

Таким образом, разработанная методика расчета отклонений электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки под действием полей остаточной намагниченности свариваемого изделия позволяет оценить возможность получения качественных сварных соединений. Использование в промышленности предлагаемой системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на отклонение электронного пучка позволяет производить качественную сварку изделий из магнитных материалов без предварительного размагничивания.

Список литературы

1. Дружинина А.А., Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В. Повышение точности позиционирования по стыку соединения деталей с остаточной намагниченностью при электронно-лучевой сварке // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 5.

2. Метод контроля влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке по рентгеновскому излучению из зоны обработки / А. А. Дружинина, В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин // Вестник СибГАУ. – 2012. – № 5 (45). – С. 158–163.
3. Непорожний В. Ю. Устройство для компенсации остаточного магнитного поля при электронно-лучевой сварке толстолистовых сталей // Автоматическая сварка. – 1984. – № 3. – С. 68–70.
4. Разработка технологии электронно-лучевой сварки сталей с остаточной намагниченностью / Н. В. Александров, Е. Д. Бланк, Н. В. Вовченко и др. // Технологии и оборудование «ЭЛС-2014»: доклады III Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург 24–26 июня 2014 г.). – СПб., 2014. – С. 141–149.
5. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин, В. Я. Браверман; под ред. В. Д. Лаптенка. – Красноярск.: САА, 2000. – 234 с.

Рецензенты:

Белолипецкий В.М., д.ф.-м.н., профессор, заведующий отделом Вычислительных моделей в гидрофизике, Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск;

Саханский С.П., д.т.н., профессор кафедры Информационно-управляющих систем, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск.