

На правах рукописи

Дружинина Александра Алексеевна

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТОЧНОСТЬ
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО СТЫКУ СОЕДИНЕНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лаптенко Валерий Дмитриевич

Официальные оппоненты: **Демиденко Николай Данилович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБУН «СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН,
г. Красноярск; ведущий научный сотрудник

Трушников Дмитрий Николаевич,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»; старший научный сотрудник
кафедры «Сварочное производство и технология
конструкционных материалов»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

Защита состоится 19 июня 2015 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.249.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», по адресу: 660014, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева и на сайте СибГАУ: <http://www.sibsau.ru/index.php/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsij>.

Автореферат разослан _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) широко применяется для получения высококачественных неразъемных соединений в аэрокосмической отрасли, судостроении и энергетике. Это обусловлено широкими технологическими возможностями данного вида сварки, к которым, в том числе, относится способность электронного пучка перемещаться по обрабатываемой поверхности при практически любой форме траектории под действием магнитных полей быстродействующей отклоняющей системы.

Вместе с тем, электронный пучок, благодаря своей высокой чувствительности к магнитным полям, отклоняется от оптической оси электронно-лучевой пушки как в промежутке от пушки до свариваемого изделия, так и по глубине канала проплавления в свариваемом изделии под действием поля помехи, действующей на пучок в процессе ЭЛС. Причем отклонения электронного пучка от стыка соединения намного превышают допустимые значения. Это приводит к образованию непроваров по глубине соединения, особенно при сварке изделий больших толщин.

Таким образом, влияние магнитных полей, наводимых в свариваемых деталях, на точность позиционирования электронного пучка по стыку соединения является сложной научно-технической проблемой, препятствующей достижению высокого качества сварных соединений.

Вопросам исследования влияния на электронный пучок магнитных полей и разработки методов уменьшения этого влияния посвящены работы Назаренко О. К., Непорожного В. Ю., Лаптенка В. Д., Мурыгина А. В., Драгунова В. К., Бравермана В. Я., Watanabe K., Blakeley P. J., Sanderson A., P.S. Wei и др.

Следует отметить, что существующие методы уменьшения влияния магнитных полей имеют ряд недостатков и не могут в полной мере обеспечить получение высокого качества сварных соединений. В ряде случаев их применение приводит к необходимости проведения предварительных дорогостоящих и трудоемких операций по размагничиванию деталей.

Таким образом, исследование магнитных полей, наводимых в свариваемом изделии и отклоняющих электронный пучок от стыка соединения, а также разработка методов и средств автоматического контроля и компенсации влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы. Повышение качества сварного соединения при ЭЛС в условиях действия магнитных помех за счет повышения точности позиционирования электронного пучка по стыку.

Задачи исследования.

1. Анализ автоматических устройств позиционирования электронного пучка по стыку, методов контроля влияния магнитных полей на электронный пучок и способов уменьшения этого влияния.

2. Разработка математической модели влияния магнитного поля термоэлектрических токов на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке разнородных материалов.

3. Разработка математической модели распределения индукции магнитных полей остаточной намагниченности в пространстве электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие.

4. Разработка метода контроля отклонения сканирующего электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванного действием магнитных полей.

5. Разработка математической модели метода контроля отклонения сканирующего электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванного действием магнитных полей.

6. Разработка системы автоматической компенсации влияния магнитных полей, вызванных токами термо-ЭДС, на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке разнородных материалов.

7. Разработка системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке изделий с остаточной намагниченностью.

Методология и методы диссертационного исследования.

Методологическая основа диссертационного исследования базируется на использовании методов теории функций, теории поля, теории вероятностей и математической статистики, аппарата дифференциального и интегрального исчисления, аналитической геометрии, теории рядов, методов математического моделирования, теории автоматического управления, экспериментальных исследованиях. Расчеты производились с применением системы MatLAB.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель влияния магнитного поля термоэлектрических токов на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке разнородных материалов.

2. Математическая модель распределения магнитных полей остаточной намагниченности в пространстве электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие.

3. Метод контроля отклонения сканирующего электронного пучка, вызванного действием магнитных полей, и его математическая модель, основанная на обработке сигнала коллимированного рентгеновского датчика, наведенного на оптическую ось пушки, по методу синхронного детектирования.

4. Метод и функциональная схема системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка, вызванных токами термо-ЭДС, при сварке разнородных материалов.

5. Метод и функциональная схема системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке изделий с остаточной намагниченностью.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата, отсутствием противоречий исследованиям отечественных и зарубежных авторов, а также хорошей сходимостью экспериментальных и рассчитанных по моделям данных.

Научная новизна.

1. Разработаны новые математические модели распределения магнитной индукции в пространстве электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности деталей, основанные на представлении намагниченности в виде эквивалентных проводников с током, позволяющие рассчитать отклонение электронного пучка от оптической оси пушки.

2. Впервые разработаны метод контроля отклонения электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, основанный на сканировании электронного пучка поперек стыка и обработке сигнала коллимированного рентгеновского датчика по методу синхронного детектирования, и его математическая модель, позволяющие сформировать сигнал управления системы автоматической компенсации.

3. Впервые предложен метод автоматической компенсации влияния магнитных полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности деталей при электронно-лучевой сварке, в котором контролируется отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки и путем вве-

дения компенсирующих магнитных полей, создаваемых с помощью управляемых источников тока или электромагнита, это отклонение устраняется.

Теоретическая значимость. Разработаны математические модели распределения магнитной индукции полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности в пространстве между пушкой и свариваемым изделием. Разработана математическая модель коллимированного рентгеновского датчика отклонения электронного пучка от стыка.

Практическая значимость.

1. Разработаны методики расчета отклонений электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки под действием полей остаточной намагниченности свариваемого изделия и токов термо-ЭДС, позволяющие оценить возможность получения качественных сварных соединений.

2. Получены расчетные характеристики устройства контроля отклонения пучка электронов от оптической оси пушки по рентгеновскому излучению из зоны обработки, позволяющие спроектировать систему автоматической компенсации влияния магнитных полей.

3. Разработана система автоматической компенсации влияния магнитных полей. Испытания системы подтвердили ее работоспособность. Погрешность совмещения электронного пучка с плоскостью стыка от влияния магнитных полей уменьшилась в 30-50 раз. Использование разработанной системы в промышленности позволяет производить качественную сварку изделий из разнородных и магнитных материалов без их предварительного размагничивания.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. XI Международной научной конференции «Electron Beam Technologies EBТ 2014» (Болгария, г. Варна, 2014 г.);

2. III Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции «Технологии и оборудование ЭЛС-2014» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.);

3. XII Международной научной конференции бакалавров, магистрантов и аспирантов «Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации» (г. Красноярск, 2013 г.);

4. XV Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, «Решетневские чтения» (Красноярск, 2011 г.)

5. VII Всероссийской конференции творческой молодежи «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (г. Красноярск, 2011 г.).

6. научно-практическом семинаре кафедры автоматизации производственных процессов и теплотехники в металлургии Института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета (г. Красноярск, 2012 г.)

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 9 публикациях, среди которых 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 136 источников. Общий объем работы – 116 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика проблемы, обоснована актуальность выбранной темы, определены цель и задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассмотрено современное состояние изучаемого вопроса.

Малая ширина сварного шва и большое отношение глубины и ширины шва 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. Известно, что при сварке магнитных материалов имеет место остаточная намагниченность свариваемых деталей, а при сварке разнородных материалов возникает магнитное поле, наводимое токами термо-ЭДС.

Значительно снизить уровень остаточной намагниченности свариваемых деталей позволяет их предварительное размагничивание переменным магнитным полем в специальных индукторах или путем нагрева до температуры выше точки Кюри. Однако эти операции не дают гарантии того, что детали не намагнитятся вновь, и являются дорогостоящими и трудоемкими. Защиту от внешних магнитных полей оказывает экранирование электронного пучка магнитным экраном. Следует отметить, что такой экран оказывает защиту от внешних полей только в пространстве его размещения и значительно снижает возможность наблюдения за процессом ЭЛС.

Наиболее приемлемым способом защиты электронного пучка от магнитных полей помехи является их компенсация в зоне сварки. Для этого необходимо измерять продольную относительно стыка соединения составляющую магнитного поля в пространстве электронно-лучевой пушки – свариваемое изделие и осуществлять его компенсацию.

Влияние магнитных полей определялось экспериментально в результате анализа шлифов соединений. Во многих случаях это влияние было настолько сильным, что не позволяло осуществлять сварку без проведения дополнительных работ по размагничиванию.

Оценить влияние магнитного поля на траекторию пучка электронов позволяют формулы для расчета угла ψ наклона траектории и отклонения x пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки:

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

где $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ – заряд электрона, Кл; m – масса электрона, кг; V – скорость движения электронов, м/с; $B(z)$ – закон распределения продольной составляющей индукции магнитного поля в пространстве между пушкой и свариваемым изделием.

Применение этих формул возможно при известном законе распределения продольной составляющей индукции магнитного поля $B(z)$.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей влияния на положение электронного пучка магнитных полей термоэлектрических токов при электронно-лучевой сварке разнородных материалов и остаточной намагниченности свариваемых деталей.

При сварке разнородных материалов отклонение электронного пучка от стыка может быть вызвано действием магнитного поля токов термо-ЭДС.

На основании выполненных теоретических исследований разработана математическая модель магнитного поля термоэлектрических токов при ЭЛС разнородных материалов. Схема модели представлена на рисунке 1.

Величина продольной составляющей индукции магнитного поля в соответствии принципом суперпозиции рассчитывается путем суммирования индукций магнитных полей, создаваемых в точке каждым из токов в отдельности

$$B(z) = \sum_n (B_n^+(z) + B_n^-(z)),$$

где $B_n^+(z)$ и $B_n^-(z)$ рассчитываются по формулам в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа для отрезка прямого тока:

$$B_n^+(z) = \frac{\mu_0 I_n}{2\pi \sqrt{(-y_w + nb_y)^2 + (l-z)^2}} \cdot \frac{b_x - nb_y}{\sqrt{(b_x - nb_y)^2 + (-y_w + nb_y)^2 + (l-z)^2}},$$

$$B_n^-(z) = \frac{\mu_0 I_n}{2\pi \sqrt{(-y_{\max} - nb_y)^2 + (l-z)^2}} \cdot \frac{b_x - nb_y}{\sqrt{(b_x - nb_y)^2 + (-y_{\max} - nb_y)^2 + (l-z)^2}},$$

где μ_0 – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума); I_n – величины циркулирующих термоэлектрических токов ($n=0, 1, 2, 3\dots$); b_x – половина длины проводника с током; b_y – ширина проводника с током; y_w – расстояние от оптической оси электронно-лучевой пушки до проводника с током (длина сварочной ванны по оси y); l – расстояние от поверхности изделия до электронно-лучевой пушки; z – координата точки по оси z ; y_{\max} – координата замыкания цепи максимального термоэлектрического тока по оси y при заданной малой полуоси эллипса a_x ; знаки «+» и «-» показывают, что вектора магнитной индукции направлены встречно друг другу.

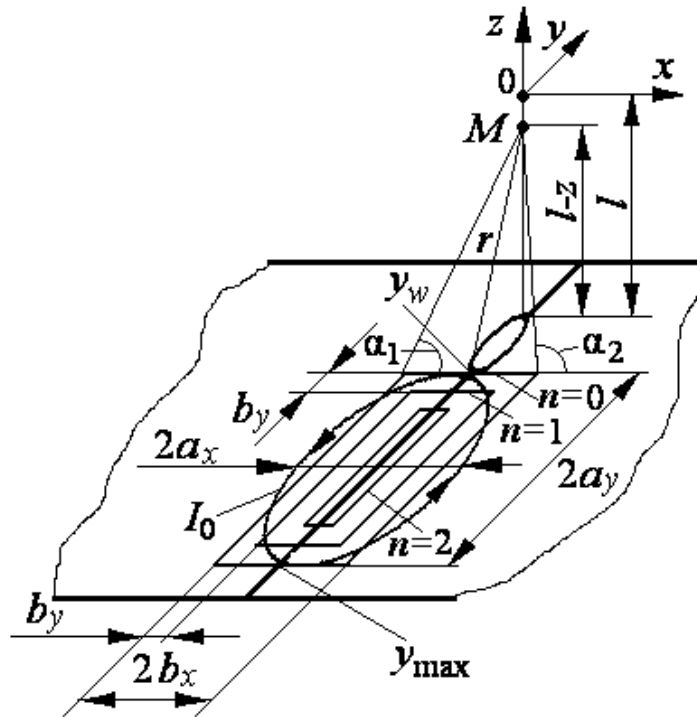


Рисунок 1 – Схематическое изображение модели

Координата y_{\max} определяется исходя из условия максимума термоэлектрического тока, протекающего в свариваемом изделии.

Величины циркулирующих термоэлектрических токов определяются по формуле

$$I_n = \frac{2\alpha_{12}\delta b_y \left(k_{12}T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y_w + nb_y}} - k_{12}T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y_{\max} - nb_y}} \right)}{\pi \cdot (\rho_1 + \rho_2) \cdot \left(\frac{-y_{\max} + y_w}{2} + a_x - 2nb_y \right)},$$

где δ – толщина изделия; α_{12} – термоэлектрическая способность пары (или коэффициент термо-ЭДС); k_{12} – коэффициент, характеризующий теплофизические свойства свариваемых материалов; ρ_1, ρ_2 – удельные сопротивления свариваемых материалов; T_{\max} – максимальная температура (температура испарения металла); v – скорость сварки.

Моделирование влияния термоэлектрических токов при сварке разнородных материалов на смещение пучка хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Магнитное поле, создаваемое намагниченным телом с фиксированным распределением намагниченности, можно найти, заменив намагниченное тело эквивалентным распределением молекулярных токов. Индукция магнитного поля в этом случае рассчитывается по найденному распределению молекулярных токов аналогично методам нахождения индукции магнитного поля токов в вакууме.

При ЭЛС наибольшую опасность представляет намагниченность, направленная вдоль линии сварки, поскольку электронный пучок в данном случае отклоняется поперек стыка. Такая намагниченность наблюдается в магнитном поле прямого тока, протекающего поперек стыка свариваемых деталей.

В результате анализа магнитных полей остаточной намагниченности получена математическая модель их распределения в пространстве между электронно-лучевой пушкой и свариваемым изделием, которая описывается выражением

$$B(z) = B_0 \frac{\frac{\delta}{2}}{\frac{\delta}{2} + (l - z)}, \quad (1)$$

где B_0 – величина магнитной индукции на поверхности свариваемого изделия вблизи стыка и в свариваемом изделии.

Выражение (1) описывает закон изменения магнитной индукции в промежутке электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие.

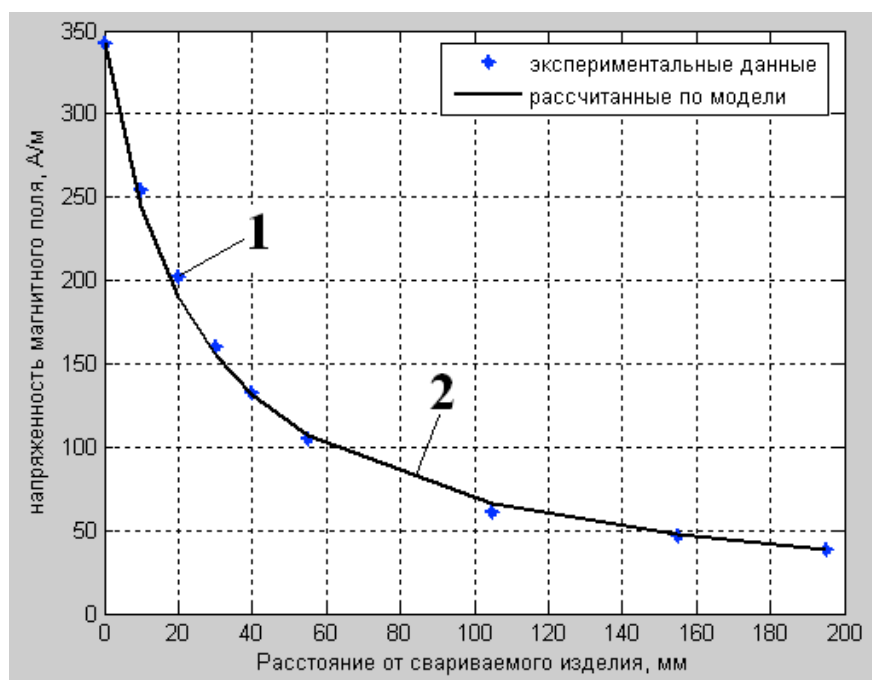
Для оценки точности полученной модели распределения магнитной индукции в пространстве электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие произведено сравнение экспериментальных значений $H(z)$ (таблица 1) напряженности магнитного поля намагниченного изделия толщиной 50 мм, измеренных цифровым измерителем магнитных полей с феррозондовым датчиком, со значениями, рассчитанными по формуле

$$H_x(z) = \frac{B(z)}{\mu_0} = \frac{B_0}{\mu_0} \cdot \frac{\frac{\delta}{2}}{\frac{\delta}{2} + (l - z)}$$

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные значения напряженности магнитного поля

$l - z$, мм	0	10	20	30	40	55	105	155	195
$H(z)$, А/м	342	254	202	160	133	105	61	47	38
$H_x(z)$, А/м	342	244,3	190	155,5	131,5	106,9	65,8	47,5	38,9

На рисунке 2 представлены экспериментальные данные изменения напряженности магнитного поля в пространстве между электронной пушкой и свариваемым изделием, а также кривая, рассчитанная по модели. Средняя относительная ошибка аппроксимации не превышает 5 %.



1 – экспериментальные данные; 2 – кривая, рассчитанная по модели

Рисунок 2 –Изменение напряженности магнитного поля

В третьей главе представлен метод и математическая модель метода контроля отклонения сканирующего электронного пучка путем обработки сигнала по методу синхронного детектирования коллимированного рентгеновского датчика, наведенного на оптическую ось пушки.

При взаимодействии электронного пучка с обрабатываемым материалом электроны в результате торможения теряют свою энергию. Этот процесс сопровождается возбуждением рентгеновского излучения, локализованного в месте взаимодействия электронного пучка с обрабатываемым материалом.

Возможность контролировать отклонение электронного пучка от оптической оси пушки, вызванное магнитными полями помехи, по рентгеновскому излучению из зоны торможения электронов основана на том, что интенсивность рентгеновского излучения зависит от площади поверхности, через которую проходит поток излучения. Отклонение луча, обусловленное действием магнитных полей, от оси электронно-лучевой пушки вызовет уменьшение доли рентгеновского излучения, прошедшего через площадь кристалла датчика, а, следовательно, и интенсивности рентгеновского излучения I_d , измеренной датчиком.

Рентгеновский датчик содержит рентгеновский детектор и коллиматор в виде щелевой бленды, ориентированной на оптическую ось пушки (рисунок 3).

Для контроля смещения пучка используется технологическое сканирование, повышающее качество сварного соединения.

Математическая модель рентгеновского датчика как элемента, обладающего частотным спектром выходного сигнала при наличии периодического сигнала сканирования электронного пучка, выражается соотношением

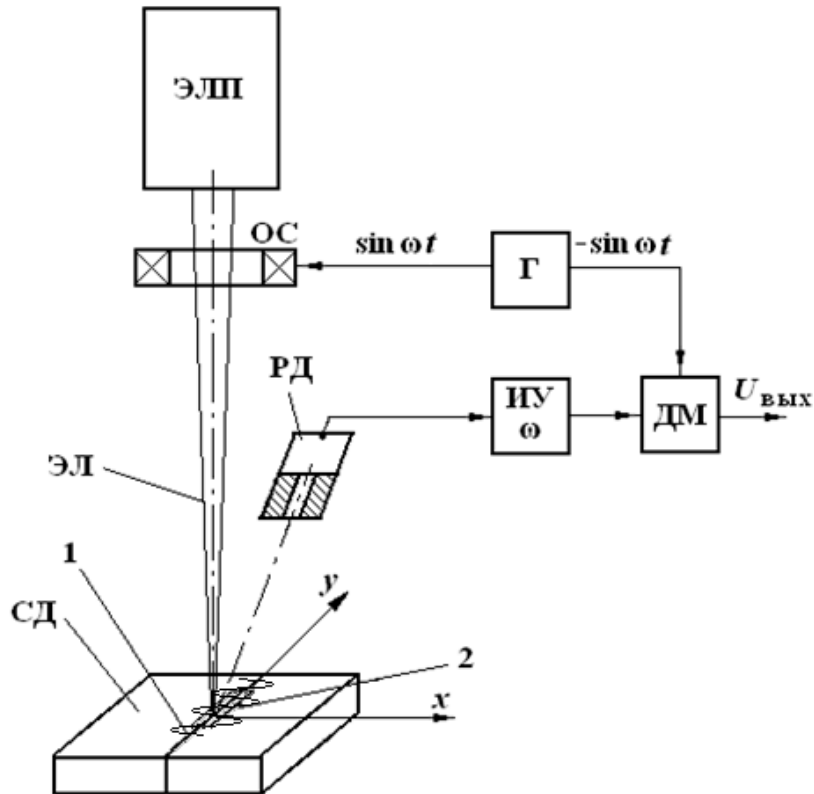
$$I_d(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nt + b_n \sin nt), \quad (2)$$

где коэффициенты ряда определяются выражениями:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_d(t) dt, \quad (3)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_d(t) \cos ntdt, \quad (4)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_d(t) \sin ntdt. \quad (5)$$



ЭЛП – электронно-лучевая пушка; ЭЛ – электронный луч; СД – свариваемые детали;
 ОС – отклоняющая система; РД – коллимированный рентгеновский датчик;
 Г – генератор; ИУ – избирательный усилитель; ДМ – демодулятор;
 1 – стык свариваемых деталей; 2 – проекция коллиматора
 Рисунок 3 – Схема метода измерения влияния магнитных полей на электронный луч
 с помощью рентгеновского датчика

Здесь интенсивность рентгеновского излучения от поверхности свариваемого изделия определяется из выражения

$$I_d = k k_1 U_0^2 Z I_b \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f_d(x) \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_0 - \varepsilon_m \sin \omega t)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx, \quad (6)$$

где $f_d(x)$ – функция зоны обзора коллиматора рентгеновского датчика; $k = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ В}^{-1}$ – коэффициент пропорциональности; k_1 – коэффициент, учитывающий пространственную ориентацию датчика; I_b – ток электронного пучка; Z – атомный номер материала свариваемого изделия; U_0 – ускоряющее напряжение; σ_x – среднеквадратические отклонения электронов от оси пучка по оси x ; ε_0 – рассогласование положений пучка и оптической оси электронно-лучевой пушки; ε_m – амплитуда сканирования пучка поперек стыка.

На рисунках 4 и 5 изображены зависимости нечетных и четных гармоник от положения электронного луча относительно оптической оси пушки. Расчет соответствующих гармоник производился по формулам (4) и (5) с учетом (6).

В соответствии с разработанной математической моделью рентгеновского датчика первая гармоника частоты сканирования позволяет определять отклонение электронного пучка от оси электроно-лучевой пушки.

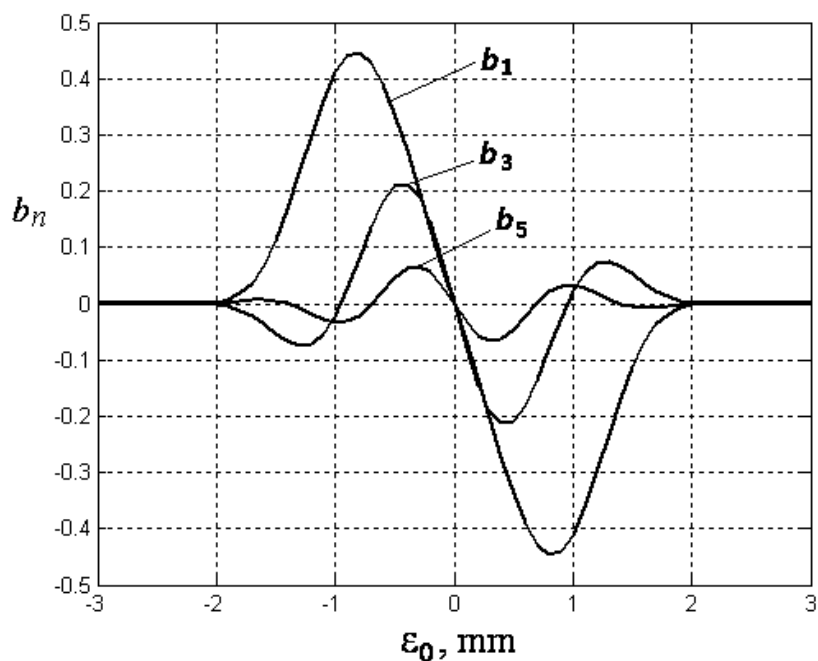


Рисунок 4 – Зависимость $b_n(\epsilon_0)$ при $\epsilon_m=1$

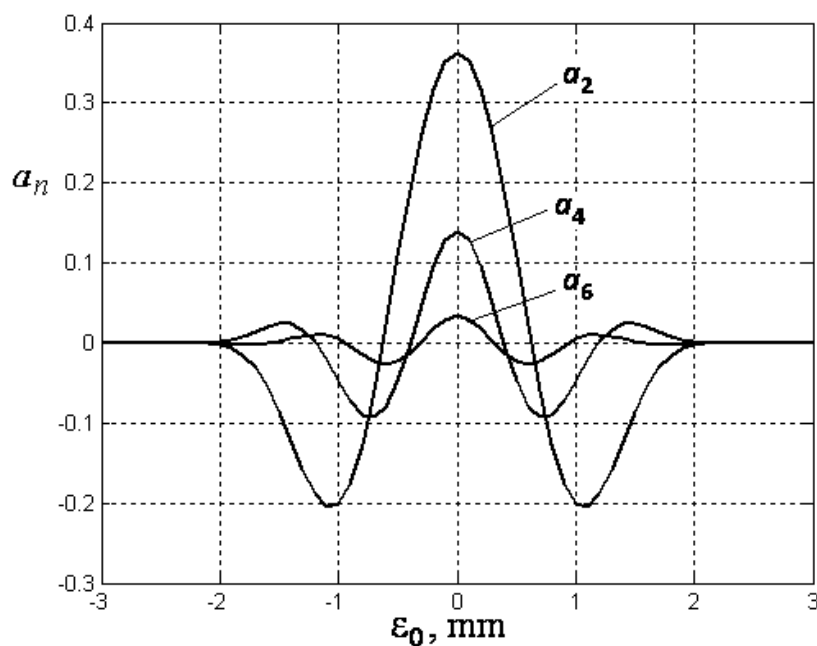


Рисунок 5 – Зависимость $a_n(\epsilon_0)$ при $\epsilon_m=1$

Амплитуда второй гармоники пропорциональна чувствительности измерительного преобразователя и может быть использована для стабилизации коэффициента усиления системы компенсации влияния магнитных полей.

В четвертой главе предложены методы автоматической компенсации влияния магнитных полей токов термо-ЭДС и остаточной намагниченности на точность позиционирования электронного пучка по стыку соединения при электронно-лучевой сварке.

Для контроля отклонения пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванного действием магнитного поля, используется коллимированный рентгеновский датчик, размещенный на электронно-лучевой пушке, коллимационная щель которого наведена на оптическую ось пушки. Информация рентгеновского датчика обрабатывается по методу синхронного детектирования с частотным выделением сигналов первой и второй гармоник частоты сканирования электронного пучка поперек стыка соединения. Для этого используется технологическое сканирование электронного пучка.

На рисунке 6 представлена функциональная схема системы автоматической компенсации влияния магнитного поля термоэлектрических токов, а на рисунке 7 – функциональная схема системы автоматической компенсации влияния поля остаточной намагниченности.

Электронно-лучевой пушкой 1 формируется сфокусированный электронный пучок. С помощью генератора сканирования 7 и отклоняющих катушек 4 и 5 осуществляется технологическое сканирование пучка. Рентгеновский датчик 8 с щелевым коллиматором закреплен на электронно-лучевой пушке так, что проекция коллимационной щели на поверхности свариваемого изделия параллельна стыку соединения и совпадает с оптической осью пушки.

В случае действия магнитных полей в промежутке электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие в процессе сканирования электронного пучка поперек стыка (по оси x) электронный пучок смещается от оптической оси электронно-лучевой пушки, а в выходном сигнале рентгеновского датчика 8 появляется гармоническая составляющая частоты сканирования, амплитуда которой пропорциональна смещению электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, а фаза этой гармонической составляющей указывает на направление смещения.

Гармоническая составляющая рентгеновского датчика 8 усиливается избирательным усилителем 9 и преобразуется в напряжение постоянного тока в

демодуляторе 10, на опорный вход которого подается сигнал с генератора 7 с частотой сканирования электронного пучка поперек стыка.

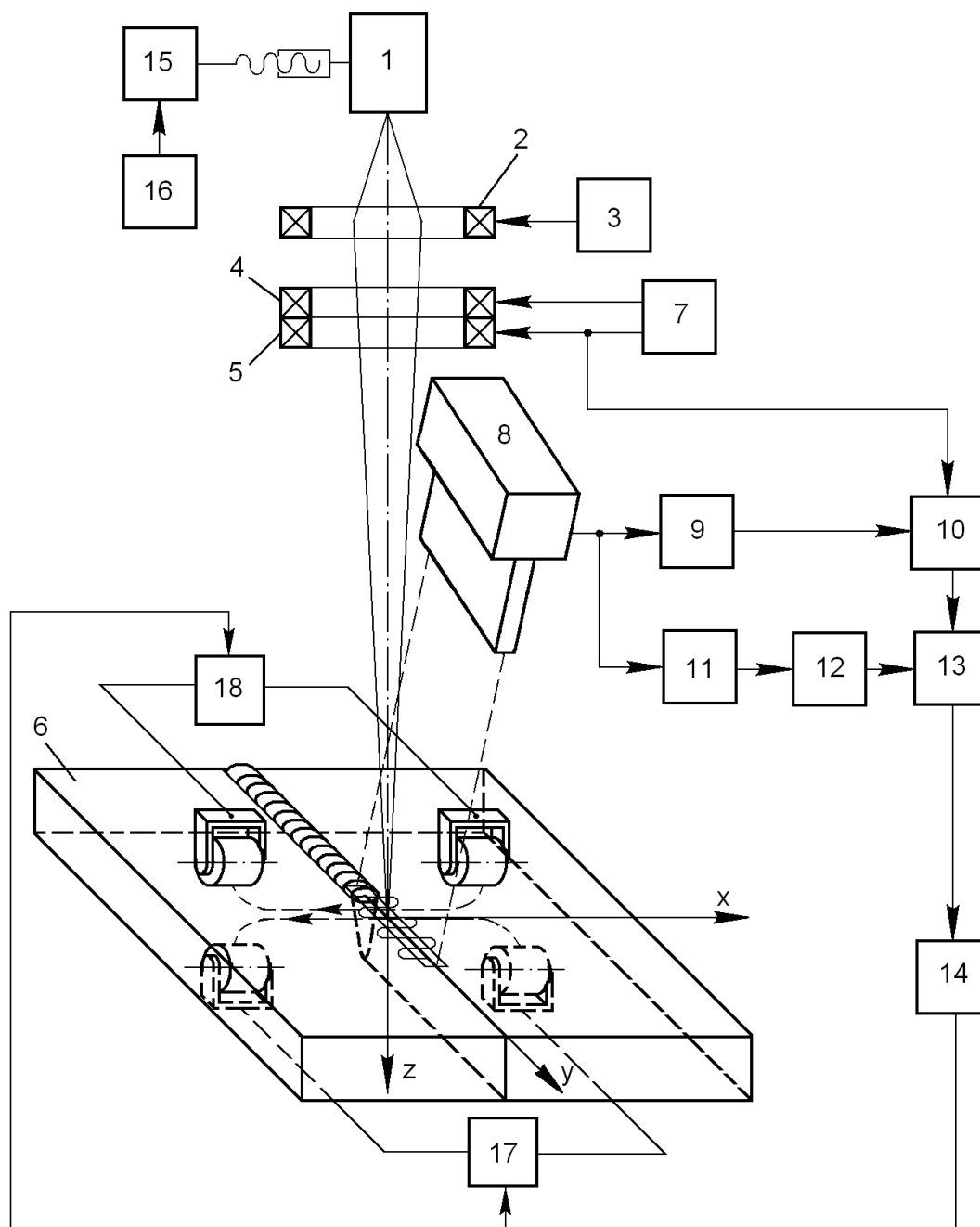


Рисунок 6 – Функциональная схема системы автоматической компенсации влияния магнитного поля термоэлектрических токов

В выходном сигнале рентгеновского датчика 8 присутствует составляющая с частотой второй гармоники частоты сканирования. Вторая гармоника максимальна при совмещении электронного пучка с оптической осью электронно-лучевой пушки. Она характеризует чувствительность рентгеновского датчика и увеличивается вместе с увеличением тока электрон-

ного пучка. Эта составляющая усиливается избирательным усилителем 11 второй гармоники и преобразуется в напряжение постоянного тока на выходе выпрямителя 12 и поступает на вход регулировки коэффициента усилителя 13. Регулировка коэффициента усиления производится с целью стабилизации коэффициента усиления контура управления во всем диапазоне сварочных токов. Усиленный сигнал через интегратор 14 поступает на источник компенсирующего магнитного поля.

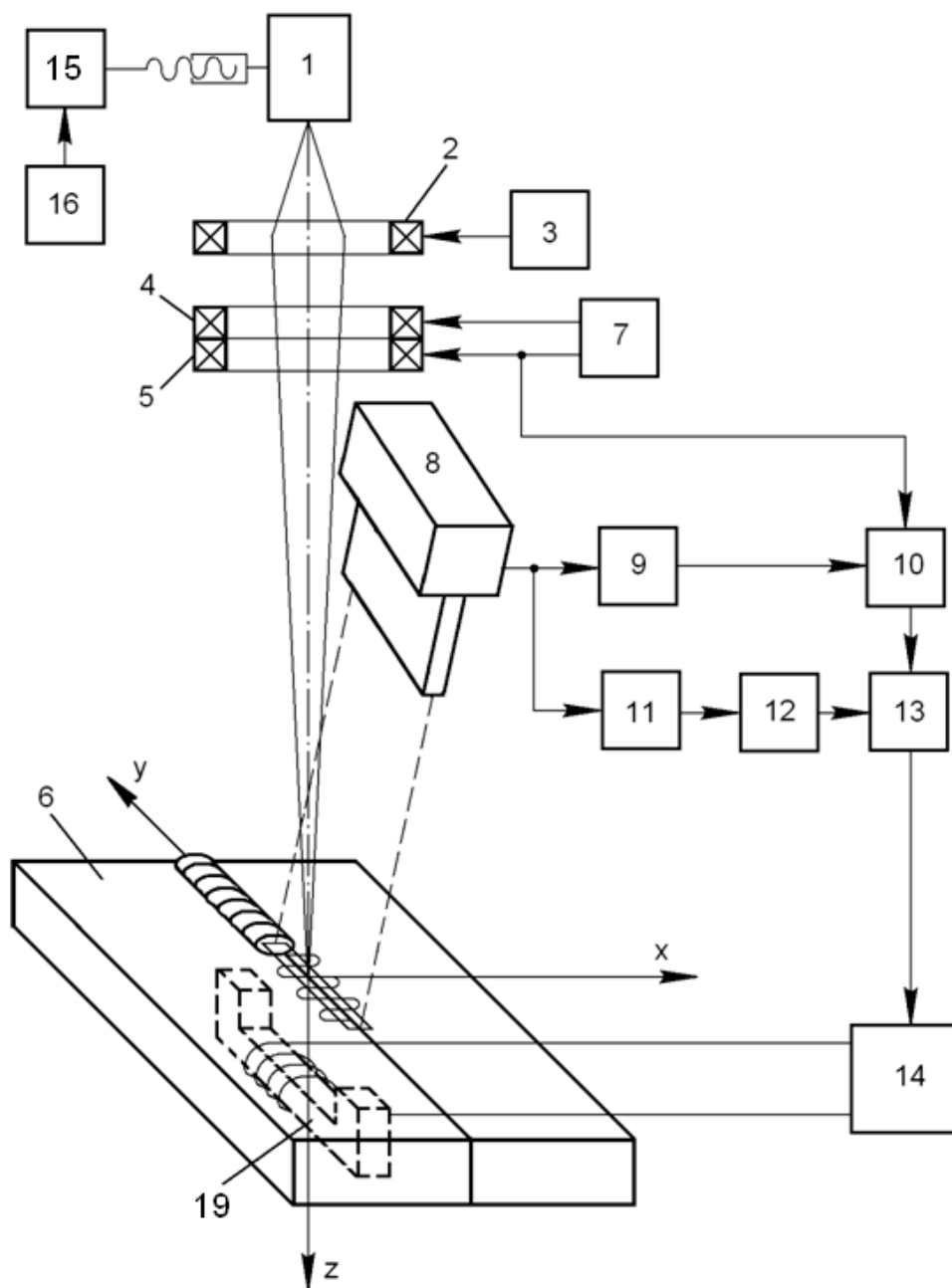


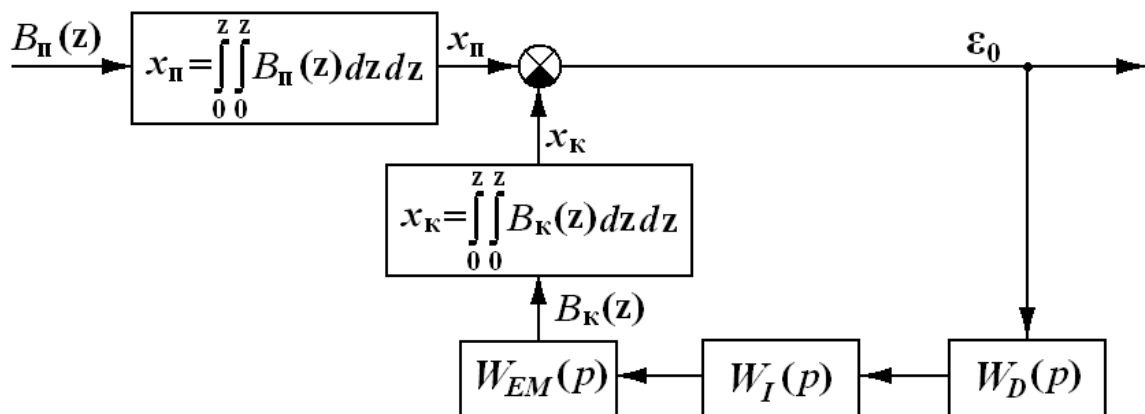
Рисунок 7 – Функциональная схема системы автоматической компенсации влияния поля остаточной намагниченности

При сварке изделий из разнородных материалов магнитное поле $B(z)$ индуцируется токами термо-ЭДС, которые распределены в свариваемом изделии. В этом случае токи термо-ЭДС компенсируются встречными токами, формируемыми регулируемым источником тока 17 и 18 (рисунок 6). Источники тока содержат токоподводы для введения компенсирующих токов в сварной шов в зоне максимальной температуры, размещенные на верхней и нижней поверхностях свариваемого изделия симметрично стыку соединения.

При сварке изделий с остаточной намагниченностью усиленный сигнал через интегратор 14 поступает на электромагнит 19 (рисунок 7), который создает в свариваемом изделии компенсирующее магнитное поле, противоположное полю остаточной намагниченности изделия.

Применение интегратора 14 позволяет ввести в управление интегральный закон и ликвидировать отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки. Совмещение электронного пучка со стыком свариваемого изделия осуществляется с помощью блока 16 наведения электронного пучка на стык сварного соединения и электропривода 15 перемещения электронно-лучевой пушки. При этом плоскость стыка сварного соединения должна быть параллельна оптической оси электронно-лучевой пушки. Это особенно важно при сварке деталей больших толщин.

На рисунке 8 приведена структурная схема системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке.



$W_D(p)$ – передаточная функция измерительного устройства; $W_I(p)$ – передаточная функция интегратора; $W_{EM}(p)$ – передаточная функция электромагнита; $B_{II}(z)$ – магнитная индукция поля помехи, направленная вдоль стыка; $B_K(z)$ – компенсирующее магнитное поле; ε_0 – отклонение пучка от оси электронно-лучевой пушки

Рисунок 8 – Структурная схема системы автоматической компенсации

Передаточная функция системы имеет вид

$$W(p) = \frac{1}{1 + W_D(p) \cdot W_I(p) \cdot W_{EM}(p)}.$$

Анализ динамических характеристик системы и магнитных полей, имеющих место в условиях сварочного производства, показал, что автоматическая компенсация влияния магнитных полей позволяет уменьшить отклонение электронного пучка от стыка до величин, обеспечивающих высокое качество сварных соединений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ автоматических устройств позиционирования электронного пучка по стыку, методов контроля влияния магнитных полей на электронный пучок и способов уменьшения этого влияния показал, что наиболее приемлемым способом защиты пучка электронов от магнитного поля является его компенсация в зоне сварки.

2. Разработанные математические модели распределения магнитной индукции в пространстве между электронно-лучевой пушкой и свариваемым изделием полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности позволяют количественно оценить отклонение электронного пучка от оптической оси пушки, вызванное этими полями. Адекватность моделирования подтверждена корректным использованием математического аппарата и экспериментальными исследованиями.

3. Разработанный метод контроля отклонения электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, основанный на сканировании электронного пучка поперек стыка и обработке сигнала коллимированного рентгеновского датчика по методу синхронного детектирования, позволяет сформировать сигнал управления системы автоматической компенсации.

4. Разработанная математическая модель коллимированного рентгеновского датчика позволяет определить величину отклонения электронного пучка от оси электронно-лучевой пушки по амплитуде первой гармоники частоты сканирования, а также направление отклонения по фазе этой гармоники. Кроме того, в соответствии с разработанной математической моделью амплитуда второй гармоники частоты сканирования, пропорциональная чувствительности рентгеновского датчика, может быть использована для стабилизации коэффициента усиления системы компенсации.

5. Использование разработанной автоматической системы компенсации позволяет устранить влияние наведенных в свариваемом изделии магнитных полей и уменьшить погрешность позиционирования электронного пучка по стыку соединения от действия магнитных полей в 50 раз.

Таким образом, на основании выполненных в диссертации исследований достигнута поставленная цель работы – предложен и разработан новый метод автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка в процессе сварки, позволяющий повысить качество сварного соединения при ЭЛС в условиях действия магнитных полей за счет повышения точности позиционирования электронного пучка по стыку.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Дружинина А. А. 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. С. 158–163.

2. Дружинина А. А. Повышение точности позиционирования по стыку соединения деталей с остаточной намагниченностью при электронно-лучевой сварке / А. А. Дружинина, В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин // Вестник СибГАУ, 2014. № 5. С. 168–173.

3. Дружинина А.А. Анализ точности позиционирования по стыку соединения при электронно-лучевой сварке в условиях компенсации магнитных полей // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. 2015. № 1. URL: www.science-education.ru/121-18283 (дата обращения: 07.04.2015).

Прочие основные публикации по теме диссертации:

4. Druzhinina A. Compensation of the effect of magnetic fields on the electron beam position in the process of electron beam welding / V. Laptенок, A. Druzhinina, A. Murygin, Y. Seregin // *Elektrotechnica & Elektronika E+E*, Sofia, 2014. Vol. 49. No 5-6. P. 62–67.

5. Дружинина А. А. Компенсация влияния магнитных полей на положение электронного пучка в процессе электронно-лучевой сварки / А. А. Дружинина, В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин // Технологии и оборудование ЭЛС-2014: Сборник докладов Санкт-Петербургской международной

научно-технической конференции, Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 62–73.

6. Druzhinina A. A. On the need of monitoring and compensating the effect of magnetic interference in the process of electron-beam welding / A. A. Druzhinina, V. D. Laptenok, O. V. Maslova // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации: материалы XII Междунар. науч. конф. бакалавров, магистрантов и аспирантов, Красноярск: СибГАУ, 2013. С. 99–100.

7. Дружинина А. А. О возможности контроля и компенсации влияния магнитных помех при ЭЛС / А. А. Дружинина, П. В. Лаптенок, А. В. Федоров // Решетневские чтения: материалы XV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева; Красноярск: СибГАУ, 2011. С. 567–568.

8. Дружинина А. А. Анализ влияния магнитных полей на электронный луч в процессе электронно-лучевой сварки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов; Красноярск: СибГАУ, 2011. С. 388–389.

Патент на изобретение:

9. Пат. 2547367 Российская Федерация, ^{МПК7} В 23К 15/00. Устройство для электронно-лучевой сварки / Бочаров А. Н., Дружинина А. А., Лаптенок В. Д., Лаптенок П. В., Мурыгин А. В., Серегин Ю. Н. № 2013133698/02; заявл. 18.07.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10. 8 с.

Дружинина Александра Алексеевна

Автоматическая компенсация влияния магнитных полей на точность позиционирования по стыку соединения при электронно-лучевой сварке

Автореферат

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага писчая. Печ. л. 1.0

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в отделе копировальной и множительной техники СибГАУ
660014 г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31