

Д. В. Тихоненко, А. В. Мурыгин

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО НАВЕДЕНИЯ НА СТЫК ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

Представлена математическая модель комбинированного рентгеновского датчика для электронно-лучевой сварки (ЭЛС), позволяющая связать амплитуду и форму сигнала датчика с местом положения электронного луча относительно стыка. Предложена методика автоматического слежения по стыку, позволяющая повысить точность наведения. Рассмотрена функциональная схема и алгоритм функционирования системы слежения за стыком при ЭЛС.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, слежение, рентгеновские детекторы.

Электронно-лучевая сварка получила широкое распространение в отраслях машиностроения, связанных с производством авиационной и аэрокосмической техники. ЭЛС относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии, позволяющими соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 до 400 мм, и обладает широкими технологическими возможностями. Значительные достижения в технологии ЭЛС достигнуты благодаря разработке принципов автоматического регулирования режимами ЭЛС и созданию систем автоматического направления луча по стыку.

Среди известных устройств можно отметить устройства автоматического слежения, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона, Сумском производственном объединении «Электрон», НИИТМе, Воронежском политехническом институте, Сибирском государственном аэрокосмическом университете имени академика М. Ф. Решетнева, а также в зарубежных фирмах «Сиаки» (Франция), «Гамилтон Стандарт» (США), «Герецс», «Штейгервальд» (ФРГ), «Мицубиси дэнки», «Итами сэйсакусе» (Япония). В качестве датчиков стыка применяются оптические, вторично-эмиссионные и рентгеновские детекторы. Высокая помехозащищенность рентгеновского датчика стыка по сравнению с другими типами датчиков позволила использовать его как в автоматических системах слежения с предварительной записью траектории стыка, так и в автоматических системах слежения за стыком в процессе сварки. Для повышения помехозащищенности датчика автоматические устройства обнаружения стыка в процессе сварки используют коллимированный детектор рентгеновского излучения.

Следует отметить, что существующие автоматические устройства позиционирования луча по стыку не в полной мере удовлетворяют современным требованиям точности и надежности наведения луча на стык. Причиной этого являются проблемы, связанные с компенсацией различных возмущений, вызванных физическими процессами, сопровождающими ЭЛС, низкая помехозащищенность датчиков измерительных устройств. Поэтому актуальной является задача исследования и разработки новых автоматических устройств обнаружения стыка при ЭЛС, отвечающих требованиям помехоустойчивости, и создание на их основе новых средств автоматизации контроля и систем слежения за стыком.

Наиболее перспективным направлением является разработка систем наведения на стык по рентгеновскому из-

лучению с поверхности свариваемых деталей. Возможность контролировать наведение на стык электронного луча по косвенному параметру – рентгеновскому излучению из зоны торможения электронов – основана на том, что плотность рентгеновского излучения с поверхности обрабатываемого изделия в направлении детектора, пропорциональная плотности тока электронного пучка, в процессе сканирования меняется при пересечении лучом стыка свариваемых деталей. Если при этом установить второй детектор и ограничить зону обзора рентгеновского детектора коллиматором – щелевой блендой из рентгенопоглощающего материала – то при пересечении лучом проекции коллиматора на поверхности деталей можно контролировать координаты оси пучка электронов. Совместное применение детектора с широкой зоной обзора и детектора с узкой зоной обзора в составе комбинированного датчика стыка позволяет повысить точность наведения электронного луча на стык деталей, дает возможность устранить ошибки позиционирования луча. Математическая модель комбинированного датчика стыка представлена в виде математических выражений, позволяющих связать амплитуду и форму сигнала датчика с местом положения электронного луча относительно стыка.

При взаимодействии пучка электронов с поверхностью обрабатываемого материала электроны в результате торможения теряют свою энергию. Этот процесс сопровождается возбуждением рентгеновского излучения (РИ). В работах Н. Н. Рыкалина, В. Д. Лаптенка, А. В. Мурыгина, А. Н. Бочарова было установлено, что плотность тока электронного пучка распределяется на поверхности деталей неравномерно и может быть описана нормальным законом [1; 2]. Учитывая это, интенсивность РИ на детекторе можно описать выражением

$$J = \frac{K \cdot K_1 \cdot Z \cdot I_n \cdot U^2}{\sigma_x \cdot \sigma_y \cdot 2 \cdot \pi} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_3(x, y) \cdot \varphi(x, y) \cdot \exp\left[-\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2 \cdot \sigma_x^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(y - \varepsilon_y)^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right] \cdot dy \cdot dx, \quad (1)$$

где σ_x, σ_y – среднее квадратичное отклонение электронов от центра луча по осям X, Y ; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – координаты математического ожидания оси пучка электронов по осям X, Y ;

$K = 1,5 \cdot 10^{-9} B^{-1}$ – коэффициент пропорциональности; K_1 – коэффициент, учитывающий пространственную ориентацию детектора; I_n – ток электронного луча; Z – атомный номер материала свариваемого изделия; U – ускоряющее напряжение; $\varphi(x, y)$ – функция обзора детектора; $K_s(x, y)$ – коэффициент, учитывающий неоднородность поверхности стыка деталей.

Интенсивность РИ для детектора с широкой зоной обзора [3] определяется как

$$J = W \cdot \left\{ 1 - \frac{(1 - K_s)}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-0,5h_c}^{0,5h_c} \exp \left[-\frac{(x - \varepsilon)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] \cdot dx \right\}, \quad (2)$$

где $W = K \cdot K_1 \cdot Z \cdot I_n \cdot U^2$ – полное РИ с поверхности деталей; $\sigma = \sigma_x$; $\varepsilon = \varepsilon_x$.

Интенсивность РИ для детектора с узкой зоной обзора описывается следующим выражением:

$$J_k = \frac{W \cdot h_k}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left(-\frac{(\varepsilon_x \cdot \cos \beta - (\varepsilon_y - y_k) \sin \beta)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right) \times \left\{ 1 - \frac{(1 - K_s)}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{y_1}^{y_2} \exp \left[-\frac{(y - \varepsilon_x \cdot \sin \beta - (\varepsilon_y - y_k) \cdot \cos \beta)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] \cdot dy \right\}, \quad (3)$$

где $y_1 = -\frac{h_c}{2 \cdot \operatorname{tg} \beta} + y_k$; $y_2 = \frac{h_c}{2 \cdot \operatorname{tg} \beta} + y_k$ – границы стыкового соединения.

Зависимость нормированной интенсивности РИ для детектора с широкой и узкой зоной обзора от места положения оси пучка относительно стыка показана на рис. 1, 2. На основе обработки совместных сигналов детектора с широкой зоной обзора и узкой зоной обзора можно построить статическую характеристику комбинированного датчика стыка автоматического устройства обнаружения стыка. Статическая характеристика описывает форму сигнала комбинированного датчика в зависимости от координаты положения оси луча на оси X . Для построения статистической характеристики комбинированного датчика необходимо совместить две характеристики интенсивности рентгеновского излучения на детекторах. Для совмещения характеристики графики интенсивности РИ детекторов приводим к общей оси и одному масштабу. Статистическая характеристика комбинированного измерителя получается как результат наложения двух характеристик, переходящих одна в другую в точке их пересечения. В результате получаем двухмодальное распределение, один из горбов которого при перемещении координаты траектории сканирования по оси Y перемещается к точке пересечения проекции коллиматора и стыка. При попадании в эту точку кривая принимает форму одномодального нормального распределения. Результат наложения статической характеристики детектора с широкой зоной обзора $J = f(\varepsilon_x)$ и статической характеристики детектора с коллиматором $J_k = f(\varepsilon_x)$ приведен на рис. 3–5.

Закон распределения статической характеристики комбинированного рентгеновского датчика стыка $j(x)$ как функция распределения может характеризоваться набором признаков U_1, U_2, \dots, U_n . Чтобы признаки характеризовали только форму закона распределения, они должны быть безразмерными и не зависеть от смещения центра

распределения. Интегральные признаки проще всего формируются как линейные функционалы от функции $j(x)$. В частности, интегральными признаками могут служить моменты распределений и энтропия [4].

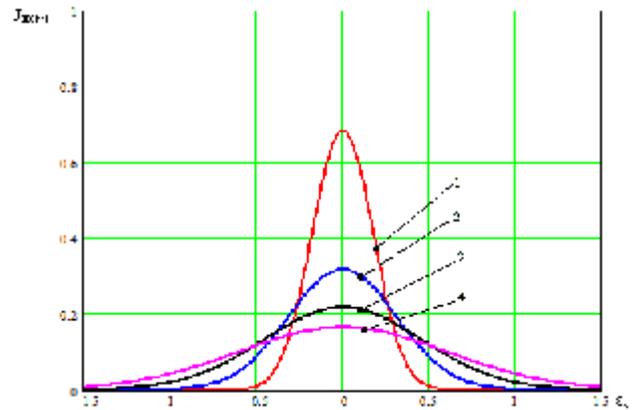


Рис. 1. Зависимость нормированной интенсивности рентгеновского излучения от местоположения оси луча относительно стыка для детектора с широкой зоной обзора при $h_c = 0,3$ мм: 1 – $\sigma = 0,5 \cdot h_c$; 2 – $\sigma = 1 \cdot h_c$; 3 – $\sigma = 1,5 \cdot h_c$; 4 – $\sigma = 2 \cdot h_c$

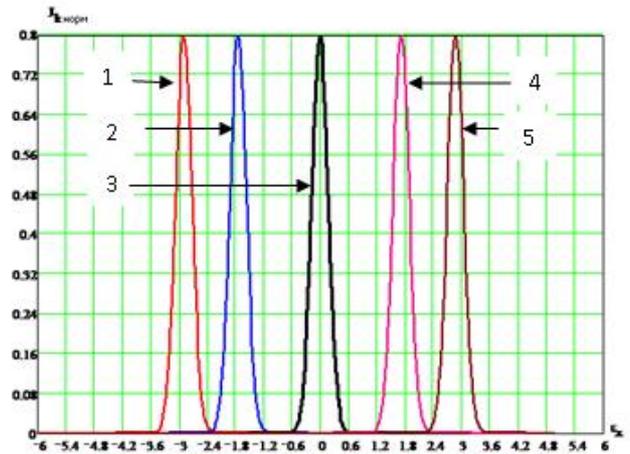


Рис. 2. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от местоположения луча на стыке для детектора с узкой зоной обзора при $h_k = 0,3$ мм, $h_c = 0,3$ мм: $\sigma = 0,5 \cdot h_c$; 1 – $\varepsilon_y = 0,5 y_k$; 2 – $\varepsilon_y = 0,7 y_k$; 3 – $\varepsilon_y = y_k$; 4 – $\varepsilon_y = 1,3 y_k$; 5 – $\varepsilon_y = 1,5 y_k$; $\beta = 30^\circ$

Для идентификации распределений по их форме удобно использовать контрэксцесс: $\chi = 1/\sqrt{\varepsilon}$. Это *первый информационный признак* формы распределения сигнала датчика стыка.

В качестве *второго независимого признака* формы закона распределения сигнала можно принять значение энтропийного коэффициента k_s , который для любых законов распределения изменяется от 0 до $\sqrt{(\pi \cdot e)}/2 \approx 2,066$ и является функционалом энтропии H : $k_s = \frac{1}{2 \cdot \sigma} e^H$.

В качестве *третьего информационного признака* будем использовать взаимокорреляционную функцию сигналов от детекторов с узкой и широкой зоной обзора:

$$\Psi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} J(\varepsilon_x) \cdot J_k(\varepsilon_x - \tau) d\varepsilon_x.$$

При использовании первого и второго признака изображающая точка с координатами k_y и χ будет всегда находиться в пределах прямоугольника, ограниченного значениями k_y от 0 до 2,066 и значениями χ от 0 до 1 и называемого полем признаков формы сигнала.

В процессе сканирования сигнал комбинированного рентгеновского датчика стыка меняет свою форму от дискретного двухзначного до нормального одномодального распределения. При этом точка, отображающая закон распределения статической характеристики комбинированного рентгеновского датчика стыка, будет перемещаться из точки 1, соответствующей дискретному двухзначному распределению, в точку 2, соответствующую нормальному одномодальному распределению, и обратно (рис. 6). Точка 2 соответствует пересечению оси стыка детали и оси проекции коллиматора рентгеновского детектора с узкой зоной обзора и может быть использована для определения координаты стыка.

В автоматическом устройстве обнаружения стыка в качестве детекторов используется рентгеновский датчик с широкой зоной обзора и коллимированный рентгеновский датчик с узкой зоной обзора. Реализовать сложные алгоритмы обработки сигнала от стыка возможно только с помощью средств вычислительной техники, поэтому в качестве системы управления применяется промышленная ЭВМ, что позволяет снизить число аппаратных средств, реализовать многие функции системы программным путем, повысить в целом надежность системы.

Для обнаружения ошибки наведения луча на стык используется следующий метод [5]. Детектор с узкой зоной обзора ориентируется таким образом, чтобы проек-

ция коллимационного отверстия пересекала стык на расстоянии 10 мм от места сварки под углом $\beta = 12^\circ$ (рис. 7). Для обнаружения стыка электронный луч выбрасывается из сварочной ванны вперед по направлению сварки и отклоняется влево на 2,5 мм в исходную точку, из которой производится сканирование по траектории, являющейся прямой линией, длиной 5 мм, и направленной перпендикулярно стыку, после чего электронный луч возвращается в точку сварки. В процессе сканирования электронный луч пересекает участки проекции коллиматора и стыка деталей. Блок регистрации сигналов детектора при этом будет измерять сигналы детекторов с узкой и широкой зоной обзора. Фаза этих сигналов ω_1 и ω_2 будет различной. Первое сканирование производится на расстоянии 5 мм. Всего делается 31 сканирование на различных расстояниях от сварочной ванны. Траектории сканирования группируются в три отдельных блока, хранящихся в постоянном запоминающем устройстве, и выбираются в зависимости от величины ошибки наведения, определенной при предыдущем сканировании. На рис. 7 показаны 3 характерных случая при определении ошибки наведения. Они различаются тем, что количество сканирований локально увеличивается в зоне предполагаемого нахождения стыка: стык в центре, $\Delta x = \pm 0,5$ мм (рис. 7, а); смещение стыка вправо, $\Delta x = 0,5$ мм $< \Delta x \leq 1$ мм (рис. 7, б); смещение стыка влево, $\Delta x = -0,5$ мм $< \Delta x \leq -1$ мм (рис. 7, в). Если предыдущее измерение показало, что ошибка находится в пределах $\pm 0,5$ мм (стык в центре), то зона сканирования делится на три участка (рис. 7, а). На первом (с 1 по 5 траектории) и третьем (с 27 по 31 траектории) участках ошибка наведения Δx будет определяться с точностью 0,1 мм. На этих участках каждое последующие сканирование производится на расстоянии 0,5 мм

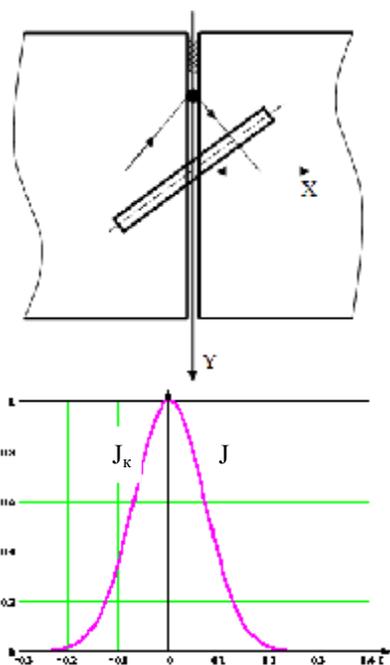


Рис. 3. Наложение характеристик детектора с широкой зоной обзора и коллимированного детектора без смещения стыка

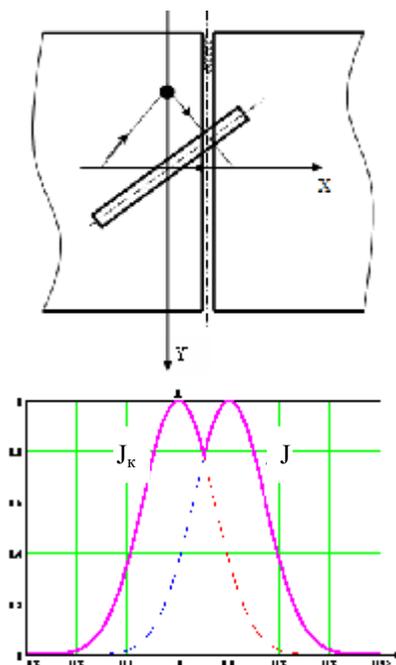


Рис. 4. Наложение характеристик детектора с широкой зоной обзора и коллимированного детектора при смещении стыка вправо

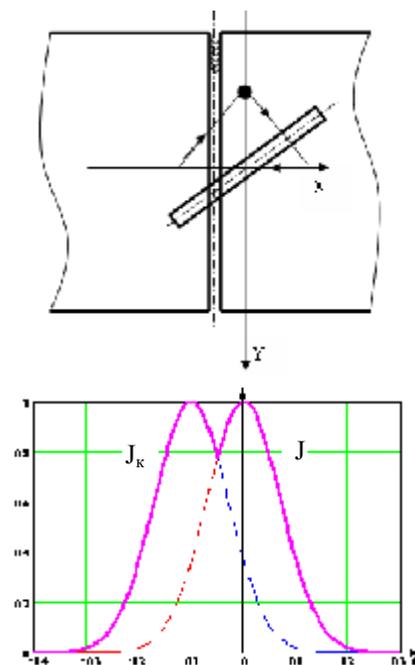


Рис. 5. Наложение характеристик детектора с широкой зоной обзора и коллимированного детектора при смещении стыка влево

от предыдущего. Второй участок (с 6 по 26 траектории) соответствует зоне наиболее вероятного нахождения точки пересечения стыка с проекцией коллиматора. На этом участке каждое последующие сканирование производится на расстоянии 0,25 мм от предыдущего. и ошибка наведения будет определяться с точностью 0,05 мм. Если координата точки сварки и координата стыка совпадают, то при сканировании траектории 16, которое производится на расстоянии 10 мм от места сварки, фазы сигналов детекторов ω_1 и ω_2 будут совпадать.

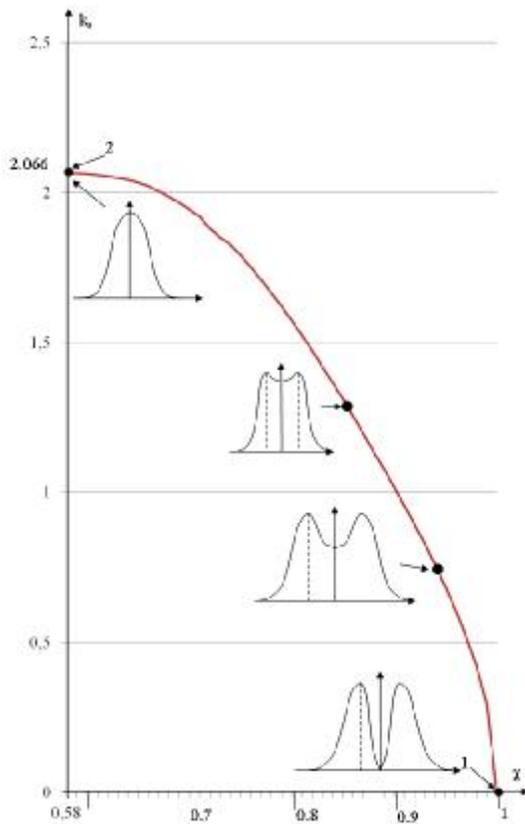


Рис. 6. Поле признаков форм сигналов комбинированного рентгеновского датчика стыка: 1 – точка, соответствующая дискретному двузначному распределению; 2 – точка, соответствующая нормальному одномодальному распределению

Если фазы сигналов ω_1 и ω_2 совпадают на траектории сканирования с другим номером (N_c), то это означает, что координата стыка не совпадает с координатой точки сварки и есть ошибка наведения Δx . Ошибка наведения определяется следующим образом:

стык в центре, $\Delta x = \pm 0,5$ мм:

$$\Delta x(\text{мм}) = \begin{cases} -0,5 + (N_c - 6) 0,1, & \text{при } 1 \leq N_c \leq 5, \\ (N_c - 16) 0,05, & \text{при } 6 \leq N_c \leq 26, \\ 0,5 + (N_c - 26) 0,1, & \text{при } 27 \leq N_c \leq 31; \end{cases}$$

смещение стыка вправо, $0,5 \text{ мм} \leq \Delta x \leq 1 \text{ мм}$:

$$\Delta x(\text{мм}) = \begin{cases} (N_c - 11) 0,1, & \text{при } 1 \leq N_c \leq 10, \\ (N_c - 11) 0,05, & \text{при } 11 \leq N_c \leq 31; \end{cases}$$

смещение стыка влево, $-0,5 \text{ мм} \leq \Delta x \leq -1 \text{ мм}$:

$$\Delta x(\text{мм}) = \begin{cases} (N_c - 21) 0,05, & \text{при } 1 \leq N_c \leq 21, \\ (N_c - 21) 0,1, & \text{при } 22 \leq N_c \leq 31. \end{cases}$$

Автоматическая система слежения за стыком состоит из двух основных блоков (рис. 8) [3]: блок выброса луча БВЛ и измерительный блок ИзБ. БВЛ осуществляет вывод луча из сварочной ванны, пересечение лучом зоны обзора рентгеновских детекторов по заданной траектории через СЧ1. Развертка луча производится цифровым генератором по 128 точкам. Координаты траекторий сканирования хранятся в постоянном запоминающем устройстве ПЗУХ и ПЗУУ. Выбор нужного блока траекторий сканирования производится через порт ЭВМ подачей нужного кода на счетчик СЧ1. Работа БВЛ синхронизируется частотой питающей сети от генератора ГСС. В блоке ИзБ сигнал рентгеновских детекторов с узкой зоной обзора (КД) и широкой зоной обзора (Д) после преобразования запоминается в оперативном запоминающем устройстве ОЗУ. После заполнения ОЗУ ЭВМ через шинный формирователь ШФ производит считывание информации и последующую ее обработку.

Коррекция положения луча относительно стыка производится через ШД с записью в регистр Р1. Регистр Р1 запускается сигналом «2» с дешифратора ДШ. Далее кодовые комбинации преобразуются в аналоговую форму в ЦАПе с последующим суммированием в усилителе УМХ и отклоняющей системе ОСХ.

Аварийный вывод тока луча производится схемой АВЛ по команде ЭВМ в случае потери сигнала от стыка или при сбое программы.

Блок-схема алгоритма работы ЭВМ в составе системы слежения за стыком приведена на рис. 9. Начальная установка заключается в настройке ЭВМ для задания направления обмена информацией. Полученную из ОЗУ измерительного блока информацию ЭВМ хранит в специально отведенной области памяти. Перед началом каждого цикла измерений ОЗУ очищается. Далее загружается код блока траекторий сканирования. Затем ЭВМ переходит в режим ожидания синхроимпульса сети. Синхроимпульс подается на одну из линий порта ЭВМ с частотой 100 Гц. ЭВМ постоянно опрашивает эту линию и при поступлении синхроимпульса запускает блок выброса луча, организуя подачу сигнала «1» дешифратором.

Затем ЭВМ переходит в режим ожидания сигнала «Гот» от измерительного блока. Этот сигнал поступает на одну из линий порта примерно через 0,1 мс. ЭВМ постоянно опрашивает эту линию и при поступлении сигнала переходит к считыванию информации из ОЗУ измерительного блока. Если сигнал «Гот» через 0,1 мс не поступил, то это означает, что измерительный блок неисправен. С целью распознавания такой ситуации ЭВМ перед началом ожидания сигнала «Гот» на одном из своих регистров организует счетчик (С1), работающий на вычитание (блоки 7, 8, 9). В счетчик С1 загружается число, и после каждого опроса сигнала «Гот» содержимое счетчика уменьшается на 1. Если измерительный блок неисправен и сигнал «Гот» не поступает, то через 0,15 мс счетчик С1 обнулится, после чего ЭВМ организует индикацию аварийного режима и запускает схему аварийного вывода тока луча.

Если сигнал «Гот» поступает через 0,1 мс, ЭВМ переходит к считыванию информации из ОЗУ измерительного блока (блоки 13–16). С этой целью ЭВМ по одной из

линий порта посылает на счетчик СЧ2 измерительного блока синхроимпульс. После получения синхроимпульса СЧ2 выставляет на адресный вход ОЗУ измерительного блока код адреса. Данные ОЗУ измерительного блока считываются ЭВМ и перемещаются в отведенную область памяти. Всего считывается 128 чисел, после чего ЭВМ снова переходит в режим ожидания синхроимпульса сети (блок 5). После поступления синхроимпульса организуется новый цикл сканирования и считывания информации. После совершения 31 цикла ЭВМ переходит к программе обработки сигналов детекторов (блоки 18–27).

Обработка производится в следующем порядке: вначале обрабатывается сигнал детектора с узкой зоной обзора. Для каждой сохраненной реализации сигнала детектора вычисляются информационные параметры формы – контрэксцесс χ и энтропийный коэффициент k_3 и их среднее значение χ_{cp} , $k_{3, cp}$ по всем реализациям. После этого средние значения сравниваются с пороговыми значениями. Если $k_{3, cp} = 1,9 \pm 0,1$, а контрэксцесс $\chi_{cp} = 0,6 \pm 0,1$, то сигнал считается достоверным.

Затем обрабатывается сигнал детектора с широкой зоной обзора: показания детектора в каждой x_i -й точке траектории сканирования усредняются по всем реализациям. Это позволяет уменьшить влияние помех. После этого усредненный сигнал нормируется, и вычисляются его информационные параметры формы – контрэксцесс χ и энтропийный коэффициент k_3 , которые сравниваются с пороговыми значениями. Если $k_3 = k_{3, cp} \pm 5\%$ и $\chi = \chi_{cp} \pm 5\%$, то сигнал считается достоверным.

Если сигнал детекторов достоверен, то производится определение смещения Δx стыка. Для этого для каждой траектории сканирования строится характеристика комбинированного рентгеновского датчика стыка путем совмещения полученных сигналов от детектора с узкой зоной обзора и усредненной в каждой x_i -й точке траектории сканирования сигнала детектора с широкой зоной обзора. Далее высчитываются информационные признаки полученной характеристики, по которым определяется координата стыка.

Если принятый сигнал недостоверен, то в этом случае ЭВМ принимает решение о том, что произошел сбой. Наиболее вероятной причиной сбоя системы слежения может быть наличие прихваток. С целью распознавания этой ситуации в блоке 22 анализируется количество сбоев. Если число сбоев меньше заданного числа n , то процесс слежения возобновляется. Число допустимых сбоев зависит от скорости сварки и длины прихваток.

Конструктивно автоматическое устройство обнаружения стыка выполнено в виде отдельного блока. Блок представляет собой промышленную рабочую станцию фирмы Advantech, в корпусе которой на специальной кроссплате расположены плата АЦП и ЦАП, плата ГСС, ГТИ, АРУ измерительного блока и источник питания.

Таким образом, можно отметить следующее.

1. Разработанная аналитическая модель комбинированного рентгеновского датчика стыка автоматического устройства наведения на стык, состоящая из двух детекторов рентгеновского излучения с широкой и узкой зоной обзора, позволяет определять положение стыка деталей по форме статической характеристики, получаемой наложением статических характеристик детекторов, обработанных с помощью созданных программ расчета.

2. Характеристика комбинированного датчика автоматического устройства наведения на стык имеет двухмодальную форму распределения, если на траектории сканирования проекция коллиматора и стык деталей не совпадают, и одномодальную нормальную форму распределения, если они совпадают. Для оценки формы статической характеристики можно использовать информационные параметры: контрэксцесс χ , энтропийный коэффициент k_3 и взаимокорреляционную функцию сигналов детекторов $\Psi(\tau)$. При изменении координаты траектории сканирования информационные параметры сигнала меняют свое значение от $\chi = 1$, $k_3 = 0$, $\Psi(\tau) = 0$, что соответствует двухмодальной форме распределения, до $\chi = 0,58$, $k_3 = 2,066$, $\Psi(\tau) = \max$, что соответствует нормальному одномодальному распределению, и обратно.

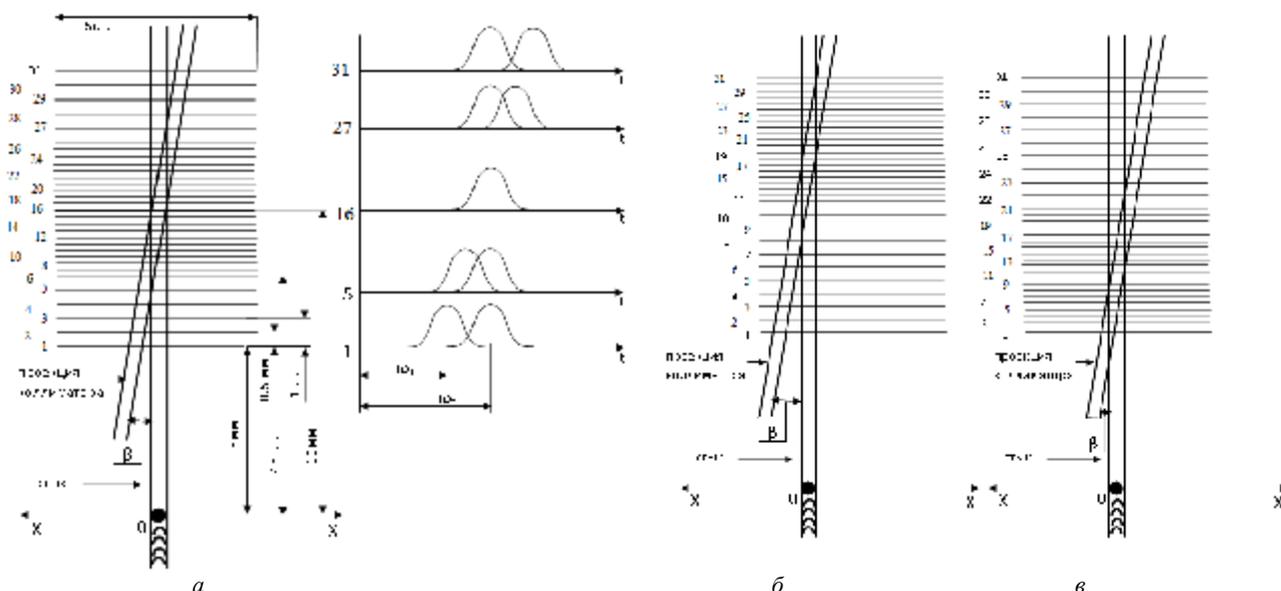


Рис. 7. Схема определения ошибки Δx наведения на стык: а – стык в центре ($\Delta x = \pm 0,5$ мм); б – смещение стыка вправо ($0,5$ мм $< \Delta x \leq 1$ мм); в – смещение стыка влево ($-0,5$ мм $< \Delta x \leq -1$ мм)

3. Разработанный метод автоматического обнаружения ошибки наведения электронного луча на стык деталей по сигналам рентгеновских детекторов с широкой и узкой зоной обзора позволяет определять ошибку наведения с точностью 0,05 мм.

4. Разработанное автоматическое устройство наведения на стык позволяет на основе полученных алгоритмов и программ обнаруживать стык при различных технологических параметрах ЭЛС, записывать и обрабатывать сигналы, получаемые с рентгеновских детекторов, оце-

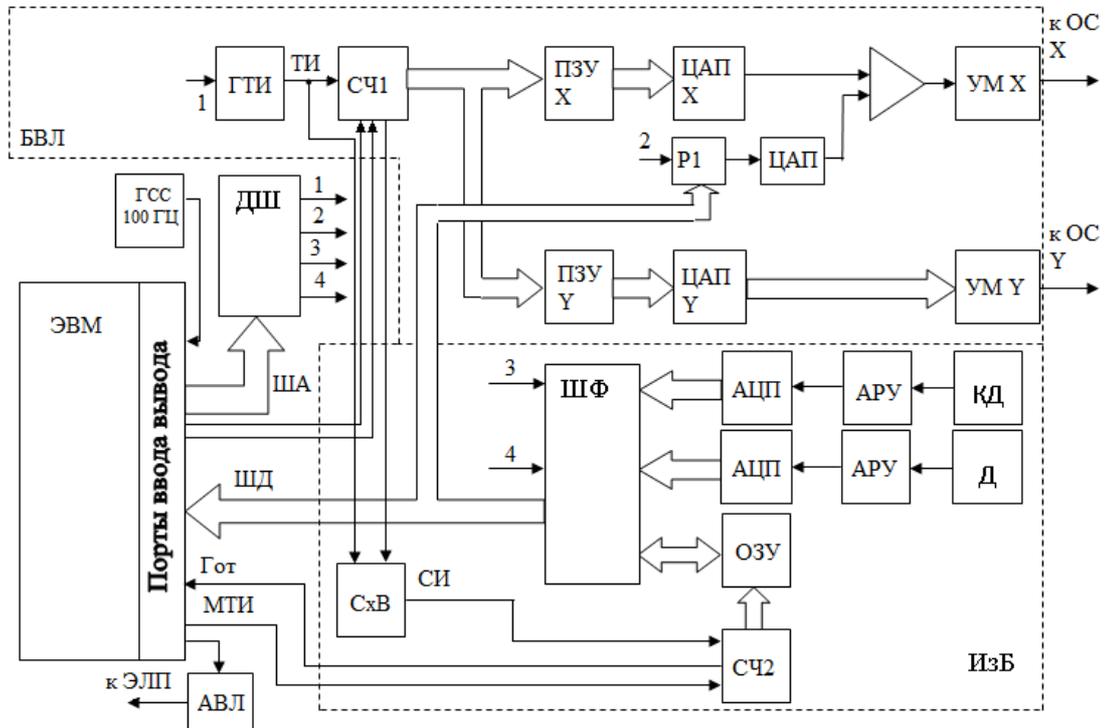


Рис. 8. Функциональная схема автоматической системы слежения за стыком

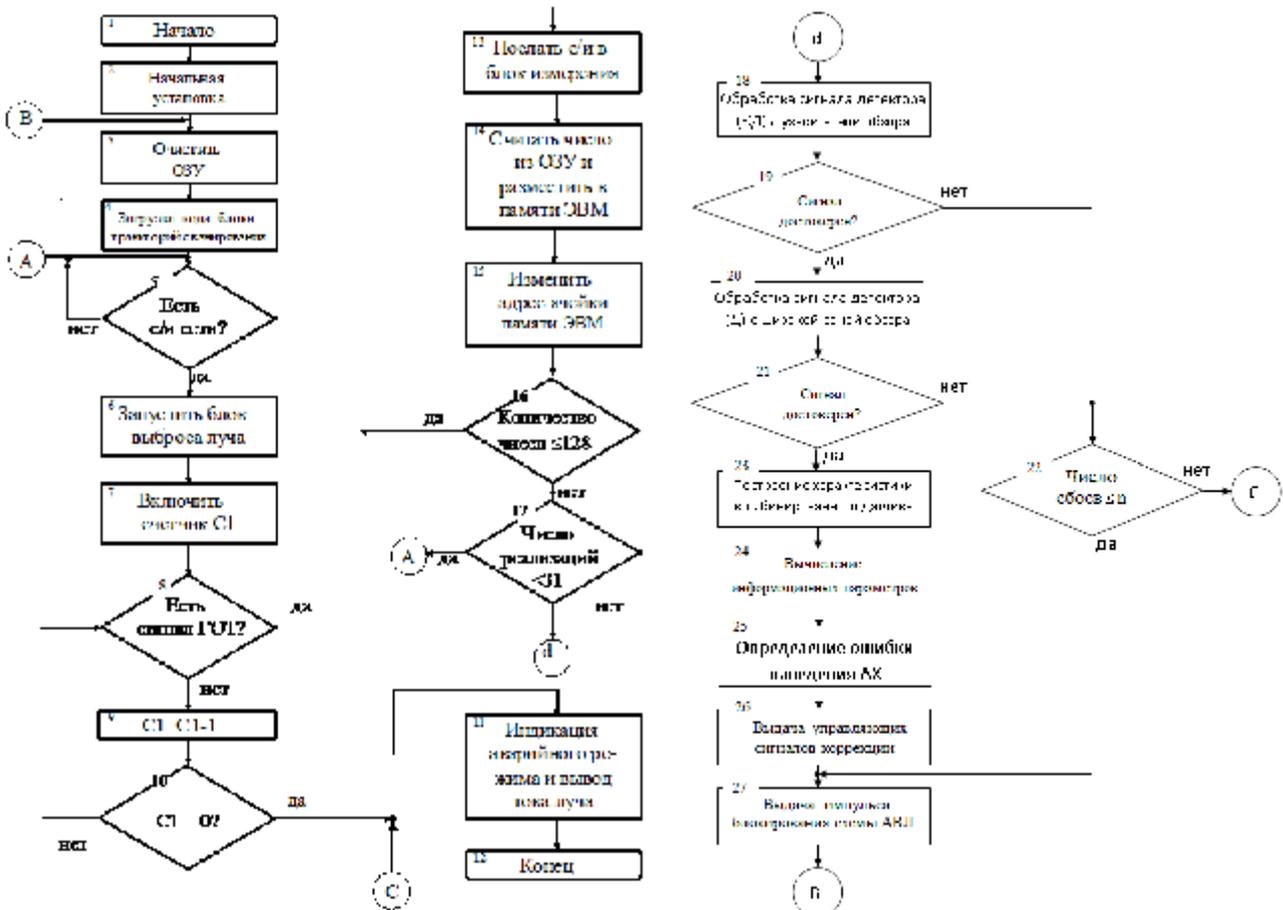


Рис. 9. Блок-схема алгоритма работы автоматической системы слежения

нивать достоверность полученных сигналов и работоспособность самой системы.

Библиографические ссылки

1. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978.

2. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенко [и др.]; САА. Красноярск, 2000.

3. Тихоненко Д. В. Автоматическая система слежения за стыком при ЭЛС с рентгеновским датчиком стыка // Вестник НИИ СУВПТ: сб. науч. тр. Красноярск, 2008. Вып. 26. С. 78–84.

4. Тихоненко Д. В., Мурыгин А. В. Анализ достоверности информации по форме сигнала датчика стыка при электронно-лучевой сварке // Вестн. СибГАУ. Вып. 3 (10). 2006. С. 61–64.

5. Тихоненко Д. В. Автоматическое определение ошибки наведения на стык деталей при ЭЛС // Вестник НИИ СУВПТ: сб. науч. тр. Красноярск, 2008. Вып. 26. С. 75–77.

D. V. Tikhonenko, A. V. Murygin

AUTOMATIC SYSTEM OF INDUCTION ON JOINT FOR ELECTRON BEAM WELDING

The article presents mathematical model of combined x-ray data transmitter for electron beam welding (EBW) which affords to correlate data transmitter amplitude, form of signal and the position of electronic ray against the joint. Method of automatic-tracking on a joint, which makes possible to promote aiming exactness, is offered, and functional diagram and algorithm of functioning of the track system behind a joint at EBW is considered in the article.

Keywords: electron beam welding (EBW), track system, x-ray detectors.

© Тихоненко Д. В., Мурыгин А. В., 2010

УДК 004.7

С. П. Саханский, С. М. Баркин

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КРЕМНИЯ

Предложена математическая модель формирования задания температуры на установке выращивания монокристаллов кремния по способу Чохральского, которая позволяет автоматизировать процесс его ввода в микропроцессорную систему управления установкой.

Ключевые слова: модель, температура, выращивание, монокристалл, кремний.

Методы вытягивания кристаллов из расплава по способу Чохральского берут начало от работ таких авторов, как R. Nacem, S. Kyrohulos и J. Czochralski. Основа этих методов состоит в том, что небольшую монокристаллическую затравку вводят неглубоко в расплав и затем ее медленно вытягивают из расплава. При вытягивании температуру расплава сначала повышают, что приводит к образованию шейки, затем температуру расплава снижают до первоначального уровня, в результате чего диаметр затравки возрастает. Этот процесс носит название подрезания затравки. Он позволяет получить гарантированную монокристаллическую затравку. После подрезания затравки для перехода в автоматический режим выращивания кристалла по программе, закладываемой в систему управления, производится вытягивание шейки затравки определенного диаметра и длины с одновременным обеспечением заданной скорости вытягивания, что позволяет стабилизировать тепловые условия перед переходом в автоматический режим работы по программе. Выращивание кристаллов кремния производится

обычно в протоке инертного газа аргона, при этом расплав помещается во вращающийся тигель (с угловой скоростью вращения в пределах 2–10 об/мин), а затравке с кристаллом придается программируемое вращение (с угловой скоростью в пределах 10–90 об/мин). В процессе вытягивания форма прямого конуса кристалла, его цилиндрической части и обратного конуса, а также процесс последующего отжига кристалла (снижения температуры после отрыва кристалла от расплава) программируется системой управления за счет программного изменения скорости вытягивания кристалла и температуры. Во многих системах управления поддерживается постоянный уровень расплава в тигле и имеются подсистемы измерения и управления текущим диаметром кристалла. Интенсивное перемешивание расплава в тигле за счет центробежных сил позволяет отбросить от кристалла возможные возникающие паразитные кристаллические зародыши и исключить радиальные температурные градиенты, способные вызвать неправильный (боковой) рост кристалла. Это благоприятствует поддер-