

УДК 53.06, 621.791.722, 681.5.08

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЗАДАНИЯ КООРДИНАТ ШВА В УСТАНОВКАХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ*

Э. А. Купер¹, П. В. Логачев^{1,2}, В. В. Репков¹,
А. Н. Селиванов^{1,2}, П. А. Селиванов¹, Ю. И. Семенов¹,
А. Г. Трибендис¹, М. Г. Федотов^{1,2}, А. С. Чертовских¹

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: mihailru@mail.ru

В Институте ядерной физики СО РАН разработан и изготовлен ряд установок электронно-лучевой сварки. Описывается прототип системы, предназначенный для точного определения положения свариваемого шва перед выполнением сварки и наведения на шов электронного пучка в процессе сварки. Для этого используется различие в рассеянии (и формировании вторичных) электронов швом и поверхностью свариваемой детали, что позволяет регистрировать изображение шва при сканировании пучком малого тока. Приведены блок-схема созданного прототипа и основные алгоритмы его функционирования, как отработанные, так и предполагаемые к реализации в дальнейшем. Рассмотрены результаты тестирования и опытной эксплуатации первого варианта системы в составе действующей установки электронно-лучевой сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, визуализация, рассеянные электроны, вторичные электроны.

Введение. Электронно-лучевая сварка является одним из наиболее эффективных методов соединения металлических деталей плавлением [1–3]. К её особенностям следует отнести:

- 1) проведение процесса в высоком вакууме, что практически предотвращает загрязнение даже химически активных металлов;
- 2) исключительно высокую плотность подведения энергии (10^3 – 10^4 Вт/мм²) сфокусированным (приблизительно до 1 мм) электронным пучком, что обеспечивает быстрый локальный разогрев и плавление любых металлов;
- 3) образование так называемого «кинжального реза» — глубокого (до 5 см и более) проникновения пучка в материал за счёт формирования заполненного парами и плазмой канала.

Эти особенности позволяют применять электронно-лучевую сварку для соединения практически любых металлов, в том числе тугоплавких активных (W, Ta, Nb, Ti) и с высокой теплопроводностью (Cu, Al), причём глубина шва может достигать нескольких сантиметров при незначительной (на порядок меньшей) ширине.

Однако из-за формирования зоны проплавления в форме конуса получение качественного шва возможно только при точном (с ошибкой не более десятых долей миллиметра) наведении пучка на зону контакта свариваемых деталей.

Для такого наведения на практике используют два основных метода: либо оптическое наблюдение зоны сварки, либо получение её изображения за счёт сканирования пучком с

*Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект № 4022).

малым током и регистрации возникающего потока рассеянных и вторичных электронов [1–4].

Автоматизация процесса наведения возможна при использовании регистраторов оптических изображений (прежде всего, цифровых телевизионных камер) на основе полупроводниковых детекторов — ПЗС- и КМОП-сенсоров, характеризующихся стабильностью раstra, дискретной структурой формируемого изображения и малой чувствительностью к магнитным и электрическим полям. Точка наведения электронного пучка при этом может выделяться как по метке сопряжённого с электронной пушкой лазерного визира, так и по свечению под действием слаботоочного пучка подходящего люминофора, нанесённого в небольшом количестве на поверхность свариваемых деталей.

К сожалению, оптический метод кроме ряда достоинств: использования в основном стандартного, легко сопрягаемого с ЭВМ оборудования и простоты наблюдения самого процесса сварки — имеет и трудно устранимый недостаток — различие дрейфов системы наблюдения и электронно-оптической системы, что может приводить к ухудшению точности наведения и требовать периодической юстировки.

В значительной мере от этого недостатка свободен второй подход, поскольку слаботоочный сканирующий электронный пучок создаётся той же самой электронно-оптической системой, что обеспечивает в режиме сварки наведение и фокусировку сильноточного. Как следствие, токи отклоняющей системы, необходимые для наведения пучка на какой-либо элемент объекта при сканировании, обеспечивают наведение на этот же элемент в процессе сварки. Большинство дрейфов и ошибок юстировки, имевшихся на момент сканирования, оказываются в таких условиях автоматически скомпенсированными.

Целью данной работы являлись создание и исследование системы наведения нового поколения с использованием современной схемотехники и элементной базы. Кроме того, одной из центральных задач было уменьшение тока сканирующего пучка при приемлемом качестве изображения.

Прототип системы наведения (первый вариант). Структура блока приведена на рис. 1. Узел цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) содержит четыре быстродейст-

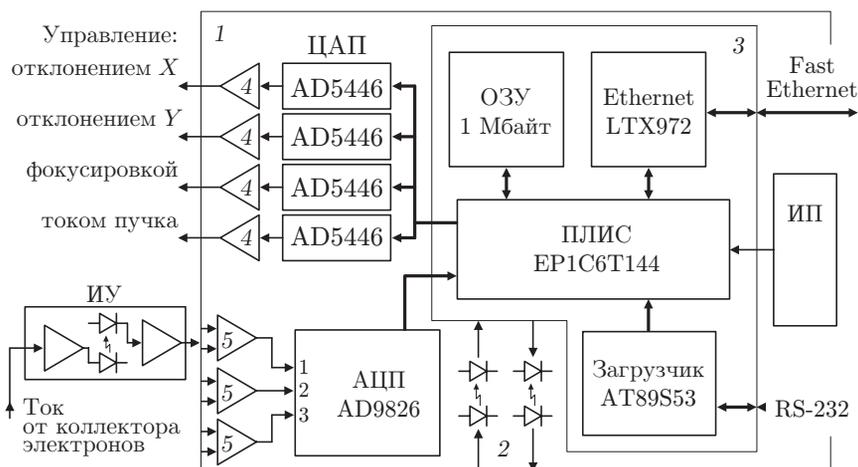


Рис. 1. Блок-схема первого варианта устройства наведения пучка. Материнская плата 1 содержит узлы: ЦАП, АЦП, цифрового порта 2, стабилизаторов и преобразователей напряжения (ИП), установленную мезонином плату управления и интерфейса 3. Схемы ЦАП дополнены фильтрами нижних частот третьего порядка (интерполяторами) 4, АЦП — дифференциальными усилителями с функциями фильтров 5, подключаемых к внешним изолирующим усилителям (ИУ)

вующих (с темпом обновления данных до 2,7 МГц) умножающих 14-разрядных ЦАП AD5446 фирмы "Analog Devices" (США), дополненных фильтрами нижних частот третьего порядка (интерполяторами). Два ЦАП управляют токами катушек системы отклонения электронного пучка, третий изменяет фокусировку электронного пучка, а четвёртый используется либо для управления током пучка, либо как опорный для ЦАП отклонения, чтобы одновременно масштабировать развёртку по двум координатам

Узел аналого-цифрового преобразователя (АЦП) включает 3-канальный 16-разрядный видеоАЦП AD9826 фирмы "Analog Devices" и три входных дифференциальных усилителя (приёмники сигнала с линии) с функциями фильтров. Данный узел преобразует в цифровую форму регистрируемый сигнал тока рассеянных и вторичных электронов.

Цифровой порт содержит набор гальванически развязанных (фототранзисторными оптронами) входных и выходных цифровых линий. Линии предназначены для связи блока с другими подсистемами электронно-лучевой сварки, в частности для синхронизации с процессом механического перемещения свариваемой детали.

Узел стабилизаторов и преобразователей напряжения формирует сетку напряжений питания, необходимых для работы остальных узлов блока. Кроме того, он обеспечивает формирование в соответствии с полуволнами силовой сети (50 Гц) двух тактовых сигналов. Эти сигналы позволяют синхронизовать формируемую развёртку с сетью и подавить ряд помех регистрируемого изображения.

На плате управления и интерфейса находится интегральная программируемая логическая схема (ПЛИС) EP1С6Т144 (фирмы "Altera") (около 6000 логических ячеек), в которую загружаются алгоритмы формирования развёрток.

Для конфигурирования (загрузки) программируемой логики используется микропроцессор, что позволяет при необходимости перепрограммировать блок по каналу RS-232. На этой же плате размещены элементы интерфейсов 100-baseT Ethernet и RS-232, а также статическая память ёмкостью 1 Мбайт.

Работа блока разделяется на два этапа. В начале первого этапа (визуализации) от управляющей ЭВМ загружаются настройки режима сканирования. Потом согласно полученным настройкам плата управления циклически вычисляет и загружает коды, соответствующие формируемому растру, в ЦАП отклонения. Выходные сигналы этих преобразователей поступают (после обработки фильтрами) на формирователи тока отклоняющих катушек, обеспечивая сканирование поверхности свариваемых деталей электронным пучком. Пучок при этом переводится в режим малого (50–200 мкА) тока и максимально острой фокусировки.

Рассеянные и/или вторичные электроны, возникающие при бомбардировке поверхности металла пучком, оседают на специальный электрод-коллектор, ток которого после усиления передаётся на вход АЦП. Выходной поток данных АЦП заносится в память блока и далее построчно передаётся в управляющую ЭВМ.

Поскольку уровень разнообразных помех на установке сварки крайне высок, для предварительного усиления сигнала с коллектора используется специально разработанный широкополосный изолирующий усилитель с оптронной развязкой входной и выходной цепей.

Так как пересекаемые пучком дефекты металлической поверхности, в частности шов, возмущают ток рассеянных и вторичных электронов, то в ЭВМ формируется цифровой образ изображения свариваемых деталей. Далее обработанное в ЭВМ изображение выводится на экран, шов опознаётся и маркируется оператором.

На втором этапе работы (наведение) вычисленные по положениям маркеров значения кодов передаются в блок и в соответствии с необходимым алгоритмом загружаются в ЦАП отклонения, что обеспечивает удержание пучка на шве в процессе сварки.

Тестирование системы. Первые тесты системы, направленные на определение условий регистрации, выполнялись на опытной установке электронно-лучевой сварки (разработки Института ядерной физики (ИЯФ) СО РАН) с энергией пучка 60 кэВ и рабочим током до 500 мА [5]. Например, были проведены эксперименты по определению вклада в формируемое изображение рассеянных и вторичных электронов.

Известно, что рассеянные (отражённые мишенью) электроны имеют непрерывный спектр энергий вплоть до энергии исходного пучка [2]. Их полный ток зависит прежде всего от материала мишени и угла падения пучка и в случае нормального падения составляет приблизительно от 10 % (Ве) до 50 % (W) тока пучка.

Спектр вторичных электронов ограничен низкими энергиями (50 эВ и ниже). Их ток определяется многими факторами, как параметрами и углом падения пучка, так и материалом мишени и состоянием её поверхности и обычно соизмерим с током самого пучка.

В выполненных тестах для определения вкладов обеих компонент тока потенциал коллекторного электрода смещался в пределах ± 40 В. При потенциалах ниже -20 В коллектор был практически заперт для осаждения вторичных электронов и регистрировались только рассеянные электроны, а при $+30 \dots +40$ В электрическое поле «вытягивало» на него едва ли не все образующиеся вторичные электроны (но почти не увеличивало сбор рассеянных).

В частности, в одном из экспериментов при токе сканирующего пучка 500 мкА ток коллектора составлял 77 мкА в отсутствие смещения и менялся от 34 до 180 мкА при изменении смещения от -40 до $+40$ В. Таким образом, в отсутствие смещения вклады в ток сигнала рассеянных и вторичных электронов были практически равными.

Глубина модуляции изображения в этих экспериментах составляла 10–30 %, причём без смещения и при отрицательном смещении в момент пересечения пучком места стыковки деталей ток коллектора уменьшался. С введением существенного положительного смещения (>20 В) начинали выделяться детали состояния сканируемой поверхности (плёнки окислов, следы загрязнений) и в некоторых случаях контраст шва менял знак. Последнее, вероятно, зависело от способа подготовки кромок и сопрягаемых поверхностей свариваемых деталей.

Однако проведённые тесты выявили и существенную проблему: при работе со стандартной длительностью кадров (20 мс) возникали значительные динамические искажения развёртки, связанные с частотными ограничениями магнитно-оптической системы. Поэтому время кадра было радикально увеличено до 1,5–10 с (в зависимости от необходимого разрешения). Это позволило формировать строчную развёртку с частотой 50 Гц (синхронизация с периодом сети), когда динамические искажения развёртки становятся пренебрежимо малыми.

Устройство было передано для опытной эксплуатации на установке электронно-лучевой сварки экспериментального производства ИЯФ СО РАН [6]. Основной задачей при этом являлось получение вакуумно-плотного кольцевого шва при точной бездеформационной сварке медных деталей сложной формы (ускорительных трубок). Поскольку сварка деталей стандартно выполняется их вращением при неподвижном пучке, были внесены необходимые изменения в микрокоды блока и программное обеспечение и отработан подходящий алгоритм наведения.

В начале процесса выполнялось грубое ручное наведение пучка малого тока (50–100 мкА) штатными регулировками установки. Затем осуществлялось одномерное сканирование в направлении, поперечном шву, а деталь приводилась во вращение. Соответственно в ЭВМ построчно формировалось изображение поверхности. Далее оператором осуществлялось распознавание шва и вводился режим «лупы» (развёртки малой амплитуды). На полученное изображение шва высокого разрешения накладывался вертикальный репер,

который при точной установке детали был параллелен шву. Расхождение шва и репера указывало на дефекты установки (перекос, остаточная намагниченность оснастки и т. д.).

При совпадении репера и шва программа заносила в ЦАП отклонения коды, соответствующие наведению пучка на шов, после чего осуществлялась сварка вращающейся детали.

Фактическая ошибка наведения определялась после полировки и травления поверхности поперечного шву реза по отклонению вершины конуса проплава от места стыка и обычно была около 50 мкм. Такая ошибка является допустимой и может вызываться как параллаксом, возникающим из-за отклонения пучка, так и неточностями в юстировке фокусирующей системы (слегка сдвигающей пучок при фокусировке большого тока). Обычный режим двумерного сканирования при этом использовался только как обзорный.

Второй вариант системы. В связи с разработкой в ИЯФ СО РАН специализированной установки электронно-лучевой сварки для производства элементов вакуумных систем электрон-позитронных коллайдеров высокой интенсивности (в рамках проекта МНТЦ № 4022) был изготовлен второй вариант системы наведения.

Основной электронный блок второго варианта близок по структуре к первому и отличается в основном увеличенным (до шести) количеством управляющих цифроаналоговых преобразователей. Два дополнительных ЦАП предназначены для управления токами второй (расположенной на некотором расстоянии от первой) системы отклонения, обеспечивающей так называемый параллельный перенос пучка [5].

Для проведения сварки без использования системы наведения по конструкторской документации изделия определяется такая траектория его движения, которая обеспечивает совпадение шва и пучка. Соответствующие последовательности команд, необходимые для получения этой траектории, заносятся в контроллеры управления перемещением детали и далее выполняются в процессе сварки. При этом синхронная перестройка во времени токов отклоняющей системы осуществляется в соответствии с загруженными таблицами (также рассчитываемыми по конструкторской документации).

В случае использования системы наведения перед выполнением сварки дополнительно проводится операция визуализации. В режиме двумерного сканирования пучком малого тока проверяется точность установки детали и при необходимости с помощью электромеханической системы перемещения вносятся поправки.

Далее, при сохранении малого тока пушки запускается имитация процесса сварки — механическое перемещение детали и/или движение пучка (определённые по конструкторской документации). Система наведения при этом начинает синхронно процессу формировать одномерную развёртку с ориентацией, примерно перпендикулярной шву.

По завершении имитации сварки и сканирования управляющая ЭВМ выводит обработанное изображение. Оператор либо подтверждает правильность нахождения шва при автоматическом распознавании, либо сам выделяет шов, расставляя вдоль него маркеры. После чего программа определяет время каждого пересечения шва сканирующим пучком и соответствующие ему коды ЦАП отклонения, а по кодам — токи отклоняющих систем, и по этим данным рассчитываются поправки к таблицам. В процессе сварки токи отклонения перестраиваются в соответствии со скорректированными таблицами, обеспечивающими наведение пучка.

Пример зарегистрированного изображения тестовой детали приведён на рис. 2.

Для дальнейшего улучшения качества изображения предполагается применять дифференциальное подавление помехи, что потребует размещения рядом с коллектором электронов аналогичного электрода (но защищённого от оседания электронов) и формирования во входном усилителе разности их сигналов. Кроме того, возможно использование многовходового режима работы АЦП. Это позволит параллельно оцифровывать сигналы

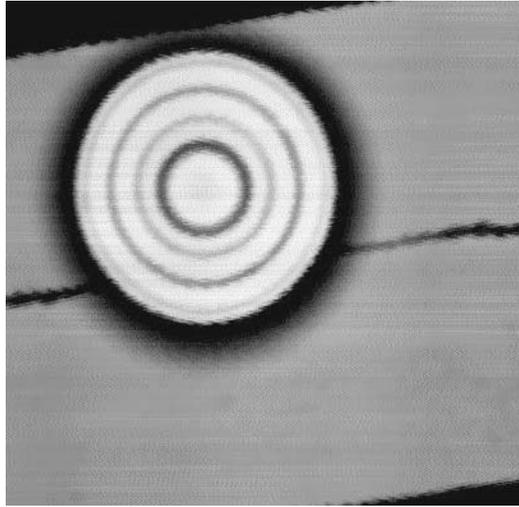


Рис. 2. Изображение детали, состоящей из пяти вложенных друг в друга колец с зазорами от 0,02 до 0,1 мм. Диаметр внешнего кольца 20 мм, ток сканирования 100 мкА. Тёмная линия у основания детали — имитация шва на поверхности опорного столика

коллектора и дополнительного электрода (датчика помех) для последующей совместной обработки в ЭВМ.

Однако в последнем случае более интересным представляется использование секционированного коллектора. Поддерживая на разных секциях коллектора разные потенциалы (например, +30 и –30 В), можно формировать визуально более информативное «двухцветное» изображение за счёт одновременной независимой регистрации и отображения (каждого своим цветом) сигналов от рассеянных и вторичных электронов.

Кроме того, ожидается, что путём установки соответствующим образом секционированного коллектора возможно улучшение контраста с использованием пространственной анизотропии рассеяния [4], возникающей при пересечении электронным пучком места стыка свариваемых деталей. Однако в отличие от работы [4] секции коллектора предполагается выполнить в виде концентрических колец. Это устранил зависимость контраста шва от его ориентации.

Заключение. Разработаны и изготовлены два варианта системы наведения пучка электронно-лучевой сварки. Выполнен ряд тестов этих устройств.

Первый вариант установлен на эксплуатирующейся установке сварки и обеспечивает типовую точность наведения около 50 мкм.

Ожидается, что после реализации намеченных аппаратных и программных усовершенствований может быть обеспечена точность вплоть до 10 мкм при токе сканирования не более 50–100 мкА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением /Под ред. Б. Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768 с.
2. **Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З.** Электронно-лучевая технология. М.: Энергия, 1980. 528 с.
3. **Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А.** Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.

4. **Корнилов С. Ю., Ремпе Н. Г., Светлаков А. А., Шаропин Ю. Б.** Автоматизация сварочных комплексов на основе пушек с плазменным катодом: визуализация поверхности и наведение электронного пучка на стык обработкой сигнала отражённых электронов // Тр. IV Междунар. Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». Улан-Удэ, 25–30 июня 2012. URL: http://ipms.bscnet.ru/conferenc/krnd_sem/proceedings_of_sem/section_2/Kornilov_107-111.pdf (дата обращения: 20.09.2013).
5. **Semenov Yu. I., Akimov V. E., Batazova M. A. et al.** 60 keV 30 kW electron beam facility for electron beam technology // Proc. of EPAC08. Genoa, Italy, 2008. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e08/papers/tupr161.pdf> (дата обращения: 20.09.2013).
6. **Бибко С. И., Вещеревич В. Г., Волков В. Н. и др.** Автоматизированная установка электронно-лучевой сварки. Новосибирск, 1993. 16 с. (Препр. /ИЯФ СО РАН; 93-63).

Поступила в редакцию 20 сентября 2013 г.
