

appearing at finite automata output, are investigated. All these sets are regular and “continuable” and they generate a system of regular languages, nested in each other.

Keywords: spectral function of finite automata, output multi-sets of finite automata, output languages of finite automata

Получено: 10.05.12

УДК 621.791.72

Д. Н. Трушников, кандидат технических наук, доцент;
В. Я. Бельский, доктор технических наук, профессор;
В. Е. Щавлев, аспирант;
А. Л. Пискунов, аспирант;
А. Н. Лялин, аспирант

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННОГО СИГНАЛА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ *

Исследованы возможности использования параметров тока несамостоятельного разряда в плазме в зоне электронно-лучевой сварки как сигнала для контроля сквозного проплавления. В экспериментах производилась осцилляция электронного пучка и регистрировались составляющие вторично-эмиссионного сигнала с различными частотами. Показана возможность создания систем автоматического контроля при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением и описана модель такой системы.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, вторично-эмиссионный сигнал, контроль проплавления

Технология электронно-лучевой сварки (ЭЛС) является эффективным способом соединения металлов и сплавов. Высокая концентрация мощности в сварочном электронном пучке и возможность его глубокого проникновения в металл позволяют обеспечить минимальные деформации свариваемого изделия.

Несмотря на значительные достижения в исследовании процессов, протекающих при взаимодействии мощного электронного пучка с металлом при сварке, в теории и практике ЭЛС остается целый ряд нерешенных проблем. К их числу можно отнести задачу стабилизации формирования сварного шва при ЭЛС с полным проплавлением. Большинство работ в этом направлении связано с регистрацией сквозного тока, возникающего при этом режиме обработки [1–4]. Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования для этой цели вторично-эмиссионных сигналов, регистрируемых датчиками, расположенными над зоной сварки [5–7]. Однако сообщения о появлении работоспособных систем, получающих информацию с помощью таких датчиков, отсутствуют, что говорит

© Трушников Д. Н., Бельский В. Я., Щавлев В. Е., Пискунов А. Л., Лялин А. Н., 2012

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-Урал № 11-08-96016 и при финансовой поддержке Министерства образования Пермского края.

о необходимости дальнейших исследований в направлении поиска информационных признаков появления сквозного проплавления при ЭЛС.

В настоящей работе исследована возможность использования параметров тока несамостоятельного разряда в плазме, измеряемого в цепи коллектора электронов, установленного над свариваемым изделием, в качестве сигналов, позволяющих контролировать формирование сварного шва при ЭЛС со сквозным проплавлением.

Для проведения экспериментов были изготовлены специальные образцы из стали 12X18H10T с выфрезерованным в нижней части пазом (рис. 1).

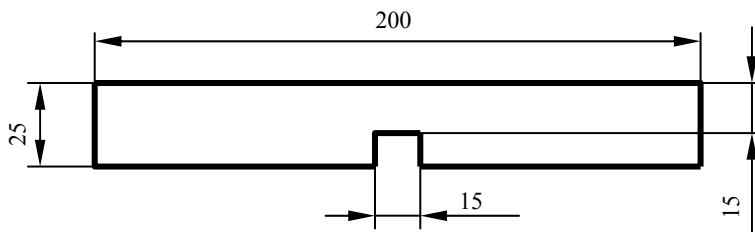


Рис. 1. Образец для проведения экспериментального исследования формирования вторично-эмиссионного сигнала при ЭЛС со сквозным проплавлением

Во время экспериментов выполнялся сварочный проход поперек паза, а мощность и фокусировка электронного пучка экспериментально подбирались таким образом, чтобы при сварочном проходе в пазе обеспечивалось сквозное проплавление с качественным формированием обратного валика шва. Таким образом, в начале и в конце сварочного прохода осуществлялась сварка с частичным проплавлением металла толщиной 25 мм, а при прохождении паза имело место сквозное проплавление металла толщиной 15 мм.

Сварка осуществлялась статическим или колеблющимся по X-образной и круговой траекториям электронным пучком. Во время выполнения сварочных проходов с помощью специальной информационно-измерительной системы выполнялась регистрация переменной составляющей тока несамостоятельного разряда в плазме, протекающего в цепи коллектора электронов, расположенного над зоной сварки и находящегося относительно изделия под положительным потенциалом 30 В. Момент начала сквозного проплавления можно было наблюдать визуально по появлению светящихся брызг металла с обратной стороны изделия.

Сигнал тока коллектора подвергался цифровой фильтрации с целью выделения из спектра колебаний составляющих с частотами в диапазонах 200...1 000 Гц, 2,5...20 кГц и, в случае ЭЛС с разверткой электронного пучка, – колебаний с частотой, кратной частоте осцилляции [8–11].

На рис. 2 изображены зависимости амплитуд колебаний в диапазонах 200...1 000 Гц, 2,5...20 кГц и колебаний с частотой, вдвое превышающей частоту осцилляции, от времени. Появление сквозного проплавления сопровождается заметным снижением амплитуд колебаний с частотами в исследуемых диапазонах, которое составляет 30...60 %.

Указанное влияние режима проплавления (полное или неполное проплавление) при ЭЛС с осцилляцией луча на параметры тока несамостоятельного разряда наблюдается в широком диапазоне режимов сварки.

Гипотезы, объясняющие снижение амплитуд колебаний вторичного тока при формировании сквозного проплавления, приведены в [12–13].

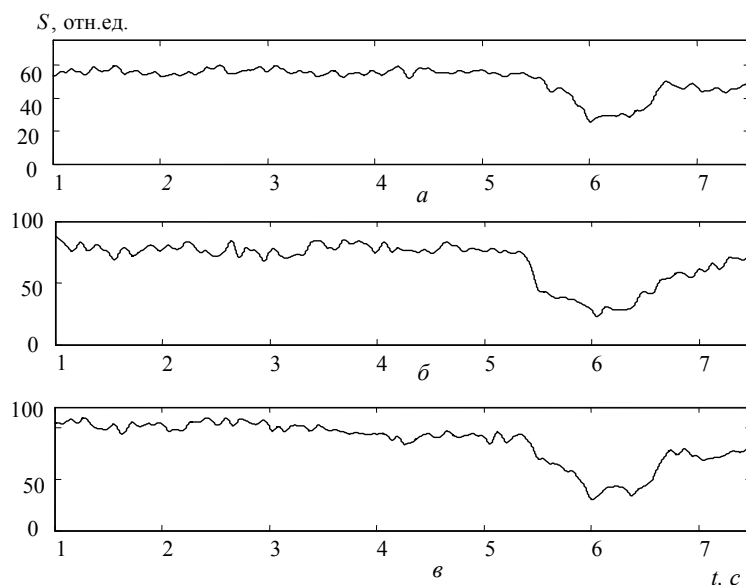


Рис. 2. Изменение амплитуды колебаний с частотами в диапазонах 2,5...20 кГц (а), 200...1 000 Гц (б) и на частоте 860 Гц при появлении сквозного проплавления при ЭЛС с осцилляцией пучка по Х-образной траектории: $t = 5,4$ с – время визуально зафиксированного появления сквозного проплавления. Ток пучка – 50 мА, ток фокусировки – 790 мА, ускоряющее напряжение – 60 кВ. Амплитуда осцилляции – 1,5 мм, частота осцилляции – 430 Гц

Существование параметров тока несамостоятельного разряда в плазме, несущих информацию о появлении сквозного проплавления, позволяет использовать их для автоматического управления процессом ЭЛС с полным проплавлением. При этом в качестве параметров тока несамостоятельного разряда, характеризующих появление сквозного проплавления, используются снижения амплитуд составляющих спектра колебаний вторичного тока с частотами в диапазонах 200...1 000 Гц и 2,5...50 кГц, а также амплитуда сигнала на частоте, кратной частоте осцилляции электронного пучка (рис. 2). Появление сквозного проплавления определяется по одновременному снижению двух из трех амплитуд колебаний указанных составляющих ниже заданных для каждой составляющей уровней.

Блок-схема системы управления процессом формирования сварного шва при ЭЛС со сквозным проплавлением приведена на рис. 3.

В установке для ЭЛС с помощью блоков 5, 6 производится осцилляция электронного пучка по круговой или Х-образной траекториям и регистрируется вторичный ток в цепи, содержащей источник напряжения смещения и резистор нагрузки, которые подключены к коллектору электронов. Напряжение с резистора нагрузки 15, пропорциональное величине вторичного тока, обрабатывается полосовыми фильтрами 7 и 9 с целью выделения из спектра колебаний вторичного тока составляющих с частотами в диапазоне 200...1 000 Гц и 3...50 кГц, соответственно,

и узкополосным фильтром 12 для выделения составляющей на частоте, кратной частоте осцилляции. Сигналы с выходов фильтров поступают на амплитудные детекторы 8, 10 и 13. После амплитудного детектирования сигналы поступают на входы электронного блока 14, который управляет током электронного пучка с помощью блока управления 4 в соответствии с описанным далее методом.

Управление формированием шва осуществляется следующим образом. На первом этапе экспериментально определяется значение тока луча $I_{л_скв}$, обеспечивающее сквозное проплавление данного металла при выбранных значениях скорости сварки, ускоряющего напряжения и фокусировки электронного пучка. Далее, экспериментально определяется значение тока пучка $I_{л_не_скв}$, наиболее близкое к $I_{л_скв}$, при котором сквозное проплавление данного металла и толщины при тех же условиях прекращается.

Сварочный цикл начинается при токе пучка, равном $I_{л_не_скв}$. В этот период фиксируются значения амплитуд колебаний тока коллектора в диапазоне 200...1 000 Гц ($I_{к_низк}$) и в диапазоне 3...50 кГц ($I_{к_высок}$), а также величина амплитуды составляющей на частоте ν , кратной частоте осцилляции ($I_{к_осц}$).

Информационным признаком появления сквозного проплавления является снижение двух каких либо амплитуд из $I_{к_низк}$, $I_{к_высок}$ или $I_{к_осц}$ ниже определенных уровней $I_{к_низк}^{скв}$, $I_{к_низк}^{скв}$ и $I_{к_осц}^{скв}$. Уровни $I_{к_низк}^{скв}$, $I_{к_высок}^{скв}$ и $I_{к_осц}^{скв}$ задаются в относительных величинах от значений $I_{к_низк}$, $I_{к_высок}$ и $I_{к_осц}$ соответственно. Информационным признаком прекращения сквозного проплавления является превышение двух каких либо амплитуд из $I_{к_низк}$, $I_{к_высок}$ или $I_{к_осц}$ выше их уровней $I_{к_низк}^{скв}$, $I_{к_высок}^{скв}$ и $I_{к_осц}^{скв}$.

Регулирование начинается линейным увеличением тока электронного пучка до тех пор, пока не появится сквозное проплавление или пока ток пучка не достигнет значения $I_{л} = I_{л_скв}$. После появления сквозного проплавления ток пучка снижают по линейному закону до значения $I_{л} = I_{л_не_скв}$ или до прекращения сквозного проплавления, после чего вновь начинается увеличение тока пучка, и процесс повторяется.

Экспериментальное опробование способа осуществлялось на электронно-лучевой сварочной установке ЭЛА-60/60 при использовании образцов толщиной 15 мм и 30 мм из стали 12Х18Н10Т. Развертка электронного пучка по круговой и Х-образной траектории осуществлялась с частотой 430 Гц.

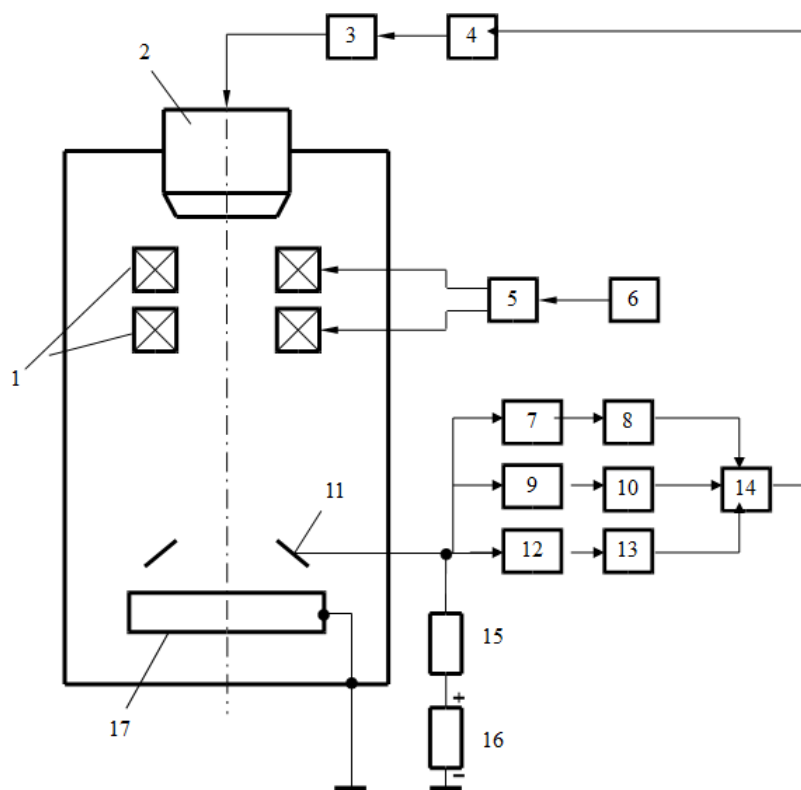


Рис. 3. Схема системы управления формированием шва при ЭЛС со сквозным проплавлением: 1 – отклоняющие катушки; 2 – электронная пушка; 3 – источник питания электронной пушки; 4 – блок управления током электронного пучка; 5, 6 – блоки управления отклонением пучка; 7, 9, 12 – фильтры; 11 – коллектор электронов; 8, 10, 13 – амплитудные детекторы; 14 – блок управления; 15 – резистор нагрузки; 16 – источник смещения; 17 – обрабатываемое изделие

Сигнал с коллектора электронов, установленного над зоной сварки, обрабатывался с помощью компьютерной информационно-измерительной системы. Система включала в себя АЦП, ЦАП и регулятор, представляющий собой программное приложение, в котором был реализован классический закон регулирования по отклонению. Связь приложения с АЦП и ЦАП осуществлялась посредством программного интерфейса на основе технологии COM.

После обработки сигнала с коллектора компьютерная система выдавала управляющий сигнал на блок управления током электронного пучка, снижая ток пучка по линейному закону при появлении сквозного проплавления и увеличивая при переходе в режим частичного проплавления. При правильном подборе величин скоростей снижения и нарастания тока электронного пучка, а также значений уровней $I_{к_низк}^{скв}$, $I_{к_высок}^{скв}$, $I_{к_осц}^{скв}$ и времени, по которому производится осреднение параметров вторичного тока, сквозные проникновения пучка накладываются друг на друга таким образом, что образуется непрерывный обратный валик.

Выводы

1. Экспериментально установлены параметры тока несамостоятельного разряда в плазме (вторичного тока), несущие информацию о появлении сквозного проплавления. Появление сквозного проплавления сопровождается снижением амплитуд колебаний составляющих тока несамостоятельного разряда в плазме с частотами в диапазонах 200...1 000 Гц и 2,5...50 кГц, а также амплитуды на частоте, кратной частоте осцилляции.

2. Величина снижения амплитуд колебаний указанных составляющих повышается при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка.

3. Разработан метод автоматического управления процессом ЭЛС со сквозным проплавлением. В предлагаемом методе в качестве параметров тока несамостоятельного разряда, характеризующих появление сквозного проплавления, приняты амплитуды составляющих с частотами в диапазонах 200...1 000 Гц и 2,5...50 кГц, а также амплитуда на частоте, кратной частоте осцилляции. За информационный признак возникновения полного проплавления принято одновременное снижение двух из трех амплитуд указанных составляющих ниже заданных для каждой составляющей уровней, а для увеличения отношения «сигнал – шум» сварку осуществляют с осцилляцией электронного пучка.

Библиографические ссылки

1. Оборудование для электронно-лучевой сварки / А. И. Четвертко, О. К. Назаренко, А. М. Святский и др. – Киев : Наук. думка, 1973. – 408 с.
2. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
3. Baschenko, V. W., Mauer, K.-O. Untersuchungen zur Durchdringungs und Rückstreuung aus dem Dampfkanal beim Elektronenstrahlschweißen // ZIS-Mitteilungen. – 1976. – Nr. 9. – S. 923-936.
4. Башенко В. В., Майер К. О. Импульсный характер потоков заряженных частиц из канала при электронно-лучевой сварке // Автомат. сварка. – 1976. – № 8. – С. 21–23.
5. Ланкин Ю. Н. Экспериментальное исследование эмиссии заряженных частиц и теплового излучения как параметров автоматического регулирования процесса электронно-лучевой сварки. – Киев : ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1982. – 32 с. – (Препринт ИЭС-85-5).
6. Батухтин В. А., Башенко В. В. Обработка вторичных излучений для контроля и управления процессом электронно-лучевой сварки // Автоматическое управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки : сб. науч. тр. – Киев : ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. – С. 64–74.
7. Лесков Г. И., Нестеренков В. М. Потоки плазмы, тепловые и гидродинамические процессы в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке металлов // Автомат. сварка. – 1978. – № 6. – С. 27–30.
8. Структура вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / Д. Н. Трушников, В. М. Язовских, В. Я. Бельский и др. // Сварка и диагностика. – 2008. – № 4. – С. 22–24.
9. Трушников Д. Н., Бельский В. Я., Зыков В. В. Исследование взаимосвязи структуры вторично-эмиссионного сигнала с параметрами проплавления при ЭЛС большой мощностью // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2011. – № 2. – С. 214–219.
10. Получение бездефектных швов при электронно-лучевой сварке / В. Я. Бельский, В. М. Язовских, Л. Н. Кротов и др. // Наука производству. – 2000. – № 5. – С. 42–44.

11. Механизм вторично-эмиссионных процессов при электронно-лучевой сварке с модуляцией электронного пучка / В. М. Язовских, Д. Н. Трушников, В. Я. Беленький и др. // Свароч. пр-во. – 2004. – № 4. – С. 21–27.
12. Формирование вторично-эмиссионного сигнала при ЭЛС со сквозным проплавлением / Д. Н. Трушников, В. М. Язовских, Л. Н. Кротов и др. // Свароч. пр-во. – 2006. – № 5. – С. 22–24.
13. Беленький В. Я., Трушников Д. Н., Шварев А. В. Некоторые аспекты контроля процесса формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением // Сварка и диагностика. – 2010. – № 1. – С. 41–43.

D. N. Trushnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Perm State National Research University

V. Ya. Belenkiy, DSc in Engineering, Professor, Perm State National Research University

V. E. Shchavlev, Post-graduate, Perm State National Research University

A. L. Piskunov, Post-graduate, Perm State National Research University

A. N. Lyalin, Post-graduate, Perm State National Research University

Application of secondary-emission signal parameters for penetration control in electron-beam welding

The paper describes investigations of possibilities to apply parameters of non-self-discharge current in plasma as a signal for through-penetration monitoring in electron-beam welding. Experiments involved oscillation of the electron beam, and components of secondary-emission signal with various frequencies have been measured. Possibility of creating an automation control system in electron-beam welding with through-penetration is shown. The model of such a system is described.

Keywords: electron beam welding, secondary-emission signals, weld penetration control and monitoring

Получено: 10.05.12

УДК 62-754.4

К. В. Шишаков, кандидат физико-математических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА ТВГ И МЕТОДОВ ИХ КОМПЕНСАЦИИ

Рассматривается твердотельный волновой гироскоп с измерительным устройством из восьми емкостных датчиков. Для него проведен анализ основных погрешностей информационного сигнала: систематического дрейфа, непостоянства масштабного коэффициента, шумов. Изучаются методы их компенсации.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, измерительное устройство, алгоритмы обработки сигналов

Введение

Повышение точностных характеристик твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) и, как следствие, расширение областей его использования связаны с умень-