

УДК 621.791

Н.С. Портнов, А.В. Косьянов, С.В. Варушкин, А.А. Абдуллин
N.S. Portnov, A.V. Kosyanov, S.V. Varushkin, A.A. Abdullin

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНОГО ТОКА РАЗРЯДА В ПЛАЗМЕ С ФОКУСИРОВКОЙ ПУЧКА ПРИ ЭЛС

INTERCONNECTION OF SECONDARY PLASMA CURRENT CHARACTERISTICS WITH BEAM FOCUS IN THE PROCESS OF EBW

Исследован вторично-эмиссионный сигнал при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча. С помощью анализа методом синхронного накопления установлена взаимосвязь вторичного тока в плазме с током фокусирующей катушки. Построена функция, характеризующая зависимость параметров вторичного сигнала от тока фокусировки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, метод синхронного накопления, вторичный ток в плазме, фокусировка луча, контроль проплавления.

The research concerns the secondary-emission flux in the process of electron-beam welding with the beam oscillation. During the analysis by the synchronous storage method the interconnection of secondary plasma current with the current of focus coil is found. The function characterizing the correlation of secondary current and focus current is drawn.

Keywords: electron-beam welding, synchronous storage method, secondary plasma current, beam focus, control of penetration.

Одним из наиболее перспективных методов сварки является сварка электронным лучом, она имеет ряд преимуществ перед традиционными методами, в том числе обеспечение равнопрочности металла сварного шва основному металлу, малой зоны термического влияния, концентрированного ввода тепла, возможность ведения процесса сварки в вакууме и др. [1].

До настоящего времени развитие методов оперативного контроля электронно-лучевой сварки сдерживалось недостатком знаний о процессах, сопутствующих взаимодействию мощного электронного пучка с металлом. Сложность этих явлений затрудняет их математическое моделирование и оперативный контроль процесса сварки в целом.

Необходимо дальнейшее исследование процессов, происходящих в канале проплавления при электронно-лучевой сварке. С этими процессами напрямую связаны параметры вторичных сигналов в области воздействия электронного луча на металл, такие как токи вторичной эмиссии электронов, заряды плазмы и др. Анализируя вторичные сигналы, возможно исследовать и контролировать процессы в канале проплавления [2–6].

К настоящему времени разработаны методы контроля фокусировки электронного луча при электронно-лучевой сварке по параметрам сигнала вторичного тока в плазме. Зависимости этих параметров от тока фокусирующей катушки носят экстремальный характер. В этих зависимостях выделяются два значения тока фокусирующей катушки, которые обеспечивают равнозначные сигнальные параметры [5–8]. При этом адаптивные системы контроля фокусировки электронного луча используют низкочастотное сканирование фокуса, которое значительно ограничивает скорость работы этих систем и негативно влияет на качество сварного шва [9].

В данной работе представлены результаты анализа вторично-эмиссионного сигнала, сопутствующего взаимодействию электронного пучка с металлом при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча. С помощью метода синхронного накопления выявлена взаимосвязь вторично-эмиссионного сигнала с величиной тока фокусирующей катушки. Эта информация очень важна для построения математической модели динамики процессов, происходящих в канале проплавления, и осуществления оперативного контроля электронно-лучевой сварки.

Методика проведения исследований. Для получения обобщающих результатов в процессе экспериментов использовалось перемещение электронного пучка по простейшим траекториям: вдоль и поперек шва. Сигнал тока в отклоняющих катушках имел линейную форму. Варьировались четыре параметра: амплитуда осцилляции электронного пучка, частота осцилляции, мощность пучка и ток фокусирующей линзы. Образцы из стали 15X5M сваривались при ускоряющем напряжении 60 кВ и скорости сварки 5 мм/с. Глубина проплавления при острой фокусировке без осцилляции пучка 10–18 мм. Изменение параметров для каждого этапа эксперимента сведены в табл. 1.

При выполнении сварочных проходов с помощью компьютерной информационно-измерительной системы на базе IBM-совместимого компьютера, оснащенного многоканальным аналого-цифровым интерфейсом, регистрировался ток, проходящий в цепи коллектора вторичных электронов, расположенного над зоной сварки и находящегося под положительным потенциалом 50 В (рис. 1). Сопротивление резистора нагрузки в цепи коллектора составляло 50 Ом. Результаты регистрации записывались в файл для дальнейшей обработки. Частоты дискретизации в проведенных экспериментах – от 100 кГц до 1 МГц на канал.

Таблица 1

Варьирование параметров при проведении экспериментов

Этапы	Осцилляция пучка поперек стыка				Осцилляция пучка вдоль стыка			
	ΔI_f , мА	f , Гц	$2A$, мм	P , кВт	ΔI_f , мА	f , Гц	$2A$, мм	P , кВт
Нижний предел варьирования	-24	200	0,1	2	-24	90	0,4	2
Верхний предел варьирования	24	2000	1,4	4	24	1200	2,7	4

Примечание. P – мощность сварки, $\Delta I_f = I_f - I_{f0}$ – отклонение тока фокусировки при сварке осциллирующим пучком (разница между значениями тока фокусировки при сварке с осцилляцией пучка и током острой фокусировки, обеспечивающим максимальную глубину при сварке без осцилляции пучка), $2A$ – удвоенная амплитуда отклонения электронного пучка, f – частота осцилляции.

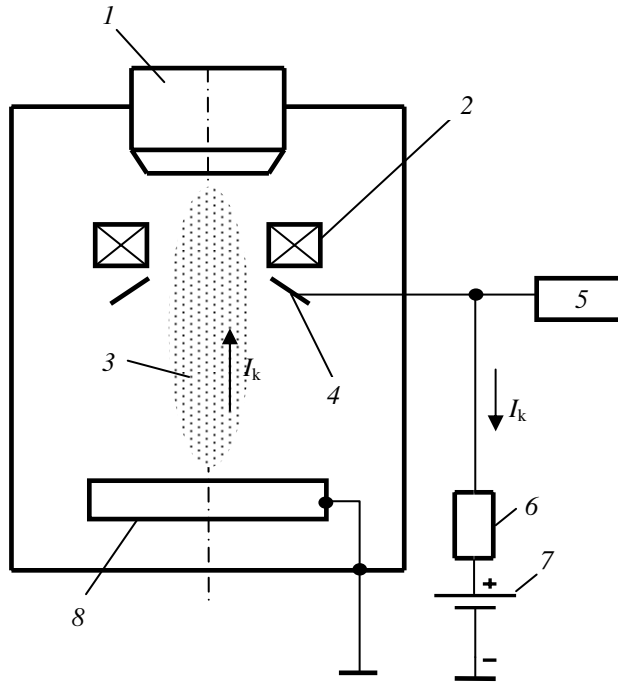


Рис. 1. Схема регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме, образующейся над областью электронно-лучевой сварки: 1 – электронная пушка; 2 – фокусирующая линза; 3 – плазма, образующаяся над областью электронно-лучевой сварки; 4 – коллектор электронов; 5 – система регистрации; 6 – резистор нагрузки; 7 – источник смещения; 8 – обрабатываемое изделие

Далее изготавливались поперечные макрошлифы полученных швов и проводилось измерение основных геометрических параметров зоны проплавления (глубина, ширина в средней и верхней частях и т.д.). Обработка полученных сигналов осуществлялась с использованием пакетов прикладного программного обеспечения MATLAB 7 и Mathcad 15.

При анализе сигнала вторичного термоэлектронного тока в плазме применялся метод синхронного накопления, являющийся модификацией метода синхронного детектирования [10]. Опорный сигнал $g(t)$ для синхронного детектирования формировался из сигнала в отклоняющих катушках и представлял собой прямоугольные колебания малой скважности (рис. 2).

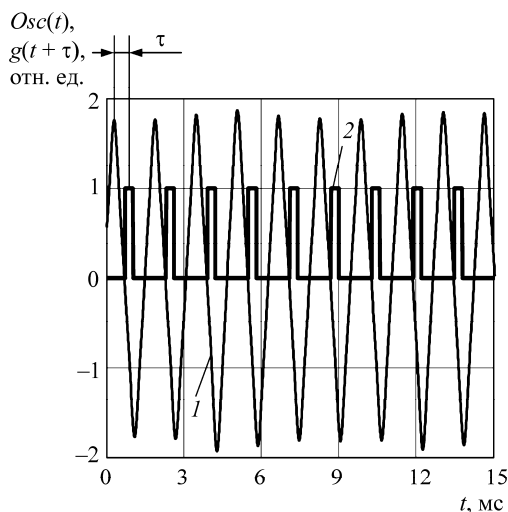


Рис. 2. Формирование опорного сигнала: 1 – ток отклоняющих катушек $Osc(t)$; 2 – сформированный опорный сигнал $g(t + \tau)$; τ – сдвиг опорного сигнала относительно сигнала отклоняющих катушек

Опорный сигнал $g(t + \tau)$, сдвинутый на время τ ($0 < \tau < T$, где T – период сигнала в отклоняющих катушках), умножался на сигнал вторичного тока $Data(t)$ и затем интегрировался (суммировался или усреднялся) по времени t .

Результатом данных преобразований являлась функция $S(\tau)$, описывающая изменение результата синхронного детектирования в зависимости от сдвига опорного сигнала:

$$S(\tau) = \int_0^{\tau_0} g(t + \tau) \cdot Data(t) dt,$$

где τ_0 – время выборки.

Результаты и обсуждение. Результат, полученный при обработке вторичного сигнала методом синхронного накопления при сварке с осциллирующей вдоль стыка недофокусированным и перефокусированным пучком, приведен на рис. 3. На рис 3, в, г функция $S(\tau)$ отображена в фазовом пространстве «сигнал – смещение электронного пучка в канале проплавления».

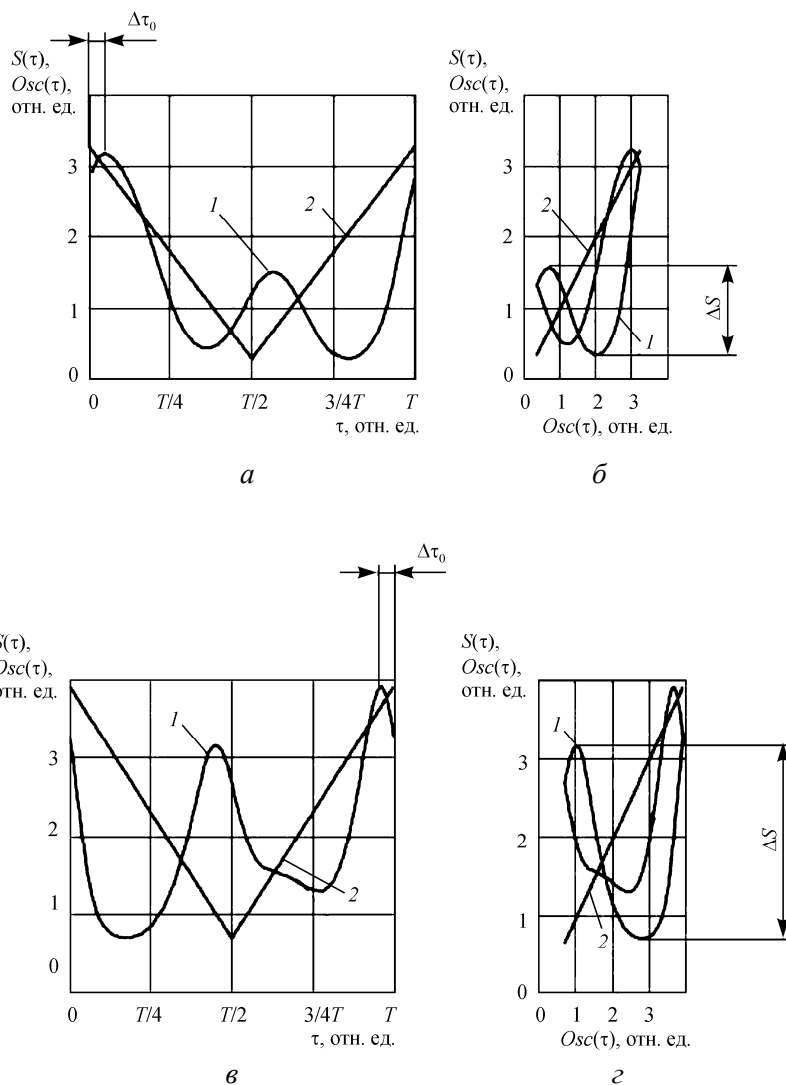



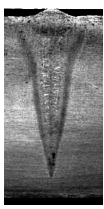

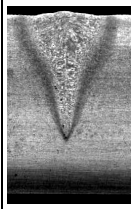
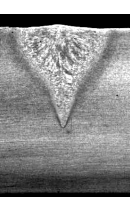
Рис. 3. Результаты обработки вторично-эмиссионного сигнала методом синхронного накопления: 1 – функция $S(\tau)$; 2 – $Osc(t)$ сигнал тока с отклоняющих катушек; а, б – недофокусированный луч ($\Delta I_f = -15$ мА); в, г – перефокусированный луч ($\Delta I_f = 10$ мА)

Можно отметить увеличение второй гармоники при переходе к перефокусированным режимам. Также очевидно, что при сварке с осцилляцией вдоль стыка недофокусированным пучком он большую часть энергии отдает передней стенке канала проплавления. На перефокусированных режимах форма канала принимает, по-видимому, более симметричную форму и электронный пучок одинаково взаимодействует как с передней, так и с задней стенкой канала проплавления.

Выявлена зависимость параметров функции $S(\tau)$ от режима фокусировки электронного пучка. Функция имеет характерную задержку (характеризующую задержку вторичного сигнала тока в плазме) относительно тока отключающих катушек – $\Delta\tau_0$ или ΔS (см. рис. 3). Знак и величина $\Delta\tau_0$ (ΔS) зависит от режима фокусировки электронного пучка: значение задержки уменьшается с положительного в режиме сварки с недофокусированным электронным пучком до отрицательного в режиме сварки с перефокусированным пучком (табл. 2, рис. 3). Это позволяет идентифицировать режим фокусировки электронного пучка при электронно-лучевой сварке без дополнительного низкочастотного сканирования. Данная зависимость может быть использована в методах оперативного контроля фокусировки электронного пучка в процессе сварки.

Таблица 2

Геометрия сварного шва и значение сдвига $\Delta\tau_0$ при различных режимах фокусировки электронного пучка

Номер режима	1	2	3	4	5
Значение фокуса Δf , мА	-15	-7	0	7	14
Поперечный срез					
Глубина проплавления, мм	9,2	13,8	15,1	10,8	9
Ширина шва, мм	4,5	4,9	4,7	5,6	6,5
Сдвиг $\Delta\tau_0$, отн. ед.	0,119	0,079	0,02	-0,01	-0,02

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность оперативного контроля фокусировки луча в процессе электронно-лучевой сварки. Отметим следующее:

При сварке с осцилляцией вдоль стыка недофокусированным пучком пучок большую часть времени взаимодействует с передней стенкой канала проплавления. На перефокусированных режимах пучок одинаково взаимодействует как с передней, так и с задней стенкой канала проплавления.

Функция $S(\tau)$ описывает изменение значения синхронного детектирования в зависимости от сдвига исходного входного сигнала и содержит информацию о взаимодействии электронного пучка с металлом в канале проплавления.

При сварке с осцилляцией электронного пучка вдоль стыка функция $S(\tau)$ имеет характерный сдвиг относительно сигнала в отклоняющих катушках. Значение сдвига $\Delta\tau_0$ монотонно изменяется в зависимости от значения тока фокусирующей линзы и меняет свой знак при переходе от режима сварки с недофокусированным электронным пучком к режиму сварки с перефокусированным пучком. Этот факт позволяет идентифицировать режим фокусировки электронного пучка при сварке без использования дополнительного низкочастотного сканирования фокуса пучка и может использоваться в методах оперативного контроля фокусировки электронного пучка непосредственно в процессе электронно-лучевой сварки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (исследовательский проект № 11-08-96016-а) и Министерства образования Пермского края Российской Федерации.

Список литературы

1. Ланкин Ю.Н. Экспериментальное исследование эмиссии заряженных частиц и теплового излучения как параметров автоматического регулирования процесса электронно-лучевой сварки. – Киев, 1982. – 32 с.
2. Структура вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / Д.Н. Трушников, В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов // Сварка и диагностика. – 2008. – № 4. – С. 22–24.
3. Yazovskikh V.M., Trushnikov D.N., Belenky V.Y. The mechanism of secondary emission processes in electron beam welding with the modulation of the electron beam // Welding International. – 2004. – Vol. 8, № 9. – С. 724–729.
4. Krinberg I.A., Mladenov G.M. Formation and expansion of the plasma column under electron beam metal interaction // Vacuum. – 2005. – Vol. 77, № 4. – P. 407–411.
5. 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.

6. Трушников Д.Н., Беленький В.Я, Зыков В.В. Исследование взаимосвязи структуры вторично-эмиссионного сигнала с параметрами проплавления при ЭЛС большой мощностью // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 2. – С. 214–219.

7. Secondary-Emission signal for weld formation monitoring and control in electron beam welding (EBW) / D.N. Trushnikov, V.Ya. Belenki'y, G.M. Mladenov, N.S. Portnov // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2012. – № 43. – P. 893–897.

8. Использование параметров вторично-эмиссионного сигнала для управления проплавлением при электронно-лучевой сварке / Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, В.Е. Щавлев, А.Л. Пискунов, А.Н. Лялин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 1. – С. 175–181.

9. Трушников Д.Н. Применение вейвлет-анализа сигналов вторичного тока для исследования и контроля электронно-лучевой сварки // Сварочное производство. – 2012. – № 4. – С. 15–21.

10. Трушников Д.Н., Беленький В.Я. Исследование формирования сигнала вторичного тока в плазме при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка // Сварочное производство. – 2012. – № 11. – С. 9–13.

Получено 15.02.2013

Портнов Николай Сергеевич – магистрант, ПНИПУ, МТФ, ТСП-11м,
e-mail: wontrop88@mail.ru.

Косьянов Андрей Валерьевич – магистрант, ПНИПУ, МТФ, ТСП-12м,
e-mail: poison_08@mail.ru.

Варушкин Степан Владимирович – студент, ПНИПУ, МТФ, ТСП-09,
e-mail: dark_stefan@mail.ru.

Абдуллин Александр Альбертович – аспирант, ПНИПУ, МТФ, e-mail:
aaa130988@mail.ru.