

Schematic Design of Relaxation Measuring Transducer of CG-Based Two-Terminal Parameters

The schematic design of the relaxation measuring transducer of CG-based two-terminal parameters is considered, and realization variants of some its units are described. An experimental study of the transducer model showing, including the determination of measuring circuit initial parameters and measurement errors of capacitance and conductivity, are presented.

Key words: CG-based two-terminal, relaxation, modulation, measuring circuit

Получено: 02.11.11

УДК 621.791.72

Д. Н. Трушников, кандидат технических наук
В. Я. Бельский, доктор технических наук, профессор
В. В. Зыков, студент
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

**ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫЙ СИГНАЛ ИЗ ЗОНЫ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ И ЕГО СВЯЗЬ
С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ СВАРНОГО ШВА**

Исследована структура вторично-эмиссионного сигнала из зоны воздействия электронного пучка на металл при электронно-лучевой сварке мощным концентрированным электронным пучком путем регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме с использованием коллектора заряженных частиц, установленного над зоной сварки. Приведены спектральные распределения сигнала переменной составляющей тока коллектора в диапазоне частот 5...40 кГц при сварке статическим и осциллирующим пучком, а также поперечные шлифы и эмпирические ненормированные плотности распределения сигнала при различных режимах фокусировки

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, фокусировка электронного пучка, вторично-эмиссионные процессы, ток несамостоятельного разряда в плазме

Исследования вторично-эмиссионных процессов при воздействии мощных сварочных электронных пучков на металлы с целью использования параметров этих процессов для оптимизации режимов электронно-лучевой сварки ведутся уже на протяжении четырех десятилетий. Ряд накопленных теоретических и экспериментальных данных, полученных при этих исследованиях, приведен в работах [1–5].

Установлено, что процесс ЭЛС с глубоким проплавлением сопровождается автоколебательными процессами перемещения зоны взаимодействия электронного пучка с металлом по глубине канала и сопутствующими этому перемещению взрывными вскипаниями [6]. В зоне электронно-лучевой сварки происходит ионизация паров металла электронным пучком и образуется низкотемпературная плазма. В результате интенсивной термоэлектронной эмиссии из области соударения электронного пучка с металлом в канале проплавления в плазме при наличии внешней электрической цепи для зарядов формируется несамостоятельный разряд.

В спектре сигнала тока несамостоятельного разряда выделяют две характерные составляющие: с частотой 5...40 кГц, характеризующей взрывные вскипания в канале, и с частотой 200...2000 Гц, отражающей перемещение зоны взаимодействия пучка с металлом по глубине канала [7].

В настоящей работе исследуются особенности вторично-эмиссионного сигнала, в качестве которого используется ток несамостоятельного разряда в плазме в зоне электронно-лучевой сварки, и связь параметров этого тока с геометрическими характеристиками сварного шва.

Методика

При проведении экспериментов производили сварку образцов из сталей 12X18H10T, ЭП-609 и из титанового сплава ОТ4 на различных электронно-лучевых сварочных установках с источниками питания ЭЛА-60/60, изменяя в широких пределах значения токов фокусирующей системы и мощности электронного пучка (1,5...18 кВт). При выполнении сварочных проходов с помощью компьютерной информационно-измерительной системы, оснащенной многоканальным аналого-цифровым интерфейсом, регистрировался ток несамостоятельного разряда в плазме. Отбор этого тока осуществлялся с помощью коллектора электронов, установленного над зоной сварки и находящегося под положительным потенциалом величиной 20...50 В (рис. 1).

Результаты регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме записывались в файл для дальнейшей обработки. Частоты дискретизации в проведенных экспериментах составляли 83 и 250 кГц.

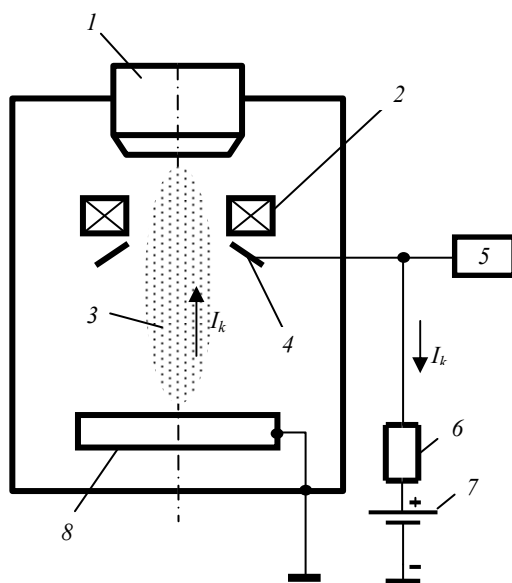


Рис. 1 Схема регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме, образующейся над зоной электронно-лучевой сварки: 1 – электронная пушка; 2 – фокусирующая линза; 3 – плазма, образующаяся над зоной электронно-лучевой сварки; 4 – коллектор электронов; 5 – система регистрации; 6 – резистор нагрузки; 7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

Результаты и обсуждения

На рис. 2 приведена типичная спектрограмма сигнала переменной составляющей тока коллектора при сварке стали немодулированным пучком, построенная с помощью оконного преобразования Фурье (мощность электронного пучка около 9 кВт). На спектрограмме виден отчетливый максимум на частоте около 17 кГц. Появление в спектре этих составляющих обусловлено наличием в сигнале резких пиков (импульсов), следующих друг за другом практически периодически. Эти импульсы имеют стохастически изменяющуюся амплитуду и следуют друг за другом сериями через случайные промежутки времени между сериями. Подобный характер спектрограмм наблюдался практически на всех режимах сварки с глубоким проплавлением для всех исследованных материалов.

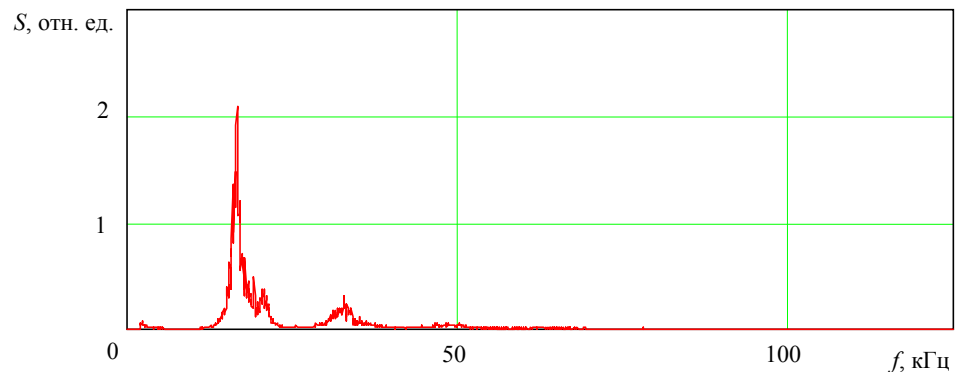


Рис. 2. Спектральное распределение S сигнала переменной составляющей тока коллектора в диапазоне частот f 5...125 кГц (сварка стали статическим пучком мощностью около 9 кВт)

Исследованные характеристики сигнала тока коллектора отражают процессы, происходящие в канале проплавления, а именно: серии периодических взрывных вскипаний («микровзрывов»), прерываемые экранировкой луча продуктами испарения, а полученные временные характеристики связаны с постоянными времени указанных процессов в канале проплавления.

Было установлено, что частота указанной высокочастотной составляющей на исследованных режимах практически не зависит от режима фокусировки и от мощности электронного пучка. Эта частота на всех исследуемых режимах оставалась одинаковой для всех исследованных материалов. При сварке титана максимум сдвигается в область более низких частот – около 14 кГц (рис. 3).

Исследования показали, что структура высокочастотной составляющей тока независимого разряда в плазме содержит информацию о режиме фокусировки электронного пучка. На рис. 4 показаны осциллограммы полученных после фильтрации сигналов (диапазон 10...30 кГц) от времени для нескольких режимов фокусировки. На осциллограммах отчетливо наблюдается изменение характера регистрируемых сигналов. При переходе от недофокусированного режима к режиму острой фокусировки сигнал становится прерывистым, а при дальнейшем изменении фокусировки в сторону перефокусированных режимов снова становится более регулярным.

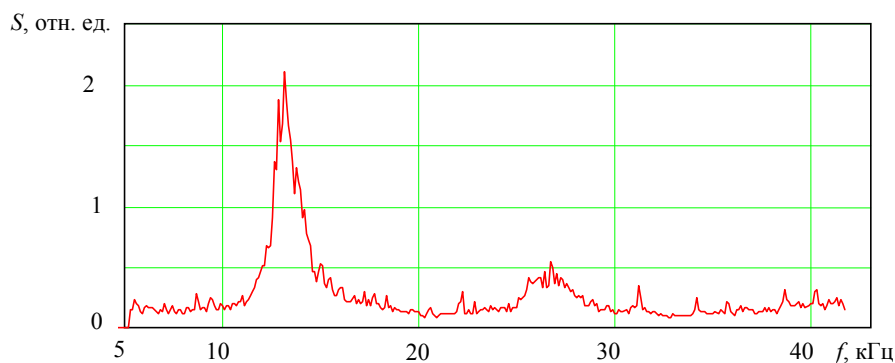


Рис. 3. Спектральное распределение S сигнала переменной составляющей тока коллектора в диапазоне частот f 5...40 кГц (сварка титана с разверткой пучка мощностью около 6 кВт по круговой траектории на частоте 1000 Гц)

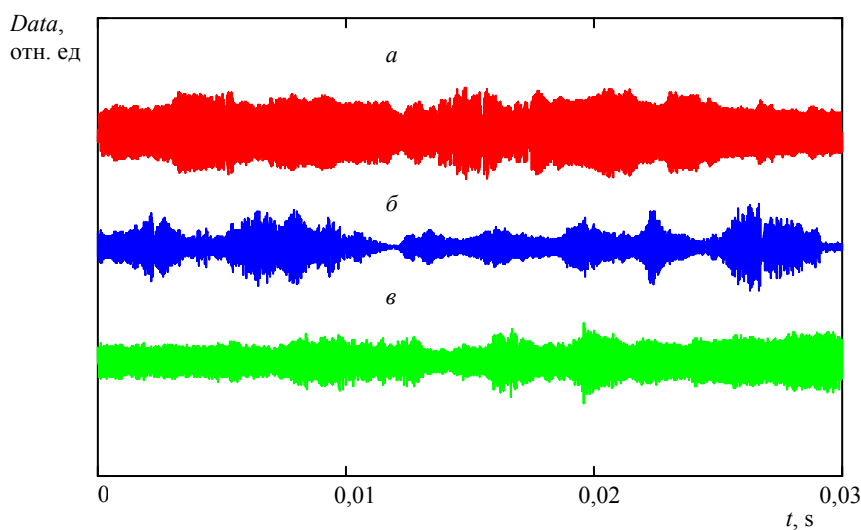


Рис. 4. Осциллограммы полученных после фильтрации сигналов (диапазон 10...30 кГц) от времени для режимов фокусировки:

a – ток фокусировки 720 мА (недофокусированный луч); $б$ – ток фокусировки 735 мА (острый фокус); $в$ – ток фокусировки 750 мА (перефокусированный луч)

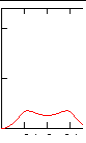
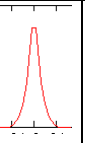
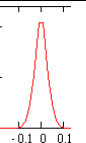
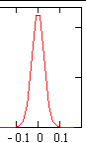
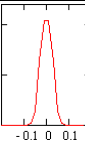
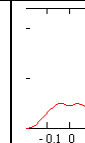
Наблюдаемое изменение характера сигнала, полученного при регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме, при изменении степени фокусировки электронного пучка может объясняться следующим образом. Высокочастотная составляющая тока коллектора характеризует взрывные вскипания в канале проплавления, связанные с перегревами металла в области взаимодействия. На недофокусированных или перефокусированных режимах диаметр канала велик, а его глубина мала. Взрывные вскипания и соответствующие им импульсы тока несамостоятельного разряда в плазме следуют почти периодически. При приближении к острому фокусу отношение глубины канала к его диаметру возрастает, и взрывные вскипания начинают следовать сериями, время между которыми является случайной ве-

личинной. Сигнал начинает носить прерывистый характер, что связано с поступательным движением области взаимодействия электронного пучка с металлом по глубине канала проплавления и экранировкой пучка продуктами выброса.

Таким образом, параметры высокочастотной составляющей тока несамостоятельного разряда в плазме в зоне электронно-лучевой сварки зависят от степени фокусировки и могут применяться для оперативного контроля удельной мощности электронного пучка в процессе сварки.

Ниже приведены результаты статистической обработки сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме.

Поперечные шлифы и эмпирические ненормированные плотности распределения выделенного сигнала в амплитудном диапазоне при сварке стали статичным пучком мощностью 9 кВт при различных режимах фокусировки

Ток фокусировки, мА	715	720	725	730	735	740	745	750
Поперечные шлифы								
Глубина шва, мм	10	14	16	17	21	19	17	13
Ширина шва в верхней части, мм	10	9	8	9	9	9	10	12
Эмпирические ненормированные плотности распределения								
Модальное значение, отн. ед.	1,089	1,835	9,777	10,425	10,672	10,386	7,115	2,535
Среднеквадратичное отклонение, отн. ед.	0,11	0,093	0,056	0,053	0,047	0,049	0,058	0,073

Наибольший интерес представляют амплитудная гистограмма сигнала или построенная с ее помощью эмпирическая плотность распределения. Параметры гистограммы или (что практически то же самое) параметры эмпирической плотности сигнала должны нести информацию об удельной мощности. Такими параметрами могут являться: среднеквадратичное отклонение сигнала (или дисперсия плотности распределения), а также величина максимума амплитудной гистограммы (модальное значение плотности распределения).

Полученный после фильтрации сигнал подвергали статистической обработке, при этом строилась эмпирическая плотность распределения выделенного сигнала в амплитудном диапазоне при частоте попадания сигнала в 30 поддиапазонов амплитудного диапазона.

Как видно из таблицы, в которой представлены поперечные шлифы при сварке стали статическим электронным пучком мощностью около 9 кВт на восьми различных режимах фокусировки, параметры полученных зон проплавления и построенные для этих режимов ненормированные эмпирические плотности распределения выделенного сигнала в амплитудном диапазоне, характер кривых ненормированной эмпирической плотности распределения хорошо отражает форму зоны проплавления. На рис. 5 представлены зависимости модальных значений ненормированной эмпирической плотности распределения и среднеквадратичного отклонения от тока фокусировки электронного пучка.

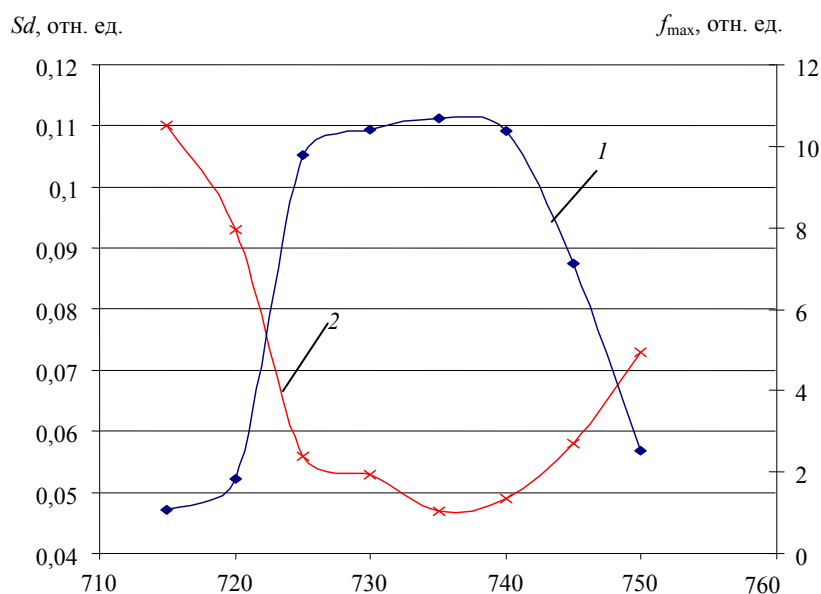


Рис. 5. Зависимости значений эмпирических плотностей распределения в моде $f_{\max}$ и среднеквадратичного отклонения Sd от тока фокусировки электронного пучка I_{ϕ} :

1 — значения эмпирических плотностей распределения в моде;

2 — среднеквадратичное отклонение

Значение модального значения плотности распределения максимально там, где максимально отношение глубины проплавления h к ширине зоны проплавления в верхней части d , т. е. в режиме острой фокусировки. Значения дисперсии и, соответственно, среднеквадратичного отклонения минимальны. Таким образом, указанные параметры позволяют определять режим острой фокусировки или, что то же самое, режим максимальной удельной мощности электронного пучка при сварке.

Аналогичные результаты имели место при электронно-лучевой сварке всех применявшихся в экспериментах материалов при описанных выше режимах.

Найденные характеристики сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме могут быть использованы для оперативного контроля процесса формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что в спектре сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме в зоне электронно-лучевой сварки содержится характерная высокочастотная (~ 15 кГц) составляющая. Установлено, что частота этой составляющей не зависит явным образом от режима фокусировки электронного пучка его мощности. Установлено, что параметры эмпирической плотности сигнала несут информацию об удельной мощности электронного пучка, определяемой его фокусировкой, и могут быть использованы для оперативного контроля процесса формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке. Необходимо также отметить характерное появление двумодальности (см. таблицу) при сварке на режимах с фокусировкой электронного пучка, заведомо далекой от оптимальной, что также может являться параметром, служащим для индикации дефектного режима процесса электронно-лучевой сварки.

Библиографические ссылки

1. Башенко В. В., Мауэр К.-О. Импульсный характер потоков заряженных частиц из канала при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1982. – № 3. – С. 62–64.
2. Батухтин В. А., Башенко В. В. Обработка вторичных излучений для контроля и управления процессом электронно-лучевой сварки // Автоматическое управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки. – Киев : ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. – С. 64–74.
3. Petrov P., Georgieva C., Petrov G. Experimental investigation of weld pool formation in electron beam welding // Vacuum. – 1998. – Vol. 51, № 3. – P. 339–343.
4. Беленький В. Я., Язовских В. М., Журавлев А. П. О природе вторичного тока в плазме, образующейся в зоне взаимодействия электронного луча при сварке // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 6. – С. 128–129.
5. 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.
6. Миткевич Е. А., Локишин В. Е. Динамика формирования канала в условиях электронно-лучевой сварки // Автоматическая сварка. – 1980. – № 9. – С. 26–27.
7. Структура вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / Д. Н. Трушников [и др.] // Сварка и диагностика. – 2008. – № 4. – С. 22–24.

Статья подготовлена по результатам выполнения работ по гранту РФФИ-Урал (заявка № 11-08-96016, номер государственной регистрации НИР - 01201168147).

D. N. Trushnikov, Candidate of Technical Sciences, Perm National Research Politechnical University

V. Ya. Belenkiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm National Research Politechnical University

V. V. Zykov, Student, Perm National Research Politechnical University

Secondary Emission Signal of Electron-Beam Welding Zone and Its Connection with Weld Joint Geometric Parameters

The emission of electrons from the welding zone is analyzed. Experiments were conducted to examine the spectrum of oscillations of the secondary current at various values of the specific

power of the electron beam. The conducted research showed that the signal spectrum of the secondary current in electron beam welding of high power contains a characteristic high-frequency (15 kHz) component. Empirical density distribution of the signal was constructed in the amplitude range for this component. It was shown that the parameters of the density distribution is closely linked with the nature of interaction of the beam with metal and can be used for remote control of technology process.

Key words: electron beam welding, secondary-emission signals, stainless steel, electron beam focusing, weld formation control and monitoring

Получено: 15.11.11

УДК 007.62-5

К. В. Шишаков, кандидат физико-математических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет

УПРАВЛЕНИЕ УГЛОВЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ СЛОЖНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ОБЪЕКТА

Рассматривается управление угловым перемещением сложного и большого прецизионного объекта. Для его низкочастотного наведения применяется трехконтурное подчиненное управление электроприводом с упругой передачей. Анализируются возможности и ограничения управления в условиях внешних и эксплуатационных возмущений.

Ключевые слова: управление, электропривод, прецизионный объект, угловое перемещение, упругая связь

Введение

В высокоточных системах управления угловым перемещением сложных и больших прецизионных объектов (прецизионных столов [1, 2], в робототехнике и т. п.) требования к точности углового позиционирования достигают от единиц до десятых и менее угловых секунд. При таких точностях традиционные электроприводы управления часто становятся источниками погрешностей. Это может быть редукторная понижающая передача в электроприводах с редуктором (особенно при переменных ускорениях и вблизи сверхнизких угловых скоростей) или эксплуатационные погрешности самого электродвигателя без редуктора (напрямую передаются на управляемый объект) [3].

Обеспечение высокоточного углового наведения рассматриваемых объектов затрудняется большими размерами и сложностью. Их масса может достигать до нескольких тонн, а сложность проявляется в специфике сборной механической конструкции, имеющей широкий спектр резонансных частот. Поэтому в условиях сильных внешних и внутренних возмущений достичь требуемых высоких точностей с помощью одного низкочастотного электропривода не всегда удается. В таких случаях в систему вводят дополнительные корректирующие каналы управления [4, 5].

Для того чтобы максимально использовать точностные ресурсы низкочастотного электропривода, применяют трехконтурную подчиненную обратную связь магнитными двигателями постоянного тока с прямой передачей [6, 7]. Обсуждение