

УДК 621.791.72

В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников
V.Y. Belenky, D.N. Trushnikov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

Г. Младенов
G. Mladenov

Институт электроники Болгарской академии наук
Institute of Electronics of Bulgarian Academy of Science

Е. Колева
E. Koleva

Химико-технологический и металлургический университет,
София, Болгария
University of Chemical Technology and Metallurgy, Sophia, Bulgaria

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ
СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ**

**OPTIMIZATION OF ENERGY IMPACT ELECTRON BEAM
WITH ELECTRON BEAM WELDING HEAVY SECTIONS
OF METAL**

Рассмотрены вопросы применения электронно-лучевой сварки для изделий с большой толщиной свариваемого металла. Показана эффективность этого способа по сравнению с многопроходной дуговой сваркой. Исследованы возможности контроля фокусировки электронного пучка по характеру кривых ненормированной эмпирической плотности распределения вторично-эмиссионного сигнала из зоны воздействия электронного пучка на металл. Показано, что эти кривые хорошо отражают форму зоны проплавления, что позволяет добиться максимальной концентрации выделяемой в зоне сварки тепловой энергии и получать швы с максимальным отношением глубины шва к его ширине.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронный пучок, контроль фокусировки электронного пучка, канал проплавления, несамостоятельный разряд в плазме.

Aspects of the electron-beam welding products with large thickness of the base metal are considered. The effectiveness of this method in comparison with multi-pass welding. The possibilities of controlling the focus of the electron beam by the nature of non-normalized curves of the empirical density of secondary-emission signal from the zone of the electron beam on the metal. It is shown that these curves are in good shape reflects the melting zone, which allows for maximum concentration released in the welding heat and getting the welds with a maximum depth-to-width seam.

Keywords: electron beam welding, electron beam, beam focus control, keyhole of penetration, plasma non-self-charge.

В настоящее время для получения неразъемных соединений в металлических конструкциях широко применяется дуговая сварка. Несмотря на эффективность ее применения при изготовлении различных изделий, этот процесс является весьма энергоемким, а коэффициент полезного действия процесса нагрева металла электрической дугой зависит от конкретного способа



Рис. 1. Выполнение сварного шва многопроходной дуговой сваркой

и не превышает 60–65 %. При необходимости сварки металла большой толщины с использованием дуговых методов приходится применять многопроходную сварку (рис. 1), и затраты электрической энергии при формировании такого сварного соединения существенно возрастают.

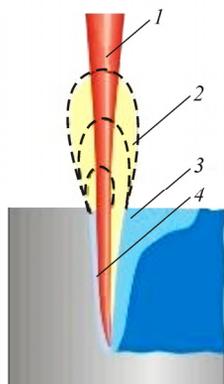


Рис. 2. Формирование канала проплавления при электронно-лучевой сварке: 1 – электронный пучок; 2 – плазма; 3 – расплавленный металл; 4 – канал проплавления

В последние десятилетия широкое применение в машиностроении, судостроении и аэрокосмической технике находит электронно-лучевая сварка, при которой источником нагрева металла является концентрированный пучок электронов. Процесс электронно-лучевой сварки протекает в вакууме, что обеспечивает эффективную защиту расплавленного металла сварочной ванны от воздействия внешних факторов, а также рафинирование металла сварного шва. При этом механические характеристики сварного шва часто превышают показатели основного металла, что редко встречается при других способах сварки.

Особенностью взаимодействия мощного электронного пучка с металлом является образование узкого и глубокого канала проплавления в металле (рис. 2). В этом канале протекают сложные газо- и гидродинамические процессы, которые до настоящего времени не являются до конца изученными. Выделение энергии электронного пучка в ка-

нале проплавления, в отличие от поверхностного нагрева металла при дуговой сварке, обеспечивает высокую энергетическую эффективность процесса электронно-лучевой сварки. При этом коэффициент полезного действия процесса ввода энергии в металл 95–98 %.

Формирование узкого и глубокого канала проплавления при электронно-лучевой сварке позволяет получить сварные швы, отношение глубины которых к их ширине может достигать значений 50 и выше, и сваривать за один проход изделия с толщиной металла до 150–200 мм.

В ряде случаев эффективное использование электронно-лучевой сварки как энергосберегающего технологического процесса сдерживается трудностью воспроизведения геометрических параметров зоны проплавления в результате сложности контроля фокусировки электронного пучка, задаваемой величиной тока в электромагнитной фокусирующей системе электронной пушки и существенно влияющей на конфигурацию сварного шва.

Несмотря на стабилизацию всех электрических параметров современных энергетических агрегатов для электронно-лучевой сварки, воспроизведение режима фокусировки является сложной задачей [1–3]. Это связано с тем, что фокусировка электронного пучка в значительной степени связана с электронно-оптическими характеристиками катодного узла сварочной электронной пушки, которые могут изменяться во времени в результате выработки катода и при проведении регламентных работ.

Разработка методов контроля фокусировки электронного пучка позволяет добиться максимальной концентрации выделяемой в зоне сварки тепловой энергии, что позволяет получать швы с максимальным отношением глубины шва к его ширине. Такая конфигурация зоны проплавления обеспечивает высокую энергетическую эффективность процесса и возможность электронно-лучевой сварки металла большой толщины при минимальных значениях вводимой мощности.

Одними из наиболее эффективных в настоящее время являются методы контроля фокусировки при электронно-лучевой сварке по параметрам вторичных процессов, протекающих при взаимодействии мощного концентрированного электронного пучка с металлом в зоне сварки [4–8].

Одним из характерных процессов, протекающих в зоне сварки, является образование низкотемпературной плазмы в результате взаимодействия электронного пучка с парами металла над сварочной ванной. Регистрируя параметры вторичного тока, возникающего в канале проплавления и направленного в плазме навстречу току электронного пучка (рис. 3), можно осуществлять оперативный контроль параметров термического воздействия электронного пучка и конфигурацию зоны проплавления [9–12].

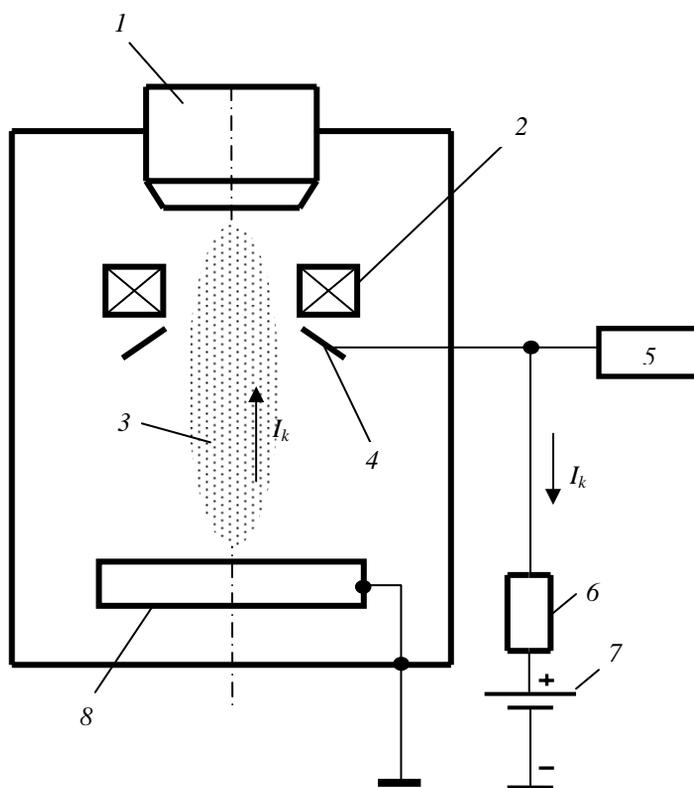
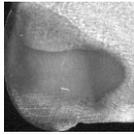
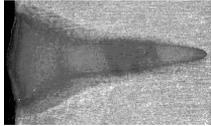
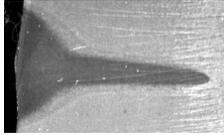
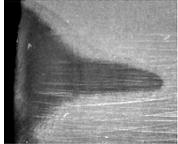
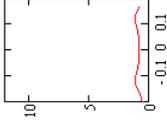
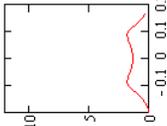
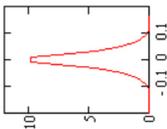
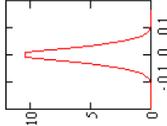
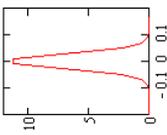
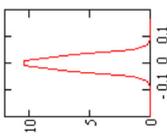
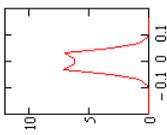
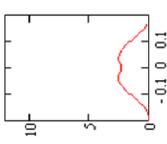


Рис. 3. Регистрация вторичного тока в плазме, образующейся над зоной электронно-лучевой сварки: 1 – электронная пушка; 2 – фокусирующая линза; 3 – плазма; 4 – коллектор электронов; 5 – система регистрации; 6 – резистор нагрузки; 7 – источник смещения; 8 – свариваемое изделие

Последние исследования, проведенные авторами, показали возможность постановки и решения обратной задачи реконструкции формы проплавления при электронно-лучевой сварке по параметрам сигнала вторичного тока в плазме, регистрируемого в цепи кольцевого электрода, находящегося над областью сварки. При обработке из сигнала вторичного тока в плазме выделялась высокочастотная составляющая в диапазоне 10–30 кГц. Далее исследовались параметры выделенной составляющей. В таблице представлены поперечные шлифы зон проплавления в металле при сварке стали 15X5M 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. Как видно из таблицы, характер кривых ненормированной эмпирической плотности распределения хорошо отражает форму зоны проплавления.

Поперечные шлифы зон проплавления и эмпирические ненормированные плотности распределения сигнала составляющей вторичного тока с частотой 10–30 кГц при различных режимах фокусировки

Ток фокусировки, мА	715	720	725	730	735	740	745	750
Поперечные шлифы зон проплавления при электронно-лучевой сварке стали 15Х5М								
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 сигнала составляющей спектра вторичного тока с частотой 10–30 кГц								
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

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.

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

Сделаем следующие выводы. Эффективное использование электронно-лучевой сварки, как энергосберегающего технологического процесса при сварке металлов больших толщин, сдерживается трудностью воспроизведения геометрических параметров зоны проплавления в результате сложности контроля фокусировки электронного пучка. Проведенные исследования показали, что наиболее эффективным является контроль фокусировки электронного пучка по параметрам эмпирической плотности распределения составляющей спектра колебаний вторичного тока в плазме с частотой в диапазоне 10–30 кГц, что может быть использовано для оперативного контроля процесса формирования сварного шва и получения его оптимальной геометрии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ-Урал № 11-08-96016, РФФИ № 13-08-00397А и при финансовой поддержке Министерства образования Пермского края.

Список литературы

1. Зуев И.В., Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
2. Koleva E. Electron beam weld parameters and thermal efficiency improvement // Vacuum. – 2005. – Vol. 77. – P. 413–421.
3. Hiramoto S., Ohmine M., Sakamoto M. Development of an automatic beam focus system for electron beam welding // Weld. Int. – 1991. – Vol. 10. – P. 763–768.
4. Laptенок V.D., Murygin A.V., Tikhonenko D.V. X-ray sensor for guiding the electron beam on the joint in electron-beam welding // Weld. Int. – 2006. – Vol. 20. – P. 894–900.
5. Mauer K.O. Systems for beam positioning in electron beam welding. Schweisstechnik. – 1982. – Vol. 32. – P. 368–373.

6. Elmer J.W., Teruya A.T. Fast method for measuring power density distribution of non-circular and irregular electron beams // *Sci. Technol. Weld. Join.* – 1998. – № 3. – P. 51–58.

7. Устройство управления фокусировкой и глубиной проплавления по собственному рентгеновскому излучению при ЭЛС с модуляцией уровня фокусировки / В.Я. Браверман, Д.А. Скурихин, С.Г. Баякин, В.Ф. Шабанов, В.В. Башенко // *Сварочное производство.* – 1997. – № 1. – С. 16–19.

8. Olszewska K., Friedel K. Control of the electron beam active zone position in electron beam welding processes // *Vacuum.* – 2004. – Vol. 74. – P. 29–43.

9. Yazovskikh V.M., Belenkiy V.Ya. Control of electron beam welding using plasma phenomena in the molten pool region // *Weld. Int.* – 1997. – Vol. 11. – P. 554–558.

10. 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.

11. Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Зыков В.В. Вторично-эмиссионный сигнал из зоны электронно-лучевой сварки и его связь с геометрическими параметрами сварного шва // *Интеллектуальные системы в производстве.* – 2011. – № 2. – С. 214–221.

12. Yazovskikh V.M., Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya. The mechanism of secondary emission processes in electron beam welding with the modulation of the electron beam // *Weld. Int.* – 2004. – Vol. 18. – P. 724–730.

Получено 2.09.2013

Беленький Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru).

Трушников Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: trdimitr@yandex.ru).

Младенов Георги – доктор физических наук, профессор, чл.-корр. Болгарской академии наук, Институт электроники Болгарской академии наук (1784, Болгария, София, ул. Цареградское ш., 72, e-mail: gmmladenov@abv.bg).

Колева Елена – доктор наук, Химико-технологический и металлургический университет (1756, Болгария, София, ул. Св. Климента Охридского, 8, e-mail: eligeorg@abv.bg).

Belenkiy Vladimir Jakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru).

Trushnikov Dmitriy Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: trdimitr@yandex.ru).

Mladenov Georgi – Doctor of Physical Science, Professor, corresponding member of Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences (1784, Bulgaria, Sofia, Tsaregradskoe shosse, 72, e-mail: gmmladenov@abv.bg).

Koleva Elena – Doctor of Sciences, University of Chemical Technology and Metallurgy (1756, Bulgaria, Sofia, St. Kliment Ohridski st., 8, e-mail: eligeorg@abv.bg).