

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 621.791.722

Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-266-273

For citation: Kurashkin S. O., Seregin Yu. N., Murygin A. V., Petrenko V. E. Features of modeling the electron beam distribution energy for the electron-beam welding process. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 266–273. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-266-273

Для цитирования: Особенности моделирования распределения энергии электронного пучка для процесса электронно-лучевой сварки / С. О. Курашкин, Ю. Н. Серегин, А. В. Мурыгин, В. Е. Петренко // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 2. С. 266–273. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-266-273.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

С. О. Курашкин*, Ю. Н. Серегин, А. В. Мурыгин, В. Е. Петренко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: scorpion_ser@mail.ru

Распределение энергии электронного пучка путем использования различных траекторий сканирования влияет на формирование сварного шва, что связано с качеством сварного соединения. Экспериментальные исследования авторов статьи показали, что наилучшее качество сварных соединений дает сканирование электронного пучка в виде растровой формы; поэтому для процесса электронно-лучевой сварки предложены траектории классического растра и усеченного растра. При исследовании в этом направлении авторами обнаружена следующая закономерность: при увеличении амплитуды сканирования вдоль стыка парогазовый канал проплавления трансформируется в устойчивую полость, по передней стенке которой происходит плавление металла, а по боковым стенкам – его перенос в хвостовую часть сварочной ванны.

Обнаруженный эффект образования полости проплавления необходимо исследовать при электронно-лучевой сварке различных материалов и толщин. Для этого должна быть создана аппаратура, реализующая сканирование в виде различных растров. Для повышения качества процесса электронно-лучевой сварки предложены траектории классического и усеченного растра поперек стыка. Для этих траекторий сканирования получены аналитические выражения и семейства расчетных характеристик плотности распределения энергии электронного пучка по пятну нагрева. Моделирование форм осцилляции электронного пучка в виде усеченного растра поперёк стыка даёт возможность получить двугорбое распределение энергии пучка на поверхности детали по пятну нагрева. Полученные характеристики позволяют более осмысленно подходить к оптимизации процесса электронно-лучевой сварки различных материалов.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, моделирование, технологические параметры, электронный пучок, оптимизация, распределение энергии.

FEATURES OF MODELING THE ELECTRON BEAM DISTRIBUTION ENERGY FOR THE ELECTRON-BEAM WELDING PROCESS

S. O. Kurashkin*, Yu. N. Seregin, A. V. Murygin, V. E. Petrenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: scorpion_ser@mail.ru

The energy distribution of the electron beam by means of application of various scanning paths, affects formation of the weld, which relates to the quality of the welded joints. Experimental studies, conducted by the authors of the article showed that scanning the electron beam in the form of a raster shape gives the best quality of welded joints; therefore, the trajectories of a classical raster and a truncated raster are proposed for the electron beam welding process. When conducting research in this direction, the authors discovered the following regularity: with an increase in the scanning amplitude along the junction, the vapour-gas penetration channel transforms into a stable cavity, along the front wall of which the metal melts, and along the side walls it is transferred to the tail of the weld pool.

The discovered effect of the formation of a penetration cavity is to be investigated in electron beam welding of various materials and thicknesses. For this the necessary equipment is to be created, allowing to make scanning in the form of various rasters. To improve the quality of the electron beam welding process, trajectories of a classical raster and a truncated raster across the joint are proposed. For these scanning trajectories, analytical expressions and families of calculated characteristics of the electron beam energy density distribution over the heating spot are obtained. Modulation of the electron beam oscillation in the form of a truncated raster across the junction makes it possible to obtain a two-humped distribution of the beam energy on the surface of the part along the heating spot. The obtained characteristics allow a more meaningful approach to optimizing the process of electron beam welding of various materials.

Keywords: electron-beam welding, modelling, technological parameters, electron beam, optimisation, normal distribution law.

Введение. Совокупность энергетических и технологических параметров процесса определяют качество сварного шва при электронно-лучевой сварке (ЭЛС). Электронный пучок представляет собой источник высококонцентрированной энергии. Формирование глубокого проплавления фокусированным электронным пучком достигается за счет образования парогазового канала, в котором транспортируется энергия пучка. При этом сварочный шов имеет кинжальную форму с характерным грибовидным формированием в верхней части. Процесс формирования сварного шва в этом случае носит колебательный характер с периодическим неустойчивым каналом проплавления. Грибовидное расширение сварного шва в верхней части связано с периодическим рассеиванием пучка на парах металла. Такой процесс сварки редко используется на практике кроме случаев сквозного проплавления. Остроконечная форма сварного шва в корневой части приводит к образованию корневых дефектов – пустот, возникающих за счет вытеснения жидкого металла каналом проплавления. Для того чтобы такие дефекты не возникали необходимо сформировать более широкую корневую часть шва. Простейшим способом формирования радиуса в корне шва является расфокусировка электронного пучка, которая используется на практике в основном на установках с ускоряющим напряжением 30–60 кВ. Расфокусировка пучка не приводит к полному устранению корневых дефектов, кроме того шов принимает форму близкую к треугольной, уменьшается глубина проплавления, возникают деформации

и напряжения, поэтому расфокусировка электронного пучка используется только при ЭЛС изделий малых толщин [1].

Для предотвращения корневых дефектов необходимо формировать пародинамический канал с достаточно широкой нижней частью. С технической стороны наиболее эффективным способом воздействия на формирование канала проплавления является осциляция электронного пучка на поверхности свариваемого изделия. Современная тенденция развития технологии сварки заключается в применении разверток сложной формы для формирования швов с заданной формой поперечного сечения. Иллюстрация примера такой разработки, выполненной компанией Steirgerwald Strahltechnik, приведена на рис. 1. Применение цифровых генераторов сигналов позволяет создавать растры любой формы с достаточно высоким разрешением до 24 разрядов, что открывает широкие возможности в области термической обработки, сварки и пайки, а также играет ключевую роль при решении задачи наведения на стык [2].

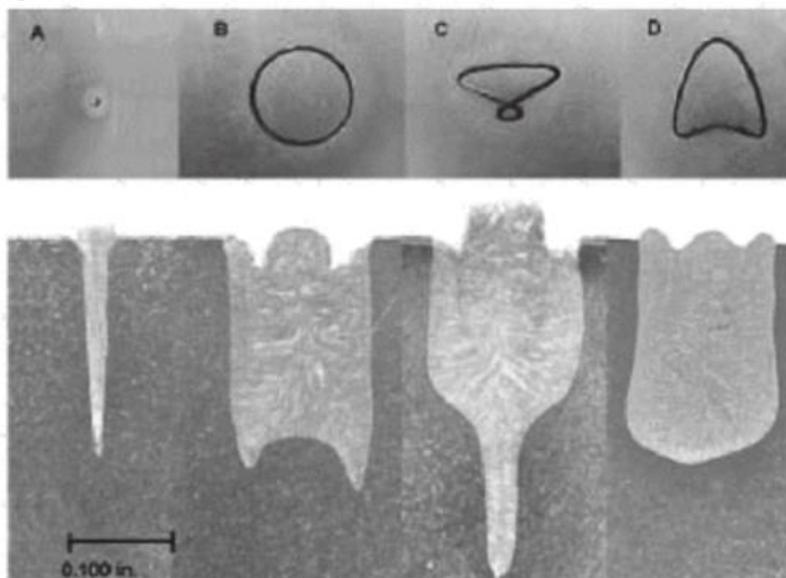


Рис. 1. Влияние траектории развертки пучка на поперечное сечение сварного шва: *A* – отсутствие развертки; *B* – окружность; *C* – восьмерка; *D* – наконечник стрелы

Fig. 1. Influence of the beam scanning trajectory on the weld cross-section:
A – without scanning; *B* – circle; *C* – eight; *D* – arrowhead

Методика выбора формы развертки электронного луча до настоящего времени не разработана. В то же время накоплено довольно большое количество экспериментальных данных [3]. Наиболее широко используются следующие развертки пучка: продольная [4], х-образная [4–6], круговая и эллиптическая [6–9], дуга и скоба [10–13]. Амплитуды разверток обычно изменяются в пределах 1–3 мм.

Электронно-лучевая сварка с вращением электронного пучка по круговой траектории позволяет добиться существенного уменьшения корневых дефектов и пикообразования, однако, ввиду того что плотность мощности в центральной части зоны нагрева мала, использование круговой развертки приводит к уменьшению глубины проплавления по сравнению с электронно-лучевой сваркой неподвижным пучком. Недостатком круговой развертки электронного пучка является также различие направлений движения пучка на противоположных краях сварного шва. При этом на одной из кромок направление движения пучка совпадает с направлением скорости сварки, а на другом – противоположно ему, что может приводить к неравномерности формирования шва.

В работе [14] авторами была разработана новая траектория сканирования на основе ввода энергии. В исследовании предлагается, подавать на модуль управления пучком не контур, а

сразу траекторию, по которой следует луч. В результате экспериментально были получены номинальная плотность энергии и функция модуляции, что позволило определить оптимальную энергию на вводе. Однако, данный метод определения энергии, предложенный авторами, энерго- и ресурсозатратный. Иллюстрация такой разработки приведена на рис. 2.

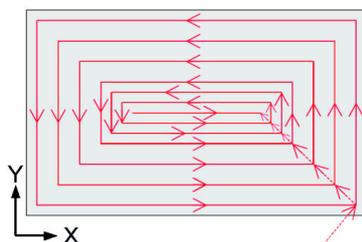


Рис. 2. Новые траектории для плавления прямоугольной области

Fig. 2. New paths for melting a rectangular region

В работе [15] приведены экспериментальные исследования по применению различных разверток электронного пучка с целью качественного формирования сварных соединений. Исследовалось влияние следующих разверток: круговая и эллиптическая, х-образная, зигзаг, буравчик, растр, треугольник, гребля веслами по изотермам. Исследования показали, что наилучшей разверткой по качеству формирования сварного шва является растр, в котором сканирование пучка по координате, совмещенной со стыком свариваемого изделия, осуществляется по одностороннему пилообразному закону, при этом пучок перемещается из передней части ванны в хвостовую по линейному закону с последующим мгновенным возвращением в переднюю часть. Такое сканирование способствует переносу расплавленного металла в хвостовую часть сварочной ванны. За одно сканирование вдоль стыка осуществляется 16, 32 или 64 сканирования поперек стыка по двухсторонней пилообразной траектории. Период сканирования вдоль стыка был равен 1–2 мс.

Более детальные исследования со сканированием в виде растра выявили, что при увеличении амплитуды сканирования вдоль стыка от 5 мм при сварке малых толщин до 15 мм при сварке средних толщин парогазовый канал трансформируется в устойчивую полость на всю глубину проплавления [16]. Форму полости фиксировали путем резкого прекращения процесса сварки отключением ускоряющего напряжения.

Математическое моделирование распределения энергии электронного пучка. На рис. 3 представлена схема электронно-лучевой сварки при сканировании в виде растра. Форма получаемого при этом шва имеет почти параллельные стенки и значительный радиус в корне, позволяющий устранить корневые дефекты, в 3–4 раза уменьшилась нестабильность глубины проплавления. Открытость и устойчивость полости проплавления приводит к дегазации сварочной ванны и снижению пористости. За счет снижения доли энергии, затрачиваемой на испарение материала, повышается проплавляющая способность процесса ЭЛС [1].

Эффект образования полости проплавления целесообразно исследовать при сварке различных материалов и разных толщин. Для этого должна быть создана аппаратура, реализующая сканирование в виде различных растров. В данной работе рассматривается три вида сканирования: классический растр, синусоидальный растр и усеченный растр. Задача этого исследования заключается в получении плотности распределения энергии сканирующего электронного пучка на поверхности детали по пятну нагрева. Она характеризует распределение энергии в сварочной ванне.

Распределение энергии в электронном пучке обычно описывается нормальным законом, который характеризуется плотностью вероятности вида [17]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2 * \pi}} * \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2 * \sigma^2}\right), \quad (1)$$

где x – координата по оси абсцисс; m – математическое ожидание; σ – среднее квадратичное отклонение, характеризующее диаметр электронного пучка, концентрацию энергии в нем. Эта величина определяется электронно-оптической системой пушки и ее фокусирующей системой. Она зависит от тока сварки и обычно определяется в пределах $\sigma = 0,05 - 0,5$ мм. Чем меньше диаметр электронного пучка, тем более качественный пучок формирует пушка.

Для того чтобы при построении характеристик плотности распределения энергии по пятну нагрева не учитывать конкретное значение среднего квадратичного отклонения, введем безразмерные координаты и амплитуды сканирования пучка по этим координатам:

$$\bar{y} = \frac{y}{\sigma}, \quad (2)$$

где y – координата вдоль стыка; σ – среднее квадратичное отклонение; \bar{y} – безразмерная координата вдоль стыка. В системе безразмерных координат $\sigma = 1$;

$$\bar{x} = \frac{x}{\sigma}, \quad (3)$$

где x – координата поперёк стыка; \bar{x} – безразмерная координата поперёк стыка;

$$\bar{A} = \frac{A}{\sigma}, \quad (4)$$

где A – амплитуда; \bar{A} – безразмерная амплитуда.

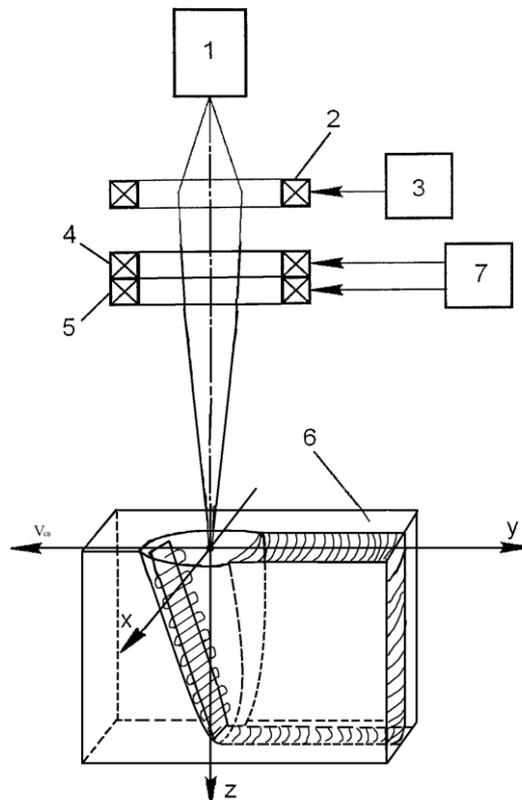


Рис. 3. Схема электронно-лучевой сварки при сканировании в виде растра:
1 – электронно-лучевая пушка; 2 – фокусирующая система; 3 – источник тока фокусировки;
4 и 5 – отклоняющая катушка; 6 – поверхность изделия; 7 – генератор сканирования пучка

Fig. 3. A scheme of electron-beam welding during scanning in the form of a raster:

1 – electron beam gun; 2 – focusing system; 3 – focus current source; 4 and 5 – deflection coil; 6 – product surface; 7 – beam scan generator

Известно, что максимальная ордината нормального распределения (1), равная, соответствует точке $x = m$. По мере удаления от точки m плотность распределения падает. Центром симметрии распределения является центр рассеивания m . Это ясно из того, что при изменении знака разности $(x - m)$ на обратный, выражение (1) не меняется. Если изменять центр рассеивания m , кривая распределения будет смещаться вдоль оси абсцисс, не изменяя своей формы. Центр рассеивания характеризует положение распределения на оси координат [9]. Поэтому, изменяя центр рассеивания по соответствующему закону, можно получить плотность распределения энергии по соответствующей координате.

Энергия электронного пучка [18]

$$W(x, y) = U * I * \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(x)W(y)dx dy, \quad (5)$$

где U – ускоряющее напряжение; I – ток луча; $W(x)$ и $W(y)$ – нормированные функции распределения энергии по соответствующим координатам; $\int_{-\infty}^{\infty} W(x)dx = 1$; $\int_{-\infty}^{\infty} W(y)dy = 1$.

Далее рассмотрим каждое сканирование подробнее. При сканировании в виде классического раstra движение по координате поперёк стыка осуществляется по двухсторонней пиле, описываемой кусочно-линейной функцией:

$$x = k * t + m, \quad (6)$$

где t – независимая переменная; k и m – некоторые числа, а при условии, что $k = 1$ за время $t = [-1;1]$ при периоде T , данный график будет в виде треугольной функции (рис. 4).

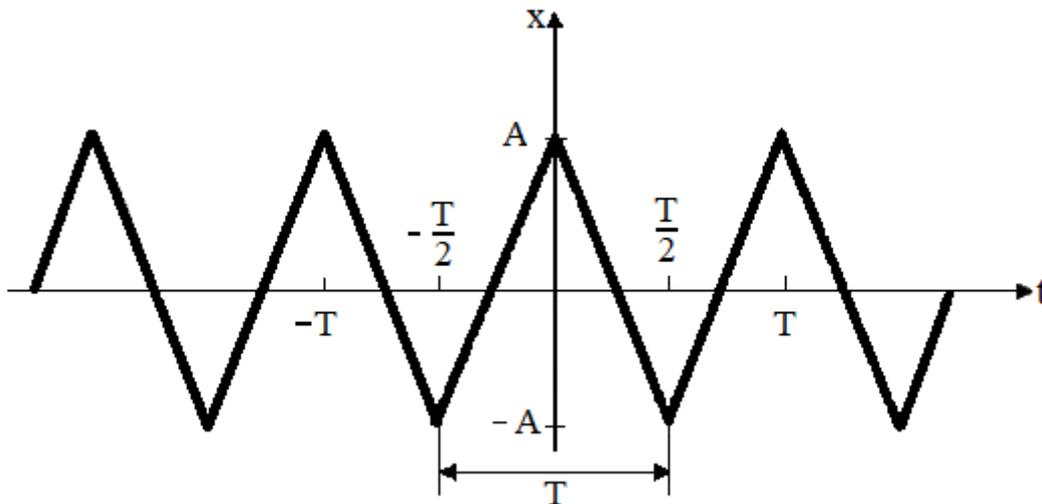


Рис. 4. График последовательных треугольных импульсов

Fig. 4. Graph of successive triangular pulses

Известно, что при изменении математического ожидания в формуле (1), смещается график относительно его центра. Следовательно, вместо математического ожидания можно подставить необходимое нам выражение, для раstra – это линейная функция. Так же необходимо проинтегрировать полученное выражение. Получим следующую формулу [18]:

$$W(\bar{x}) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{(\bar{x} - (\bar{A}_x * k * t + m))^2}{2 * \sigma^2}\right) dt, \quad (7)$$

где $\bar{A}_x \in [1;10]$, $\bar{x} \in [-15;15]$; $k = 1$; $m = 0$; \bar{x} – безразмерная координата вдоль стыка; \bar{A}_x – безразмерная амплитуда поперёк стыка; σ – среднее квадратичное отклонение.

На рис. 5 показана фигура при нормальном распределении энергии для случая траектории сканирования электронного пучка в виде раstra поперёк стыка.

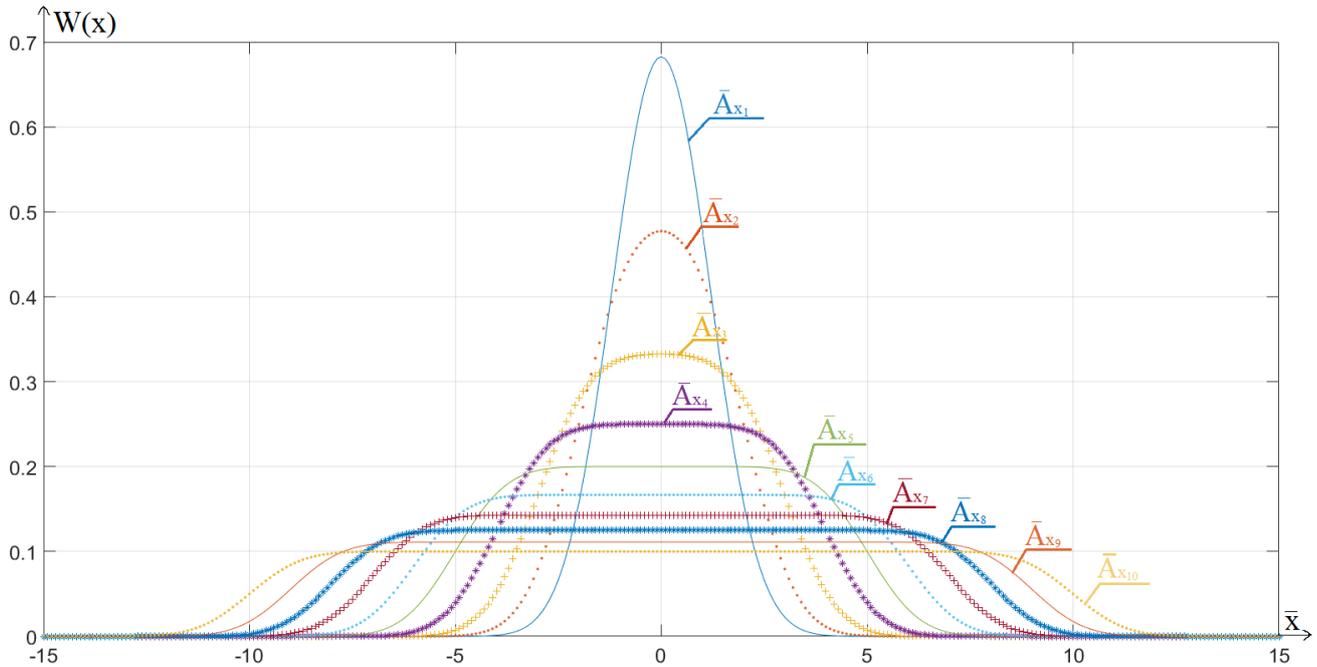


Рис. 5. Распределение энергии пучка на поверхности детали при растровом сканировании:
 $\bar{A}_{x_1} = 1$; $\bar{A}_{x_2} = 2$; $\bar{A}_{x_3} = 3$; $\bar{A}_{x_4} = 4$; $\bar{A}_{x_5} = 5$; $\bar{A}_{x_6} = 6$; $\bar{A}_{x_7} = 7$; $\bar{A}_{x_8} = 8$; $\bar{A}_{x_9} = 9$; $\bar{A}_{x_{10}} = 10$

Fig 5. Energy distribution on the surface for the case of a scanning trajectory in the form of a truncated raster:

$$\bar{A}_{x_1} = 1 ; \bar{A}_{x_2} = 2 ; \bar{A}_{x_3} = 3 ; \bar{A}_{x_4} = 4 ; \bar{A}_{x_5} = 5 ; \bar{A}_{x_6} = 6 ; \bar{A}_{x_7} = 7 ; \bar{A}_{x_8} = 8 ; \bar{A}_{x_9} = 9 ; \bar{A}_{x_{10}} = 10$$

На рис. 6 показана траектория сканирования электронного пучка в виде усеченного раstra. Траектория сканирования в виде раstra описывается формулой (8), но добавляются дополнительные ограничения в виде следующей системы [18]:

$$\begin{cases} A = 1, \text{ при } t \in [0.7;1.2] \\ A = -1, \text{ при } t \in [2.6;3.2] \end{cases} \quad (8)$$

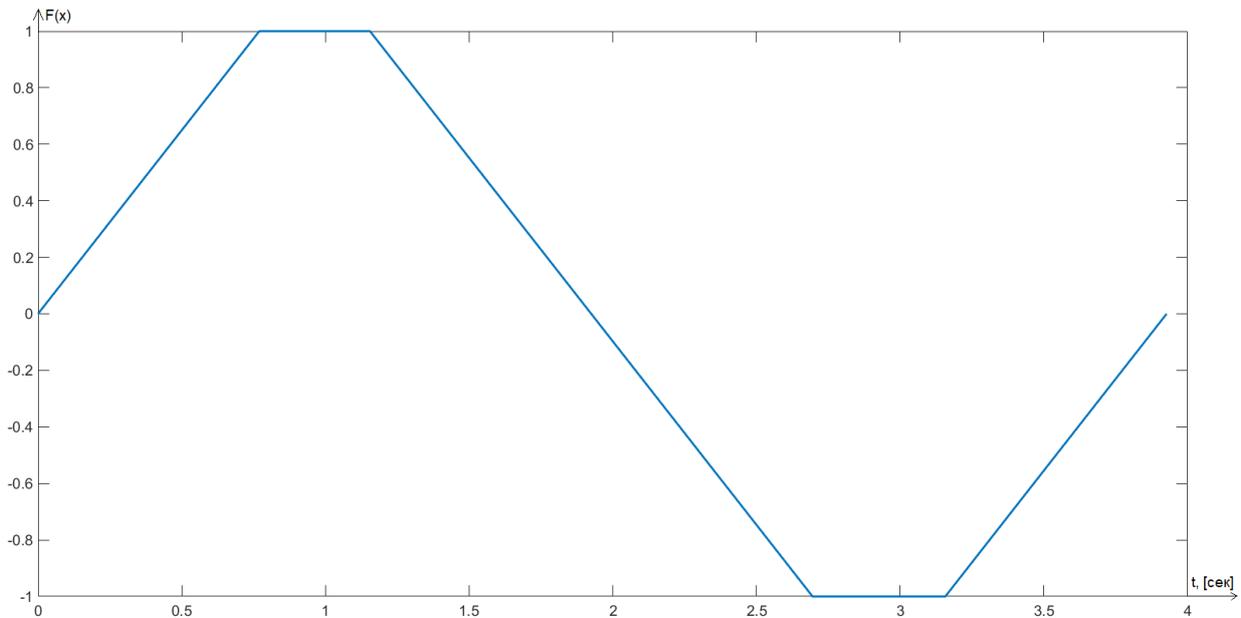


Рис. 6. Форма управляющего сигнала в виде треугольника с зонами насыщения

Fig. 6. The shape of the controlling signal in the form of a triangle with saturation zones

При сканировании усеченным растром на определенных участках при определенном периоде, амплитуда принимает фиксированное значение. Поэтому в формулу (7) добавим выражения, с помощью которых описываются пики, возникающие на значениях равных амплитуде. Получим следующее выражение:

$$W(\bar{x}) = \frac{T - 2 * M}{T} * \int_{-1}^1 \frac{1}{\sigma * \sqrt{2 * \pi}} * \exp\left(-\frac{(\bar{x} - (\bar{A}_x * k * t + m))^2}{2 * \sigma^2}\right) dt + \frac{M}{T} * \left(\exp\left(-\frac{(\bar{x} - \bar{A}_x)^2}{2 * \sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{(\bar{x} + \bar{A}_x)^2}{2 * \sigma^2}\right)\right), \quad (9)$$

где \bar{x} – безразмерная координата поперёк стыка; \bar{A}_x – безразмерная амплитуда поперёк стыка; σ – среднеквадратичное отклонение; $m = 0$; $k = 1$; M – время насыщения; T – период сканирования.

В формуле (9), при амплитуде равной 3 и при условии, что площадь фигуры при нормальном распределении энергии, изменим пределы границ зоны насыщения $\frac{M}{T} = [0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.3; 0.4]$ и получим следующие кривые распределения энергии, показанные на рис. 7.

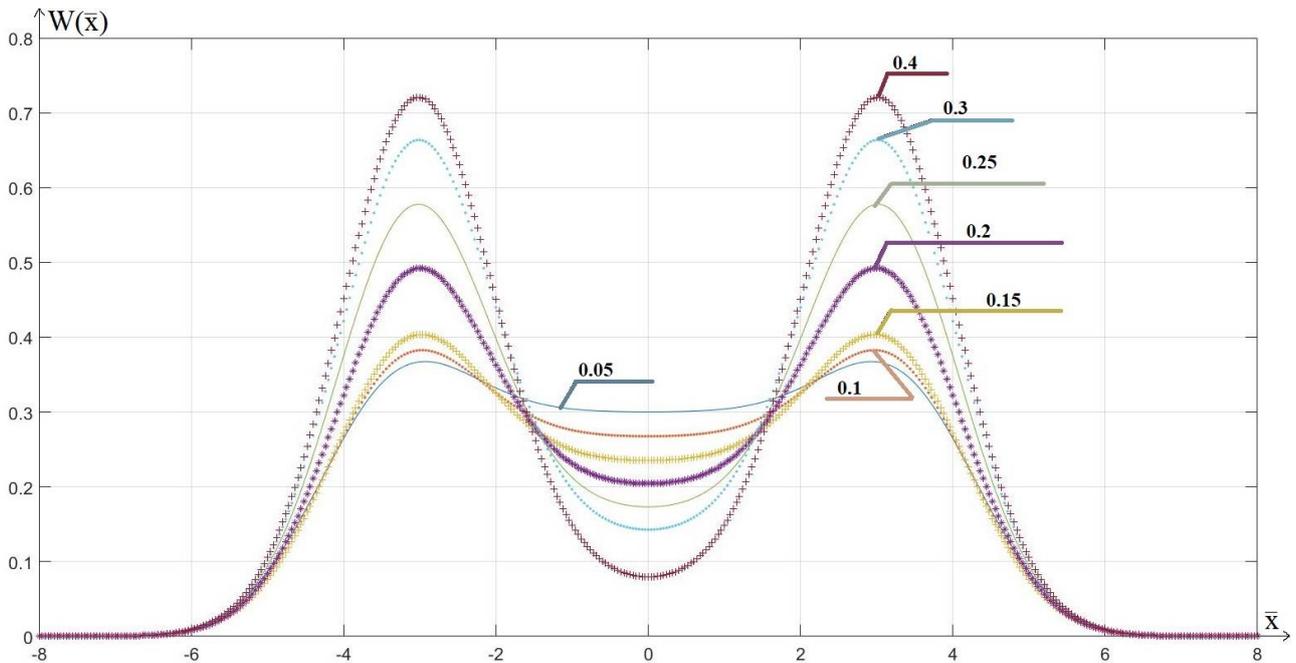


Рис. 7. Распределение энергии пучка на поверхности детали при сканировании усеченным растром и изменении границ зоны насыщения

Fig. 7. Energy distribution when changing the limits of the saturation zone

Из полученных графиков видно что, изменяя величину зоны насыщения M можно регулировать амплитуду двухгорбового распределения энергии по пятну нагрева и этим добиваться наилучшей формы сварного шва. Чтобы воспользоваться полученными расчетными характеристиками, необходимо перейти от безразмерных координат к размерным координатам. Для этого необходимо провести следующие действия [18]:

$$y = \bar{y} * \sigma; x = \bar{x} * \sigma; A = \bar{A} * \sigma; W(x) = \frac{W(\bar{x})}{\sigma}; W(y) = \frac{W(\bar{y})}{\sigma}.$$

В результате проведенных исследований была разработана программа для управления распределением энергии по пятну нагрева с помощью использования различных разверток [19].

Заключение. Можно сделать следующие выводы:

1. Для исследований по оптимизации процесса электронно-лучевой сварки целесообразно использовать сканирования электронного пучка в виде раstra, позволяющего получить устойчивую полость проплавления и высокое качество сварных соединений.

2. Форма сканирования в виде усеченного раstra позволяет получить двухгорбовое распределение энергии по координате поперек стыка, которое необходимо для формирования сварного шва с параллельными стенками и значительным радиусом в корне, исключая появление корневых дефектов.

3. Численное моделирование тепловых процессов для определения параметров ЭЛС позволит существенно сократить затраты на отработку технологий для конструкций из новых материалов и различных толщин.

Библиографические ссылки

1. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М. : Машиностроение. 1978. 239 с.

2. Собко С. А., Куликов В. А. Способ контроля электронно-лучевой сварки. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2495737> (дата обращения: 13.05.2020).

3. Системы управления электронно-лучевых установок / А. В. Щербаков, Р. В. Родякина, В. В. Новочеркасов и др. М. : Юрайт. 2018. С. 114–130.
4. Акопьянц К. С., Нестеренко В. М. Электронно-лучевая сварка сталей толщиной до 600 м с продольными колебаниями луча // Автоматическая сварка. 2002. № 9. С. 3–5.
5. Ohmine M., Hiramoto S., Jamane J. Fundamental study on the pulsed electron beam welding // Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-348-83 – S. I. 1983. 13 p.
6. Беленький В. Я. Развертка электронного луча по х-образной траектории как средство уменьшения дефектов в корне шва при ЭЛС // Автоматическая сварка. 1986. № 9. С. 35–37.
7. Барышев М. С., Редчиц А. А. Оптимизация режимов сварки колеблющимся электронным лучом // Тез. докладов 4-й Всеросс. союз. конференции по сварке цветных металлов. 1990. 34 с.
8. Zenker R. Electron beam surface treatment and multipool welding – state of the art // Proceedings of the EBEAM 2002. International Conference on High-Power Electron Beam Technology. 2002. P. 12-1–12-5.
9. Шилов Г. А., Акопьянц К. С., Касаткин О. О. Влияние частоты и диаметра круговой развертки электронного луча на проплавление при ЭЛС // Автоматическая сварка. 1983. № 8. С. 25–28.
10. Предотвращение образования корневых дефектов при ЭЛС с несквозным проплавлением глубиной до 60 мм / К. С. Акопьянц, А. В. Емченко-Рыбко, В. Ю. Непорохин и др. // Автоматическая сварка. 1989. № 4. С. 30–34.
11. Komuro Y., Punshon C. S., Gooch T. G., Blakaley P. S. Effects of process parameters on centerline solidification in EB weld // Metal Constr. 1986. No. 2. P. 104–111.
12. Прибор управления электронным пучком при сварке / А. М. Васильев, В. А. Гончаров, Б. Г. Кривков и др. // Судостроительная промышленность. Серия «Сварка». 1988. № 6. С. 11–12.
13. Mara C. I., Funk E. R., McMaster R. C., Pence P. E. Penetration mechanism of electron beam Welding and spiking phenomenon // Welding Journal. 1974. Vol. 53, No. 6. С. 246–251.
14. Béraud N., Vignat F., Villeneuve F., Dendievel R. New trajectories in Electron Beam Melting manufacturing to reduce curling effect // Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 2014. P. 738–743.
15. Экспериментальные исследования по оптимизации технологии электронно-лучевой сваркой алюминиевых сплавов / Ю. Н. Серегин, В. Д. Лаптенко, Н. В. Успенский и др. // Технологии и оборудование ЭЛС-2011. 2011. С. 71–80.
16. Seregin Yu. N., Laptenok V. D., Murygin A. V., Bocharov A. N. Experimental research on electron-beam welding technology with a scanning electron beam // 21st Int. Sci. Conf. Resnetev Readings-2017. 2019. Vol. 467. 8 p.
17. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М. : Высш. шк., 1999. 576 с.
18. Kurashkin S. O., Laptenok V. D., Murygin A. V., Seregin Yu. N. Analytical characteristics of the electron beam distribution density over the heated spot for optimizing the electron-beam welding process // Welding in Russia 2019: State-of-the-Art and Perspectives. 2019. Vol. 681. 7 p.
19. Курашкин С. О., Серегин Ю. Н., Тынченко В. С., Петренко В. Е., Мuryгин А. В. Программа для формирования траектории развертки электронного пучка в виде синусоиды при электронно-лучевой сварке. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020611327. Дата регистрации: 19 февраля 2020.

References

1. Rykalin N. N., Zuev I. V., Uglov A. A. *Osnovy elektronno-luchevoy obrabotki materialov* [Fundamentals of electron beam processing of materials]. Moscow, Engineering, Publ., 1978, 239 p.
2. Sobko S. A., Kulikov V. A. *Sposob kontrolya elektronno-luchevoy svarki* [The method of control of electron-beam welding]. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2495737> (accessed 13.05.2020).

3. Shcherbakov A. B., Rodyakina R. V., Novokreschenov V. V., Lastoviryia V. N. *Sistemy upravleniya elektronno-luchevykh ustanovok* [Technology of material processing. Equipment of electron-beam complexes]. Moscow, Yurayt Publ., 2018, P. 114–130.
4. Akopianc K. S., Nesterenko V. M. [Electron-beam welding of steels up to 600 m thick with longitudinal oscillations of the beam]. *Avtomaticheskaya svarka*. 2002, No. 9, P. 3–5 (In Russ.).
5. Ohmine M., Hiramoto S., Jamane J. Fundamental study on the pulsed electron beam welding // Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-348-83 – S. I. 1983, 13 p.
6. Belenkiy V. Ya. [Scanning of an electron beam along an x-shaped trajectory as a means of reducing defects in the root of a weld in EBW]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1986, No. 9, P. 35–37. (In Russ.).
7. Barishev M. S., Redchic A. A. [Optimization of welding modes by oscillating electron beam]. *Tez. dokladov 4-y Vserocs. soyuz. konferentsii po svarke tsvetnykh metallov* [Abstracts of the 4th. Rus. Union Conf. on welding of non-ferrous metals]. 1990, 34 p. (In Russ.).
8. Zenker R. Electron beam surface treatment and multipool welding – state of the art. *Proceedings of the EBEAM 2002. International Conference on High-Power Electron Beam Technology*. 2002, P. 12-1–12-5.
9. Shilov G. A., Akopianc K. S., Kasatkin O. O. [Influence of the frequency and diameter of the circular scan of the electron beam on the penetration in EBW]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1983, No. 8, P. 25–28 (In Russ.).
10. Akopianc K. S., Emchenko-Ribko A. V., Neporohin V. Yu., Shilov G. A. [Prevention of the formation of root defects in EBW with non-penetration of up to 60 mm depth]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1989, No. 4, P. 30–34 (In Russ.).
11. Komiro Y., Punshon C. S., Gooch T. G., Blakaley P. S. Effects of process parameters on centerline solidification in EB weld. *Metal Constr.* 1986, No. 2, P. 104–111.
12. Vasil'ev A. M., Goncharov V. A., Krivkov B. G., Solyankin V. V., Sharonov N. I. [Electronic beam control device by welding]. *Sudostroitel'naya promyshlennost'. Seriya Svarka*. 1988, No. 6, C. 11–12 (In Russ.).
13. Mara C. I., Funk E. R., McMaster R. C., Pence P. E. Penetration mechanism of electron beam Welding and spiking phenomenon. *Welding Journal*. 1974, Vol. 53, No. 6, C. 246–251.
14. Béraud N., Vignat F., Villeneuve F., Dendievel R. New trajectories in Electron Beam Melting manufacturing to reduce curling effect. *Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems*. 2014, P. 738–743.
15. Seregin Yu. N., Laptенок V. D., Uspenskiy N. V., Nikitin V. P. [Experimental research on the optimization of the technology of electron-beam welding of aluminum alloys]. *Tekhnologii i oborudovanie ELS-2011*. 2011. P. 71–80 (In Russ.).
16. Seregin Yu. N., Laptенок V. D., Murygin A. V., Bocharov A. N. Experimental research on electron-beam welding technology with a scanning electron beam. *21st Int. Sci. Conf. Resetnev Readings-2017*. 2019, Vol. 467, 8 p.
17. Venttsel' Ye. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1999, 576 p.
18. Kurashkin S. O., Laptенок V. D., Murygin A. V., Seregin Yu. N. Analytical characteristics of the electron beam distribution density over the heated spot for optimizing the electron-beam welding process. *Welding in Russia 2019: State-of-the-Art and Perspectives*. 2019, Vol. 681, 7p.
19. Kurashkin S. O., Seregin Yu. N., Tynchenko V. S., Petrenko V. E., Myrugin A. V. [The program for the formation of the scanning path of the electron beam in the form of a sine wave in electron beam welding]. *Certificate of state registration of a computer program № 2020611327*. 2020.

Курашкин Сергей Олегович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. Email: scorpion_ser@mail.ru.

Серегин Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ИУС; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. Email: ius_ceregin@mail.ru.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой ИУС; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. Email: avm514@mail.ru.

Петренко Вячеслав Евгеньевич – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. Email: dpblra@inbox.ru.

Kurashkin Sergei Olegovich – graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Email: scorpion_ser@mail.ru.

Seregin Yrui Nikolaevich – Cand. Sc., assistant professor of department of ICS; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Email: ius_ceregin@mail.ru.

Murygin Aleksandr Vladimirovich – D. Sc., administrator of department of ICS of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Email: avm514@mail.ru.

Petrenko Vyacheslav Evgenievich – graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Email: dpblra@inbox.ru.