

DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.03

УДК 621.791.72

**Е.С. Саломатова¹, Т.В. Ольшанская¹, Д.Н. Трушников¹,
В.Я. Беленький¹, Г.М. Младенов²**

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, г. Пермь, Россия

²Болгарская академия наук, г. София, Болгария

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ СВАРКИ НА ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ С ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

Электронный луч является практически безынерционным источником тепловой энергии. Возможность тонкой регулировки мощности, фокусировки и положения луча позволяет широко использовать системы управления лучом и программирования режимов сварки, обеспечивающие качественное формирование сварного шва. Используя системы управления лучом, возможно разработать новые технологические решения, такие, например, как динамическое расщепление электронного луча, позволяющее лучу одновременно воздействовать в нескольких обрабатываемых зонах или совмещать такие процессы, как сварка и термообработка. В работе приведены результаты экспериментальных исследований снижения концентрации легкоиспаряемых легирующих элементов в сварных швах, полученных при электронно-лучевой сварке алюминиевого сплава АМг6 с осцилляцией электронного луча. Получены регрессионные уравнения зависимости концентрации легкоиспаряемых компонентов сплава АМг6 от параметров режимов сварки. На основе результатов рентгенофлуоресцентного анализа проведена оценка истощения сплава легкоиспаряемыми компонентами в различных зонах сварного шва. Установлено, что с увеличением тока электронного луча происходит уменьшение концентрации магния в шве, однако с увеличением скорости сварки концентрация магния увеличивается приблизительно на 2–3 %. При сравнении концентрации магния в швах, выполненных статическим и осциллирующим лучом, наблюдается снижение концентрации магния при осцилляции электронного луча в среднем на 4 %. При электронно-лучевой сварке статическим лучом наблюдается истощение магния в пределах 7 % от первоначального содержания в сплаве, а в случае осцилляции электронного луча концентрация составляет приблизительно 10 %, причем траектория перемещения электронного луча (продольная и поперечная) не влияет на интенсивность обеднения сплава легкоиспаряющимся компонентом – магнием.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, алюминиевый сплав, легкоиспаряемые компоненты сплава, рентгенофлуоресцентный анализ, продольная и поперечная осцилляция электронного луча, специфические дефекты сварных соединений, поперечные макрошлифы, концентрация магния в сварных соединениях, регрессионные уравнения.

**E.S. Salomatova¹, T.V. Ol'shanskaia¹, D.N. Trushnikov¹,
V.Ia. Belenkii¹, G.M. Mladenov²**

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation,

²Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE WELDED JOINTS IN ELECTRON BEAM WELDING, ELECTRON BEAM WITH OSCILLATION

The electron beam is almost inertialess source of thermal energy. The ability to fine-tune the power and focus of the beam allows extensive use of beam control system and the programming of welding, providing high-quality formation of the weld. Using a beam control system may create new technological solutions, such as dynamic splitting of the electron beam, allowing the beam to simultaneously affect several treated areas, or to combine the processes such as welding and heat treatment. The results of experimental studies is a volatile reducing the concentration of alloying elements in the weld seams obtained by electron-beam welding of aluminum alloy AMg6 with oscillation of the electron beam. Obtained regression equations of the concentration is a volatile alloy components AMg6 of the welding parameters. Based on the results of X-ray analysis of the alloy assess depletion of volatile components in the various zones of the weld. It is found that with increase of the electron beam current, decreases the concentration of magnesium in the weld, however, increasing the welding speed, the concentration of magnesium is increased by approximately 2–3 %. By comparing the concentration of magnesium in the seams made static and oscillating beam, a decrease in the concentration of magnesium by the oscillation of the electron beam on average by 4 %. Electron beam welding static beam observed depletion magnesium within 7 % of the original content in the alloy, and in case of oscillations of the electron beam is about 10 %, and the trajectory of movement of the electron beam (longitudinal and transverse) does not affect the rate of depletion of the alloy volatile component – magnesium.

Keywords: electron-beam welding, aluminum alloy, volatile alloy components, X-ray fluorescence analysis, longitudinal and transverse oscillation of the electron beam, specific defects of welded joints, cross macrosections, concentration of magnesium in welded joints, regression equations.

Электронный луч является практически безынерционным источником тепловой энергии. Возможность тонкой регулировки мощности, фокусировки и положения луча позволяет широко использовать системы управления лучом и программирования режимов сварки, обеспечивающие качественное формирование сварного шва [1].

Используя системы управления лучом, можно создать новые технологические решения, такие, например, как динамическое расщепление электронного луча, позволяющее лучу одновременно воздействовать в нескольких обрабатываемых зонах или совмещать такие процессы, как сварка и термообработка [2].

На сегодняшний день ведется большое количество работ, рассматривающих возможность динамического воздействия на электронный луч и влияние параметров этого воздействия на геометрию сварного шва. При этом можно выделить три основных технологических приема:

- 1) осцилляция электронного луча;
- 2) сканирование фокуса электронного луча;
- 3) расщепление электронного луча.

Колебательные перемещения луча предоставляют дополнительную возможность влиять на процесс сварки, а значит, и на образование сварного шва. При этом электронный луч, обладающий неизменной удельной мощностью, последовательно воздействует на ряд точек в непосредственной окрестности центра сварки [1].

В электронно-лучевой установке осцилляция осуществляется за счет использования отклоняющей системы, которая представляет собой две пары пространственно ориентированных катушек. При подаче на катушки постоянного тока получается постоянное магнитное поле, которое будет отклонять электронный луч на определенный постоянный угол. Если же подать на катушки переменный ток, то возникает переменное магнитное поле, обеспечивающее колебания электронного луча.

Если амплитуда осцилляции электронного луча мала, то пароголовый канал, формирующийся в металле при воздействии электронного луча с высокой концентрацией мощности, практически не изменяется в размере, а при более высокой амплитуде осцилляции происходит его расширение. В результате колебательного воздействия электронного луча усиливается дегазация металла ванны, что способствует уменьшению пористости шва и подавлению корневых дефектов [1, 3].

Амплитуда осцилляции электронного луча, наиболее часто используемая при электронно-лучевой сварке, находится в пределах 1–3 мм, а частота колебаний – 50–500 Гц. В большинстве случаев при осцилляции электронного луча происходит уменьшение глубины проплавления. Для сохранения требуемой глубины проплавления необходимо увеличивать ток луча.

Траектории колебаний электронного луча, используемого при сварке, разнообразны, но наиболее применяемыми являются линейные, круговые и X-образные. Эффект от развертки электронного луча проявляется в изменении мгновенного и усредненного по периоду распределения плотности мощности, вводимой в металл. Соответственно меня-

ются характер гидродинамических процессов и конфигурация сварочной ванны [4, 5]. Исследованиям влияния траектории осцилляции на формирование сварных швов посвящен целый ряд работ [6–11], в которых отмечается образование более скругленной формы корня шва с отсутствием дефектов, выравнивание структуры металла по глубине шва.

Электронно-лучевая сварка с вращением электронного луча по круговой траектории позволяет добиться существенного уменьшения образования корневых дефектов в сварных швах, однако ввиду того, что плотность мощности в центральной части зоны нагрева мала, использование круговых колебаний приводит к значительному уменьшению глубины проплавления по сравнению со сваркой статическим лучом [12].

Колебания электронного луча по X-образной траектории целесообразно производить при оптимальной фокусировке, обеспечивающей при заданных режимах сварки максимальную глубину проплавления (рис. 1). Такая фокусировка может быть установлена по максимальному значению амплитуды колебаний переменной составляющей спектра тока в цепи свариваемого изделия или коллектора с частотой в диапазоне 3–15 кГц как при неподвижном, так и при осциллирующем луче [11].

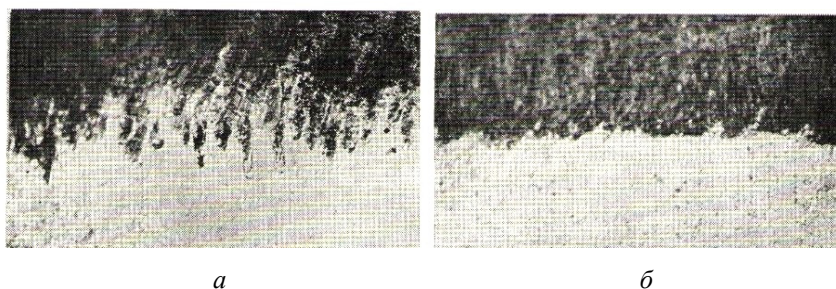


Рис. 1. Продольные макрошлифы корневой части швов, полученных:
а – без колебаний луча; *б* – с колебаниями по X-образной траектории [11]

Выбор вида осцилляции, ее частоты и амплитуды при управлении формированием сварного шва осуществляется только на основании экспериментальных данных. Строго обоснованного объяснения предпочтения той или иной формы развертки перед остальными на данный момент не существует [1, 2].

Авторы работы [13] провели исследования, посвященные изучению процесса электронно-лучевой сварки с применением осцилляции электронного луча, где рассматривается влияние продольной осцилля-

ции на форму канала проплавления, протекание процессов тепломассообмена и параметры швов для разработки методических рекомендаций. Представлена численная трехмерная математическая модель электронно-лучевой сварки на основе уравнений теплопроводности и Навье–Стокса с учетом фазовых переходов на границе раздела твердой и жидкой фаз и термокапиллярной конвекции (эффект Марангони). Форма канала проплавления определялась на основе экспериментальных данных по параметрам вторично-эмиссионного сигнала с помощью метода синхронного накопления [14].

Целью данной работы является определение зависимости концентрации в сплаве легкоиспаряющегося компонента – магния при электронно-лучевой сварке сплава АМгб с осцилляцией электронного луча.

Для сварочных проходов были выбраны параметры режимов электронно-лучевой сварки, представленные в табл. 1. В данной таблице также изображена макроструктура зон проплавления.

Далее проводился рентгенофлуоресцентный анализ поперечных шлифов с разделением сварного шва на три участка [10] (рис. 2, табл. 2).

Для наглядности полученных данных результаты экспериментов представлены в виде графиков с разделением по параметрам режимов сварки (рис. 3). На рис. 3 изображены изменения концентрации магния по глубине зоны проплавления. Режимы 1–4 относятся к сварке статическим лучом, 5–8 – к сварке с продольной осцилляцией и 9–12 – к сварке с поперечной осцилляцией электронного луча. Пунктирными линиями изображены режимы с током электронного луча 50 мА.









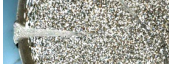


С увеличением тока электронного луча происходит уменьшение концентрации магния в шве, однако с увеличением скорости сварки концентрация магния увеличивается примерно на 2–3 %.

При сравнении концентрации магния в швах, выполненных статическим и осциллирующим электронным лучом, наблюдается снижение концентрации магния примерно на 4 % при использовании осциллирующего электронного луча.

При сварке статическим электронным лучом наблюдается истощение магния в пределах 7 % от первоначального содержания в сплаве, а при сварке с осцилляцией электронного луча концентрация составляет примерно 10 %, причем траектория перемещения электронного луча (продольная и поперечная) не влияет на интенсивность обеднения сплава магнием.

Таблица 1

Макроструктура зон проплавления и режимы, на которых они были получены

Номер режима	Макроструктура	$I_{св}$, мА	$v_{св}$, мм/с	Вид воздействия электронного луча	Номер режима	Макроструктура	$I_{св}$, мА	$v_{св}$, мм/с	Вид воздействия электронного луча	Номер режима	Макроструктура	$I_{св}$, мА	$v_{св}$, мм/с	Вид воздействия электронного луча				
1		40	5	Статический луч	5		40	5	ЭЛС с продольной осцилляцией, ($A = 0,5$ мм)	9		40	5	ЭЛС с поперечной осцилляцией, ($A = 0,5$ мм)				
2		40	10		6		40	10		10		40	10		12		50	10
3		50	5		7		50	5		11	-	50	5		11	-	50	5
4		50	10		8		50	10		12	-	50	10		12	-	50	10

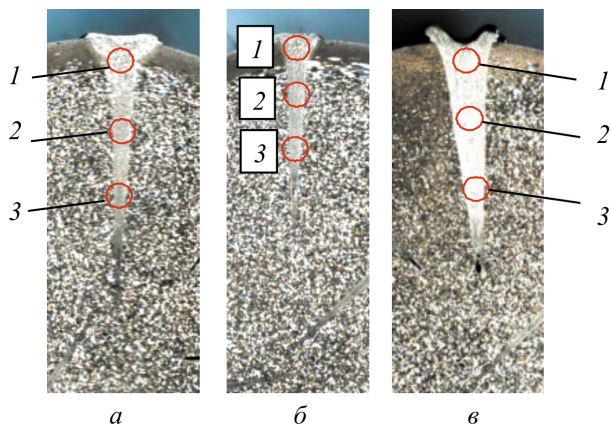


Рис. 2. Поперечные макрошлифы сварных швов, полученных при сварке сплава АМг6 статическим электронным лучом (а) и с использованием продольной (б) и поперечной (в) осцилляции электронного луча (цифрами обозначены характерные участки сварного шва)

Таблица 2

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа поперечного сечения зон проплавления

Номер режима	Содержание магния, отн. ед.					в основном металле	в сплаве, допустимое				
	в зоне 1	в зоне 2	в зоне 3	в шве, среднее							
Швы, выполненные статическим лучом											
1	0,0540	0,0541	0,0554	0,0545		0,0584	0,058–0,068				
2	0,0541	0,0543	0,0557	0,0547							
3	0,0537	0,0539	0,0546	0,0541							
4	0,0539	0,0541	0,0550	0,0543							
Швы, выполненные с продольной осцилляцией электронного луча											
5	0,0519	0,0537	0,0549	0,0535				0,0584	0,058–0,068		
6	0,0535	0,0542	0,0551	0,0542							
7	0,0516	0,0520	0,0539	0,0525							
8	0,0520	0,0523	0,0542	0,0528							
Швы, выполненные с поперечной осцилляцией электронного луча											
9	0,0518	0,0535	0,0547	0,0533						0,0584	0,058–0,068
10	0,0532	0,0539	0,0549	0,0540							
11	0,0514	0,0521	0,0542	0,0526							
12	0,0517	0,0526	0,0557	0,0533							

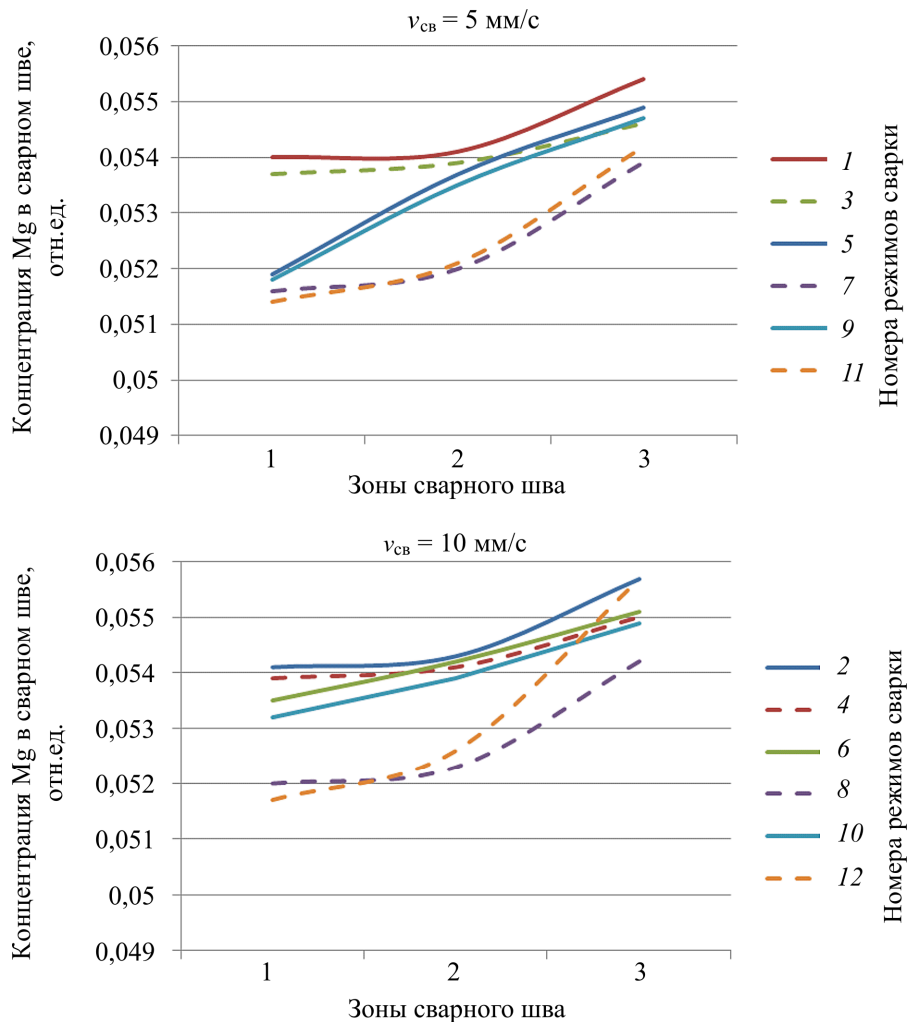


Рис. 3. Графики изменения концентрации магния по глубине сварного шва в зависимости от изменения параметров режимов сварки

На основании полученных данных были построены регрессионные зависимости концентрации магния в швах при электронно-лучевой сварке с различными видами осцилляции электронного луча и при различных параметрах режима сварки.

Регрессионное уравнение для определения содержания магния при электронно-лучевой сварке с продольной и поперечной осцилляцией луча имеет вид

$$SMg = 5,412 + 0,067 \cdot v_{cv} - 1,129 \cdot I_{л} \cdot v_{cv} - 32,355 \cdot I_{л} \cdot A + 2,164 \cdot A^2,$$

где SMg – концентрация магния, %; $v_{св}$ – скорость сварки, мм/с; $I_{л}$ – ток луча, мА; A – амплитуда осцилляции электронного луча, мм.

По полученным регрессионным уравнениям зависимости концентрации магния от параметров режимов сварки были построены графики, которые приведены на рис. 4.

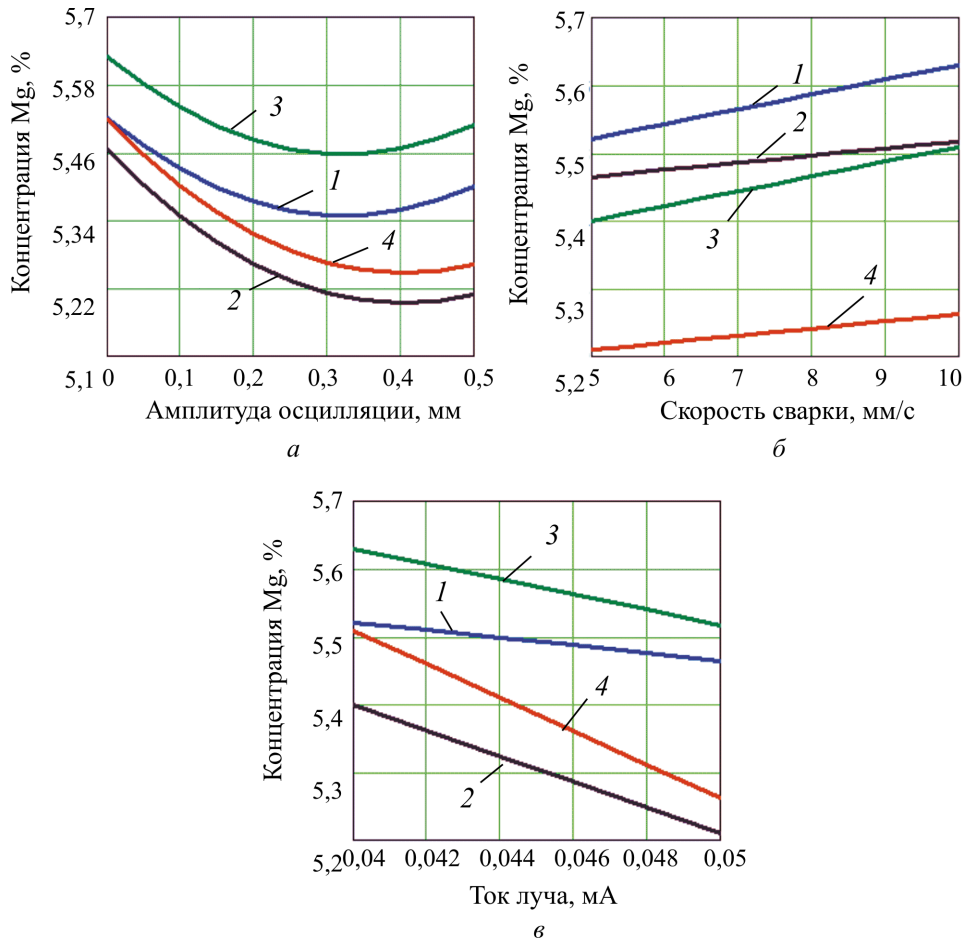


Рис. 4. Влияние параметров режимов сварки на изменение концентрации магния в сварных швах, полученных с продольной и поперечной осцилляцией электронного луча:

- a – 1 – $v_{св} = 5$ мм/с, $I_{св} = 40$ мА; 2 – $v_{св} = 5$ мм/с, $I_{св} = 50$ мА; 3 – $v_{св} = 10$ мм/с, $I_{св} = 40$ мА; 4 – $v_{св} = 10$ мм/с, $I_{св} = 50$ мА; A изменяется от 0 до 0,5 мм;
 b – 1 – $a = 0$ мм, $I_{св} = 40$ мА; 2 – $a = 0$ мм, $I_{св} = 50$ мА; 3 – $a = 0,5$ мм, $I_{св} = 40$ мА; 4 – $a = 0,5$ мм, $I_{св} = 50$ мА; $v_{св}$ изменяется от 5 до 10 мм/с;
 v – 1 – $v_{св} = 5$ мм/с, $a = 0$ мм; 2 – $v_{св} = 5$ мм/с, $a = 0,5$ мм; 3 – $v_{св} = 10$ мм/с, $a = 0$ мм; 4 – $v_{св} = 10$ мм/с, $a = 0,5$ мм; $I_{св}$ изменяется от 40 до 50 мА

Как видно из графиков, с увеличением тока электронного луча происходит уменьшение концентрации магния в шве, однако с увеличением скорости сварки концентрация магния увеличивается приблизительно на 2–3 %. При сравнении концентрации магния в швах, выполненных статическим и осциллирующим лучом, наблюдается снижение концентрации магния при осцилляции электронного луча в среднем на 4 %. При электронно-лучевой сварке статическим лучом наблюдается истощение магния в пределах 7 % от первоначального содержания в сплаве, в случае осцилляции электронного луча это составляет приблизительно 10 %, причем траектория перемещения электронного луча (продольная и поперечная) не влияет на интенсивность обеднения сплава легкоиспаряющимся компонентом – магнием.

Получены регрессионные зависимости концентрации магния в сварных швах при электронно-лучевой сварке сплава АМгб с различными видами осцилляции электронного луча при различных параметрах режима сварки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-08-96008 р_урал_а, 13-08-00397А) и при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части госзадания № 1201460538.

Список литературы

1. Глазов С.И., Люшинский А.В. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки. – Рыбинск: Рыбинск. дом печати, 2001. – С. 123–233.
2. Литвинов В.В., Ярмилко А.В. Многопараметрическое адаптивное управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки // Математичні машини і системи. – Киев, 2013. – № 2 – С. 130–138.
3. Masny H. Multi-Beam Technology in Electron Beam Welding // ISFF – Welding and Joining Institute. – 2006. – Vol. 34. – P. 1–4.
4. Peng-Fei Fua, Zhi-Yong Mao Temperature field modeling and microstructure analysis of EBW with multi-beam for near a titanium alloy // Huazhong University of Science and Technology. – 2013. – Vol. 102. – P. 54–62.
5. Zenker R. Modern thermal electron beam processes – research results and industrial application // La Metallurgia Italiana. – 2009. – Iss. 3. – P. 1–8.

6. Effect of electron beam oscillation on the formation of the structure and properties of the welded joint / T.V. Ol'shanskaya, D.N. Trushnikov, V.Y. Belen'kii, G.M. Mladenov // *Welding International*. – 2013. – Т. 27, № 11. – P. 881–885.

7. Язовских В.М., Ольшанская Т.В. Расчет формы шва и направление роста кристаллов при электронно-лучевой сварке в системе MATHCAD // *Вестник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций*. – 2000. – № 3. – С. 156–163.

8. Влияние осцилляции электронного пучка на формирование структуры и свойства сварных швов / Т.В. Ольшанская, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Г.М. Младенов // *Сварочное производство*. – 2012. – № 11. – С. 13–18.

9. Особенности кристаллизации металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / В.М. Язовских, Т.В. Ольшанская, Р.А. Мусин, В.Я. Беленький // *Сварочное производство*. – 1999. – № 1. – С. 3–9.

10. Язовских В.М., Ольшанская Т.В. Влияние развертки луча на формирование макроструктуры металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением // *Вестник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций*. – 1999. – № 2. – С. 225–235.

11. Язовских В.М., Беленький В.Я., Ольшанская Т.В. Электронно-лучевая сварка с колебаниями луча по X-образной траектории // *Сварочное производство*. – 1994. – № 6. – С. 5–10.

12. Volpp J., Vollertseen F. Modeling keyhole oscillations during laser deep penetration welding at different spatial laser intensity distributions // *Production Engineering Research and Development*. – 2015. – Vol. 9. – P. 167–178.

13. Численное моделирование процесса электронно-лучевой сварки с продольной осцилляцией луча / Г.Л. Пермяков, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Т.В. Ольшанская // *Сварка и диагностика: сб. докл. междунар. форума / Мин-во образования и науки РФ; Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; УрО РАН, Ин-т физики металлов; правительство Свердл. обл.; администрация г. Екатеринбург*. – Екатеринбург, 2015. – С. 139–145.

14. Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ya. Investigation of the formation of the secondary current signal in plasma in electron beam welding with oscillations of the electron beam // *Welding International*. – 2013. – Vol. 27, iss. 11. – P. 877–880.

References

1. Glazov S.I., Liushinskii A.V. Osnovy tekhnologii elektronno-luchevoi i diffuzionnoi svarki [The basic technology of electron beam and diffusion welding]. Rybinskii dom pechati, 2001, pp. 123-233.

2. Litvinov V.V., Iarmilko A.V. Mnogoparametricheskoe adaptivnoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom elektronno-luchevoi svarki [Multivariable adaptive control process of electron beam welding]. *Matematichni mashini i sistemi*. Kiev, 2013, no. 2, pp. 130-138.

3. Masny H. Multi-beam technology in electron beam welding. *ISFF – Welding and Joining Institute*, 2006, vol. 34, pp. 1-4.

4. Peng-Fei Fua, Zhi-Yong Mao. Temperature field modeling and microstructure analysis of EBW with multi-beam for near a titanium alloy. *Huazhong University of Science and Technology*, 2013, vol. 102, pp. 54-62.

5. Zenker R. Modern thermal electron beam processes – research results and industrial application. *La Metallurgia Italiana*, 2009, iss. 3, pp. 1-8.

6. Ol'shanskaya T.V., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Y., Mladenov G.M. Effect of electron beam oscillation on the formation of the structure and properties of the welded joint. *Welding International*, 2013, vol. 27, no. 11, pp. 881-885.

7. Iazovskikh V.M., Ol'shanskaia T.V. Raschet formy shva i napravlenie rosta kristallov pri elektronno-luchevoi svarke v sisteme MATHCAD [Calculation of weld shape and the direction of crystal growth in electron beam welding system MATHCAD]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika i tekhnologiya materialov i konstruksii*, 2000, no. 3, pp. 156-163.

8. Ol'shanskaia T.V., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ia., Mladenov G.M. Vliianie ostsilliatsii elektronnoogo puchka na formirovanie struktury i svoistva svarykh shvov [Effect of the oscillations of the electron beam on the structure and properties of welded joints]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no. 11, pp. 13-18.

9. Iazovskikh V.M., Ol'shanskaia T.V., Musin R.A., Belen'kii V.Ia. Osobnosti kristallizatsii metalla shva pri elektronno-luchevoi svarke s glubo-

kim proplavleniem [Features weld metal crystallization in electron beam welding with deep penetration]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1999, no. 1, pp. 3-9.

10. Iazovskikh V.M., Ol'shanskaia T.V. Vliianie razvertki lucha na formirovanie makrostruktury metalla shva pri elektronno-luchevoi svarke s glubokim proplavleniem [Impact beam scan on the formation of the microstructure of the weld metal during electron beam welding with deep penetration]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika i tekhnologiya materialov i konstruksii*, 1999, no. 2, pp. 225-235.

11. Iazovskikh V.M., Belen'kii V.Ia., Ol'shanskaia T.V. Elektronno-luchevaia svarka s kolebaniiami lucha po Kh-obraznoi traektorii [Electron beam welding with the vibrations of the beam of X-shaped trajectory]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1994, no. 6, pp. 5-10.

12. Volpp J., Vollertseen F. Modeling keyhole oscillations during laser deep penetration welding at different spatial laser intensity distributions. *Production Engineering Research and Development*, 2015, vol. 9, pp. 167-178.

13. Permiakov G.L., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ia., Ol'shanskaia T.V. Chislennoe modelirovanie protsessa elektronno-luchevoi svarki s prodol'noi ostsilliatsiei lucha [Numerical simulation of electron beam welding with a longitudinal oscillation of the beam]. *Sbornik докладов mezhdunarodnogo foruma "Svarka i diagnostika"*. Ekaterinburg, 2015, pp. 139-145.

14. Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ya. Investigation of the formation of the secondary current signal in plasma in electron beam welding with oscillations of the electron beam. *Welding International*, 2013, vol. 27, iss. 11, pp. 877-880.

Получено 28.10.2015

Об авторах

Саломатова Екатерина Сергеевна (Пермь, Россия) – аспирант, младший научный сотрудник кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: weld-katy@mail.ru.

Ольшанская Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: tvob6@rambler.ru.

Трушников Дмитрий Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, начальник управления науки и инноваций Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: trdimitr@yandex.ru.

Беленький Владимир Яковлевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: mtf@pstu.ru.

Младенов Георгий Михайлович (София, Болгария) – доктор физических наук, профессор, член-корреспондент Болгарской академии наук.

About the authors

Ekaterina S. Salomatova (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Junior Researcher, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: weld-katy@mail.ru.

Tatyana V. Ol'shanskaia (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: tvo66@rambler.ru.

Dmitrii N. Trushnikov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Head of the Department of Science and Innovation, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: trdimitr@yandex.ru.

Vladimir Ia. Belenkii (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: mtf@pstu.ru.

Georgii M. Mladenov (Sofia, Bulgaria) – Doctor of Physical Sciences, Professor, Corresponding Member, Bulgarian Academy of Sciences.