

DOI: 10/15593/2224-9877/2016.3.07

УДК 621.791.722

С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Г.Л. ПермяковПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ОСОБЕННОСТИ СИГНАЛА ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ С ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

В ряде случаев целесообразно применение режима полного проплавления металла свариваемого изделия при электронно-лучевой сварке, так как это обеспечивает более качественное формирование сварного шва. Однако из-за колебательных процессов в канале проплавления при сварке для поддержания режима полного проплавления необходимо использование оперативного контроля. Осцилляция электронного луча может упростить управляющее воздействие системы контроля сквозного проплавления и повысить качество формирования корневого валика. Кроме того, осцилляция может исказить опорный сигнал для системы регулирования. Для выявления возможных особенностей структуры сигнала рентгеновского излучения, измеряемого с обратной стороны изделия, был проведен опыт электронно-лучевой сварки с осцилляцией луча по различным траекториям и одновременной регистрацией сигнала проходящего рентгеновского излучения. Использованы следующие траектории осцилляции: продольная; поперечная; кольцевая; X-образная; две параллельные линии, направленные вдоль стыка; прямоугольный растр. Полученные сварные швы были исследованы с целью определения наиболее подходящего для формирования обратного валика режима осцилляции. Основным параметром для сравнения швов служил радиус корня шва. Сравнение полученных поперечных шлифов показало, что наибольший радиус корня шва формируется при траектории осцилляции, представляющей две параллельные линии, направленные вдоль стыка, что позволяет косвенно судить о лучшем формировании корня шва при режиме сквозного проплавления. Далее была проведена обработка методом синхронного накопления сигналов рентгеновского излучения для режимов с продольной осцилляцией и разверткой луча с образованием двух линий. Было установлено, что осцилляция луча по двум параллельным линиям увеличивает общий уровень сигнала и вносит дополнительные возмущения, выраженные в появлении новых пиков уровня сигнала.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, полное проплавление, осцилляция, рентгеновское излучение, корневой валик, синхронное накопление, канал проплавления, оперативный контроль, опорный сигнал, корень шва.

S.V. Varushkin, D.N. Trushnikov, V.Ya. Belenkiy, G.L. Permyakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE FEATURES OF CONTINUOUS X-RAY SIGNAL IN ELECTRON BEAM WELDING WITH OSCILLATION OF ELECTRON BEAM

In some cases, it is advisable to use the full penetration mode in electron beam welding. Since it provides a better formation of the weld. However, due to oscillatory processes in keyhole during weld-

ing, to maintain full penetration mode requires the use of operational control. The oscillation of the electron beam can simplify the control action of full-penetration control system and improve the quality of the formation of the backside bead. Additionally, oscillation can distort the reference signal for the regulation system. In order to identify the possible features of the structure of the x-ray emission signal, an experiment of electron beam welding with oscillation of beam at various trajectories and simultaneous recording of the passing X-ray emission signal was carried out. The measurement signal produced from the backside of the workpiece. The trajectory of the oscillations: longitudinal; transverse; ring; X-shaped; two parallel lines, directed along the joint; rectangular raster. Obtained welds were investigated to determine the most appropriate mode of oscillations to the backside bead forming. The main parameter for comparison of joints served radius of root part. A comparison of the transverse section showed that the maximum radius of the joint root is formed by the trajectory of oscillations representing by two parallel lines, directed along the joint. That indirectly allows assuming better formation of root part at full-penetration mode. Further was processing of X-ray emission signal by method of simultaneous accumulation for longitudinal oscillation and oscillation representing by two parallel lines. It was found that the oscillation of the beam along two parallel lines increases the overall signal level and introduces additional disturbance, expressed by the appearance of new peaks of the signal level.

Keywords: electron beam welding, full penetration mode, oscillation, X-ray, root bead, locked-in detection, keyhole, on-line control, reference signal, weld root.

Введение

В сварных конструкциях, изготавливаемых с применением электронно-лучевой сварки (ЭЛС), широко используются сварные швы с полным проплавлением металла [1–3]. Такие швы исключают появление специфических дефектов ЭЛС, имеющих место при неполном проплавлении металла [4], являются более надежными и во многих случаях обеспечивают более высокие прочностные характеристики сварных соединений [5, 6].

Существует необходимость оперативного контроля режима полного проплавления. Это вызвано тем, что в канале проплавления, формируемом в металле электронным лучом при ЭЛС, протекают процессы, имеющие стохастический характер [7, 8]. Применяя осцилляцию электронного луча в процессе сварки, можно добиться снижения влияния автоколебательных процессов на формирование сварного шва [9, 10].

Наиболее часто режим полного проплавления стабилизируют по среднему значению сквозного тока. Главными факторами для получения качественного обратного валика является правильный выбор постоянной времени цепи интегрирования и уровня значения проходящего тока относительно полного тока луча. Использование в качестве параметра сквозного тока числа импульсов сквозного тока на 1 мм шва позволяет исключить проблемы, связанные с выбором уровня значений проходящего тока относительно полного тока луча и постоянной времени в цепи интегрирования. Однако точность регулирования в этом

случае зависит от параметров входных фильтров измерительной системы и отношения величины сигнала к порогам ограничения ее формирующего каскада. Кроме того, в качестве параметра сквозного тока может быть использована усредненная продолжительность импульса, когда величина скважности делится на количество импульсов за единицу времени [11–13].

Однако сигнал проходящего тока возникает только в момент сквозного проплавления, что делает невозможным плавное регулирование или регулирование процесса ЭЛС с частичным проплавлением. В свою очередь, использование рентгеновского излучения для сигнала обратной связи системы регулирования позволяет производить плавное регулирование или регулирование процесса с частичным проплавлением. А структура сигнала рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке статичным лучом позволяет использовать датчик рентгена в системе автоматического проплавления без значительной модернизации такой системы. Также в настоящее время ведутся исследования возможности контроля режима полного проплавления с помощью датчиков, установленных над зоной сварки [14, 15]. Такой подход в значительной степени зависит от колебательных процессов в канале проплавления [16].

Кроме того, при ЭЛС с полным проплавлением металла для качественного формирования корневого валика наиболее подходят швы с эллиптической формой корневой части сварного шва [17]. При таком формировании шва информационный сигнал для системы регулирования может значительно отличаться от сигнала при формировании шва с малым радиусом корневой части шва. Косвенно оценить возможность качественного формирования корневого валика при ЭЛС с полным проплавлением можно посредством измерения радиуса корня шва при ЭЛС с частичным проплавлением.

Целью данной работы являлся анализ геометрии зон проплавления в металле при различных видах динамического воздействия на электронный пучок и оценка параметров сигнала вторичного рентгеновского излучения, регистрируемого с обратной стороны свариваемого изделия при формировании сварного шва.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на электронно-лучевой сварочной установке с энергетическим агрегатом ЭЛА-6ВЧ. В качестве образцов использовались цилиндрические образцы диаметром 160 мм и толщиной стенки 10 мм из стали 12Х18Н10Т. В процессе сварки производилась регистрация рентгеновского излучения с обратной стороны изделия. В качестве датчика рентгеновского излучения использовался сцинтилляционный детектор на основе монокристалла активированного йодистого цезия и кремниевый фотоэлектронный умножитель. Режимы ЭЛС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры режимов сварки

Номер режима	$U_{\text{вск}}$, кВ	$I_{\text{св}}$, мА	$v_{\text{св}}$, мм/с	Положение фокального пятна	Траектория осцилляции луча
1	60	40	5	на поверхности	Без осцилляции
2	60	45	5	на поверхности	Продольная* (амплитуда 1,6 мм, частота 810 Гц)
3	60	50	5	на поверхности	Поперечная* (амплитуда 1,6 мм, частота 810 Гц)
4	60	54	5	на поверхности	Кольцевая развертка (амплитуда 1,6 мм, частота 810 Гц)
5	60	44	5	на поверхности	Кольцевая развертка (амплитуда 1,0 мм, частота 810 Гц)
6	60	48	5	на поверхности	X-образная развертка** (амплитуда 1,6 мм, частота 810 Гц)
7	60	44	5	на поверхности	X-образная развертка** (амплитуда 1,0 мм, частота 810 Гц)
8	60	55	5	на поверхности	X-образная развертка* (амплитуда 1,6 мм, частота 810 Гц)

Окончание табл. 1

Номер режима	$U_{\text{уск}}$, кВ	$I_{\text{св}}$, мА	$v_{\text{св}}$, мм/с	Положение фотокатодного пятна	Траектория осцилляции луча
9	60	49	5	на поверхности	X-образная развертка* (амплитуда 1,0 мм, частота 810 Гц)
10	60	56	5	на поверхности	Развертка с формированием двух параллельных линий по обе стороны стыка*, длина линий 1,6 мм (частота 810 Гц), расстояние между линиями 1 мм (частота переключения 8 кГц)
11	60	50	5	на поверхности	Прямоугольный растр*, длина вдоль стыка 1,6 мм (частота 810 Гц), ширина 1 мм (частота 8 кГц)

* Линейное пилообразное изменение сигнала в отклоняющей системе.

** Синусоидальное изменение сигнала в отклоняющей системе.

После каждого сварочного прохода производилось охлаждение образца. По окончании опытов были выполнены поперечные макрошлифы для каждого режима.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена конфигурация поперечного сечения сварных швов, полученных при сварочных проходах с режимами, указанными в табл. 1. Эти швы можно условно разделить на три группы:

1. Швы с кинжальным проплавлением (№ 1–3, 5, 7). Кроме шва, выполненного стационарным пучком, сюда можно отнести швы, полученные со следующими видами разверток: линейной продольной осцилляцией, X-образной и кольцевой развертками малой амплитудой.

2. Швы с конусной формой шва (№ 6, 8, 9). Швы, выполненные электронным пучком с разверткой по X-образной траектории и амплитудой 1,6 мм, отличаются широкой средней частью и узким корнем шва.

3. Швы с эллиптическим корнем шва (№ 4, 10, 11). Такую форму шва позволяют получить: кольцевая развертка, развертка с формиро-

ванием двух параллельных линий по обе стороны стыка, а также прямоугольный растр с длинной стороной вдоль стыка.

Формирование кинжального проплавления обусловлено высокой концентрацией вводимой энергии. Швы конусной формы получаются вследствие того, что вводимая энергия частично распределена по области взаимодействия электронного пучка с металлом, но основная ее часть находится в центре этой области. Корень шва эллиптической формы при ЭЛС достигается путем распределения вводимой энергии равномерно по области взаимодействия электронного пучка с металлом либо по периферии этой области. Формирование шва с большим радиусом корня снижает вероятность появления корневых дефектов, приводит к повышению механических характеристик сварного шва [18].

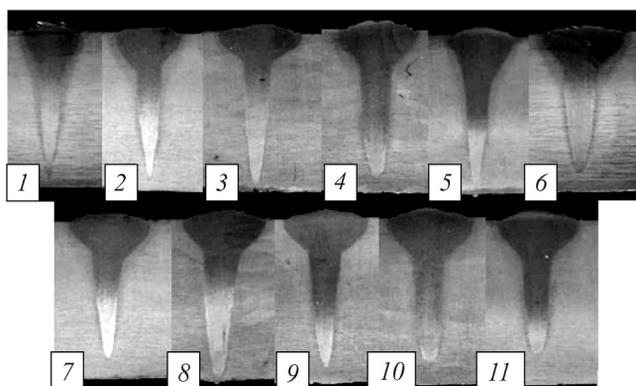


Рис. 1. Поперечные сечения швов (цифрами обозначены номера режимов, указанных в табл. 1)

Анализ геометрических размеров поперечных сечений сварных швов (табл. 2) и сопоставление их с параметрами режима сварки показали наличие обратной зависимости между радиусом корня шва и проплавляющей способностью электронного пучка (в качестве параметра использовался удельный ток сварки на 1 мм проплавленной глубины).

Наиболее благоприятными для формирования шва с большим радиусом корневой части являются режимы ЭЛС с распределением мощности по периферии области взаимодействия луча с металлом. При снижении проплавляющей способности на 40 % такие режимы могут увеличить радиус корня более чем в восемь раз (режим 10).

Таблица 2

Геометрические размеры поперечных сечений сварных швов

Номер шва	H , мм	H_2 , мм	B , мм	B_2 , мм	$I_{св}/H$, мА/мм	r , мм
1	9,32	0,55	3,71	1,13	4,29	0,07
2	9,10	0,35	3,74	1,36	4,95	0,07
3	10,46	0,54	5,37	1,55	4,78	0,20
4	9,60	0,54	5,03	1,76	5,63	0,44
5	10,16	0,62	4,34	1,29	4,33	0,12
6	8,71	0,44	5,02	1,70	5,51	0,30
7	8,59	0,41	4,84	1,37	5,12	0,18
8	10,65	0,62	5,35	1,86	5,16	0,30
9	8,73	0,52	4,97	1,42	5,61	0,19
10	9,16	0,58	5,45	1,77	6,11	0,62
11	8,24	0,59	4,85	1,51	6,07	0,37

Примечание: H – глубина шва; H_2 – высота валика; B – ширина шва на поверхности; B_2 – ширина шва на половине глубины шва; r – радиус корня шва.

Для математической обработки сигнала рентгеновского излучения были выбраны продольная осцилляция, как наиболее близкая к статичному лучу и при этом позволяющая применять метод синхронного детектирования, и развертка с образованием двух линий как наиболее приемлемая для формирования корневого валика. Необходимо отметить, что разница глубин проплавления для этих двух режимов составляет менее 1 %, а разница вводимой мощности – 25 %. На рис. 2 приведены результаты обработки сигнала рентгеновского излучения, измеренного с обратной стороны изделия, методом синхронного накопления, являющегося частным случаем синхронного детектирования, для режимов 2 и 10.

Как видно из графиков, при формировании шва с малым радиусом корневой части существует отчетливый пик сигнала в положении $-0,4$ мм относительно центра осцилляции пучка и это положение соответствует воздействию пучка в корневой части шва. При формировании шва с большим радиусом корневой части кроме повышения общего уровня сигнала на 50–70 % наблюдается увеличение сигнала практически на всей отрицательной области относительно центра осцилляции.

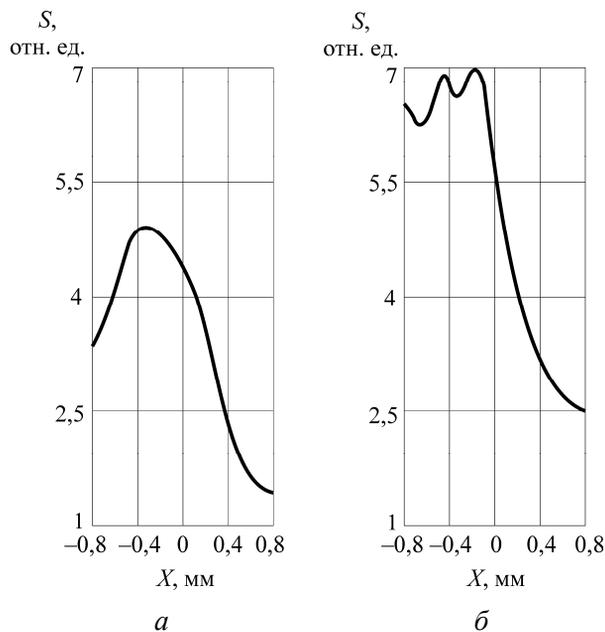


Рис. 2. Результаты обработки сигнала рентгеновского излучения: *а* – режим № 2; *б* – режим № 10

Кроме того, наблюдаются несколько пиков сигнала, что может быть объяснено переключением луча между линиями и колебаниями расплавленного металла в корне шва вследствие его большого объема. Для качественного автоматического регулирования процесса сквозного проплавления при ЭЛС необходимо учитывать данный характер сигнала. Система регулирования проплавления по среднему значению сигнала должна быть дополнительно подвергнута тарировке при переходе на новую форму осцилляции электронного луча. В системе, использующей в качестве параметра регулирования количество импульсов на 1 мм шва, при переходе на новую форму осцилляции необходимо провести дополнительную тарировку для исключения участия субимпульсов в формировании сигнала управления. Ширина верхней части импульса при сварке осциллирующим лучом с образованием двух линий значительно отличается от ширины импульса при сварке продольно осциллирующим лучом. Но ширина импульса, измеренная вблизи минимального уровня сигнала, практически одинакова для этих двух видов развертки электронного луча. Это дает преимущество способу контроля проплавления по усредненной ширине им-

пульсов, так как при использовании различных видов осцилляций может не потребоваться дополнительной подстройки системы регулирования.

Заключение

Корневая часть в значительной степени зависит от распределения мощности электронного луча в зоне его взаимодействия с металлом. Наиболее скругленную корневую часть электронно-лучевого шва обеспечивает развертка с образованием двух линий вдоль стыка. Методом синхронного детектирования в сигнале рентгеновского излучения, измеряемого с обратной стороны изделия, было выявлено наличие дополнительных пиков и общее увеличение уровня сигнала при такой форме осцилляции. В зависимости от параметра регулирования необходим учет таких особенностей при сварке с автоматическим регулированием проплавления при электронно-лучевой сварке.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-08-96008 р_урал_а, № 16-48-590208 р_а и при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания (проект № 01201460538).

Список литературы

1. Болдарев Е.А., Пашкин А.Н., Богданов В.В. Изготовление буровых долот с применением ЭЛС // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 91–92.
2. Исследование сварных соединений разнородных сталей деталей магнитопровода, выполненных ЭЛС / А.Л. Гончаров, А.П. Слива, М.А. Портнов, Е.В. Терентьев, М.С. Грибков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 74–87.
3. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
4. Васильев А.А., Ерофеев В.А., Судник В.А. Теория формирования корневых пустот при электронно-лучевой сварке // Известия Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2015. – № 6–2. – С. 43–52.

5. Получение бездефектных швов при электронно-лучевой сварке / В.Я. Беленький, В.М. Язовских, Л.Н. Кротов, Д.Н. Трушников // Наука – производству. – 2000. – № 5. – С. 42.

6. Валяев И.Г., Жидков И.А., Квак В.Л. Двухпроходная ЭЛС стыковых соединений на весу // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 24–25.

7. Ластовирия В.Н., Новиков В.В. Моделирование колебаний глубины парогазового кратера при электронно-лучевой сварке // Известия Моск. гос. индустр. ун-та. – 2008. – № 2(11). – С. 39–43.

8. Углов А.А., Селищев С.В. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. – М.: Наука, 1987. – 149 с.

9. Особенности получения качественных сварных швов при электронно-лучевой сварке высокопрочных сталей большой толщины / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Г.М. Младенов, Т.В. Ольшанская // Автоматическая сварка. – 2012. – № 2(706). – С. 47–50.

10. Effect of electron beam oscillations 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. – Vol. 27, iss. 11. – P. 881–885.

11. 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.

12. Управление электронно-лучевой сваркой / В.Д. Лаптенко, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин, В.Я. Браверман. – Красноярск: САА, 2000. – 234 с.

13. Development of back current controller for improvement of back bead formation in electron beam welding / T. Shida, H. Okamura, S. Kokura, H. Kita. – Tokio: Hitachi, 1984. – 26 p.

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

15. Secondary-emission signal for weld formation monitoring and control in electron beam welding (EBW) / D.N. Trushnikov, V.Y. Belenki'y,

N.S. Portnov, G.M. Mladenov // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. – 2012. – Т. 43, № 10. – С. 892–897.

16. Язовских В.М., Грушников Д.Н., Беленький В.Я. Механизм вторично-эмиссионных процессов при электронно-лучевой сварке с модуляцией электронного пучка // *Сварочное производство*. – 2004. – № 4. – С. 21–27.

17. Марченко Е.С., Муниров Д.В., Успенский Н.В. Природа корневых дефектов при ЭЛС и методы борьбы с ними // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 109–110.

18. Замков В.Н., Шевелев А.Д., Хрипков К.С. Выбор режимов ЭЛС титана средней и большой толщины // *Автоматическая сварка*. – 1993. – № 1. – С. 50–52.

References

1. Boldarev E.A., Pashkin A.N., Bogdanov V.V. Izgotovlenie burovyykh dolot s primeneniem ELS [Manufacturing of drill bits using electron beam welding]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2014, vol. 1, no 10, pp. 91-92.

2. Goncharov A.L., Sliva A.P., Portnov M.A., Terent'ev E.V., Gribkov M.S. Issledovanie svarnykh soedinenii raznorodnykh staley detalei magnitoproвода, vypolnennykh ELS [Investigation of welded connections of heterogeneous steels magnetic parts made EBW]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 74-87.

3. Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A. Osnovy elektronno-luchevoi obrabotki materialov [Fundamentals of electron beam processing of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 239 p.

4. Vasil'ev A.A., Erofeev V.A., Sudnik V.A. Teoriia formirovaniia kornevykh pustot pri elektronno-luchevoi svarke [Theory of the formation of root cavities by electron beam welding]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 6-2, pp. 43-52.

5. Belen'kii V.Ia., Iazovskikh V.M., Krotov L.N., Trushnikov D.N. Poluchenie bezdefektnykh shvov pri elektronno-luchevoi svarke [Getting defect-free joints in electron beam welding]. *Nauka – proizvodstvu*, 2000, no. 5, p. 42.

6. Valiaev I.G., Zhidkov I.A., Kvak V.L. Dvukhprokhodnaia ELS sty-kovykh soedinenii na vesu [Two pass EBW joints on weight]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1990, no. 5, pp. 24-25.

7. Lastoviria V.N., Novikov V.V. Modelirovanie kolebanii glubiny parogazovogo kratera pri elektronno-luchevoi svarke [Simulation of the combined-cycle oscillation depth of the crater in electron-beam welding]. *Izvestiia Moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo uniiversiteta*, 2008, no. 2(11), pp. 39-43.

8. Uglov A.A., Selishchev S.V. Avtokolebatel'nye protsessy pri vozdeistvii kontsentrirrovannykh potokov energii [Self-oscillating under the action of concentrated energy flows]. Moscow: Nauka, 1987. 149 p.

9. Belen'kii V.Ia., Trushnikov D.N., Mladenov G.M., Ol'shanskaya T.V. Osobennosti polucheniia kachestvennykh svarnykh shvov pri elektronno-luchevoi svarke vysokoprochnykh stalei bol'shoi tolshchiny [Features produce quality welds in electron beam welding of high strength steels of great thickness]. *Avtomaticheskaia svarka*, 2012, no. 2(706), pp. 47-50.

10. Ol'shanskaya T.V., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Y., Mladenov G.M. Effect of electron beam oscillations on the formation of the structure and properties of the welded joint. *Welding International*, 2013, vol. 27, iss. 11, pp. 881-885.

11. Braverman V.Ia., Skurikhin D.A., Baiakin S.G., Shabanov V.F., Bashenko V.V. Ustroistvo upravleniia fokusirovki i glubinoi proplavleniia po sobstvennomu rentgenovskomu izlucheniiu pri ELS s moduliatsiei urovnia fokusirovki [The control unit focus and depth of penetration of X-rays on his own in EBW with focus level modulation]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 1, p. 16.

12. Laptinok V.D., Murygin A.V., Seregin Iu.N., Braverman V.Ia. Upravlenie elektronno-luchevoi svarkoi [Control of electron-beam welding]. Krasnoiar'sk: SAA, 2000. 234 p.

13. Shida T., Okamura H., Kokura S., Kita H. Development of back current controller for improvement of back bead formation in electron beam welding. Tokyo: Hitachi, 1984. 26 p.

14. Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ia. Issledovanie formirovaniia signala vtorichnogo toka v plazme pri elektronno-luchevoi svarke s ostsil'iat'siei elektronno-puchka [Study secondary current signal forming plasma by electron-beam welding with an electron beam oscillation]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no. 11, pp. 9-13.

15. Trushnikov D.N., Belenki'y V.Y., Portnov N.S., Mladenov G.M. Secondary-emission signal for weld formation monitoring and control in electron beam welding (EBW). *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2012, vol. 43, no. 10, pp. 892-897.

16. Iazovskikh V.M., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ia. Mekhanizm vtorichno-emissionnykh protsessov pri elektronno-luchevoi svarke s moduliatsiei elektronnogo puchka [The mechanism of secondary emission processes in electron beam welding with electron beam modulation]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 4, pp. 21-27.

17. Marchenko E.S., Munirov D.V., Uspenskii N.V. Priroda kornevykh defektov pri ELS i metody bor'by s nimi [Nature of root defects in EBW and methods of dealing with them]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2014, vol. 1, no. 10, pp. 109-110.

18. Zamkov V.N., Shevelev A.D., Khripkov K.S. Vybor rezhimov ELS titana srednei i bol'shoi tolshchiny [Selecting modes titanium EL medium and high thickness]. *Avtomaticheskaya svarka*, 1993, no. 1, pp. 50-52.

Получено 27.06.2016

Об авторах

Варушкин Степан Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: stepan.varushkin@mail.ru.

Трушников Дмитрий Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, 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: vladimirbelenkij@yandex.ru.

Пермяков Глеб Львович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.

About the authors

Stepan V. Varushkin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: stepan.varushkin@mail.ru.

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

Vladimir Ya. Belenky (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

Gleb L. Permyakov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.