

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.11

УДК 621.791.72

**В.Я. Браверман**

Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

## **НАБЛЮДЕНИЕ КАНАЛА ПРОПЛАВЛЕНИЯ В РЕНТГЕНОВСКОМ СПЕКТРЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

Формирование сварного шва при электронно-лучевой сварке представляет собой сложный процесс, результирующий совместное действие множества факторов (теплообмена, истечения паров, рассеяния и переотражения электронов луча и т.д.), которые являются следствием воздействия на свариваемые материалы концентрированного источника энергии – пучка электронов. Сложность и многофакторность этого вида сварки оставляют многие задачи обеспечения требуемого качества сварного шва для решения непосредственно в процессе сварки с помощью технических средств управления формированием сварного шва. Визуальное наблюдение может стать дополнительным инструментом для исследований физических процессов, происходящих в канале проплавления, и для контроля формирования сварного шва при сварке. Сопутствующее тормозное рентгеновское излучение – практически единственный источник информации для этой цели. В статье представлены результаты исследований, направленных на обеспечение визуального наблюдения за каналом проплавления в рентгеновском спектре. Рассматривается метод формирования стереоскопического изображения канала проплавления путем коммутации на экране дисплея двух аксонометрических изображений канала и наблюдения их с помощью бинокулярного устройства, у которого синхронно с частотой коммутации аксонометрических изображений коммутируют прозрачность левого и правого окуляров. При этом каждое аксонометрическое изображение канала проплавления получают по сформированному массиву данных о топографии канала проплавления. Сигналы о заглуплении электронного луча в материал для каждого аксонометрического изображения регистрируют из разных точек пространства. В качестве датчиков рентгеновского излучения использованы сцинтилляционные кристаллы совместно с фотоэлектронными умножителями. Кристаллы выполнены на основе монокристаллического йодистого натрия, активированного таллием.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, электронный луч, рентгеновское излучение, датчик рентгеновского излучения, проникающее рентгеновское излучение, канал проплавления, глубина проплавления, сканирование луча, бинокулярное устройство, монитор, коммутация изображений.

**V.Ya. Braverman**

Siberian State Aerospace University Named after M.F. Reshetnev,  
Krasnoyarsk, Russian Federation

## **MONITORING OF WELDING CHANNEL IN THE X-RAY SPECTRUM DURING THE ELECTRON BEAM WELDING**

Formation of the welding seam during the electron beam welding is a complex process. It's a result of many factors (heat and mass interchange, gas liberation, dispersion and reflection of the elect-

ron beam, etc.) working together and produced by the impact of the concentrated energy source – bunch of electrons on the welded materials. Complexity and multi-faceted nature of this welding type creates many issues that need to be solved during the process using technical tools to control welding seam formation to deliver the required quality of the welding seam. Visual observation can become one of these tools to study physical processes occurring in the welding channel and used to control formation of the welding seam. Concomitant breaking X-ray radiation is practically the only source of the information for this purpose. This paper provides research results for implementation of visual observation of the welding channel in the X-ray spectrum. We look at the method of creating a stereoscopic image of the welding channel by means of commutation on the screen of the two axonometric images of the channel and observing them with a binocular device which has the transparency of the left and right oculars commutating in sync with the commutation frequency of the axonometric image. Every axonometric image of the welding channel is received through a formed data array about the topography of the welding channel. For each axonometric image, signals about electron beam penetration into the material are captured from various points in the vicinity.

**Keywords:** electron beam welding, electron beam, X-ray, X-ray sensor, penetrating X-ray radiation, penetration channel, depth of penetration, beam scanning, binocular device, monitor, image switching.

Сложность и многофакторность электронно-лучевой сварки (ЭЛС) оставляют многие задачи обеспечения требуемого качества сварного шва для решения непосредственно в процессе сварки с помощью технических средств управления формированием сварного шва. Визуальное наблюдение может стать дополнительным инструментом для исследований физических процессов, происходящих в канале проплавления, и для контроля формирования сварного шва при сварке. Наблюдение за каналом проплавления дает представление о гидро- и пародинамических явлениях в канале, позволяет оценить процесс формирования сварного шва, его геометрию (глубину проплавления, объем шва), образование дефектов и т.д.

При ЭЛС сопутствующее тормозное рентгеновское излучение – практически единственный источник информации для этой цели [1–3].

Данной тематике посвящены работы многих отечественных и зарубежных коллективов, таких как МЭИ, НПО «Техномаш»<sup>1</sup>, НИКИМТ, СибГАУ (Красноярск) [4–6], ПНИПУ (Пермь) [7–13], ООО «Институт Интроскопии» (Томск) [14], ИЭС им. Е.О. Патона<sup>2</sup> [15], «Сиаци» (Франция), «Гамильтон Стандарт» (США), «Штейгервальд», Институт Манфреда фон Арденне (ФРГ), «Мицубиши дэнки» [16] и др.

---

<sup>1</sup> А.с. 1504040 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 15/00. Способ стабилизации глубины проплавления / Солнцев А.А. Оpubл. 30.08.89, Бюл. № 32.

<sup>2</sup> А.с. 401105 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки с контролем и регулированием глубины проплавления / Акопьянц К.С., Назаренко О.К., Локшин В.Е. Оpubл. 23.06.81, Бюл. № 23.

В работе рассматривается возможность получения стереоскопического изображения канала проплавления в рентгеновском спектре.

Если с определенной периодичностью осуществлять сканирование электронного луча в плоскости свариваемого изделия, то расположенный с обратной стороны изделия датчик рентгеновского излучения будет измерять интенсивность прошедшего через непроплавленный металл рентгеновского излучения в каждый момент зондирования. Сигнал рентгеновского датчика несет информацию о заглублении канала проплавления в точке, где в данный момент находится электронный луч. Формируя массив данных о траектории сканирования и заглублении канала проплавления, можно получить аксонометрическое изображение, характеризующее геометрию канала.

Стереоскопическое изображение получают путем коммутации на экране дисплея двух аксонометрических изображений канала и наблюдения их с помощью бинокулярного устройства, у которого синхронно с частотой коммутации аксонометрических изображений коммутируют прозрачность левого и правого окуляров. При этом каждое аксонометрическое изображение канала проплавления получают по сформированному массиву данных о топографии канала проплавления<sup>3</sup>. Сигналы о заглублении электронного луча в материал для каждого аксонометрического изображения регистрируют из разных точек пространства.

На рис. 1 представлена функциональная схема устройства наблюдения. Электронно-лучевой пушкой (ЭЛП) на свариваемые детали направляется сварочный электронный луч (ЭЛ). Контроллер генерирует последовательность чисел, которые в устройстве связи с объектом (УСО) преобразуются в аналоговые сигналы  $U_x$ ,  $U_y$  и подаются на соответствующие входы отклоняющей системы (ОС). В результате осуществляется сканирование электронного луча в плоскости с координатными осями  $X$  и  $Y$ .

Определение величины заглубления электронного луча в свариваемый материал осуществляют путем измерения интенсивности рентгеновского излучения канала проплавления с помощью детекторов (Датчик 1 и Датчик 2).

---

<sup>3</sup> А.с. 1433690 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 15/00. Способ контроля канала проплавления при электронно-лучевой сварке / Башенко В.В., Баякин С.Г., Лаптенко В.Д. Опубл. 30.10.88, Бюл. № 26.

Значительная часть излучения исходит из дна канала, положение которого определяет глубину проплавления. Рентгеновское излучение ослабляется слоем непроплавленного металла по следующему закону [17]:

$$J = J_0 \exp(-\mu x),$$

где  $J_0$  – интенсивность источника излучения,  $J_0 = C \cdot I_{\text{л}} \cdot U^2 \cdot Z$ ,  $C$  – коэффициент,  $I_{\text{л}}$  – ток электронного луча,  $U$  – ускоряющее напряжение электронно-лучевой пушки,  $Z$  – атомный номер свариваемого материала;  $\mu$  – коэффициент линейного ослабления материала;  $x$  – толщина слоя непроплавленного металла;  $d$  – толщина свариваемого изделия (см. рис. 1).

Измеряя интенсивность  $J$  рентгеновского излучения, можно рассчитать величину  $h$  заглупления электронного луча в свариваемый материал:

$$h = d - x = d - \frac{1}{\mu} \ln \frac{J_0}{J}.$$

Преобразование сигналов детекторов рентгеновского излучения в величину заглупления электронного луча в свариваемый материал осуществляется контроллером в соответствии с алгоритмом, определяемым последней формулой. Перед обработкой в компьютере сигнал с детекторов в УСО преобразуется в цифровую форму.

Для получения информации о топографии канала проплавления формируют массив данных, в котором каждому положению луча на траектории сканирования в каждом такте (такт определяется временем проекции изображения при регистрации сигнала с одного датчика) приводят в соответствие величину заглупления  $h$  электронного луча в свариваемый материал путем измерения двух координат  $U_x$ ,  $U_y$  положения луча в плоскости сканирования и величину  $U_h$ , пропорциональную заглуплению  $h$  электронного луча в свариваемый материал.

Контроллером осуществляется обработка измеренных величин по следующим формулам:

– для первого аксонометрического изображения

$$\begin{cases} X_1 = K_1 U_x + K_2 U_y, \\ Y_1 = K_3 U_x + K_4 U_y + K_5 U_{h1}; \end{cases}$$

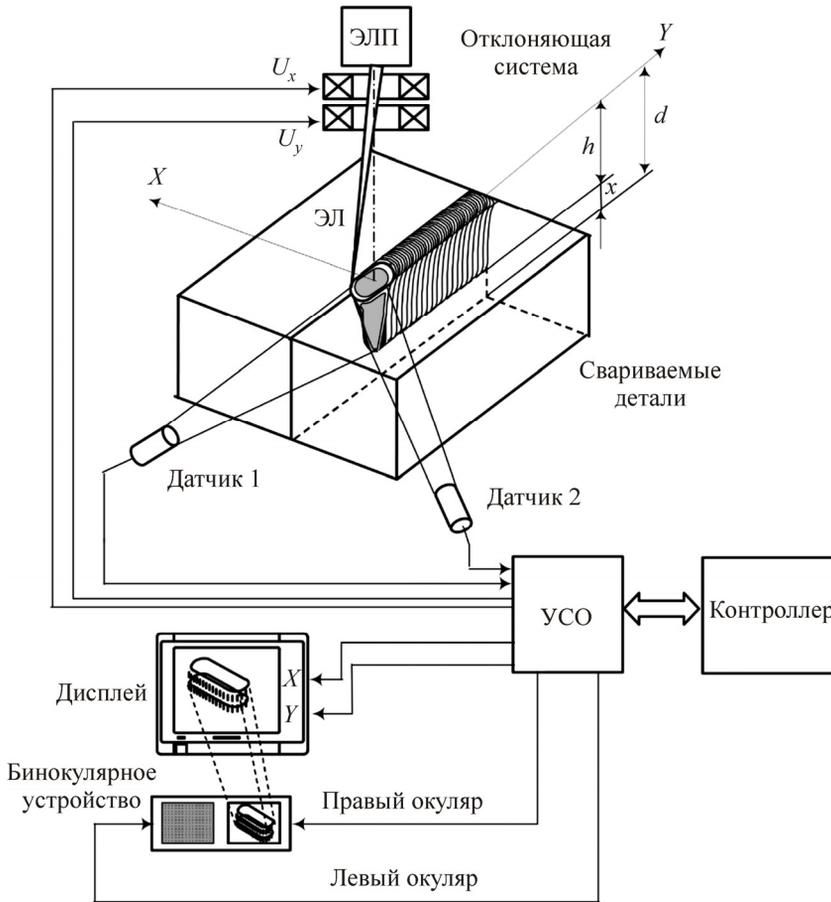


Рис. 1. Функциональная схема устройства наблюдения

– для второго аксонометрического изображения

$$\begin{cases} X_2 = K_6 U_x + K_7 U_y, \\ Y_2 = K_8 U_x + K_9 U_y + K_{10} U_{h_2}, \end{cases}$$

где  $K_1-K_{10}$  – масштабные коэффициенты изображения;  $X_1, Y_1$  и  $X_2, Y_2$  – координаты луча на экране дисплея в каждый такт формирования проекции изображения;  $U_{h_1}$  и  $U_{h_2}$  – составляющие координаты  $Y$  луча дисплея, пропорциональные величинам заглупления сварочного луча в материал в соответствующий такт измерения. При этом в один такт на координатные  $X, Y$  и информационный входы дисплея поступают с выхода УСО значения  $X_1, Y_1, h_1$ , в другой –  $X_2, Y_2, h_2$  (рис. 2).

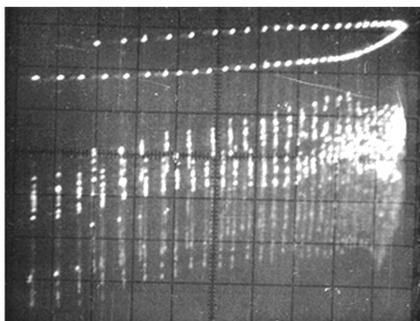


Рис. 2. Аксонометрическое изображение, формируемое одним датчиком

Одновременно с коммутацией изображений на экран дисплея осуществляется переключение окуляров (левого и правого) бинокулярного устройства. В каждый такт каждый окуляр прозрачен только для одного аксонометрического изображения. Человек, смотрящий на экран дисплея через бинокулярное устройство, наблюдает стереоскопический эффект. Достаточная тактовая частота позволяет видеть канал проплавления

в реальном масштабе времени. На рис. 2 представлена фотография изображения, наблюдаемого через один из окуляров.

Результаты экспериментов подтверждают возможность получения требуемого изображения, однако для адекватной идентификации изображения с топографией канала проплавления необходима дополнительная программная и аппаратная обработка видеoinформации.

### Список литературы

1. Браверман В.Я., Белозерцев В.С., Успенский А.Н. Экспериментальные исследования рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке // Вестник СибГАУ. – 2005. – Вып. 6. – С. 196–200.
2. Браверман В.Я. Тормозное рентгеновское излучение при электронно-лучевой сварке и его взаимосвязь с параметрами процесса // Вестник СибГАУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 117–121.
3. Вопросы управления формированием сварного шва при электронно-лучевой сварке / В.Я. Браверман, В.С. Белозерцев, В.П. Литвинов, О.В. Розанов // Вестник СибГАУ. – 2008. – Вып. 2. – С. 148–152.
4. Браверман В.Я., Белозерцев В.С. Частотный метод определения уровня фокусировки электронного луча и глубины проплавления при электронно-лучевой сварке // Вестник СибГАУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 65–68.
5. Браверман В.Я., Белозерцев В.С., Вейсвер Т.В. Контроль глубины проплавления по интенсивности рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке // Вестник СибГАУ. – 2010. – Вып. 6. – С. 116–119.

6. Браверман В.Я., Белозерцев В.С., Вейсвер Т.В. Повышение точности контроля проплавления при электронно-лучевой сварке // Вестник СибГАУ. – 2012. – Вып. 2. – С. 122–126.

7. Secondary-emission signal for weld formation monitoring and control at electron beam welding (EBW) / D.N. Trushnikov, V.Ya. Belenkiy, G.M. Mladenov, N.S. Portnov // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik (Materials science and Engineering technology)*. – 2012. – Vol. 43, № 10. – P. 892–897.

8. Plasma charge current for control and monitoring at electron beam welding with the beam oscillation / D. Trushnikov, V. Belenkiy, V. Schavlev, A. Piskunov, A. Abdulin, G. Mladenov // *Sensors*. – 2012. – № 12(12). – P. 17433–17445

9. Использование параметров вторично-эмиссионного сигнала для управления проплавлением при электронно-лучевой сварке / Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, В.Е. Щавлев, А.Л. Пискунов, А.Н. Лялин // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2012. – № 1. – С. 175–181.

10. Formation of a secondary-emission signal in electron beam welding with continuous penetration / D.N. Trushnikov, V.M. Yazovskikh, L.N. Krotov, V.Y. Belen'kii // *Welding International*. – 2007. – Т. 21, №. 5. – С. 384–386.

11. Trushnikov D.N., Belen'kii V.Y. Investigation of the formation of the secondary current signal in plasma in electron beam welding with oscillations of the electron beam // *Welding International*. – 2013. – Т. 27, № 11. – С. 877–880.

12. Effect of beam deflection oscillations on the weld geometry / D.N. Trushnikov, E.G. Koleva, G.M. Mladenov, V.Y. Belenkiy // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213, iss. 9. – P. 1623–1634.

13. Trushnikov D.N., Mladenov G.M., Belenkiy V.Ya. Controlling the electron beam focus regime and monitoring the keyhole in electron beam welding // *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*. – 2013. – Т. 31, № 4. – С. 91–95.

14. Рубинович И.М., Дмитров А.А., Кисс П.Э. Использование рентгеновского излучения сварочной ванны для контроля ЭЛС // *Электронно-лучевая сварка*. – Л., 1988. – С. 61.

15. Баня Е.Н., Киселевский Ф.Н., Назаренко О.К. Об использовании рентгеновских датчиков в системах направления электронного пучка по стыку // Материалы 5-й Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке. – Киев: Наук. думка, 1977. – С. 126–128.

16. Arata Y., Abe E., Fujisawa M. The observation by a fluoroscopic method // Jap. Weld. Soc. – 1976. – Vol. 5, № 1. – P. 1–9.

17. Хараджа Ф.Н. Общий курс рентгенотехники. – М.: Энергия, 1966. – 568 с.

### References

1. Braverman V.Ia., Belozertsev V.S., Uspenskii A.N. Eksperimental'nye issledovaniia rentgenovskogo izlucheniia pri elektronno-luchevoi svarke [Pilot studies of x-ray radiation at electron beam welding] *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2005, iss. 6, pp. 196-200.

2. Braverman V.Ia. Tormoznoe rentgenovskoe izluchenie pri elektronno-luchevoi svarke i ego vzaimosviaz' s parametrami protsessa [Brake x-ray radiation at electron beam welding and his interrelation with process parameters]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2008, iss. 3, pp. 117-121.

3. Braverman V.Ia., Belozertsev V.S., Litvinov V.P., Rozanov O.V. Voprosy upravleniia formirovaniem svarnogo shva pri elektronno-luchevoi svarke [Questions of management of formation of a welded seam at electron beam welding]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2008, iss. 2, pp. 148-152.

4. Braverman V.Ia., Belozertsev V.S. Chastotnyi metod opredeleniia urovnia fokusirovki elektronnoogo luchia i glubiny proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarke [Frequency method of determination of level of focusing of an electronic beam and depth of pro-melting at electron beam welding]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2010, iss. 4, pp. 65-68.

5. Braverman V.Ia., Belozertsev V.S., Veisver T.V. Kontrol' glubiny proplavleniia po intensivnosti rentgenovskogo izlucheniia pri elektronno-luchevoi svarke [Control of depth of pro-melting on intensity of x-ray radiation at electron beam welding]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2010, iss. 6, pp. 116-119.

6. Braverman V.Ia., Belozertsev V.S., Veisver T.V. Povyshenie tochnosti kontrolya proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarke [Increase in accuracy of control of pro-melting at electron beam welding]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, iss. 2, pp. 122-126.

7. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya., Mladenov G.M., Portnov N.S. Secondary-emission signal for weld formation monitoring and control at electron beam welding (EBW). *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik (Materials science and Engineering technology)*, 2012, vol. 43, no. 1, pp. 892-897.

8. Trushnikov D., Belenkiy V., Schavlev V., Piskunov A., Abdulin A., Mladenov G. Plasma charge current for control and monitoring at electron beam welding with the beam oscillation. *Sensors*, 2012, no. 12(12), pp. 17433-17445.

9. Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ia., Shchavlev V.E., Piskunov A.L., Lialin A.N. Ispol'zovanie parametrov vtorichno-emissionnogo signala dlia upravleniia proplavleniem pri elektronno-luchevoi svarke [Use of parameters of a secondary and issue signal for management of pro-melting at electron beam welding]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2012, no. 1, pp. 175-181.

10. Trushnikov D.N., Yazovskikh V.M., Krotov L.N., Belen'kii V.Y. Formation of a secondary-emission signal in electron beam welding with continuous penetration. *Welding International*, 2007, vol. 21, no. 5, pp. 384-386.

11. Trushnikov D.N., Belen'kii V.Y. 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, no. 11, pp. 877-880.

12. Trushnikov D.N., Koleva E.G., Mladenov G.M., Belenkiy V.Y. Effect of beam deflection oscillations on the weld geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, iss. 9, pp. 1623-1634.

13. Trushnikov D.N., Mladenov G.M., Belenkiy V.Ya. Controlling the electron beam focus regime and monitoring the keyhole in electron beam welding. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2013, vol. 31, no. 4, pp. 91-95.

14. Rubinovich I.M., Dmitrov A.A., Kiss P.E. Ispol'zovanie rentgenovskogo izlucheniia svarочноi vanny dlia kontrolya ELS [Use of x-ray

radiation of a welding bathtub for control of ELS]. *Elektronno-luchevaia svarka*. Leningrad, 1988, p. 61.

15. Bania E.N., Kiselevskii F.N., Nazarenko O.K. Ob ispol'zovanii rentgenovskikh datchikov v sistemakh napravleniia elektronnoogo puchka po styku [About use of x-ray sensors in systems of the direction of an electron beam on a joint]. *Materialy 5-oi vsesoiuznoi konferentsii po elektronno-luchevoi svarke*. Kiev: Naukova dumka, 1977, pp. 126-128.

16. Arata Y., Abe E., Fujisawa M. The observation by a fluoroscopic method. *Japan welding society*, 1976, vol. 5, no. 1, pp. 1-9.

17. Kharadzha F.N. Obshchii kurs rentgenotekhniki [General course of x-ray engineering]. Moscow: Energiia, 1966. 568 p.

Получено 20.10.2016

### Об авторе

**Браверман Владимир Яковлевич** (Красноярск, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматического управления Института космической техники Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева; e-mail: braverman-vladimir@rambler.ru.

### About the author

**Vladimir Ya. Braverman** (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Systems of Automatic Control, Institute of Space Technology, Siberian State Aerospace University Named after M.F. Reshetnev; e-mail: braverman-vladimir@rambler.ru.