Вестник СибГАУ 2014. № 5(57). С. 168–173

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО СТЫКУ СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТЬЮ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

А. А. Дружинина¹, В. Д. Лаптенок², А. В. Мурыгин²

 ¹ Сибирский федеральный университет Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
 ² Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31 E-mail: druzhininasasha@rambler.ru

Влияние остаточной намагниченности свариваемых деталей на точность позиционирования электронного пучка по стыку соединения является сложной научно-технической проблемой по достижению высокого качества сварных соединений в аэрокосмической отрасли, судостроении и энергетике. В результате анализа магнитных полей остаточной намагниченности получены математическая модель их распределения в пространстве «электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие» и количественные характеристики отклонений пучка электронов от стыка соединения. Для получения математической модели используется известный в литературе метод представления остаточной намагниченности в виде эквивалентного поля проводника с током. Адекватность моделирования проверена сравнительной оценкой экспериментальных и расчетных данных. Предложены метод и функциональная схема системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на точность позиционирования электронного пучка по стыку соединения при электронно-лучевой сварке. Для контроля отклонения пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки используется коллимированный рентгеновский датчик, размешенный на электронно-лучевой пушке, коллимационная шель которого наведена на оптическую ось пушки. Информация рентгеновского датчика обрабатывается по методу синхронного детектирования с частотным выделением сигналов первой и второй гармоник частоты сканирования электронного пучка поперек стыка соединения. Для этого используется технологическое сканирование электронного пучка поперек и вдоль стыка соединения, позволяющее помимо обеспечения измерения отклонения пучка электронов расширить возможности повышения качества сварки за счет управления распределением энергии по пятну нагрева. Автоматическая компенсация действия магнитных полей остаточной намагниченности свариваемого изделия позволяет уменьшить погрешность позиционирования электронного пучка по стыку соединения в корне шва в 20-30 раз.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, магнитное поле, остаточная намагниченность.

Vestnik SibGAU 2014, No. 5(57), P. 168–173

IMPROVEMENT OF THE POSITIONING ACCURACY ALONG THE JOINT CONNECTION OF DETAILS WITH THE RESIDUAL MAGNETIZATION IN ELECTRON BEAM WELDING

A. A. Druzhinina¹, V. D. Laptenok², A. V. Murygin²

¹ Siberian Federal University
 79, Svobodnyi Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
 ² Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
 E-mail: druzhininasasha@rambler.ru

The effect of residual magnetization of the welded parts on the accuracy positioning of the electron beam along the joint connection is a complicated scientific and technical problem to achieve the high quality of welded joints in the aerospace industry, shipbuilding and power engineering. As a result of analysis of the magnetic fields of residual magnetization the authors obtained the mathematical model of their distribution in the space between the electron beam gun and the workpiece and also the quantitative characteristics of deflection of the electron beam from the joint connection were obtained. For obtaining the mathematical model, the authors use a method which is widely known in the literature. This method is based on the representation of residual magnetization as equivalent field of conductor with current. Comparative evaluation of experimental and calculated data confirms the adequacy of the modeling. The authors have developed a method and a functional diagram of the automatic compensation of the effect of magnetic fields on the accuracy of positioning of the electron beam along the joint connection in the process of electron beam.

welding. The system of automatic compensation includes a collimated X-ray sensor, which is designed for monitoring deflection of the electron beam from the optical axis of the electron beam gun. The X-ray sensor is placed on the electron beam gun. The collimation slit of X-ray sensor is aimed at the optical axis of the gun. The method of synchronous detection is used to process information from the X-ray sensor. Thus the signals of the first and second harmonics of the scanning frequency of the electron beam across the joint connection are allocated. The method of synchronous detection uses the technological scanning of electron beam across and along the joint connection. The technological scanning allows to provide the measurement of deflection of the electron beam and to expand opportunities to improve weld quality by controlling the distribution of energy in the heating spot. Automatic compensation of the action of magnetic fields of residual magnetization of welded product can reduce the positioning error of the electron beam on the joint connection in the weld root in 20–30 times.

Keywords: electron-beam welding, magnetic field, residual magnetization.

Введение. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) используется в 30 странах мира в основных отраслях промышленности. Наибольшее широкое применение этот вид сварки получил в автомобильной, авиационной, космической отраслях, судостроении, ядерной энергетике, где к качеству сварных соединений предъявляют высокие требования [1].

Точное совмещение электронного пучка со стыком свариваемых деталей является необходимым условием получения качественного сварного соединения при электронно-лучевой сварке. При этом ось пучка должна находиться в той же плоскости, что и поверхность стыка, а также должна быть совмещена со стыком по всей глубине свариваемого изделия. В противном случае возможно смещение шва.

Несмотря на значительные достижения в разработке автоматических систем слежения за стыком соединения, проблема совмещения электронного пучка со стыком по всей глубине свариваемого изделия остается актуальной из-за наличия в некоторых случаях магнитных полей, отклоняющих электронный пучок от стыка и приводящих к смещению сварного шва, что влечет за собой появление непроваров.

Известно, что отклонение электронного пучка может быть вызвано остаточной намагниченностью свариваемых изделий, намагниченностью оснастки, воздействием различных электромагнитных устройств, действием тока термо-ЭДС, возникающего при сварке разнородных материалов [2].

Применяют различные способы уменьшения влияния магнитных полей [3–8]: размагничивание изделия, экранирование электронного пучка, компенсация магнитного поля в зоне сварки. Наиболее приемлемым способом защиты пучка электронов от магнитного поля является его компенсация в зоне сварки. Для этого необходимо измерить продольную составляющую магнитного поля в пространстве «пушка – свариваемое изделие».

Влияние магнитного поля помехи на траекторию пучка электронов можно оценить, используя формулы для расчета угла наклона ψ траектории пучка и отклонения *x* пучка электронов от оси электронно-лучевой пушки [9]:

$$\Psi = \frac{e}{mV} \int_{0}^{z} B(z) dz , \quad x = \frac{e}{mV} \int_{0}^{z} \int_{0}^{z} B(z) dz dz , \qquad (1)$$

где $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ – заряд электрона, Кл; V – скорость движения электронов, м/с; B(z) – закон распределения

магнитной индукции в рабочем пространстве по оси Z; m – масса электрона, рассчитываемая по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}},$$

где $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$ – масса покоя электрона, кг; $c = 2,977 \cdot 10^8$ – скорость света, м/с.

Математическая модель магнитных полей термоэлектрических токов, возникающих при сварке разнородных материалов, представлена в работе [10] и может быть использована для оценки отклонения электронного пучка от стыка свариваемых деталей вследствие действия этих полей.

Возникает необходимость в математическом описании закона распределения магнитной индукции в рабочем пространстве при сварке изделий с остаточной намагниченностью.

Математическая модель распределения магнитной индукции полей остаточной намагниченности. В литературе [11; 12] магнитное поле намагниченных тел представляют как результат взаимодействия магнитных полей эквивалентных проводников с током. В частности, поле поляризованного по оси намагниченного диска представляется как поле эквивалентного кольцевого проводника с током, а поле стержневого магнита представляется как результирующее поле совокупности круговых токов эквивалентной цилиндрической обмотки с током. Подобный подход широко используется в современной электротехнике.

Магнитное поле, создаваемое намагниченным веществом, можно описать введением макроскопических «молекулярных токов», отличных от тока проводимости. Вектор объёмной плотности молекулярных токов *j*' определяется соотношением

$$j' = \operatorname{rot} M. \tag{2}$$

Сила молекулярного тока I' через произвольную поверхность S, опирающуюся на контур L, определяется интегральным соотношением, следующим из (2):

$$I' = \int_{S} j' dS = \oint_{L} M dl.$$

В отличие от тока проводимости, молекулярный ток через полную площадь любого сечения намагниченного тела равен нулю. Поле магнитной индукции B'(r), создаваемое намагниченным веществом, эквивалентно полю, создаваемому молекулярными токами j'(r) в вакууме. При этом полный вектор магнитной индукции *B* определяется эффективной плотностью тока j_{Σ} , равной сумме плотности токов проводимости и молекулярных токов: $j_{\Sigma} = j + j'$.

С введением молекулярных токов дифференциальное и интегральное уравнения магнитостатики можно записать в виде

$$\operatorname{rot} B = \mu_0 j_{\Sigma},$$
$$\oint_L B dl = \mu_0 \int_S j_{\Sigma} dS = \mu_0 I_{\Sigma}$$

где $I_{\Sigma} = I + I'$ – величина эффективного тока через поверхность *S*, опирающуюся на контур *L*.

Магнитное поле, создаваемое намагниченным телом с фиксированным распределением намагниченности M(r), можно найти, заменив намагниченное тело эквивалентным распределением молекулярных токов. Индукция магнитного поля рассчитывается по найденному распределению молекулярных токов аналогично методам нахождения индукции магнитного поля токов в вакууме [12].

При ЭЛС наибольшую опасность представляет намагниченность, направленная вдоль линии сварки, поскольку электронный пучок в данном случае отклоняется поперек стыка. Такая намагниченность наблюдается в магнитном поле прямого тока, протекающего поперек стыка свариваемых деталей.

Предположим, что свариваемое изделие имеет однородную намагниченность и молекулярные токи направлены поперек стыка сварного соединения. По закону Био-Савара–Лапласа индукция магнитного поля бесконечно длинного прямого проводника с током находится по формуле

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r},\tag{3}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; *I* – сила тока, А; *r* – расстояние от оси прямого проводника с током до заданной точки пространства, м.

Если ток распределен равномерно по сечению прямого цилиндрического проводника, радиус сечения которого равен *R*, то индукция магнитного поля внутри проводника с током определяется выражением

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r \; .$$

Отсюда индукция магнитного поля на поверхности проводника (r = R)

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} R = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \,.$$

Таким образом, выражение (3) можно переписать в следующем виде:

$$B = \frac{B_0 \cdot R}{r} \, .$$

Такой же результат получается, если проводник имеет квадратное сечение.

Если началом координат является электроннолучевая пушка, расстояние от которой до свариваемого изделия равно l, то закон распределения магнитной индукции в рабочем пространстве по оси Z будет определяться выражением

$$B(z) = B_0 \frac{R}{R + (l - z)},$$
 (4)

где B_0 – величина магнитной индукции на поверхности свариваемого изделия вблизи стыка и в свариваемом изделии.

Выражение (4) описывает закон изменения магнитной индукции в пространстве «электроннолучевая пушка – свариваемое изделие».

Для оценки точности полученной модели распределения магнитной индукции в рабочем пространстве «электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие» произведено сравнение экспериментальных значений $H_3(z)$ (см. таблицу) напряженности магнитного поля, измеренных цифровым измерителем магнитных полей с феррозондовым датчиком, со значениями, рассчитанными по формуле

$$H(z) = \frac{B(z)}{\mu_0}$$

с учетом (4) при толщине изделия 50 мм (R = 25 мм). Расчеты показывают, что средняя ошибка аппроксимации не превышает 5 %.

Подставляя выражение (4) в формулы (1) и интегрируя по z, получим выражения для определения угла наклона ψ траектории луча и отклонения x пучка электронов от оси электронно-лучевой пушки:

$$\Psi = \frac{e}{mV} \int_{0}^{z} B(z) dz = \frac{e}{mV} \int_{0}^{z} B_{0} \frac{R}{R + (l - z)} dz =$$

$$= \frac{e}{mV} B_{0} R \left[\ln(R + l) - \ln(R + (l - z)) \right],$$
(5)

Экспериментальные и расчетные значения напряженности магнитного поля

<i>Z</i> , ММ	0	10	20	30	40	55	105	155	195
<i>H</i> _э (<i>z</i>), А/м	342	254	202	160	133	105	61	47	38
<i>H</i> (<i>z</i>), А/м	342	244,3	190	155,5	131,5	106,9	65,8	47,5	38,9

$$x = \frac{e}{mV} \int_{0}^{z} \int_{0}^{z} B(z) dz dz = \frac{e}{mV} \int_{0}^{z} \int_{0}^{z} B_{0} \frac{R}{R + (l - z)} dz dz =$$

= $\frac{e}{mV} B_{0} R [z + (R + l - z) \ln(R + l - z) + (c - R - l) \ln(R + l)].$ (6)

Зная величину отклонения луча от оси электроннолучевой пушки, нетрудно рассчитать значение индукции поля намагниченности на поверхности изделия вблизи стыка.

Так, в работе [13] рассмотрены поля остаточной намагниченности при электронно-лучевой сварке стали типа АБ толщиной 150 мм. Отклонение луча от оси шва в результате действия полей остаточной намагниченности достигало 15 мм. Используя формулу (6) при R = 75 мм, l = 250 мм и ускоряющем напряжении U = 60 кВ, получим $B_0 = 1,2$ мТл.

Система автоматической компенсации смещения луча, вызванного действием полей остаточной намагниченности. Для управления процессом сварки в условиях действия полей остаточной намагниченности наиболее простым способом является компенсация магнитных полей путем введения магнитного поля встречной направленности с помощью электромагнитных устройств. На рисунке представлена функциональная схема системы автоматической компенсации влияния поля остаточной намагниченности свариваемого изделия.

Устройство содержит электронно-лучевую пушку 1, формирующую электронный пучок, фокусирующую систему 2 и источник тока фокусировки 3, отклоняющие катушки 4 и 5 отклонения электронного пучка по поверхности свариваемого изделия в координатах y и x, генератор 7 сканирования пучка, рентгеновский датчик 8 с щелевым коллиматором, избирательный усилитель 9, настроенный на частоту сканирования по координате x, демодулятор 10, избирательный усилитель 11 второй гармоники частоты сканирования, выпрямитель 12, усилитель 13 с регулируемым коэффициентом усиления, интегратор 14, электромагнит 15, блок 16 наведения пучка на стык сварного соединения, электропривод 17 перемещения пушки.

Электронно-лучевой пушкой формируется сфокусированный электронный пучок. С помощью генератора сканирования и отклоняющих катушек осуществляется технологическое сканирование пучка, которое помимо обеспечения измерения отклонения электронного пучка от стыка позволяет расширить возможности повышения качества сварки за счет управления распределением энергии по пятну нагрева [14]. Рентгеновский датчик контроля влияния магнитных полей на электронный пучок закреплен на электронно-лучевой пушке так, что проекция коллимационной щели на поверхности свариваемого изделия параллельна стыку соединения и совпадает с оптической осью пушки.

В процессе сканирования электронного пучка поперек стыка в выходном сигнале рентгеновского датчика 8 появляется гармоническая составляющая частоты сканирования, амплитуда которой пропорциональна смещению электронного пучка от оптической оси пушки, вызванному действием магнитных полей в промежутке «пушка – свариваемое изделие», а фаза этой гармонической составляющей указывает на направление смещения.

Гармоническая составляющая рентгеновского датчика усиливается избирательным усилителем 9 и преобразуется в напряжение постоянного тока в демодуляторе 10, на опорный вход которого подается сигнал с генератора 7 с частотой сканирования пучка поперек стыка. Сигнал на выходе демодулятора пропорционален отклонению электронного пучка от оси пушки в соответствии с математической моделью, представленной в работе [15].

Кроме того, в выходном сигнале рентгеновского датчика присутствует составляющая с частотой второй гармоники частоты сканирования. Вторая гармоника максимальна при совмещении электронного пучка с оптической осью пушки. Она характеризует чувствительность рентгеновского датчика и увеличивается при возрастании тока пучка. Эта составляющая усиливается избирательным усилителем 11 второй гармоники, преобразуется в напряжение постоянного тока на выходе выпрямителя 12 и поступает на вход регулировки коэффициента усиления усилителя 13. Регулировка коэффициента усиления производится с целью стабилизации коэффициента усиления контура управления во всем диапазоне сварочных токов. Усиленный сигнал через интегратор 14 поступает на электромагнит, который создает в свариваемом изделии компенсирующее магнитное поле, противоположное полю остаточной намагниченности свариваемого изделия. Использование интегратора позволяет ликвидировать отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки.

Совмещение электронного пучка со стыком свариваемого изделия осуществляется с помощью блока наведения пушки на стык сварного соединения и электропривода перемещения электронно-лучевой пушки. При этом плоскость стыка сварного соединения должна быть параллельна оптической оси пушки.

Полная компенсация влияния магнитного поля достигается, если компенсирующее магнитное поле имеет такой же закон изменения индукции *B*(*z*), только направлено встречно. Это достигается выбором конфигурации электромагнита.

Точная компенсация положения электронного пучка относительно стыка соединения достигается в точке, находящейся в середине глубины канала проплавления, в связи с тем, что интенсивность рентгеновского излучения усредняется по каналу проплавления.

Автоматическая компенсация действия магнитных полей остаточной намагниченности свариваемого изделия позволяет уменьшить погрешность позиционирования электронного пучка по стыку соединения в корне шва в 20–30 раз.

Заключение. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Представлена модель распределения магнитного поля от остаточной намагниченности изделия в промежутке «электронно-лучевая пушка – изделие».



Функциональная схема системы автоматической компенсации влияния поля остаточной намагниченности

2. Предложена функциональная схема системы автоматической компенсации отклонения пучка электронов под действием магнитного поля помехи.

3. Автоматическая компенсация позволяет уменьшить отклонение пучка от стыка соединения до величин, обеспечивающих высокое качество сварных соединений.

Библиографические ссылки

1. Вихман В. Б., Козлов А. Н., Маслов М. А. Преимущества и недостатки электронного луча при сварке по сравнению с лазером и электрической дугой // Технологии и оборудование «ЭЛС-2014»: доклады III Санкт-Петербургской Междунар. науч.-техн. конф. (24–26 июня 2014, г. Санкт-Петербург) / под ред. В. Б. Вихмана ; СПб. гос. политехн. ун-т. СПб., 2014. С. 4–19.

2. Назаренко О. К. Отклонение пучка электронов при ЭЛС // Автоматическая сварка. 1982. № 1. С. 33–39.

3. Децик В. Н., Децик Н. Н., Нестеренко В. М. Проблемы борьбы с остаточной намагниченностью при ЭЛС ротора газового нагревателя // Электроннолучевая сварка. М. : МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1986. С. 107–110. 4. Непорожний В. Ю. Устройство для компенсации остаточного магнитного поля при электроннолучевой сварке толстолистовых сталей // Автоматическая сварка. 1984. № 3. С. 68–70.

5. Стенд для размагничивания конструкций перед сваркой / Ф. Б. Черепнин [и др.] // Автоматическая сварка. 1981. № 3. С. 58–61.

6. Furner A. J. Electron beam welding thick section presipitation hardening steel // Weld J. 1981. № 1. P. 18–66.

7. High power electron beam welding of thick steel plates. Method for elimination beam deflection coused / H. Kihara [et al.] // Weld. Wold. 1984. Vol. 22, № 516. P. 126–136.

8. A study on occurrence and prevention of defects of EBW / K. Watanabe [et al.] // J. Jap. Weld Sos. 1975. Vol. 44, N 2. P. 121–127.

9. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенок [и др.]; под ред. В. Д. Лаптенка; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 2000. 234 с.

10. Compensation of the effect of magnetic fields on the electron beam position in the process of electron beam welding / V. Laptenok [et al.] // Elektrotechnica & Elektronica E+E. 2014. Vol. 49, No 5–6. P. 62–67.

11. Путилов К. А. Курс физики. Т. II. М. : ГИТТЛ, 1954. 592 с.

12. Электричество и магнетизм. Методика решения задач / А. С. Жукарев [и др.] // М. : МГУ, 2010. 436 с.

13. Разработка технологии электронно-лучевой сварки сталей с остаточной намагниченностью / Н. В. Александров [и др.] // Технологии и оборудование «ЭЛС-2014» : доклады III Санкт-Петербургской Междунар. науч.-техн. конф. (24–26 июня 2014, г. Санкт-Петербург) / под ред. В. Б. Вихмана ; СПб. гос. политехн. ун-т. СПб., 2014. С. 141–149.

14. Экспериментальные исследования по оптимизации технологии электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов / Ю. Н. Серегин [и др.] // Технологии и оборудование «ЭЛС-2011» : доклады Санкт-Петербургской Междунар. науч.-техн. конф. (23–26 мая 2011, г. Санкт-Петербург) / под ред. В. Б. Вихмана ; СПб. гос. политехн. ун-т. СПб., 2011. С. 71–80.

15. Метод контроля влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке по рентгеновскому излучению из зоны обработки / А. А. Дружинина [и др.] // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 158–163.

References

1. Vihman V. B., Kozlov A. N., Maslov M. A. [Advantages and disadvantages of electron beam as compared to laser and electric arc during the welding]. *Doklady III Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj nauchnotehnicheskoj konferencii "Tehnologii i oborudovanie JeLS-2014"* [Reports III St. Petersburg International Scientific and Technical Conference "Technologies and equipment EBW-2014"]. St. Petersburg, 2014, p. 4–19 (In Russ.).

2. Nazarenko O. K. [Deflection of the electron beam in EBW]. *Avt. Svarka*. 1982, no. 1, p. 33–39 (In Russ.).

3. Decik V. N., Decik N. N., Nesterenko V. M. [The problems of combating residual magnetization of the rotor of the gas heater in EBW]. *Jelektronno-luchevaya svarka*. Moscow, 1986, p. 107–110 (In Russ.).

4. Neporozhnij V. Yu. [Device for compensating residual magnetic field during electron beam welding of thick steel plates]. *Avt. Svarka*. 1984, no. 3, p. 68–70 (In Russ.).

5. Cherepnin F. B., Krepyshev V. N., Drozdov V. G. [Stand for demagnetization constructions before welding]. *Avt. Svarka.* 1981, no. 3, p. 58–61 (In Russ.).

6. Furner A. J. Electron beam welding thick section presipitation hardening steel. *Weld J.* 1981, no. 1, p. 18–66.

7. Kihara H., Minehisa S., Sacabata N., Shibuya X. High power electron beam welding of thick steel plates. Method for elimination beam deflection coused. *Weld*. *Wold*. 1984, vol. 22, no. 516, p. 126–136.

8. Watanabe K., Shida T., Susuki H., Okamura H. A study on occurrence and prevention of defects of EBW. *J. Jap. Weld Sos.* 1975, vol. 44, no. 2, p. 121–127.

9. Laptenok V. D., Murygin A. V., Seregin Yu. N., Braverman V. Ya. *Upravlenie jelektronno-luchevoj svarkoj* [Control of electron beam welding]. Krasnoyarsk, SAA Publ., 2000, 234 p.

10. Laptenok V., Druzhinina A., Murygin A., Seregin Yu. Compensation of the effect of magnetic fields on the electron beam position in the process of electron beam welding. *Elektrotechnica & Elektronica E+E*. 2014, vol. 49, no 5–6, p. 62–67.

11. Putilov K. A. *Kurs fiziki* [Physics course]. Moscow, GITTL Publ., 1954, 592 p.

12. Zhukarev A. S., Ivanov S. A., Kirov S. A. *Jelek-trichestvo i magnetism. Metodika resheniya zadach* [Electricity and Magnetism. Technique of the decision the exercises]. Moscow, MGU Publ., 2010, 436 p.

13. Aleksandrov N. V., Blank E. D., Vovchenko N. V. [Development of technology of electron beam welding of steels with residual magnetization]. *Doklady III Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii "Tehnologii i oborudovanie JeLS-2014"* [Reports III St. Petersburg International Scientific and Technical Conference "Technologies and equipment EBW-2014"]. St. Petersburg, 2014, p. 141–149 (In Russ.).

14. Seregin Yu. N., Laptenok V. D., Uspenskij N. V., Nikitin V. P. [Experimental studies on the optimization of the technology of electron beam welding of aluminum alloys]. *Doklady Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii "Tehnologii i oborudovanie JeLS-2011"* [Reports III St. Petersburg International Scientific and Technical Conference "Technologies and equipment EBW-2011"]. St. Petersburg, 2011, p. 71– 80 (In Russ.).

15. Druzhinina A. A., Laptenok V. D., Murygin A. V., Seregin Yu. N. [Method for monitoring of impact of magnetic fields in the process of electron-beam welding by x-ray radiation from treatment area]. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 5(45), p. 158–163 (In Russ.).