

Локальная нормализация сварного шва, выполненного электрошлаковой сваркой

В. В. Царевский, К. Ю. Блинов, Ю. И. Блинов✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ yuri-50@mail.ru

Аннотация. Сопутствующая локальная нормализация шва, выполненного электрошлаковой сваркой, позволяет довести механические свойства шва и зоны термического влияния до уровня основного металла. Процесс сопутствующей нормализации протекает при температуре от 600 до 950 °С в среднем, в горячем режиме с постоянными теплофизическими свойствами нагреваемого металла. Распределение плотности внутренних источников по сечению шва рассмотрено в двух приближениях. При этом плотность внутренних источников нагрева спадает от поверхности внутрь стенки. В то же время, теплоизоляция поверхностей невозможна. Неизбежен перепад температуры по толщине стенки, особенно за пределами глубины проникновения, который может привести к некачественной термообработке и неприемлемым термонапряжениям и деформациям. Рекомендовано приближение при меньшем количестве допущений. Выполнен аналитический расчет локальной нормализации сварного шва для точной его оценки. Более точно решена задача численным методом. Аналитическое решение удовлетворительно для инженерных расчетов при оценке температурного поля и термонапряжений, что существенно упрощает решение задачи.

Ключевые слова: сопутствующая локальная нормализация, электрошлаковая сварка, плотность внутренних источников тепла, индукционный нагрев, аналитическое решение задачи

Для цитирования: Царевский В. В., Блинов К. Ю., Блинов Ю. И. Локальная нормализация сварного шва, выполненного электрошлаковой сваркой // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 2. С. 51–57. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-51-57.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Electrical engineering

Original article

Local normalization of the weld made by electroslag welding

V. V. Tsarevsky, K. Yu. Blinov, Yu. I. Blinov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ yuri-50@mail.ru

Abstract. The accompanying local normalization of the seam made by electroslag welding (ESW) allows to bring the mechanical properties of the seam and the zone of thermal influence to the level of the base metal. The process of concomitant normalization proceeds at a temperature from 600 to 950 °C on average, in a hot mode with constant thermophysical properties of the heated metal. The distribution of the density of internal sources over the seam cross-section is considered in three approximations. An approximation is recommended with a smaller number of assumptions compared to others.

Keywords: concomitant local normalization, electroslag welding, density of internal heat sources, induction heating, analytical solution of the problem

For citation: Tsarevsky V. V., Blinov K. Yu., Blinov Yu. I. Local normalization of the weld made by electroslag welding. // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 51–57. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-51-57.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Широкому применению электрошлаковой сварки (ЭШС) препятствует образование литой структуры сварного шва, склонной к хрупкости и низкой ударной вязкости при отрицательных температурах.

Локальная нормализация сварного шва, выполненного ЭШС, позволяет довести механические свойства шва и зоны термического влияния до уровня основного металла. В свое время ЭШС с сопутствующей нормализацией нашла применение в химическом и нефтяном аппаратостроении [1]. Ряд причин технического плана препятствовал широкому применению этого метода. В частности, при ЭШС кольцевых швов реакторов нефтехимии локальный нагрев с целью термообработки возможен только снаружи. При индукционном нагреве даже на частоте 50 Гц глубина проникновения внутренних источников нагрева для низко- и среднеуглеродистых сталей в случае температур $\sim 950^\circ\text{C}$, характерных для нормализации, составляет около 70 мм. При этом плотность внутренних источников нагрева спадает от поверхности внутрь стенки. В то же время, теплоизоляция поверхностей невозможна. Неизбежен перепад температуры по толщине стенки, особенно за пределами глубины проникновения, который может привести к некачественной термообработке и неприемлемым термонапряжениям и деформациям.

При ЭШС кольцевых швов цилиндрическое изделие расположено горизонтально на роликовых опорах, сварное соединение формируется в диаметральной плоскости, параллельной основанию опор. Нагреватели располагаются внизу между опорами. Литая структура шва, перегретая выше точки плавления T_n (рис. 1), в течение времени t_n по мере перемещения к нагревателю остывает до температуры ниже A_{c1} на $200\dots 300^\circ\text{C}$. Затем под нагревателем она достигает предельного значения T_{\max} и подвергается нормализации при температуре выше A_{c3} в течение времени t_n , достаточного для измельчения литой структуры [2].

Строго говоря, процесс локальной нормализации кольцевых швов – сложная электротепловая задача. Теоретическая модель процесса базируется на законах, теоремах и постулатах. Это, в первую очередь, законы Ома, Джоуля–Ленца, электромагнитной индукции Фарадея, закон полного тока, теорема Гаусса, закон теплопроводности Фурье, закон теплоотдачи Ньютона–Рихмана и законы теплового излучения. Математическая модель электронагрева литой зоны сварного шва, выполненного методом ЭШС, строится на уравнениях, вытекающих из перечисленных законов, краевых условиях, конкретизирующих объект моделирования, и допущениях, призванных упростить решение задачи. Для интервалов температур, при которых с известной степенью точности решения допускается считать уравнения с постоянными коэффициентами, иногда можно найти аналитическое выражение для искомой функции, которое дает удобное и наглядное представление о качественной стороне физики процесса электронагрева.

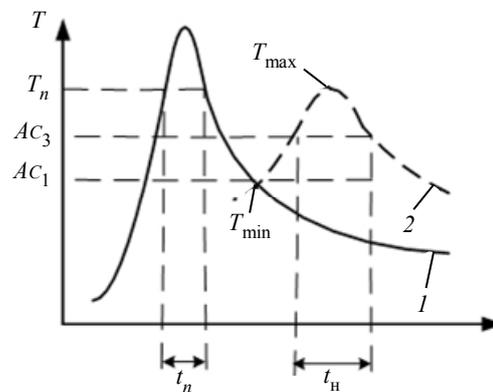


Рис. 1. ЭШС с сопутствующей нормализацией
Fig. 1. Electroslag welding with the accompanying normalization

ЭШС с сопутствующей нормализацией графически (рис. 1) может быть представлена в виде [2] термического цикла сварки (кривая 1) и процесса сопутствующей нормализации (кривая 2), начинающегося с момента пересечения кривых 1 и 2 (T_{\min}), когда температура литой зоны шва достигает $\sim 600^\circ\text{C}$, и завершающегося при температуре $\sim 950^\circ\text{C}$.

Если ставится задача найти простое аналитическое решение электромагнитной задачи, то можно положить, что процесс индукционного нагрева протекает в горячем режиме с постоянными теплофизическими свойствами нагреваемого металла. В таком случае распределение внутренних источников тепла происходит в замкнутом пространстве. Температурное поле по сечению литой части сварного соединения определяется внутренними источниками.

В 1970-х гг. во ВНИИПТхимнефтеаппаратуры (г. Волгоград) с заданными характеристиками (см. таблицу) был разработан и внедрен на четырех предприятиях Минхиммаша станд (рис. 2) для электрошлаковой сварки кольцевых швов корпусов с сопутствующей нормализацией индукционным методом на токах промышленной частоты 50 Гц.

Станд [3] состоял из установки для ЭШС 1, приводной и не приводной роликоопор 2 и 3, упорного ролика 4 для предотвращения продольного перемещения корпуса в процессе сварки, установки зональной нормализации 5 для нагрева сварного шва.

Характеристики станда
Stand Characteristics

Характеристики станда	
Диаметр свариваемых корпусов, мм	1600...5000
Толщина стенки свариваемых корпусов, мм	40...70
Грузоподъемность роликовых опор, т	100
Габаритные размеры станда, мм	25 000 × 6530 × 4900
Масса, кг	31 600

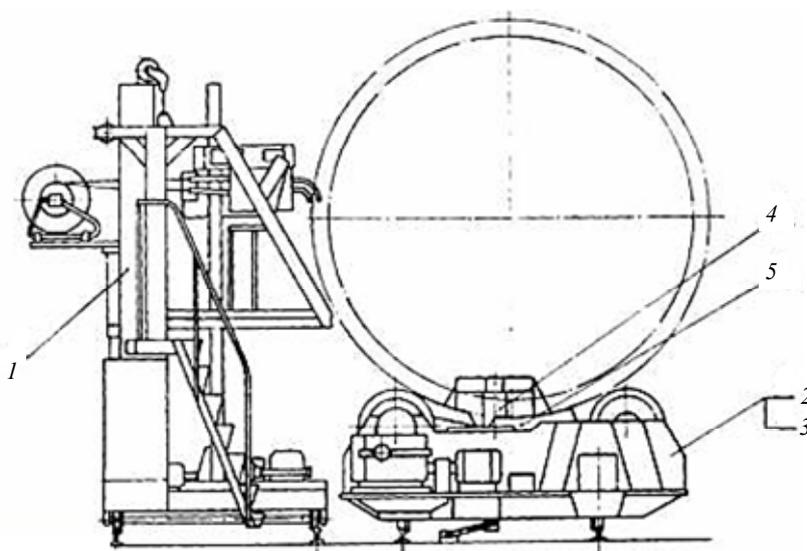


Рис. 2. Станд для электрошлаковой сварки кольцевых швов корпусов
Fig. 2. Stand for electroslag welding of annular seams of housings

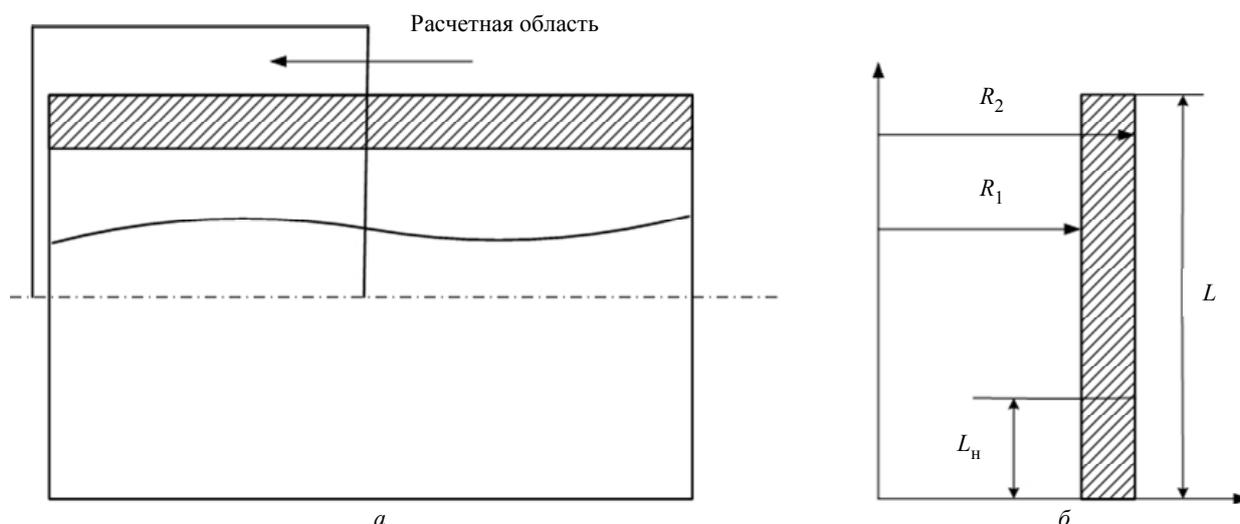


Рис. 3. Схема для расчетов: а – полый цилиндр для аналитических расчетов;
б – расчетная схема для численного моделирования
Fig. 3. Scheme for calculations: а – hollow cylinder for analytical calculations;
б – calculation scheme for numerical simulation

Ставится задача разработать простой и надежный метод аналитической количественной оценки качества сопутствующей нормализации при индукционном нагреве. Интерес представляют, в первую очередь, распределение внутренних источников тепла по толщине стенки цилиндра стенки от 40 до 70 мм из стали типов 09Г2С и 12ХМ с внутренним диаметром от 1600 до 5000 мм.

В расчетной схеме (рис. 3): *a* – полый цилиндр для аналитических расчетов; *b* – расчетная схема для численного моделирования; L_n – зона размещения нагревателей; L – длина расчетной области. Литая структура расположена в плоскости симметрии кольцевого сварного соединения и нагревается равномерно по наружной поверхности. Распределение внутренних источников в плоскости симметрии определяется видом нагрева.

В нулевом приближении плотность внутренних источников по сечению шва можно определить, используя решение задачи распространения плоской электромагнитной волны, падающей на плоскую металлическую поверхность неограниченной толщины [4]

$$w(h) = \exp\left[-\frac{2d}{\Delta}(1-h)\right].$$

Здесь $w(h)$ – плотность внутренних источников, отнесенная к ее величине на поверхности; d – толщина стенки сосуда; Δ – горячая глубина проникновения тока;

$$h = \frac{R - R_1}{R_2 - R_1},$$

где R_1 и R_2 – внутренний и наружный радиусы цилиндра соответственно, $R_2 \geq R \geq R_1$. В первом приближении плотность внутренних источников по сечению шва можно определить, используя решение задачи для двуслойной среды [4] в случае одностороннего поверхностного эффекта в пластине, имеющей толщину, равную толщине d стенки цилиндра, ограниченной с двух сторон непроводящей средой, например воздухом. В этом случае можно найти, что плотность внутренних источников в пластине, отнесенная к ее величине на поверхности, равна

$$w_1(h) = \frac{\operatorname{ch}\left(2\frac{d}{\Delta}h\right) + \cos\left(2\frac{d}{\Delta}h\right)}{\operatorname{ch}\left(2\frac{d}{\Delta}\right) + \cos\left(2\frac{d}{\Delta}\right)},$$

где $w_1(h)$ – первое приближение плотности внутренних источников.

Следующим шагом, приближающим к правдоподобному распределению внутренних источников в сечении шва, может служить решение задачи индукционного нагрева полого цилиндра при больших значениях $\sqrt{2}R_1/\Delta$ [5]. Аналитическое решение дифференциальных уравнений возможно при допущениях, делающих уравнения линейными. В горячем режиме относительная магнитная проницаемость μ стали типа 09Г2С равна 1, электропроводность γ можно считать постоянной. Цилиндр, помещенный в продольное магнитное поле, принимается достаточно длинным, чтобы можно было считать его бесконечным, а постановку задачи – одномерной. Подобное допущение не снижает ценности решения, поскольку нас интересует нагрев литой части сварного соединения.

Решение основного дифференциального уравнения для полого цилиндра в продольном магнитном поле

$$\frac{d^2 H}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dH}{dR} - j\omega\gamma\mu\mu_0 H = 0$$

имеет вид

$$H = C_1 J_0(x\sqrt{-j}) C_2 N_0(x\sqrt{-j}),$$

где H – напряженность магнитного поля; ω – частота тока, питающего нагреватель; γ – удельная электропроводность металла сосуда; μ_0 и μ – абсолютная и относительная магнитная проницаемость; C_1, C_2 – постоянные интегрирования; J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $R_2 \geq R \geq R_1$; $x\sqrt{-j}$ – аргумент означенных функций; N_0 – функция Бесселя второго рода нулевого порядка; $x = kR$, $k = \sqrt{j\omega\gamma\mu\mu_0}$.

Граничные условия на наружной поверхности цилиндра ($R = R_2$) известны. Напряженность магнитного поля $H = H_s$ на наружной поверхности определяется параметрами индуктора и силой тока в нем. (Ранее и в дальнейшем при амплитудных значениях напряженности магнитного поля индекс «*m*», означающий амплитуду, опущен.)

На внутренней поверхности цилиндра ($R = R_1$) граничное условие будет определять связь между плотностью тока δ_1 на внутренней поверхности полого цилиндра и напряженностью магнитного

поля H_1 во внутренней полости цилиндра, которую можно установить с помощью закона электромагнитной индукции

$$E_1 = \oint \frac{\delta_1}{\gamma} dl = 2\pi R_1 \delta_1 = -\frac{d\Phi}{dt} = -j\omega\mu_0 H_1 \pi R_1^2,$$

где l – замкнутый контур по внутренней поверхности цилиндра; $d\Phi$ – приращение магнитного потока во внутренней поверхности цилиндра.

Из последнего выражения следует:

$$\delta_1 = -\frac{j\omega\gamma\mu_0 R_1}{2} H_1.$$

Определенные граничные условия позволяют найти единственное решение основного уравнения, плотность тока δ_1 и напряженность магнитного поля H в стенке полого цилиндра [5].

Положим

$$\beta = \frac{1}{2\mu}, \quad h = \frac{R - R_1}{R_2 - R_1}, \quad m_0 = \frac{2(R_2 - R_1)}{\Delta}, \quad m_1 = \frac{\sqrt{2}R_1}{\Delta}.$$

Активная мощность вихревых токов в единице объема материала стенки цилиндра при $R_1 \rightarrow \infty$, полученная в [5], в таком случае находится как

$$W(h) = \frac{\delta^2}{2\gamma} = \frac{k^2 H_s^2}{2\gamma} \frac{R_2 M(h)}{RN(h=1)};$$

$$W_0 = \frac{k^2 H_s^2}{2\gamma}, \quad w(h) = \frac{W(h)}{W_0} = \frac{R_2 M(h)}{RN(h=1)},$$

где $W(h)$ – распределение активной мощности вихревых токов по толщине стенки сосуда; δ – плотность тока в стенке цилиндра; W_0 – активная мощность вихревых токов на наружной поверхности сосуда; $N(h)$ и $M(h)$ – коэффициенты, значения которых определяются по приближенным формулам для определения $W(h)$ при больших параметрах R_1 , также взятым из [5] и преобразованным для удобного представления результатов в графическом виде:

$$N(h) = \text{ch}(hm_0) + \cos(hm_0) + \beta^2 m_1^2 [\text{ch}(hm_0) - \cos(hm_0)] + \sqrt{2}\beta m_1 [\text{sh}(hm_0) - \sin(hm_0)];$$

$$M(h) = \text{ch}(hm_0) - \cos(hm_0) + \beta^2 m_1^2 [\text{ch}(hm_0) + \cos(hm_0)] + \sqrt{2}\beta m_1 [\text{sh}(hm_0) + \sin(hm_0)].$$

На практике и в прикладной литературе по индукционному нагреву широко используются поня-

тия удельной мощности p_0 от индуктора к поверхности нагреваемого изделия и глубины проникновения тока Δ . С учетом того, что

$$p_0 = \frac{1}{\Delta} \frac{H_s^2}{2\gamma}, \quad k = \frac{\sqrt{2}}{\Delta},$$

преобразуем

$$W_0 = \frac{k^2 H_s^2}{2\gamma} = \frac{p_0}{\Delta}.$$

В горячем режиме нагрева стального изделия глубина проникновения тока на частоте $f = 50$ Гц будет $\Delta = 0.07$ м и в случае сопутствующей нормализации кольцевых швов $p_0 = (2 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5)$ Вт/м².

В качестве примера принимаются: $R_1 = 1$, $R_2 = 1.07$. Значения $W_0(h)$, $W_1(h)$, $W(h)$, $0 < h < 1$ вычислены с помощью MathCad и представлены на рис. 4 (кривая 1 – $W(h)$, кривая 2 – $W_1(h)$, кривая 3 – $W_0(h)$).

Распределение плотности внутренних источников $W(h)$ по толщине стенки сосуда получено при меньшем количестве допущений по сравнению с другими приближениями $W_0(h)$ и $W_1(h)$, поэтому его следует предпочесть. Расчеты температурного поля сварного шва и зоны термического влияния по предложенному распределению внутренних источников тепла $W(h)$ свидетельствуют о возможности реализации локальной нормализации сварного шва совместно с ЭШС.

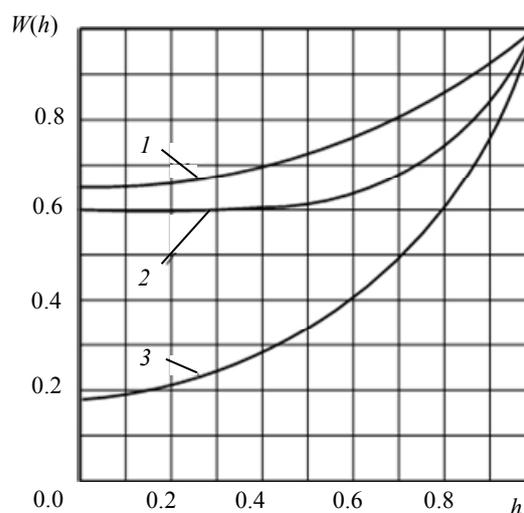


Рис. 4. Распределение внутренних источников тепла в стенке

Fig. 4. Distribution of internal heat sources in thick wall

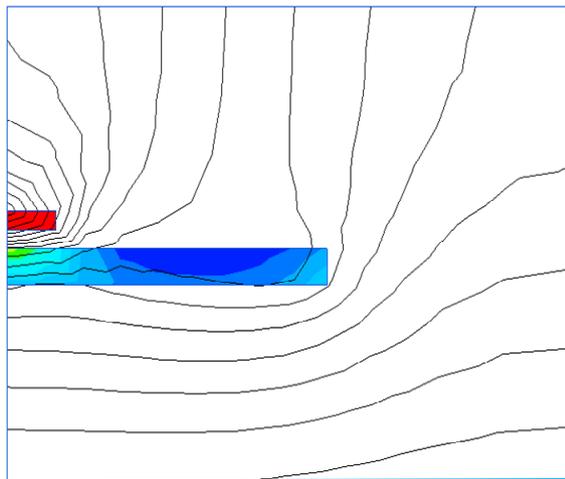


Рис. 5. Магнитное поле в расчетной области
Fig. 5. Magnetic field in the computational domain

Внедрение представленных на рис. 2 установок подтвердило данную расчетную возможность.

Это обстоятельство позволило разработать технологичный и надежный метод изготовления

плоских образцов для проверки качества сопутствующей нормализации кольцевых швов ЭШС.

Более точный результат получается при численном решении поставленной задачи. Например, с помощью общедоступной программы Elcut6.4Student [6] можно получить представление о магнитном поле в расчетной области (рис. 5) и локальные значения относительной плотности внутренних источников тепла на наружной и внутренней поверхности сосуда, а также других характеристик процесса.

Закключение. Для более точной оценки аналитического решения представляется целесообразным решить задачу численным методом более точно.

В случае признания аналитического решения удовлетворительным для инженерных расчетов оценка температурного поля и термонапряжений существенно упрощается.

Список литературы

1. Крошкин В. Н., Гейниш З. В., Губанов А. С. Электрошлаковая сварка с сопутствующей нормализацией индукционным способом // Автоматическая сварка. 1973, № 10. С. 23–27.
2. Земзин В. Н., Шрон З. В. Термическая обработка и свойства сварных соединений. Л.: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1978. 367 с.
3. Стенд для электрошлаковой сварки кольцевых швов корпусов с сопутствующей нормализацией. URL: <http://www.hna.ru/articles/automate/466.pub> (дата обращения 20.12.2021).
4. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. 190 с.
5. Родигин Н. М. Индукционный нагрев стальных изделий токами нормальной частоты. Свердловск–Москва: Металлургиздат, 1950. 248 с.
6. Программа для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. URL: https://elcut.ru/allnews/elcut64_r.htm (дата обращения 20.12.2021).

Информация об авторах

Царевский Виктор Васильевич – канд. техн. наук, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия.

E-mail: victsarj@mail.ru

Блинов Кирилл Юрьевич – канд. техн. наук, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия.

E-mail: kyblinov@etu.ru

Блинов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия.

E-mail: yuri-50@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-2620-2079>

References

1. Kroshkin V. N., Gejnish Z. V., Gubanov A. S. Elektroshlakovaya svarka s soputstvuyushchej normalizaciej indukcionnym sposobom // Avtomaticheskaya svarka. 1973, № 10. S. 23–27. (In Rus.).
 2. Zemzin V. N., SHron Z. V. Termicheskaya obrabotka i svojstva svarnyh soedinenij. L.: Mashinostroenie: Leningr. otd-nie, 1978. 367 s. (In Rus.).
 3. Stend dlya elektroshlakovoj svarki kol'cevych shvov korpusov s soputstvuyushchej normalizaciej. URL: <http://www.hna.ru/articles/automate/466.pub> (accessed: 20.12.2021). (In Rus.).
 4. Sluhockij A. E., Ryskin S. E. Induktory dlya indukcionnogo nagreva. L.: Energiya, 1974. 190 s. (In Rus.).
 5. Rodigin N. M. Indukcionnyj nagrev stal'nyh izdelij tokami normal'noj chastoty. Sverdlovsk-Moskva: Metallurgizdat, 1950. 248 s. (In Rus.).
 6. Programma dlya inzhenerenogo modelirovaniya elek-tromagnitnyh, teplovyh i mekhanicheskikh zadach metodom konechnyh elementov. URL: https://elcut.ru/allnews/elcut64_r.htm (accessed: 20.12.2021). (In Rus.).
-

Information about the authors

Victor V. Tsarevsky, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University, Professor Popov str., 5F, Saint Petersburg, 197022, Russia.

E-mail: victsarj@mail.ru

Kirill Yu. Blinov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University, Professor Popov str., 5F, Saint Petersburg, 197022, Russia.

E-mail: victsarj@mail.ru

Yuri I. Blinov, Dr Sci. (Eng.), Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University, Professor Popov str., 5F, Saint Petersburg, 197022, Russia.

E-mail: victsarj@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.10.2021; принята к публикации после рецензирования 25.01.2022; опубликована онлайн 11.03.2022.

Submitted 20.10.2021; accepted 25.01.2022; published online 11.03.2022.
