

УДК 621.791.722

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-738-750

**Для цитирования:** Серегин Ю. Н., Мурыгин А. В., Курашкин С. О. Моделирование технологических параметров электронно-лучевой сварки для изделий ракетно-космической техники // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 738–750. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-738-750.

**For citation:** Seregin Yu. N., Murygin A. V., Kurashkin S. O. [Modeling of technological parameters of electron beam welding for rocket and space technology products]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 738–750. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-738-750.

## Моделирование технологических параметров электронно-лучевой сварки для изделий ракетно-космической техники

Ю. Н. Серегин<sup>\*</sup>, А. В. Мурыгин, С. О. Курашкин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
<sup>\*</sup>E-mail: ius\_ceregin@sibsau.ru

*Статья содержит результаты научных исследований по моделированию технологических параметров электронно-лучевой сварки. При моделировании использовался материал ВТ-14 толщиной 0,16 см. Целью моделирования выбрано повышение качества сварного шва за счет оптимальной формы и отсутствие дефектов в виде пор и трещин. В расчетах применен концентрированный источник энергии, эквивалентный электронно-лучевому пучку. В ходе исследования теплового процесса нагрева материала авторами разработаны и опробованы критерии, позволяющие оптимизировать такие параметры сварки, как скорость сварки и положение фокусного пятна относительно поверхности нагреваемой детали. Авторы в своих расчетах применили оригинальный метод нахождения скорости сварки и координаты фокусного пятна по функционалам тепловой модели. Используемые математические модели позволили построить контуры зон термического влияния, соизмеримые с формами шва, полученными на образцах во время сварки с технологическими режимами, соответствующими расчетным при моделировании параметров. Такой способ исследований позволил существенно сэкономить затраты на отработку технологического режима сварки для макетного узла. Разработанный авторами алгоритм был успешно опробован на материале АМГ-6 с толщиной 10 см. В процессе моделирования сварки для больших толщин получены результаты, которые необходимо учитывать при оптимизации параметров сварки изделий с большой толщиной. Актуальность излагаемого материала подтверждается востребованностью к качеству технологии сварки конструкций электронным пучком. Исследования авторами этого направления позволят существенно расширить возможности в применении электронно-лучевой технологии для ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова:* скорость сварки, фокусное расстояние электронного пучка, форма шва, мощность электронно-лучевого оборудования, погонная энергия.

## Modeling of technological parameters of electron beam welding for rocket and space technology products

Yu. N. Seregin<sup>\*</sup>, A. V. Murygin, S. O. Kurashkin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
<sup>\*</sup>E-mail: ius\_ceregin@sibsau.ru

*The article contains the results of scientific research on modeling the technological parameters of electron beam welding. The modeling used a material VT-14 with a thickness of 0.16 cm. The purpose of the simulation is to improve the quality of the weld due to the optimal shape and the absence of defects in the form of pores and cracks. A concentrated energy source equivalent to an electron beam is used in the calculations. During the study of the thermal process of heating the material, the authors developed and tested criteria that allow optimizing welding parameters such as welding speed and the position of the focal spot relative to the surface of the heated part. In their calculations, the authors applied an original method of finding the welding speed and the coordinates of the focal spot according to the functionals of the thermal model. The algorithm developed by the authors was successfully tested on AMG-6 material with a thickness of 10 cm. In the process of modeling welding for large thicknesses, results have been obtained that must be taken into account when optimizing the welding parameters of products with large thickness. The relevance of the presented material is confirmed by the demand for the quality of the technology of welding structures with an electron beam. Research by the authors of this direction will significantly expand the possibilities in the application of electron beam technology for rocket and space technology.*

*Keywords: Welding speed, focal length of the electron beam, seam shape, power of electron beam equipment, linear energy.*

### **Введение**

Для создания неразъёмных соединений зачастую на производстве ракетно-космической техники используется электронно-лучевая сварка (ЭЛС). В процессе получения сварных соединений по разного рода причинам появляются дефекты, которые снижают прочность детали или металлоконструкции, нарушают герметичность выполняемых посредством сварки емкостей, а также способствуют уменьшению надежности эксплуатации данного узла в целом.

Соединение деталей требует равномерности зоны нагрева стыка, так как при неравномерности его нагрева возникают дефекты сварных соединений. Требуемые параметры технологического процесса сварки обычно подбираются при помощи натуральных экспериментов. Однако проведение натуральных экспериментов является материально затратным и требует большого количества времени.

Решению вопросов повышения качества процесса сварки посвящены исследования многих отечественных и зарубежных авторов (Зуев И. В., Трушников Д. Н., Нара К., Виноградов В. А., Sasaki S., Кривенков В.А., Куцан Ю. Г., Anderl P. и др.) [1–4]. В своих исследованиях Родякина Р. В. [5] разрабатывает методику моделирования процесса прохождения пучка электронов через слой испаренного металла. Авторы Мотасов М. И., Довыдов Д. А., Алексеев В. С. [6] рассматривают имитационную модель системы управления фокусировкой луча с использованием программной среды Simulink, входящей в состав пакета MATLAB. Дрозд А. А. [7] использует численный метод, который позволяет моделировать процессы развития термических напряжений и деформаций при точечной электронно-лучевой сварке, в модели учитываются фазовые переходы при нагреве, плавлении, испарении и кристаллизации. Тарасова В. Н. [8] разработала метод компьютерного моделирования, позволяющий существенно снизить временные затраты на изготовление свариваемых изделий и прогнозирующий результаты в заранее заданных условиях. Авторы Мелюков В. В. и Тарабукин Д. А. [9] предложили метод математического и численного моделирования теплового процесса сварки для определения мощности сварочного источника и сокращения времени и объема натурального эксперимента при отладке режима.

### **1. Применение теории тепловых процессов к ЭЛС**

У большинства имеющихся разработок есть ряд недостатков – отсутствует возможность реализовать разработанные методы в производственных условиях в связи с их сложностью, узконаправленность, отсутствие возможности оптимизации технологических параметров при вводе в технологический процесс новых материалов. Оптимизация технологических парамет-

ров процесса сварки при вводе новых материалов требует проведения натуральных экспериментов, что ведет к увеличению материальных и трудовых затрат. Предложенные методики и модель в данном исследовании, а также разработанная АСУ ЭЛС позволяют решить вышеуказанные проблемы и снизить количество дефектов, возникающих в процессе сварки, как для существующих режимов сварки, так и при вводе в эксплуатацию нового изделия.

Для авторов наибольший интерес представляет технология, которая используется для широкой номенклатуры толщин соединяемых конструкций. В работах [10–17] авторами предложены материалы по моделированию процесса ЭЛС с целью нахождения оптимального режима для толщин от 0,1 до 30 мм. Полученный опыт моделирования привел авторов к идее исследования возможности применения ЭЛС для значительно больших толщин свариваемых изделий. Таким образом, была реализована цель оценить возможности моделирования теплового процесса нагрева исследуемого материала концентрированным источником энергии в широком диапазоне толщины и применения результатов моделирования для практического использования на электронно-лучевом оборудовании.

При моделировании процесса электронно-лучевой сварки применялся классический способ представления процесса (рис. 1) в виде движущихся мгновенных источников энергии (рис. 2), количество и расположение которых в полной мере соответствует реальному электронному пучку.

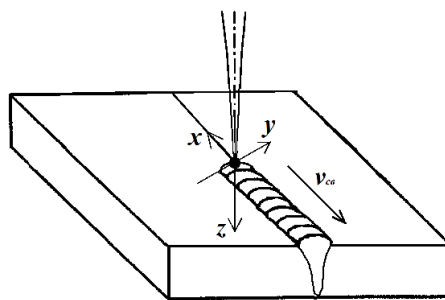


Рис. 1. Представление ЭЛС в графическом виде

Fig. 1. Representation of the EBW in graphical form

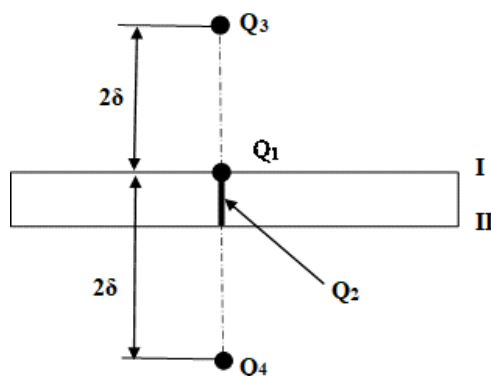


Рис. 2. Представление ЭЛС в графическом виде:

$\delta$  – толщина детали;  $Q_1$  – мгновенный точечный источник;  $Q_2$  – мгновенный линейный источник;  $Q_3$  и  $I$  – фиктивные точечные источники

Fig. 2. Representation of the EBW in graphical form:

$\delta$  – part thickness;  $Q_1$  – instant point source;  $Q_2$  – instant linear source;  $Q_3$  и  $Q_4$  – fictitious point sources

Температура нагрева материала вследствие воздействия выбранных источников в соответствии с [18] и принципа суперпозиции вычисляется по (1):

$$T_{\text{комп}} = \sum_{i=1}^4 T_i(x, y, z, v, t, Q_i), \quad (1)$$

где

$$T_1 = \frac{Q_1}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}t} \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}};$$

$$T_2 = \frac{Q_2}{4\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}t} \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{2\lambda\tau}{c\rho\delta} - \frac{x^2 + y^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau};$$

$$T_3 = \frac{Q_3}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}t} \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2 + y^2 + (z-2\delta)^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}};$$

$$T_4 = \frac{Q_4}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}t} \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2 + y^2 + (z+2\delta)^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} - \text{температура от воздейст-}$$

вия соответствующих мгновенных источников (см. рис. 2).

Используемая модель теплового процесса (1) исследовалась и настраивалась для материала ВТ-14 с толщиной проплавления  $1,5 \pm 0,5$  мм. Для сравнения формы поперечного сечения шва и смоделированной зоны термического влияния было принято соответствие соотношения размеров ширины к глубине шва. На рис. 3 приведены результаты моделирования и форма шлифа соответствующего режима сварки. График зоны термического влияния получен вычислением (1) и выбором сечения зоны нагрева по координатам, соответствующим наибольшему отклонению температуры термического влияния (для ВТ-14 – 600 °С) от положения источника нагрева.

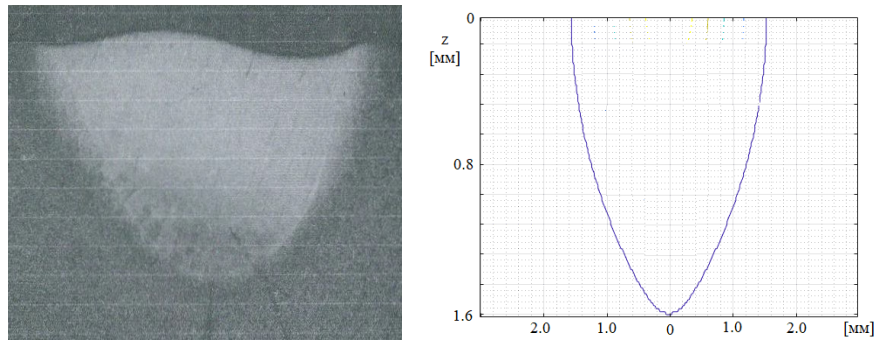


Рис. 3. Изображения формы шлифа и зоны термического влияния для применяемого в производственных условиях режима сварки

Fig. 3. Images of the shape of the slot and the zone of thermal influence for the welding mode used in production conditions

## 2. Разработка математического функционала

Для вычисления таких параметров технологического процесса, как скорость сварки, фокусное расстояние и требуемая мощность для ЭЛС авторами разработана модель математического функционала (2) (аналога среднеквадратическому отклонению), критерий оптимальности (3) которого позволяет определить указанные параметры технологического процесса для материала любой толщины:

$$J_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{\text{норм}i} - \overline{T_{\text{норм}}})^2}; \quad (2)$$

$$J_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{\text{норм}i} - \overline{T_{\text{норм}}})^2} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Согласно разработанному критерию, параметрами технологического процесса будут решения системы (4)

$$\begin{cases} \frac{\partial J_1}{\partial v} = 0, \\ \frac{\partial J_1}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial J_1}{\partial Q} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $v$  – скорость сварки;  $z$  – положение фокусного пятна;  $Q$  – энергия источника нагрева (равна сумме мгновенных точечного  $Q_1$  и линейного  $Q_2$  источников).

Для поиска требуемых технологических параметров ЭЛС (энергия, время, скорость сварки) был разработан алгоритм, представленный в виде блок-схемы на рис. 4.

Алгоритм основан на предлагаемых в данном исследовании моделях (1)–(4). После инициализации технологических параметров задаются следующие параметры:  $T$  – температура граничной зоны термического влияния (от минимальной до максимальной),  $t$  – время интегрирования,  $v$  – скорость сварки,  $Q$  – энергия источников нагрева,  $x$  – координаты по длине изделия,  $y$  – координаты по ширине изделия,  $z$  – координаты по высоте изделия. Далее значения сохраняются в базу данных для дальнейшего использования в будущих вычислениях. В случае, если эксперимент новый, то для вычисления энергии источника нагрева задаются значения температуры, времени интегрирования и скорости сварки после вычисления температуры нагрева (1) при действующих фиктивных и действительных источниках. Далее, применяя критерий оптимальности (2), вычисляется требуемая энергия, обеспечивающая равномерную зону нагрева сварного шва. Для нахождения времени интегрирования задается полученная энергия и температура граничной зоны термического влияния, затем вычисляется температура нагрева, варьируя остальные параметры в некотором диапазоне. Зная оптимальные значения энергии, времени интегрирования производится вычисления скорости сварки, аналогично предыдущим этапам.

Применив указанный алгоритм для деталей с толщиной до 100 мм, авторы столкнулись с особенностью, которая проявила себя при вычислении координаты фокусного пятна электронного пучка и распределении энергий мгновенных источников. При увеличении толщины свариваемого материала экстремум функционала (3) исчезает. Это объясняет тот факт, что сварку больших толщин осуществляют электронно-лучевой пушкой с узким фокусом.

Идея простого перебора указанных параметров с применением критерия оптимизации (3) представляет собой задачу, требующую больших временных затрат, что зачастую приводит к практической нецелесообразности проведения работ в этом направлении.

### 3. Разработка физического функционала

При изучении технологии сварки конструкций с различной толщиной проплавления, авторы столкнулись с задачей выбора конкретных значений энергий для источников  $Q_1$  и  $Q_2$ . Причем способ выбора этих величин зависит от исследуемых толщин деталей. Часто во время моделирования тепловых процессов исследователи выбирают величину энергии точечного источника, опираясь на экспериментальный материал с целью получения адекватной математической модели [19–22]. Авторы поступили аналогичным образом, выбирая наилучшее соответствие в соотношении между шириной шва и его глубиной.

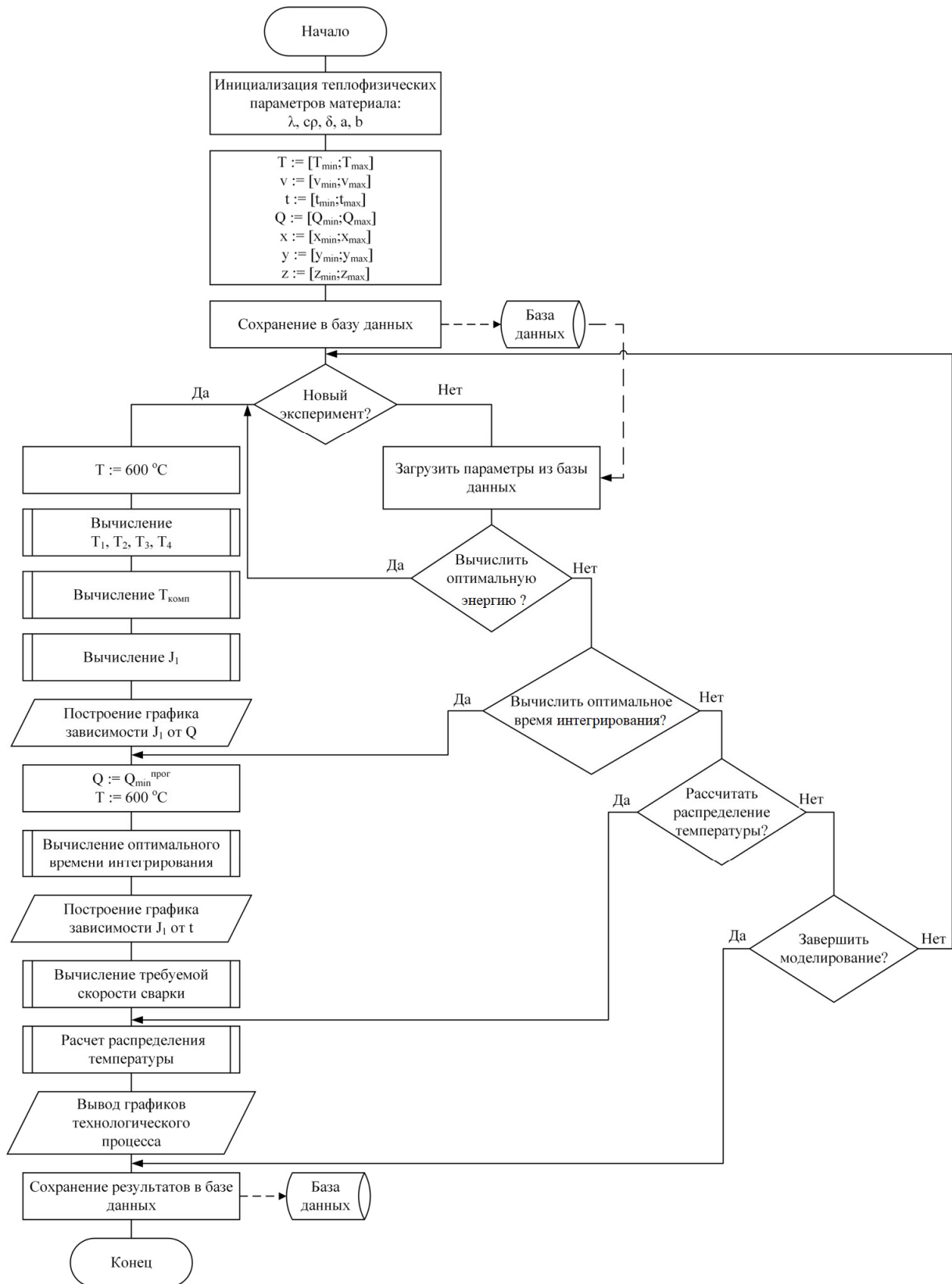


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска требуемых технологических параметров процесса сварки

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for finding the required technological parameters of the welding process

Для сокращения времени поиска указанного соотношения, авторами разработан физический функционал (5) и критерий оптимизации для этого функционала (6):

$$J_2 = \left( \left( \frac{Q}{v} \right)_{\text{норм}} - (Q \cdot t)_{\text{норм}} \right)^2; \quad (5)$$

$$J_2 = \left( \left( \frac{Q}{v} \right)_{\text{норм}} - (Q \cdot t)_{\text{норм}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $Q$  – энергия источника нагрева, включающего подобранные источники  $Q_1$  и  $Q_2$ ;  $v$  – скорость сварки,  $t$  – время достижения границы зоны термического влияния нижней границы зоны нагрева.

Моделирование процесса нагрева при сварке с использованием обоих критериев оптимальности показало хорошую корреляцию разработанных функционалов. Это послужило основанием для объединения критериев оптимальности в получении общего решения в поиске требуемых технологических параметров ЭЛС.

Применение физического функционала при моделировании процесса ЭЛС значительно сокращает вычислительный ресурс, так как использует исходную систему уравнений теплового процесса (1) в упрощенном варианте (для определения только  $v$  – скорости сварки и  $t$  – времени достижения границы зоны термического влияния нижней границы зоны нагрева).

В качестве исходного материала авторами был выбран технологический режим, применяемый в производственных условиях. Используя модели (1), (3), (5) проведен расчет параметров, входящий в состав этих уравнений. Результаты вычислений представлены в таблице.

Результаты вычисления для ВТ-14 толщиной 0,16 см

Q [Калл.]	Q <sub>1</sub> [Калл.]	Q <sub>2</sub> [Калл.]	Delta = 0,16 см (f = 0)					
			J <sub>1</sub>	Q/v	v [см/с]	t [с]	Q · t	J <sub>2</sub>
800	560	240	0,062243	484,8485	1,65	0,236	188,8	0,000291516
810	567	243	0,062089	486,4865	1,665	0,2346	190,026	0,000208469
820	574	246	0,061959	488,0952	1,68	0,2332	191,224	0,00014109
830	581	249	0,061844	489,6755	1,695	0,2318	192,394	8,82512E-05
840	588	252	0,061739	491,2281	1,71	0,2304	193,536	4,88335E-05
850	595	255	0,061649	492,7536	1,725	0,229	194,65	2,17259E-05
860	602	258	0,061591	494,2529	1,74	0,2276	195,736	5,82972E-06
870	609	261	0,061522	495,7265	1,755	0,2262	196,794	6,22367E-08
880	616	264	0,061473	497,1751	1,77	0,2248	197,824	3,35895E-06
890	623	267	0,061452	498,5994	1,785	0,2234	198,826	1,46767E-05
900	630	270	0,061436	500	1,8	0,222	199,8	3,29965E-05
910	637	273	0,061431	502,7624	1,81	0,2203	200,473	1,4464E-05
920	644	276	0,061438	505,4945	1,82	0,2186	201,112	3,10314E-06
930	651	279	0,061451	508,1967	1,83	0,2169	201,717	1,45467E-07
940	658	282	0,0615	510,8696	1,84	0,2152	202,288	6,89928E-06
950	665	285	0,061547	513,5135	1,85	0,2135	202,825	2,4751E-05
960	672	288	0,061954	516,129	1,86	0,2118	203,328	5,51664E-05
970	679	291	0,062063	518,7166	1,87	0,2101	203,797	9,96923E-05
980	686	294	0,062167	521,2766	1,88	0,2084	204,232	0,000159957
990	693	297	0,06226	523,8095	1,89	0,2067	204,633	0,000237674
1000	700	300	0,062375	526,3158	1,9	0,205	205	0,000334638

По результатам таблицы построены графики для функционалов (3) и (5) (рис. 5).

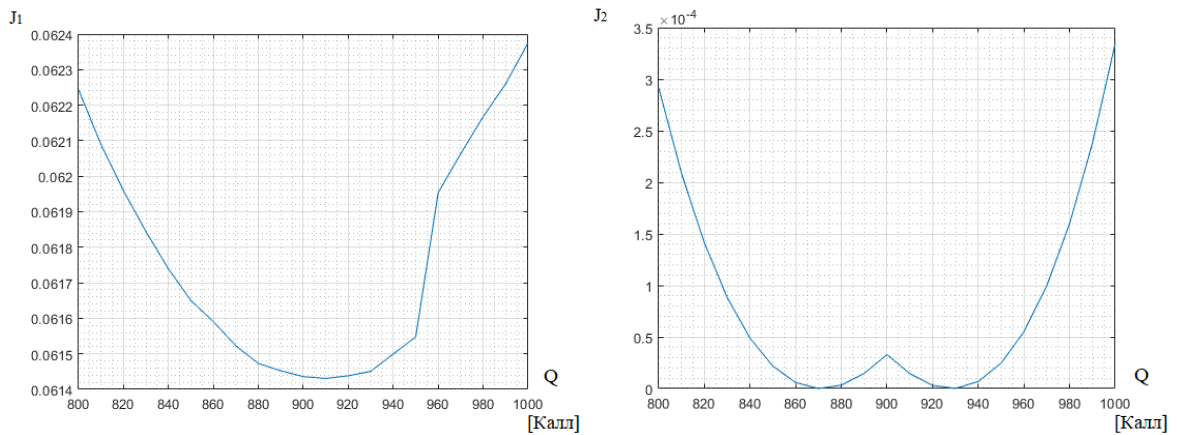


Рис. 5. Графики зависимостей функционалов

Fig. 5. Graphs of functional dependencies

Поиск оптимальных параметров выполняется по принятым критериям (4) и (6). В качестве решения принимаются координаты, где экстремумы по обоим функционалам совпадают.

В нашем случае имеется некоторое расхождение, поэтому была выбрана координата правого экстремума для функционала  $J_2$ . В таблице выделены технологический режим и режим, который принят как оптимальный. Размеры технологического режима представлены на рис. 3. На рис. 6 приведены результаты моделирования и форма шлифа соответствующего выбранного оптимального режима сварки.

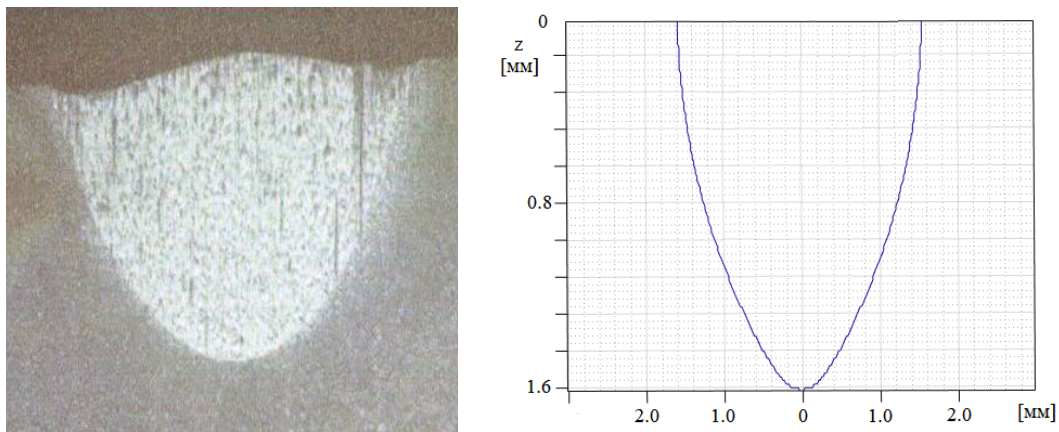


Рис. 6. Изображения формы шлифа и зоны термического влияния для оптимального по таблице режима сварки

Fig. 6. Images of the shape of the slot and the zone of thermal influence for the optimal welding mode according to Table

Как видно, оптимизация не дала значительных улучшений в сторону снижения ширины шва относительно глубины. Это связано, прежде всего, с тем, что фокусное пятно электронного пучка находилось на поверхности детали. Авторы провели исследования по влиянию на функционал (3) положения фокуса относительно поверхности детали. Было выявлено, что значение функционала будет наименьшим в случае, когда фокус электронного пучка находится внутри детали приблизительно на глубине, равной половине глубины проплавления (рис. 7).



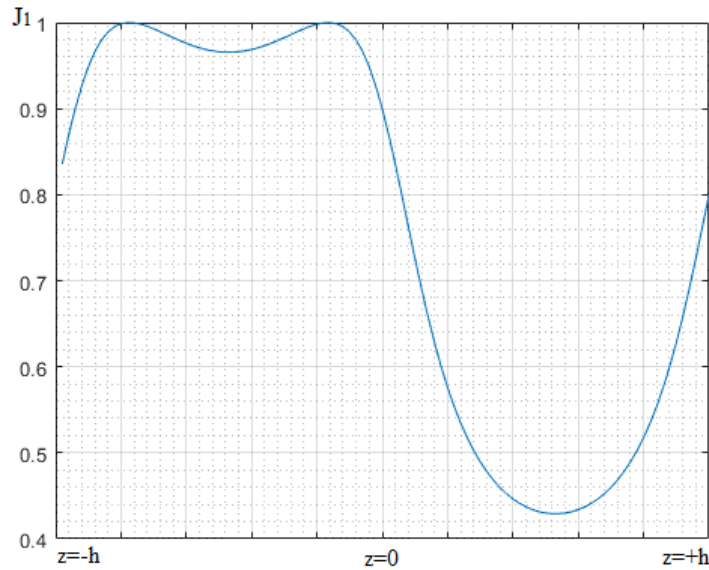


Рис. 7. График изменения функционала для толщины 0,16 см

Fig. 7. Functional change graph for 0.16 cm thickness

С учетом изменения положения фокуса авторы провели эксперимент с предложенным ранее режимом сварки. На рис. 8 приведены результаты моделирования и форма шлифа соответствующего выбранного оптимального режима сварки.

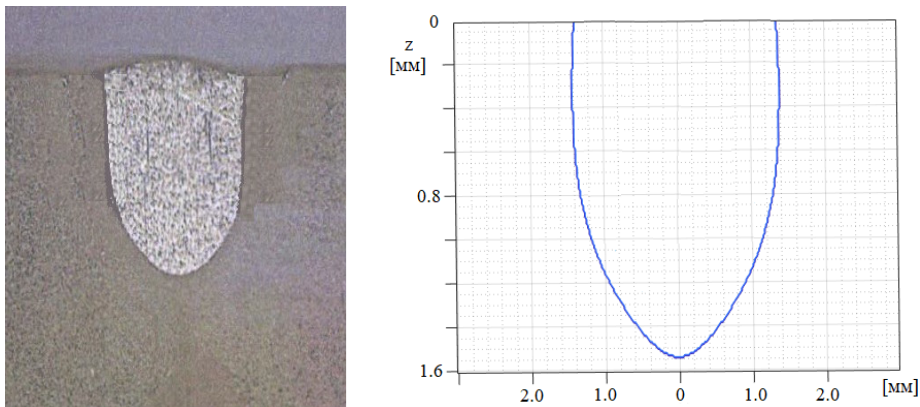


Рис. 8. Изображения формы шлифа и зоны термического влияния для оптимального режима сварки с учетом измененного фокусного расстояния

Fig. 8 Images of the shape of the slot and the zone of thermal influence for optimal welding mode taking into account the changed focal length

Результаты моделирования и опытные данные показали, что с применением полученных экспериментальных исследований боковые стенки шва опытного образца стали более параллельны, что удовлетворяет требованиям по снижению остаточных напряжений в сварочных деталях, что значительно повышает качественные показатели технологического процесса.

При моделировании технологического процесса сварки для больших толщин (от 3 см и более) авторы столкнулись со следующим явлением: при определении оптимального фокусного расстояния по минимуму функционала (2) экстремум функции не наблюдается (рис. 9).

У авторов не было возможности получить технологические параметры на образцы сварных швов больших толщин, поэтому они сделали предположение в том, что положение фокусного

пятна не оказывает влияния на процесс сварки. Объяснением этого может служить возможность сварочного оборудования проводить сварку таких глубин. Как правило, для этого применяются энергоустановки, укомплектованные электронно-лучевыми пушками с узко фокусными характеристиками пушки. Авторы провели моделирование, аналогичное изложенному для алюминиевого сплава АМГ-6 прогнозируемой модели теплового процесса сварки больших глубин проплавления, позволяющих провести оценку возможностей сварки изделий на существующем оборудовании или выбор подходящей для этого энергоустановки. Как видно из рис. 10, помимо общей координаты для критериев (3) и (5), наличие у второго функционала нескольких экстремумов расширяет картину поиска оптимальных параметров электронно-лучевой сварки, не ограничиваясь только общим с первым функционалом экстремумом.

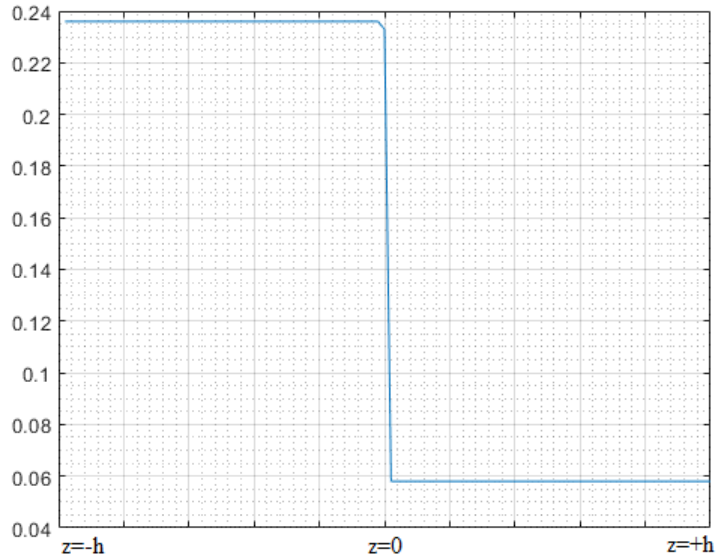


Рис. 9. График изменения функционала для толщины 10 см

Fig. 9. Functional change graph for 10 cm thickness

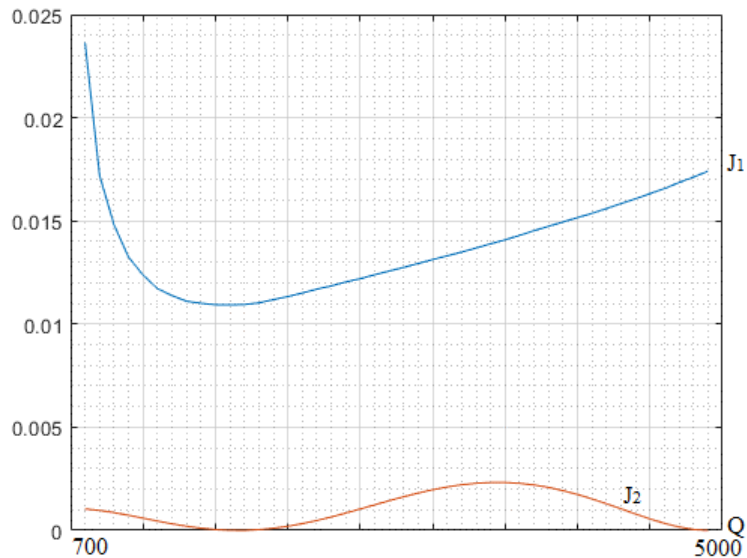


Рис. 10. Графики поведения функционалов от вводимой энергии для АМГ-6 толщиной 10 см

Fig. 10. Graphs of the behavior of functionals from the input energy for AMG-6 with a thickness of 10 cm

Совместное применение функционалов позволяет при моделировании объединить два физических свойства процесса нагрева материала: температурные характеристики зоны нагрева и эффективное энерговложение источников нагрева.

### Заключение

Результаты научных исследований, проведенные авторами, позволяют теоретически определить такие возможные параметры технологии электронно-лучевой сварки, как скорость перемещения свариваемого материала и требуемая энергия источника нагрева для деталей с широким диапазоном свариваемых толщин. Применение электронно-лучевой технологии для изготовления изделий ракетно-космической техники существенно окажет влияние на качество сварных соединений за счет оптимального выбора указанных параметров сварки.

### Библиографические ссылки

1. Guoqing, Ch., Junpeng L., Xi S., Hua G. Numerical simulation of keyhole morphology and molten pool flow behavior in aluminum alloy electron-beam welding // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 138. P. 879–888.
2. Ziyu, Y., Yuchao F., Jingshan H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow during vacuum electron beam welding of 2219 aluminium girth joints // *Vacuum*. 2020. Vol. 175. P. 109–126.
3. Sanjib J., Dilip K. P. Fuzzy Inference System-Based Neuro-Fuzzy Modeling of Electron-Beam Welding // *Advances in Computational Methods in Manufacturing*. 2019. Vol. 123. P. 839–850.
4. Mathematical modeling of the electron-beam wire deposition additive manufacturing by the smoothed particle hydrodynamics method / D. N. Trushnikov, E. G. Koleva, R. P. Daviyatshi et al. // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2019. Vol. 5. P. 1–14.
5. Родякина Р. В., Щербаков А. В., Гапонов Д. А. Моделирование процесса ионизации металла в ЭЛС // *Электронно-лучевая сварка и родственные технологии*. 2020. № 1. С. 129–136.
6. Мотасов М. И., Довыдов Д. А., Алексеев В. С. Автоматизация управления фокусировкой луча при электронно-лучевой сварке // *Вопросы электротехники*. 2017. № 1. С. 127–130.
7. Дрозд А. А. Численное исследование температурных полей и деформаций в процессе точечной электронно-лучевой сварки // *Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук*. 2018. № 1. С. 290–294.
8. Тарасова В. Н. Оптимизация конструкции электронно-лучевого оборудования за счет компьютерного моделирования // *Наука и современное образование. Материаловедение, машиностроение*. 2021. № 1. С. 11–13.
9. Мелюков В. В., Тарабукин Д. А. Определение параметров сварочного источника в зависимости от геометрических размеров сварочного шва // *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Материаловедение*. 2017. № 1. С. 117–130.
10. Seregin Yu. N., Murygin A. V., Kurashkin S. O. Features of modeling the electron beam energy distribution for the electron beam welding process // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 266–273.
11. Mathematical modelling of waveguide paths by electron-beam welding / S. O. Kurashkin, A. V. Murygin, Yu. N. Seregin et al. // *3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, ISM 2021. Procedia Computer Science, Elsevier*. 2022. Vol. 200. P. 83–90.
12. Hardware Control of the Electron Beam Energy Density by the Heating Spot / S. O. Kurashkin, V. S. Tynchenko, Yu. N. Seregin et al. // *Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Singapore, 2022. P. 71–78.
13. Kurashkin S. O., Seregin Yu. N. Modeling the thermal process using the temperature functional by electron beam welding // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. Vol. 734, No. 1. P. 012003.
14. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process / S. O. Kurashkin, Yu. N. Seregin, V. S. Tynchenko et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. Vol. 1515, No. 5. P. 052049.

15. Analytical characteristics of the electron beam distribution density over the heated spot for optimizing the electron-beam welding process / S. O. Kurashkin, V. D. Laptенок, A. V. Murygin, Yu. N. Seregin // IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing. 2019. Vol. 681, No. 1. P. 012021.
16. Свидетельство № 2021616858 Российской Федерации. Программа для моделирования плотности распределения электронного пучка с использованием различных сканирований при электронно-лучевой сварке: № 2021615834: заяв. 19.04.2021, опубл. 28.04.2021 / Курашкин С. О., Тынченко В. С., Серегин Ю. Н., Мuryгин А. В. 1 с.
17. Сертификат № 2018664000 Российской Федерации. Программа для определения скорости сварки для оптимального нагрева металла в зоне проплавления: № 2018661400: заяв. 19.10.2018; опубл. 08.11.2018 / Серегин Ю. Н., Курашкин С. О., Мuryгин А. В., Тынченко В. С. 1 с.
18. Неровный В. М. Теория сварочных процессов. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 340 с.
19. Недосека А. Я., Санченко Г. А., Ворона Г. А. Распределение температуры при воздействии концентрированного источника тепла на поверхность пластины // Автоматическая сварка. 1977. № 6. С. 1–4.
20. Недосека А. Я., Чернова О. И. Распределение температуры в пластинах с источником нагрева при сварке на разной глубине // Автоматическая сварка. 1977. № 7. С. 1–4.
21. Башенко В. В., Петров Г. Л. Формирование зоны проплавления при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. 1977. № 9. С. 23–27.
22. Михайлов В. Г., Петров П. И. Расчет тепловых процессов при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. 1988. № 5. С. 13–15.

## References

1. Guoqing, Ch., Junpeng L., Xi S., Hua G. Numerical simulation of keyhole morphology and molten pool flow behavior in aluminum alloy electron-beam welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, Vol. 138, P. 879–888.
2. Ziyou, Y., Yuchao F., Jingshan H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow during vacuum electron beam welding of 2219 aluminium girth joints. *Vacuum*. 2020, Vol. 175, P. 109–126.
3. Sanjib J., Dilip K. P. Fuzzy Inference System-Based Neuro-Fuzzy Modeling of Electron-Beam Welding. *Advances in Computational Methods in Manufacturing*. 2019, Vol. 123, P. 839–850.
4. Trushnikov D. N. Koleva E. G., Daviyatshi R. P., Gerasimov R. M., Bayandin Yu. V. Mathematical modeling of the electron-beam wire deposition additive manufacturing by the smoothed particle hydrodynamics method. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2019, Vol. 5, P. 1–14.
5. Rodyakina R. V., Shcherbakov A. V., Gaponov D. A. [Modeling of the metal ionization process at EBW]. *Elektronno-luchevaya svarka i rodstvennye tekhnologii*. 2020, No. 1, P. 129–136 (In Russ.).
6. Motasov M. I., Dovyodov D. A., Alekseev V. S. [Automation of beam focusing control during electron beam welding]. *Voprosy elektrotekhniki*. 2017, No. 1, P. 127–130 (In Russ.).
7. Drozd A. A. [Numerical study of temperature fields and deformation in the process of spot electron beam welding]. *Prikladnaya matematika i informatika: sovremennyye issledovaniya v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh nauk*. 2018, No. 1, P. 290–294 (In Russ.).
8. Tarasova V. N. [Optimization of the design of electron beam equipment due to computer modeling]. *Nauka i sovremennoe obrazovanie. Materialovedenie, mashinostroenie*. 2021, No. 1, P. 11–13 (In Russ.).
9. Melyukov V. V., Tarabukin D. A., ElectJolisch T. [Determination of welding source parameters depending on the geometric dimensions of the weld]. *Elektronno-luchevaya svarka i smezhnye tekhnologii. Materialovedenie*. 2021, Vol. 63, P. 17–28 (In Russ.).
10. Seregin Yu. N., Murygin A. V., Kurashkin S. O. Features of modeling the electron beam energy distribution for the electron beam welding process. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 266–273.
11. Kurashkin S. O., Murygin A. V., Seregin Yu. N., Tynchenko V. S., Lavrishev A. V. Mathematical modelling of waveguide paths by electron-beam welding. *3rd International Conference*

on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, ISM 2021. *Procedia Computer Science, Elsevier*. 2022, Vol. 200, P. 83–90.

12. Kurashkin S. O., Tynchenko V. S., Seregin Yu. N., Murygin A. V., Bocharov A. N. Hardware Control of the Electron Beam Energy Density by the Heating Spot. *Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Singapore, 2022, P. 71–78.

13. Kurashkin S. O., Seregin Yu. N. Modeling the thermal process using the temperature functional by electron beam welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020, Vol. 734, No. 1, P. 012003.

14. Kurashkin S. O., Seregin Yu. N., Tynchenko V. S., Petrenko V. E., Murygin A. V. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020, Vol. 1515, No. 5, P. 052049.

15. Kurashkin S. O., Laptinok V. D., Murygin A. V., Seregin Yu. N. Analytical characteristics of the electron beam distribution density over the heated spot for optimizing the electron-beam welding process. *IOP conference series: materials science and engineering*. IOP Publishing, 2019, Vol. 681, No. 1, P. 012021.

16. Certificate No. 2021616858 Russian Federation. A program for modeling the electron beam distribution density using various scans during electron beam welding: No. 2021615834 : application 19.04.2021 publ. 28.04.2021 Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Seregin Yu.N., Murygin A.V. 1 p.

17. Certificate No. 2018664000 Russian Federation. The program for determining the welding speed for optimal heating of metal in the area of penetration: No. 2018661400 : application 19.10.2018 : publ. 08.11.2018 Seregin Yu.N., Kurashkin S.O., Murygin A.V., Tynchenko V.S. 1 p.

18. Nerovniy V. M., Konovalov A. V., Yakushin B. F. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2016, 340 p.

19. Nedoseka A. Ya., Sanchenko G. A., Vorona G. A. [Temperature distribution under the action of a concentrated heat source on the plate surface]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1977, No. 6, P. 1–4 (In Russ.).

20. Nedoseka A. Ya., Chernova O. I. [Temperature distribution in plates with a welding heating source at different depths]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1977, No. 7, P. 1–4 (In Russ.).

21. Bashenko V. V., Petrov G. L. [Formation of the penetration zone during electron beam welding]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1977, No. 9, P. 23–27 (In Russ.).

22. Mikhailov V. G., Petrov P. I. [Calculation of thermal processes in electron beam welding]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1988, No. 5, P. 13–15 (In Russ.).

© Серегин Ю. Н., Мурыгин А. В., Курашкин С. О., 2023

---

**Серегин Юрий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ius\_ceregin@sibsau.ru.

**Мурыгин Александр Владимирович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ius\_murygin@sibsau.ru.

**Курашкин Сергей Олегович** – ассистент кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kurashkin\_so@sibsau.ru.

**Seregin Yuri Nikolaevich** – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Information and Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ius\_ceregin@sibsau.ru.

**Murygin Alexander Vladimirovich** – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Information and Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ius\_murygin@sibsau.ru.

**Kurashkin Sergey Olegovich** – Assistant of the Department of Information and Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kurashkin\_so@sibsau.ru.

---