

УДК 621.791.012.5.

А. В. Торбеева, В. В. Мелюков

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ СВАРКЕ С ГЛУБОКИМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

Электронно-лучевое воздействие на металлы, приводящее к их нагреву, плавлению и испарению, как новое технологическое направление в области их обработки интенсивно развивается в последние десятилетия. Сущность процесса электронно-лучевого воздействия состоит в том, что кинетическая энергия сформированного в вакууме тем или иным способом электронного пучка (импульсного или непрерывного) превращается в тепловую в зоне обработки. В данной работе выполнено численное моделирование теплового процесса сварки с глубоким проплавлением. Исследованы температурные поля, получающиеся при использовании нормально-кругового и равномерно-распределенного сварочных источников. Было показано, что ширина шва и максимальные значения температур при сварке указанными видами источников различаются несущественно, что позволяет в дальнейшем при решении задачи оптимального управления сварочным источником ограничиться классом кусочно-постоянных функций.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, быстродвижущийся источник, модель теплового процесса, глубокое проплавление.

В настоящее время во всем мире ни одна отрасль промышленности, связанная с получением соединений и обработкой материалов, не обходится без электронно-лучевого нагрева. Это можно объяснить характерными преимуществами метода, главными из которых являются возможность концентрации энергии от 10^3 до $5 \cdot 10^8$ Вт/см², то есть во всем диапазоне термического воздействия, ведение процесса в вакууме, что обеспечивает чистоту обрабатываемого материала, а также возможность управления процессом обработки.

Наиболее интенсивно развивается техника электронно-лучевой сварки металлов. Причина интенсивного развития техники электронно-лучевой сварки

металлов связана с тем, что основной объем теоретических и экспериментальных исследований процесса электронно-лучевого воздействия выполнен для диапазона плотностей энергии $10^5 - 10^6$ Вт/см² (переходные режимы и режимы глубокого проплавления), как наиболее интересного с точки зрения выявления физики процесса.

Электронно-лучевое воздействие в этом диапазоне характеризуется феноменом «кинжального», или глубокого, проплавления с соотношением глубины шва к его ширине 10 : 1 и более. Увеличение концентрации энергии до $\sim 10^7$ Вт/см² приводит к переходу от «кинжального» проплавления к образованию отверстия в материале. Нагрев при концентрациях менее 10^5 Вт/см² (например, плавка) сопровождается обычной полусферической формой проплавления металла (рис. 1) [1, 2].

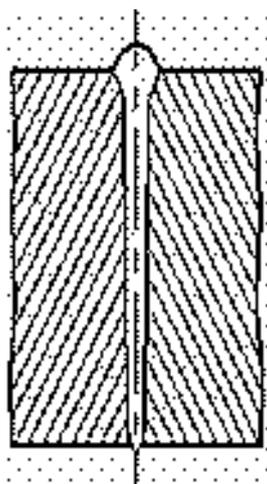


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения зоны обработки при электронно-лучевом воздействии: «кинжальное» проплавление

Выявление механизма глубокого проплавления является центральной проблемой в процессе электронно-лучевого воздействия.

Рассмотрим тепловую модель стыковой сварки пластин толщиной δ , как плоского слоя, и, используя схему быстродвижущегося источника [3], будем рассматривать двумерный тепловой процесс в поперечном сечении $ABCO$ (рис. 2).

Уравнение теплопроводности с объемным источником энергии имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{c_v}, \quad (1)$$

$$t > 0, \quad y \in (0, l), \quad z \in (0, \delta),$$

где $T(y, z, t)$ – распределение температуры в поперечном сечении $ABCO$ свариваемых пластин толщиной δ ($^{\circ}C$), a – коэффициент теплопроводности $\left(\frac{см^2}{с} \right)$,

c_v – объемная теплоемкость металла $\left(\frac{Дж}{см^3 \cdot ^{\circ}C} \right)$, $q(y, z, t)$ – плотность мощности

концентрированного объемного источника энергии $\left(\frac{Вт}{см^3} \right)$.

Начальное распределение температуры задано функцией

$$T(y, z, 0) = \varphi(y, z). \quad (2)$$

Граничные условия второго рода имеют вид [4]

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = q_1(z, t), \quad -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=l} = q_2(z, t), \quad (3)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = q_3(y, t), \quad -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=\delta} = q_4(y, t),$$

где λ – коэффициент теплопроводности металла $\left(\frac{Дж}{см \cdot с \cdot ^{\circ}C} \right)$, q_1, q_2, q_3, q_4 –

удельные тепловые потоки на границах пластин $\left(\frac{Вт}{см^2} \right)$.

Решение уравнения теплопроводности при граничных условиях второго рода можно представить в виде

$$T(y, z, t) = Q(y, z, t) + \frac{1}{c_v} \int_0^t \int_0^l \int_0^{\delta} q(\eta, \zeta, \tau) K(y, \eta, z, \zeta, t, \tau) d\zeta d\eta d\tau \quad (4)$$

где в выражение $Q(y, z, t)$ входят удельные тепловые потоки (3) и начальное распределение температуры (2);

$$K(y, \eta, z, \zeta, t, \tau) = \frac{4}{l\delta} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \beta_{n,m} \cos \mu_n \eta \cdot \cos \mu_n y \cdot \cos \mu_m \zeta \cdot \cos \mu_m z \cdot e^{-a\mu_{m,n}^2(t-\tau)}$$

$$\mu_{m,n}^2 = \mu_m^2 + \mu_n^2$$

Используя равенство (4) теплового процесса в плоском слое, можно задавать функцию $q(y, z, t)$ концентрированного объемного источника и решать прямую задачу теплопроводности, определяя распределение температуры и оценивая по этому распределению размеры, форму и свойства зоны обработки.

Распределение температуры в зоне сварки, а также форма и свойства зоны обработки зависят от формы сварочного источника. В данной работе рассмотрим два наиболее часто используемых в расчетах сварочных источника: равномерно-распределенный и нормально-круговой.

Наиболее простой моделью сварочного источника является круговой источник с равномерным распределением плотности мощности (рис. 2).

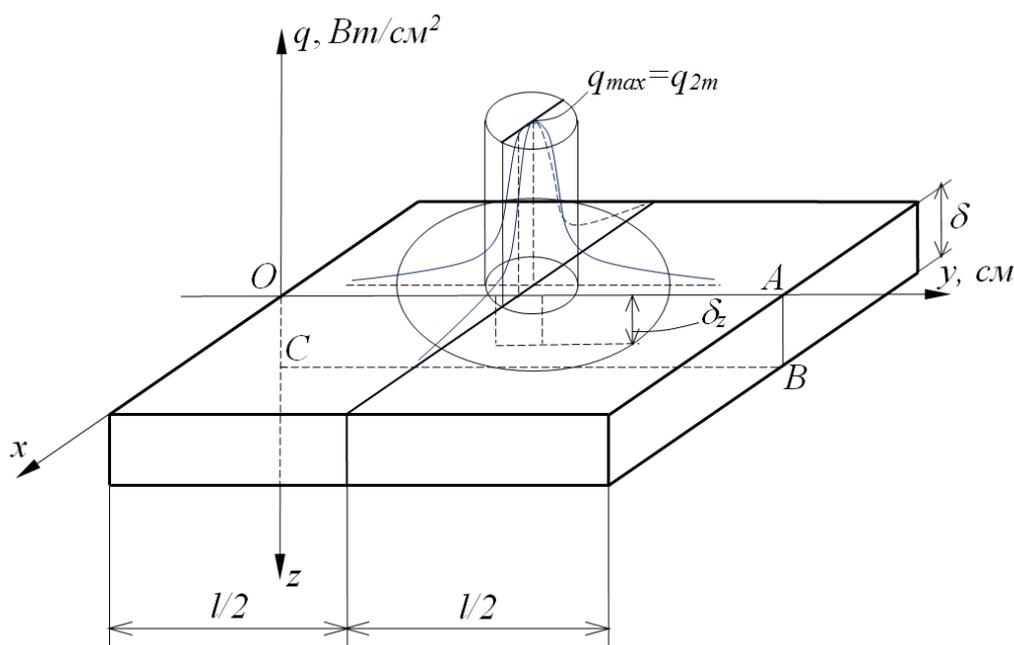


Рис. 2. Пространственная структура равномерного и нормально-кругового источников

Эффективная мощность объемного равномерно-распределенного на глубину δ_z источника радиуса r_0 определяется по формуле $q = q_{\max} \pi r_0^2 \delta_z$, где q_{\max} –

плотность мощности источника. Время сварки равно $t' = \frac{2r_0}{v}$.

Нормально круговой источник имеет пространственную структуру, изображенную на рисунке 2.

Эффективная мощность объемного нормально-кругового источника для глубины провара δ_z определяется по формуле $q = q_{2m} \frac{\pi \delta_z}{k}$ [3], где q_{2m} – максимальная плотность мощности источника, k – коэффициент сосредоточенности.

Время сварки равно $t' = \frac{2r_n}{v}$.

Исследуем процесс сварки двух стальных пластин (сталь 30ХГСА) равномерно-распределенным и нормально-круговым источниками одинаковой мощности $q = 27$ кВт на глубину $\delta_z = 7$ см. Для того, чтобы источники были эквивалентными, необходимо, чтобы $q_{max} = q_{2m}$, тогда источники будут связаны соотношением $k = \frac{1}{r_0^2}$.

Расчетные параметры модели приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные

$a, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	$c_v, \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3 \cdot \text{°C}}$	$l, \text{см}$	$\delta, \text{см}$	$q_1, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$	$q_2, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$	$q_3, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$	$q_4, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$
0,08	5,2	10	10	10	10	10	10

Параметры равномерно-распределенного и нормально-кругового источника заданной мощности приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

Параметры равномерно-распределенного источника

$r_0, \text{см}$	$t', \text{с}$	$q_{max}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}$	$v, \frac{\text{см}}{\text{с}}$
0,05	0,2	$4,911 \cdot 10^5$	0,5

Таблица 3

Параметры нормально-кругового источника

r_n , см	t' , с	q_{2m} , $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}$	k , $\frac{1}{\text{см}^2}$	v , $\frac{\text{см}}{\text{с}}$
0,0865	0,3462	$4,911 \cdot 10^5$	400	0,5

Приведем результаты численного решения задачи (1) с начальным условием (2) и граничными условиями (3).

Ширина сварочной ванны на поверхности пластин для равномерно-распределенного и нормально-кругового источника совпали и оказались равны примерно 0,48 см. Распределение температуры в середине и конце действия сварочных источников приведены на рисунках 3 и 4.

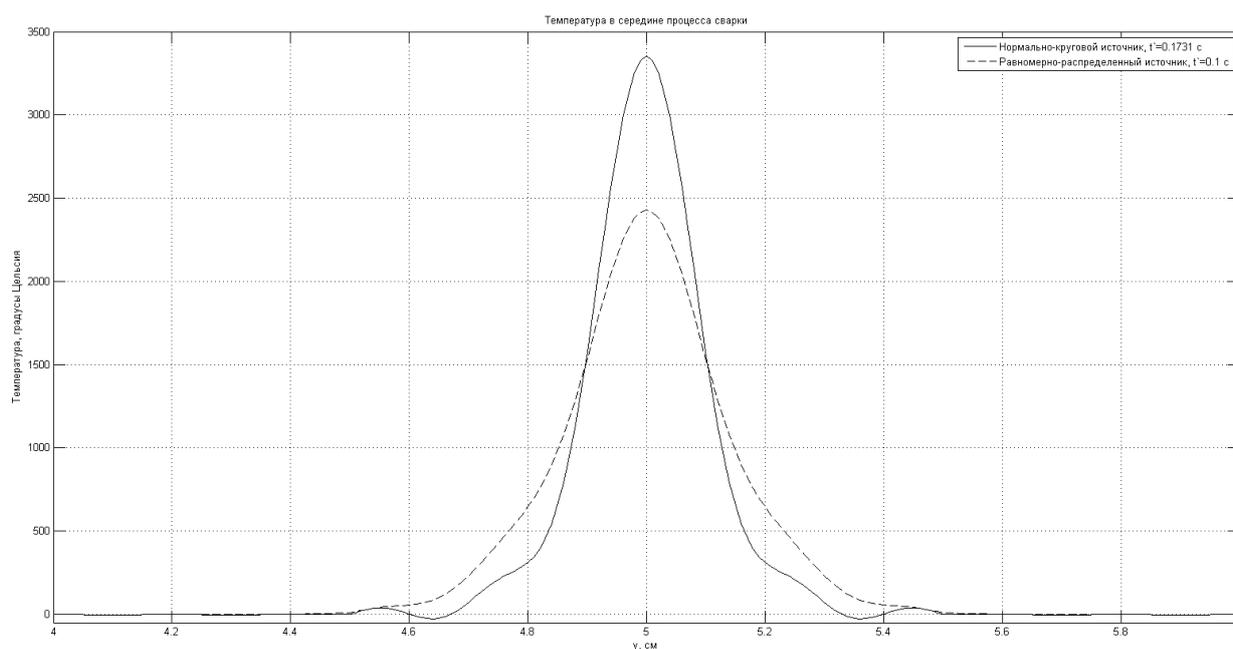


Рис. 3. Распределение температуры на поверхности пластин в середине действия сварочных источников

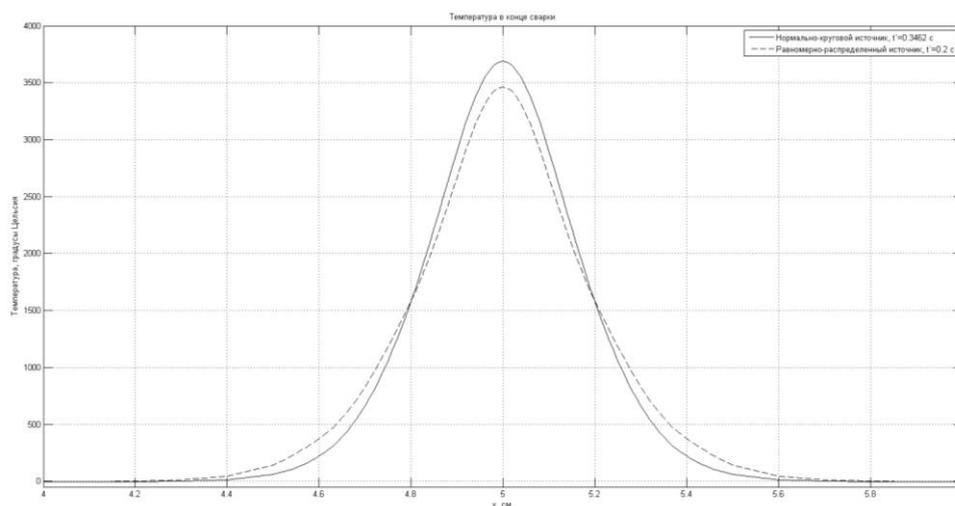


Рис. 4. Распределение температуры на поверхности пластин
 в конце действия сварочных источников

На глубине 7 см на стыке пластин ($y = 5, z = 7$) при сварке нормально-круговым источником температура оказалась равна примерно $2300\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при сварке равномерно-распределенным источником температура не превысила значение в $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термические циклы на поверхности пластин и на глубине 7 см для нормально-кругового источника приведены на рисунках 5 и 6, а для равномерно-распределенного – на рисунках 7 и 8 соответственно.

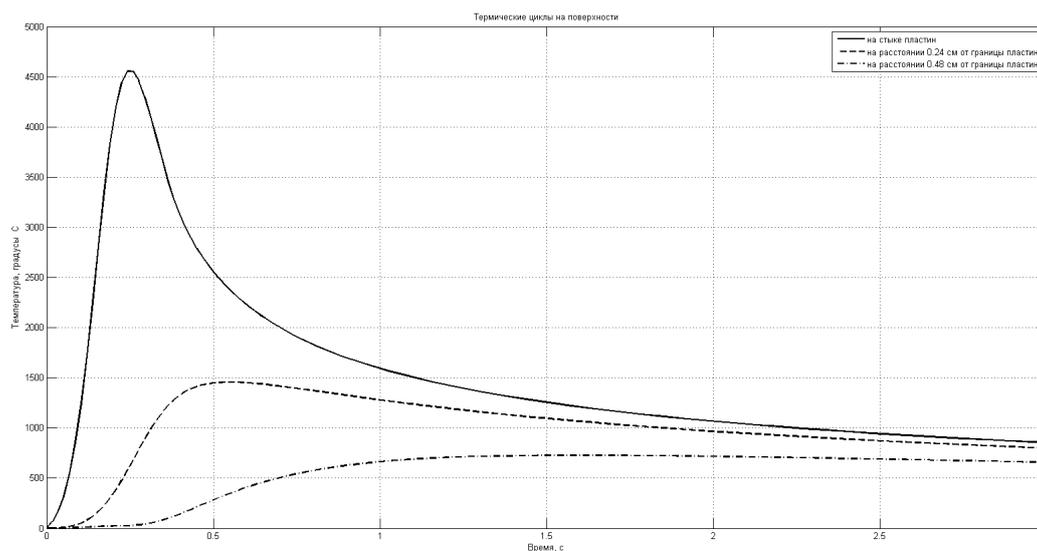


Рис. 5. Термические циклы в точках на поверхности пластин
 при сварке нормально-круговым источником

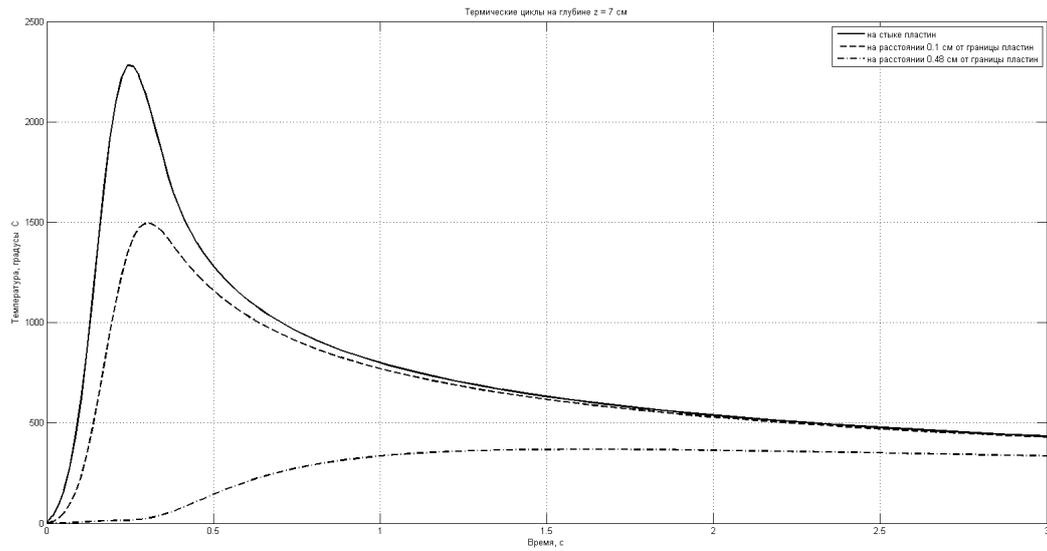


Рис. 6. Термические циклы в точках на глубине 7 см при сварке нормально-круговым источником

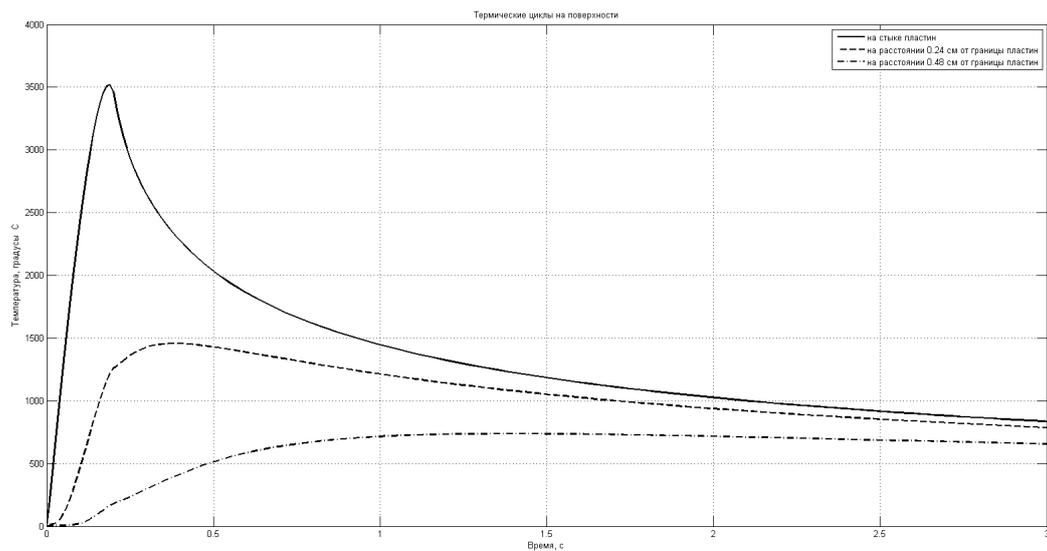


Рис. 7. Термические циклы в точках на поверхности пластин при сварке равномерно-распределенным источником

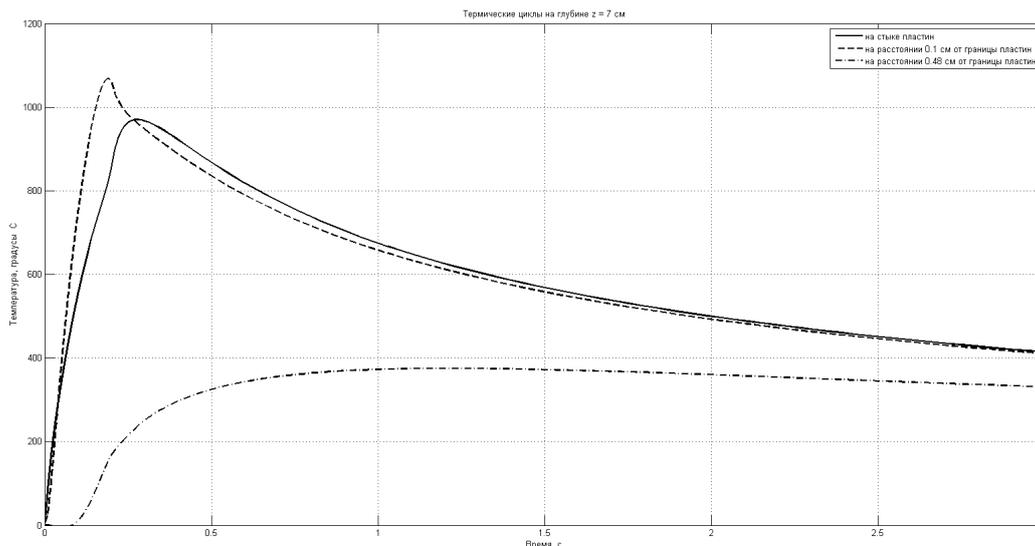


Рис. 8. Термические циклы в точках на глубине 7 см при сварке равномерно-распределенным источником

Анализ температурных полей и термических циклов показывает, что ширина шва и максимальные значения температур термических циклов при воздействии эквивалентных по мощности источников с постоянным и нормальным распределением плотности мощности в пятне нагрева совпадают с удовлетворительной точностью. Это позволяет при решении задач оптимального управления тепловым процессом сварки высококонцентрированными источниками (пучок электронов, излучение лазера при k до $4 \cdot 10^2$ 1/см²) использовать более широкий класс кусочно-постоянных функций, что необходимо при применении в решениях задач принципа максимума Понтрягина и метода моментов.

Список литературы

1. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки металлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 239 с.
2. Кайдалов А. А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : «Экотехнология», 2004. – 260 с.
3. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.
4. Мелюков В. В. Оптимизация режима сварки : учеб. пособие. – Киров : Изд-во ВятГУ, 2007. – 233 с.

ТОРБЕЕВА Анна Владимировна – преподаватель кафедры фундаментальной информатики и прикладной математики, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: stolbova@vyatsu.ru

МЕЛЮКОВ Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры фундаментальной информатики и прикладной математики, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: rus_melyukov@mail.ru