

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-318-330>

УДК 536.2+539.3



Оригинальная статья

А. И. Веремейчик*, Б. Г. Холодарь

*Брестский государственный технический университет,
ул. Московская, 267, 224017, Брест, Республика Беларусь*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ ПРИ НАГРЕВЕ ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ
С РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ**

Аннотация. Методом приложения мгновенных точечных источников получено решение задачи теплопроводности при поверхностном нагреве тела в форме полупространства движущимся с постоянной скоростью по прямолинейной траектории равномерно распределенным высококонцентрированным тепловым потоком с различной формой пятна нагрева при постоянных теплофизических характеристиках материала. Исследовано влияние режимов температурного нагружения и формы пятна нагрева на тепловые процессы в зоне термического влияния. Построены поверхности и линии уровня температуры для различных моментов времени и скоростных режимов нагружения в разных плоскостях зоны нагрева. Приведены зависимости от времени температур, скоростей нагрева и охлаждения для точек тела. Недостатки используемых методов линейной теплопроводности, отсутствие прямого учета в расчетной схеме зоны поверхностного расплава материала не позволяют достоверно оценивать влияние режимов термообработки на изменение свойств материала, ориентируясь только на уровень максимальной расчетной температуры. В связи с этим структурообразование металла в зоне теплового воздействия предложено связывать с тепловым импульсом, то есть полной тепловой энергией, воспринятой материалом в данной точке тела, а также с введенным в рассмотрение эффективным импульсом структуризации, характеризующим энергию, затрачиваемую на процесс структурных превращений материала, и временем структуризации в точке и некотором объеме тела. Представлены зависимости этих величин от скорости движения и формы пятна нагрева. Рассмотренные подходы могут быть применены к различным металлам и сплавам. Результаты исследований могут использоваться для разработки более эффективных методик определения оптимальных режимов поверхностного упрочнения металлоизделий высокоэнергетическим источником.

Ключевые слова: теплопроводность, температура, полупространство, пятно нагрева, тепловой поток, скорость движения пятна, тепловой импульс, время структуризации

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Веремейчик Андрей Иванович** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета. <https://orcid.org/0000-0003-0373-482X>. E-mail: vai_mrtm@bstu.by; *Холодарь Борис Григорьевич* – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Брестского государственного технического университета. <https://orcid.org/0000-0002-0818-097X>. E-mail: hbg@list.ru

Вклад авторов: *Веремейчик Андрей Иванович* – сбор, анализ и обобщение данных литературы, проведение вычислений, графическое представление результатов, написание текста рукописи, обсуждение выводов; *Холодарь Борис Григорьевич* – разработка алгоритма и программы вычислений, обсуждение результатов и выводов.

Для цитирования: Веремейчик, А. И. Моделирование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно распределенным тепловым потоком / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 318–330. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-318-330>

Поступила в редакцию: 24.03.2023

Доработанный вариант: 08.06.2023

Утверждена к публикации: 07.09.2023

Подписана в печать: 15.12.2023

Original article

Andrei I. Verameichyk*, Boris G. Kholodar

Brest State Technical University,
267, Moskovskaya Str., 224017, Brest, Republic of Belarus

**SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN A HALF-SPACE UNDER HEATING
BY A MOVING SOURCE WITH A UNIFORMLY DISTRIBUTED HEAT FLOW**

Abstract. Using the method of applying instantaneous point sources, a solution was obtained to the problem of heat conduction during surface heating of a body in the form of a half-space by a uniformly distributed highly concentrated heat flux moving at a constant speed along a rectilinear trajectory with a different shape of the heating spot at constant thermophysical characteristics of the material. The effect of temperature loading modes and the shape of the heating spot on thermal processes in the heat-affected zone is studied. The surfaces and lines of the temperature level are constructed for different moments of time and speed loading modes in different planes of the heating zone. Time dependences of temperatures, heating and cooling rates for body points are given. The shortcomings of the methods used for linear thermal conductivity, the lack of direct consideration in the design scheme of the surface melt zone of the material do not allow one to reliably assess the effect of heat treatment modes on changes in material properties, focusing only on the level of the maximum design temperature. In this regard, the structure formation of metal in the zone of thermal action is proposed to be associated with a thermal impulse, i.e. the total thermal energy perceived by the material at a given point of the body, as well as with the effective structurization impulse introduced into consideration, which characterizes the energy spent on the process of structural transformations of the material, and the structurization time at a point and some volume of the body. The dependencies of these values on the speed of movement and the shape of the heating spot are presented. The considered approaches can be applied to various metals and alloys. The research results can be used to develop more effective methods for determining the optimal modes of surface hardening of metal products with a high-energy source.

Keywords: thermal conductivity, temperature, half-space, heating spot, heat flux, spot movement velocity, thermal impulse, structurization time

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about authors: *Andrei I. Verameichyk** – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics at Brest State Technical University. <https://orcid.org/0000-0003-0373-482X>. E-mail: vai_mrtm@bstu.by; *Boris G. Kholodar* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher at Brest State Technical University. <https://orcid.org/0000-0002-0818-097X>. E-mail: hbg@list.ru

Contribution of the authors: *Andrei I. Verameichyk* – collection, analysis and synthesis of literature data, performing calculations, graphical representation of the results, writing the text of the manuscript, discussing the conclusions; *Boris G. Kholodar* – development of an algorithm and a calculation program, discussion of results and conclusions.

For citation: Verameichyk A. I., Kholodar B. G. Simulation of thermal processes in a half-space under heating by a moving source with a uniformly distributed heat flow. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 318–330 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-318-330>

Received: 24.03.2023

Modified version: 08.06.2023

Approved for publication: 07.09.2023

Signed to the press: 15.12.2023

Введение. В настоящее время в научно-технической литературе приводятся решения задач теплопроводности, посвященных определению пространственно-временных распределений температуры, создаваемых стационарными или движущимися источниками тепла, для которых имеет значение также форма пятна нагрева и закон распределения теплового воздействия по его площади [1–17]. При прогреве тела локальными поверхностными источниками в нем возникают большие градиенты температур, поэтому теплофизические характеристики не являются константами материала. Однако в большинстве случаев в связи со сложностью учета зависимостей этих характеристик от температуры при проведении расчетов температурных полей они принимаются осредненными (согласно [1], для стали их следует принимать соответствующими температуре $T \approx 900$ °С). Кроме того, толщина обрабатываемой детали зачастую может рассматриваться как бесконечная. При указанных обстоятельствах для решения поставленной в настоящей работе задачи об определении температурного поля тела, вызываемого движущимся источником, удобным является использование функций Грина (метод мгновенно приложенного точечного источника) с соответствующим интегрированием воздействия по площади пятна нагрева [1–4].

В соответствии с принципом локальности нагружения Сен-Венана, широко используемым в механике деформируемых твердых тел, в том числе в теории теплопроводности [3], распределение интенсивности потока теплового воздействия по пятну нагрева сказывается незначительным образом на температурном поле в удаленных от пятна точках. Однако в случае исследования структурных превращений в поверхностных слоях материала, возникающих при действии подвижных высокоэнергетических тепловых потоков, конкретное распределение потока по поверхности тела может приобрести определяющую роль.

В многочисленных работах, посвященных определению температурных полей в подобных случаях (например, [5–10]), рассмотрены разнообразные формы пятен нагрева, распределений интенсивности потока в их пределах, использованы различные методы решения соответствующих уравнений.

Установлено, что темп изменения возникающего температурного поля при воздействии подвижных источников определяет величину температурных градиентов и напряжений в материале и влияет на структурные превращения в соответствующем объеме тела как при нагреве, так и при охлаждении. В [2, 11–17] исследуются скорости нагрева/охлаждения при термической обработке, в том числе плазменными и лазерными воздействиями, а также их роль в возникающих структурных превращениях материала, приводящих к созданию градиентно-слоистой структуры при значительном дроблении поверхностного слоя, повышению микротвердости и ухудшению его пластических характеристик.

Исследования показывают, что сложный процесс структуризации в точках тела напрямую зависит от характеристик реализующегося температурного поля (уровень максимальной температуры, длительность температурного воздействия, скорости нагрева и охлаждения). Поэтому знание законов изменения температуры в зоне нагрева и разработка новых критериев оценки возможной результативности обработки представляет собой важный элемент управления процессом оптимизации свойств материалов.

Постановка задачи. Так как изменение структуры материала в зоне термического воздействия происходит на небольших глубинах, то в качестве объекта теплового нагружения можно рассматривать полупространство, что сводит к минимуму число граничных условий задачи теплопроводности и позволяет использовать для решения метод приложения мгновенных точечных источников тепла. Для такого источника энергии, расположенного в точке с координатами $[x_0, y_0, z_0]$, температурное поле в любой точке тела в заданный момент времени описывается выражением [1–4]

$$T(r, t) = \frac{Q}{8\lambda\sqrt{a}(\pi t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \quad (1)$$

где Q – выделение тепла в точке в единицу времени, Дж; $a = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – время, с; $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$ – расстояние от источника тепла до рассматриваемой точки с координатами $[x, y, z]$, м. В формуле (1) T представляет собой приращение температуры над ее исходным уровнем в теле (для удобства далее принимаем его одинаковым во всех точках).

Поскольку тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (1) в пределах этой поверхности S :

$$T(r, t) = \int \left(\int T_S(r, t) ds \right) d\xi, \quad (2)$$

где ξ – переменная интегрирования по времени от начального значения $\xi = 0$.

В случае движения с постоянной скоростью V вдоль оси X источника с нормально-круговым распределением интенсивности исходящего потока выражение (2) примет вид [1]

$$T(x, y, z, t) = \left[2P_0 \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right) (c\gamma(4\pi a)^{3/2}) \right] \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi}(t_0 + \xi)} \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \xi)} - \frac{V^2(t_0 + \xi)}{4a}\right] d\xi, \quad (3)$$

а для источника с потоком, равномерно распределенным по прямоугольной площадке, получаем:

$$T(x, y, z, t) = \frac{q}{8\rho c\sqrt{\pi a}} \int_0^w \exp\left(-\frac{z}{w}\right)^2 F_x F_y dw, \quad (4)$$

$$F_x = \Phi\left[\left(\frac{x+b}{w} - \frac{V}{4a}w\right)\right] - \Phi\left[\left(\frac{x-b}{w} - \frac{V}{4a}w\right)\right], \quad F_y = \Phi\left[\frac{y+l}{w}\right] - \Phi\left[\frac{y-l}{w}\right], \quad (5)$$

где q – интенсивность теплового потока, Вт/м²; $w = \sqrt{4at}$, м; b, l – полуразмеры площадки вдоль осей X и Y соответственно, м; $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$ – интеграл вероятности.

С использованием метода Симпсона [18] выражения (3)–(5) далее подвергаются численному интегрированию на соответствующем отрезке времени.

Если ввести в рассмотрение дополнительные источники и стоки энергии, то можно получить некоторые полезные на практике случаи. Например, если симметрично к заданному неподвижному или движущемуся вдоль оси X источнику добавить сток энергии, что эквивалентно действию отрицательной температуры, то получим задачу, в которой в плоскости $x = 0$ температура во все моменты времени окажется тождественно равной нулю. Если аналогичным образом добавить дополнительно к исходному еще один источник тепла, то получим задачу, в которой в плоскости $x = 0$ будет происходить удвоение температуры, что физически эквивалентно наличию теплоизолированной поверхности. В указанных случаях формула (4) перейдет в формулы (6) и (7) соответственно:

$$T(x, y, z, t) = T_1(x, y, z, t) - T_2(x, y, z, t), \quad (6)$$

$$T(x, y, z, t) = T_1(x, y, z, t) + T_2(x, y, z, t), \quad (7)$$

где $T_1(x, y, z, t)$ соответствует выражению (4), а $T_2(x, y, z, t)$ отличается от $T_1(x, y, z, t)$ только знаком в аргументах функций Φ перед скоростью V в выражении (5) для F_x .

Числовые значения теплофизических параметров материала принимались равными: плотность $\rho = 7860$ кг/м³, удельная теплоемкость $c = 745$ Дж/(кг·°С), коэффициент теплопроводности $\lambda = 38$ Вт/(м·°С), температура плавления $T_{пл} = 1550$ °С [4]. Расчеты температурного поля, скоростей нагрева и охлаждения в зависимости от времени и координат проводились для различных скоростей движения и форм пятна нагрева. Последние задавались в виде прямоугольника или квадрата с одинаковой площадью $A = 9$ мм². Прямоугольная площадка имела стороны 4,0 и 2,25 мм, которые могут быть ориентированы широкой стороной либо перпендикулярно оси движения источника, либо параллельно ей. Сравнение проводилось также с расчетами для эквивалентного по площади пятна круглой формы радиусом $R \approx 1,69$ мм с гауссовым распределением интенсивности потока [14]. Скорость движения источника варьировалась в пределах $V = 0,5$ – $5,0$ см/с, эффективная мощность принималась равной $P_0 = 1$ кВт, начальное положение источника соответствовало координате $x = 0$ см.

Некоторые результаты и их обсуждение. Фактическая форма пятна приложения тепловой нагрузки сказывается на распределениях температурных полей вблизи зоны воздействия. Это связано прежде всего с тем, что максимальные температуры возникают в моменты прохождения источника над рассматриваемой точкой.

На рис. 1–3 представлены зависимости температуры и скорости нагрева/охлаждения от времени в точке поверхности с координатой $x = 1$ см для различных форм пятна нагрева при скорости движения источника $V = 1$ см/с и его мощности $P_0 = 1$ кВт.

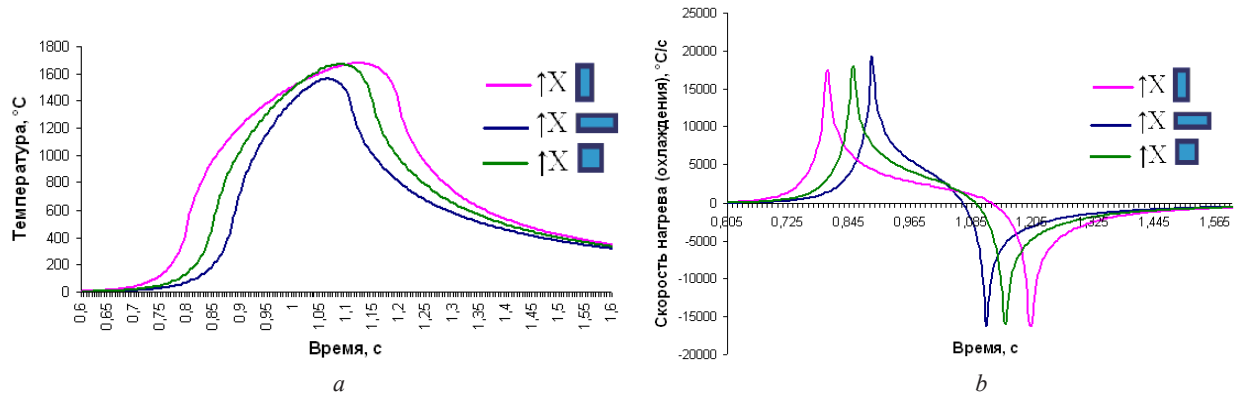


Рис. 1. Зависимость температуры (a) и скорости нагрева и охлаждения (b) от времени на поверхности

Fig. 1. Dependence of temperature (a) and heating and cooling rates (b) on time on the surface

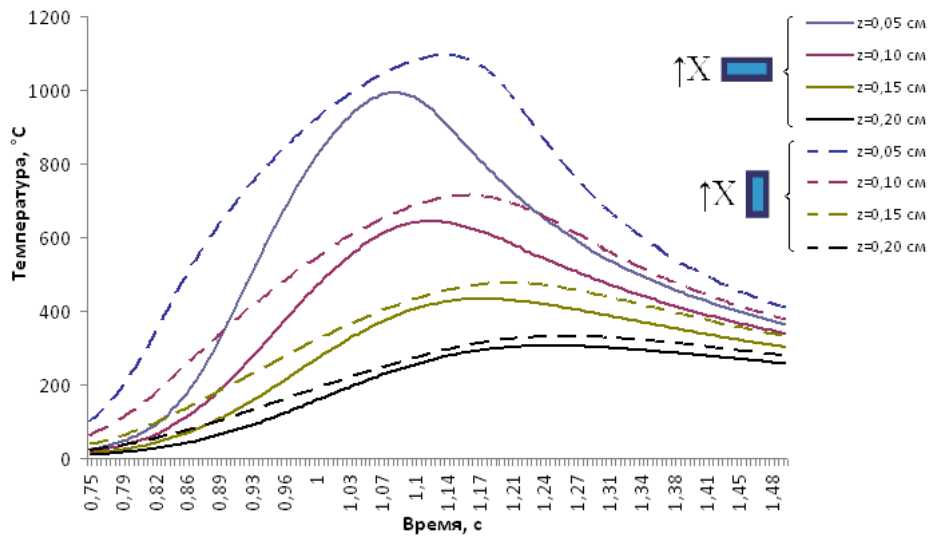
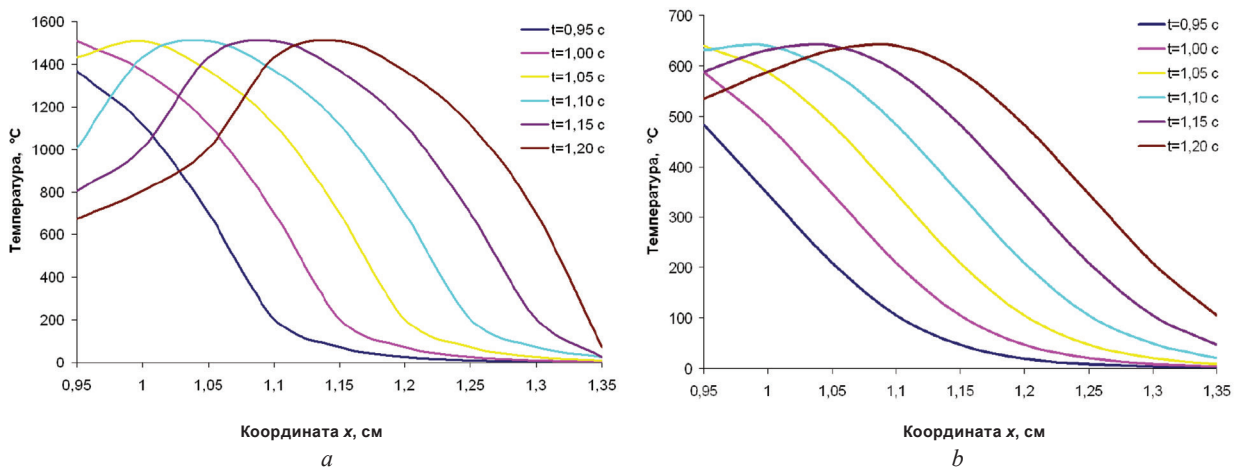


Рис. 2. Зависимость температуры от времени для прямоугольного пятна нагрева на различной глубине z

Fig. 2. Dependence of temperature on time for a rectangular heating spot at different depths z

Рис. 3. Зависимость температуры от координаты на поверхности ($z = 0$ мм) (a) и на глубине $z = 1$ мм (b), $\uparrow X$ Fig. 3. Dependence of temperature on the coordinate on the surface ($z = 0$ mm) (a) and at a depth of $z = 1$ mm (b), $\uparrow X$

Из рис. 2 видно, что максимальная температура во всех точках тела достигается раньше при ориентации широкой стороной пятна перпендикулярно оси движения, но уровни возникающих температур ниже, чем при альтернативной ориентации пятна. Естественно, что это может измениться при других размерах зоны воздействия.

Типичные распределения температуры вдоль координаты x при $z = 0$ мм и $z = 1$ мм для нескольких последовательных моментов времени приведены на рис. 3 и характеризуют сложность протекания соответствующих пространственно-временных процессов.

Зависимость максимальной температуры от скорости движения источника нагрева для точки с координатой $x_0 = 4$ см приведена на рис. 4.

Результаты расчета максимальных температур и скоростей нагрева/охлаждения на поверхности полупространства, приведенные в таблице, показывают, что наибольшие скорости нагрева и охлаждения увеличиваются с ростом скорости источника.

По результатам расчетов могут быть построены изотермы и геометрия температурной для различных моментов времени и выбранных точек. Типичные распределения приведены на рис. 5.

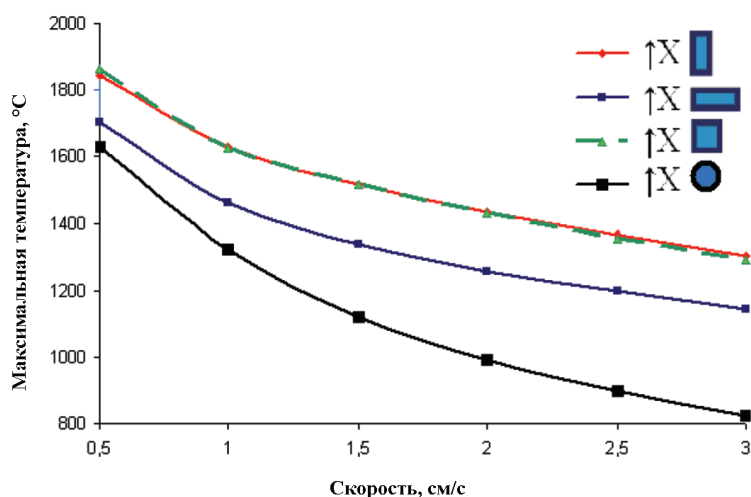


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры на поверхности от скорости движения источника нагрева

Fig. 4. Dependence of the maximum temperature on the surface on the speed of the heating source

Температуры и скорости нагрева/охлаждения при различных формах пятна воздействия

Research results for temperatures and heating heating/cooling rates for different forms of spots of the same area

Скорость движения пятна, см/с	Размеры пятна, мм	Форма пятна	Максимальная температура T_{max} , °C	Наибольшая скорость нагрева, °C/с	Наибольшая скорость охлаждения, °C/с
0,5	4 × 2,25	↑X	1905,1	10 046	9618
	2,25 × 4	↑X	1847,0	10 496	9110
	3 × 3	↑X	1931,5	10 250	9390
1	4 × 2,25	↑X	1680,0	17510	16 876
	2,25 × 4	↑X	1562,0	19 266	16 244
	3 × 3	↑X	1669,9	17 992	15 976
2	4 × 2,25	↑X	1416,3	27 134	21 260
	2,25 × 4	↑X	1235,6	28 284	24 848
	3 × 3	↑X	1344,2	27 526	20 182
3	4 × 2,25	↑X	1254,4	37 034	33 594
	2,25 × 4	↑X	1047,7	36 338	29 338
	3 × 3	↑X	1180,1	37 250	32 012

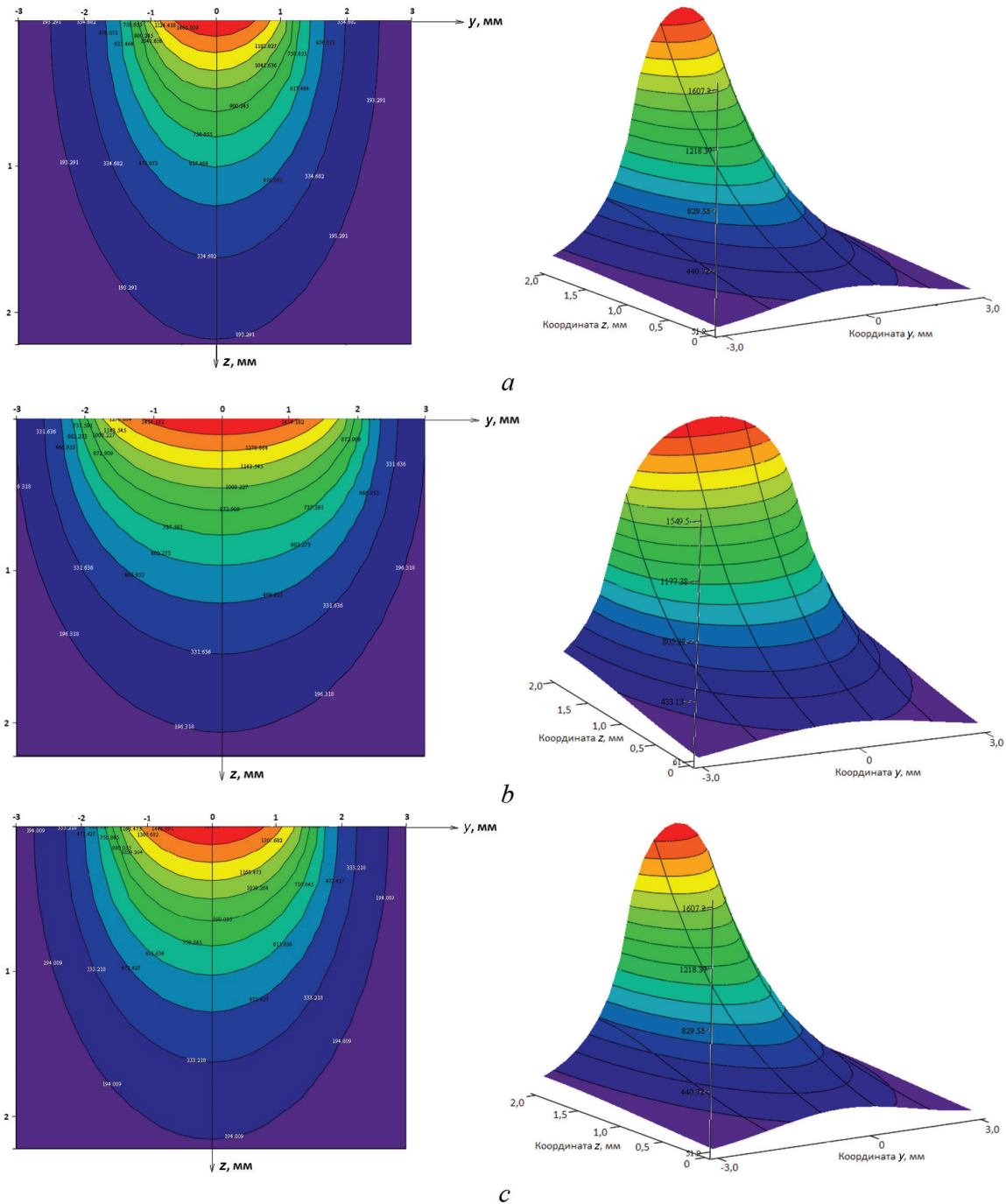


Рис. 5. Поверхности температуры и уровни температуры для сечения, перпендикулярного оси X , при $t = 1,05$ с, $x = 1$ см, $V = 1$ см/с; $a - \uparrow X$, $b - \uparrow X$, $c - \uparrow X$

Fig. 5. Temperature surfaces and temperature levels for a section perpendicular to the X axis at $t = 1.05$ s, $x = 1$ cm, $V = 1$ cm/s; $a - \uparrow X$, $b - \uparrow X$, $c - \uparrow X$

Видно, что скорость распространения температуры по поверхности (в направлении оси Y) значительно выше, чем вглубь (в направлении оси Z) тела: например, для случая $\uparrow X$ (рис. 5, a) на расстоянии 2 мм от начала координат температура на поверхности в 1,34 раза выше, чем на таком же расстоянии на глубине.

Уровни достигнутых максимальных температур в зоне термического воздействия возле центральной точки пятна нагрева (с координатой $x_0 = 8,1$ см) для рассматриваемых источников показаны на рис. 6 [14].

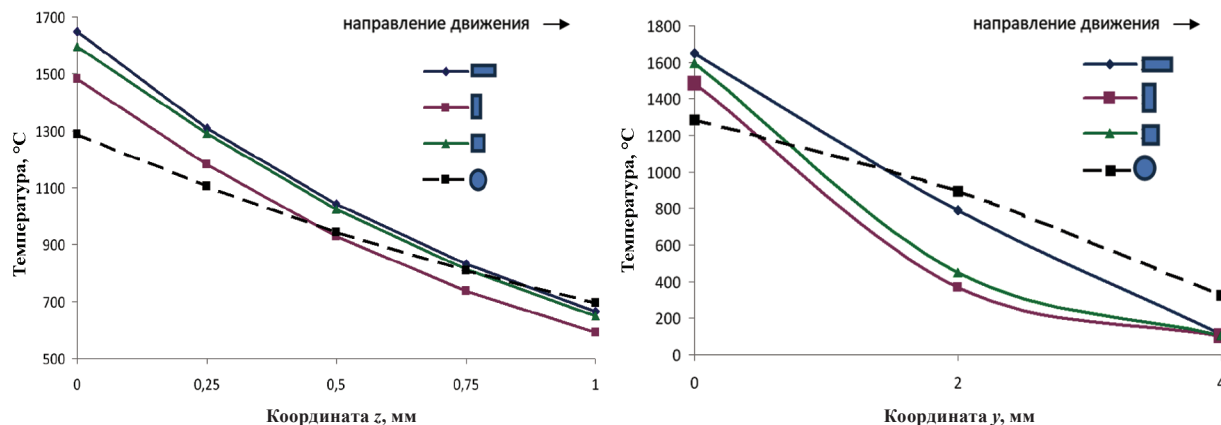


Рис. 6. Распределение максимальной температуры по ширине (ось Y) и глубине (ось Z) тела, $V = 1,17 \text{ см/с}$, $P_0 = 1 \text{ кВт}$

Fig. 6. Maximum temperature distribution along the width (Y-axis) and depth (Z-axis) of the body $V = 1.17 \text{ cm/s}$, $P_0 = 1 \text{ kW}$

Результаты расчетов термического цикла и скоростей нагрева/охлаждения коррелируют с результатами, приведенными в [15].

В силу определенных обстоятельств исследование влияния температурного поля на структурообразование материала в зоне теплового воздействия, основанное только на уровнях достигнутых в точках тела максимальных температур, является недостаточно информативным, в связи с чем для описания процесса структуризации стали в [16] предлагается использование интеграла $I_T = \int T dt$ в точках тела (интегральная температурно-временная характеристика) при учете температур выше температуры A_{c1} .

При таком подходе не учитывается, что при температуре выше температуры плавления структура стали не является аустенитной и сам материал находится в жидкой фазе. Поэтому предполагается целесообразным включение в рассмотрение только ситуаций, когда вычисленная температура находится в пределах существования аустенитного состояния.

Для этого нами дополнительно в расчет вводится температура структуризации T_{str} , представляющая собой нижний уровень температуры перехода аустенита в мартенситную структуру для заданного материала, устанавливаемая экспериментально для рассматриваемого процесса. Для каждого режима нагрева с $V \neq 0$ при появлении в рассматриваемой точке с координатами $[x, y, z]$ температуры $T > T_{str}$ вычисляется величина отрезка времени δt_{str} , на котором эта ситуация имеет место, значение интеграла $I_T = \int T dt$ на нем и интеграла $I_{str} = \int (T > T_{str}) dt$, а также их относительной величины $\theta = \frac{I_{str}}{I_T}$.

Интеграл I_T представляет собой расчетную величину теплового импульса, воспринятого материалом в данной точке тела при выполнении условия $T > T_{str}$, интеграл I_{str} – часть этого импульса, вычисление которой подчиняется условиям:

если $T_{str} < T(t) < T_{plav}$, то подынтегральная функция имеет вид $T(t) - T_{str}$;

если $T_{plav} < T(t)$, то подынтегральная функция представляет собой константу $T_{plav} - T_{str}$.

Так как температура является показателем энергии движения частиц, импульс структуризации I_{str} характеризует энергию, затрачиваемую на процесс структурных превращений материала в точке.

На рис. 7 приведены зависимости полного теплового импульса, импульса структуризации и времени структуризации от скорости движения источника при $T_{str} = 400 \text{ °C}$ в точке на поверхности при $x_0 = 4 \text{ см}$.

Анализ рис. 4 и 7 показывает, что при увеличении скорости движения пятна нагрева тепловой импульс уменьшается по зависимостям, схожим с изменением максимальной температуры, однако темп снижения теплового импульса с ростом скорости в нашем случае значительно выше, чем температуры.

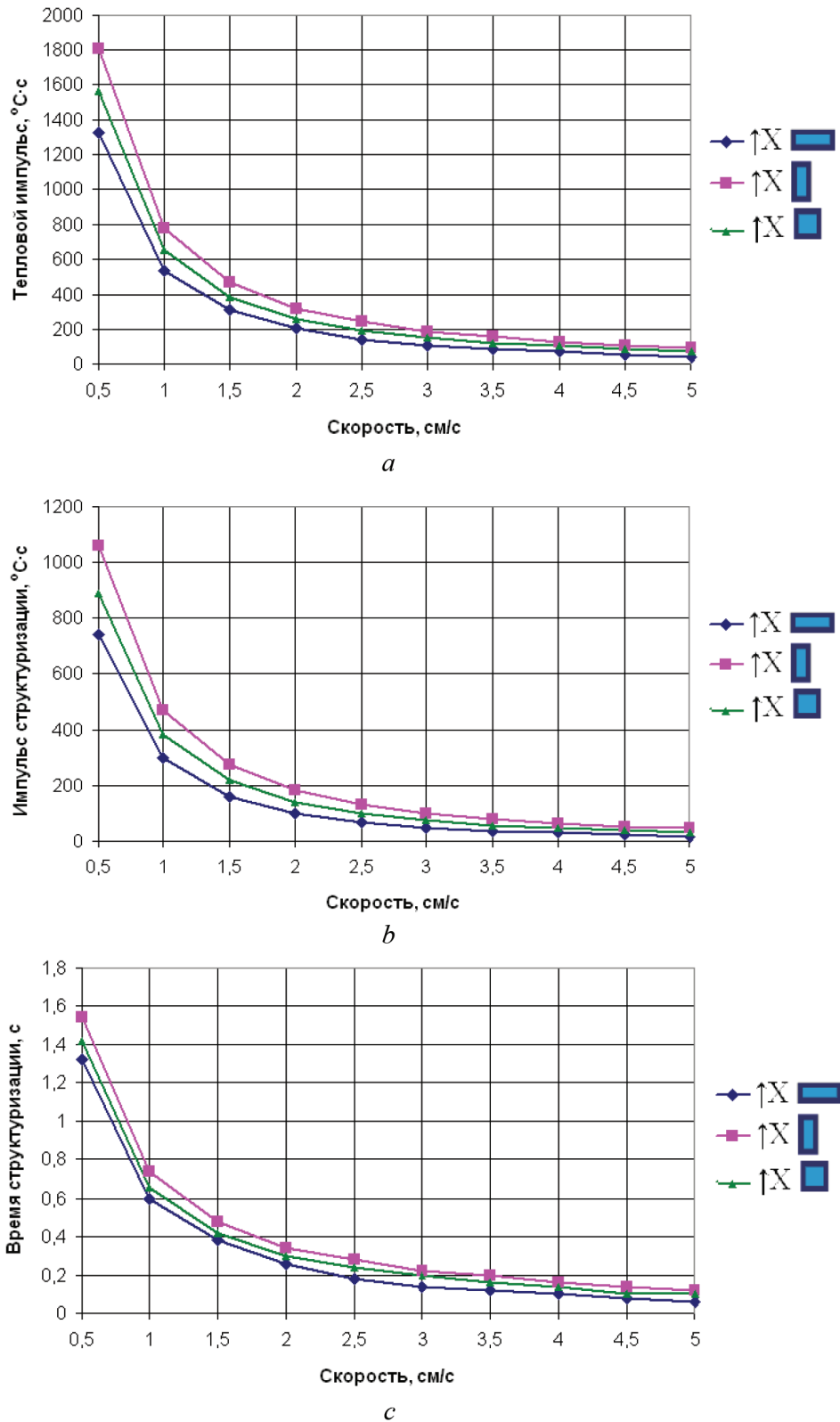


Рис. 7. Зависимости теплового импульса (а), импульса структуризации (b) и времени структуризации (c) на поверхности при $x_0 = 4$ см, $P_0 = 1$ кВт от скорости движения пятна нагрева

Fig. 7. Dependencies of thermal impulse (a), structuring impulse (b) and structuring time (c) on the surface on the speed of movement of the heating spot at $x_0 = 4$ cm, $P_0 = 1$ kW

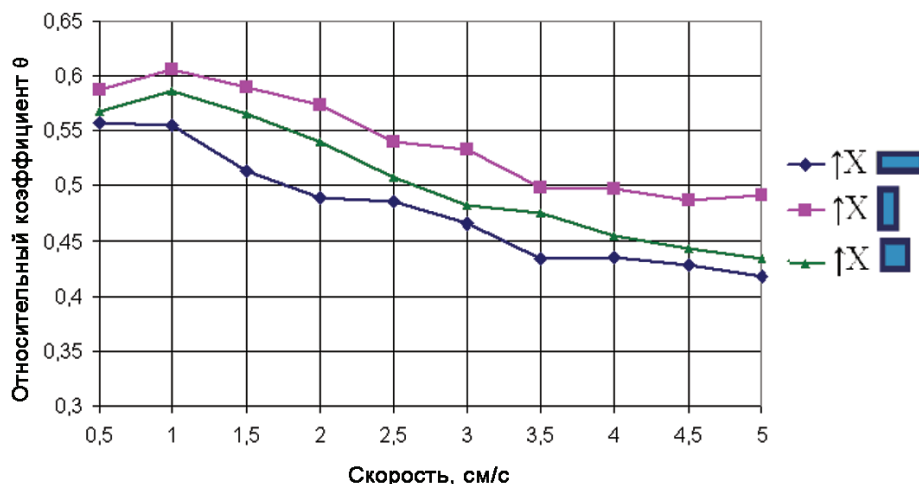


Рис. 8. Зависимость θ на поверхности от скорости движения пятна нагрева при $P_0 = 1$ кВт

Fig. 8. Dependence θ on the surface on the speed of movement of the heating spot at $P_0 = 1$ kW

Установлено, что изменение величины относительного коэффициента θ , показывающего, какая часть всей тепловой энергии расходуется на структурообразование материала в зоне теплового влияния, при росте скорости движения пятна имеет нелинейный характер (рис. 8).

Величины I_T и I_{str} могут быть вычислены как в заданной точке, так и как интегралы по площади сечения (в плоскости YOZ) и объему прилежащего слоя материала.

В связи с нелинейностью введенных функций I по координатам y и z криволинейная поверхность, образуемая ими над прямоугольным участком сечения, приближенно может быть представлена в виде двух треугольных плоскостей, линия пересечения которых проходит через соответствующие диагональные точки. При этом объем цилиндрического тела, заключенного между ними и основанием $\delta y \delta z$, составляет

$$F = \frac{2(f_1 + f_3) + (f_2 + f_4)}{6} \delta y \delta z, \quad (8)$$

где $(f_1 + f_3)$ – сумма наименьшего и наибольшего значений функций I , $(f_2 + f_4)$ – сумма промежуточных значений функций в угловых диагональных точках участка. Импульс по площади поперечного сечения обрабатываемой дорожки получается суммированием по отдельным участкам $I_{str} = \sum_i I_{str}^i$. Импульс по объему прилежащего к сечению слоя материала может быть принят равным произведению импульса по сечению на толщину слоя $V \Delta t$, где Δt – шаг выдачи результатов при вычислениях по выражениям (4), (5).

Импульс структуризации I_{str} сечения может служить показателем величины энергии, непосредственно затраченной на переход аустенитной структуры в мартенситную, а соответствующий объемный импульс может рассматриваться как некоторая дополнительная характеристика. Переходя от длины $V \Delta t$ к единице, можно сравнить получаемую величину с максимально возможным на единицу объема удельным импульсом структуризации, пропорциональным величине $T_{plav} - T_{str}$. При этом относительная величина составит $I_{str} / ((T_{plav} - T_{str}) t_{str})$, где t_{str} – максимальное из значений времен структуризации, найденных для рассмотренных точек сечения.

На рис. 9 показаны зависимости импульса структуризации в сечении, перпендикулярном траектории движения центра пятна, от скорости движения источника при $T_{str} = 400$ °С, $x_0 = 4$ см.

Наиболее резкое снижение импульса структуризации наблюдается в области небольших скоростей источника нагрева. Например, в диапазоне скоростей 0,5–1,0 см/с импульс падает в 2,5–3 раза.

Сравнение зависимостей, аналогичных приведенным на рис. 7, 9, с распределениями по глубине тела характеристик микроструктуры материалов и их микротвердости может позволить установить связь между энергетическим параметром процесса (импульсом структуризации) и реализующимися механическими свойствами материала.

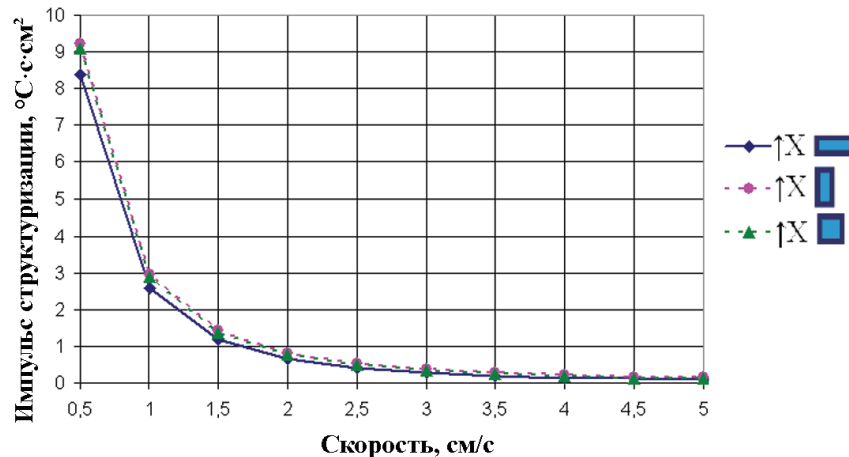


Рис. 9. Зависимости импульса структуризации от скорости движения пятна нагрева в сечении, перпендикулярном оси X , при $x_0 = 4$ см, $P_0 = 1$ кВт

Fig. 9. Dependencies of the structuring impulse on the velocity of the heating spot in the section perpendicular to the X axis, at $x_0 = 4$ cm, $P_0 = 1$ kW

Отметим, что число зон теплового нагружения (в том числе дополнительных с положительным или отрицательным потоком энергии) можно увеличить, что позволит рассматривать температурные поля, соответствующие фактической программе одновременной работы нескольких источников энергии. Не представляет принципиальной сложности задать в расчетах какую-либо криволинейную или прерывистую траекторию движения пятна нагрева. Подобные задачи могут оказаться полезными с практической точки зрения.

Заключение. Проведено исследование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником прямоугольной и квадратной формы с равномерно распределенным по пятну нагрева тепловым потоком. На основе разработанного алгоритма решения линейной задачи теплопроводности для широкого диапазона режимов нагрева построены численные зависимости температурного поля, скоростей нагрева и охлаждения от времени и координат. Исследовано влияние режимов термообработки на температурное поле в зоне нагрева и скорости нагрева и охлаждения. Построены поверхности и линии уровня температуры для различных моментов времени в разных плоскостях. Для анализа тепловых полей в зоне обработки предложено использование дополнительной характеристики – импульс структуризации. Для различных скоростей движения и форм пятна нагрева определены тепловые импульсы, импульсы структуризации и время структуризации, что расширяет возможность прогнозирования результатов обработки и позволяет оценить, какая часть тепловой энергии расходуется на структурообразование материала в зоне теплового воздействия.

С использованием полученных результатов на основе данных по техническим характеристикам источника нагрева, теплофизическим и механическим свойствам обрабатываемых материалов и их прогнозируемым после теплового воздействия структурным параметрам могут быть назначены конкретные режимы термообработки с последующим их уточнением в процессе технологических экспериментов.

Список использованных источников

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: ГНТИ машиностроит. лит., 1951. – 296 с.
3. Боли, Б. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Дж. Уэйнер. – М.: Мир, 1964. – 518 с.
4. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
5. Akbari, M. Geometrical Effects on the Temperature Distribution in a Half-Space Due to a Moving Heat Source / M. Akbari, D. Sinton, M. Bahrami // J. Heat Transfer. – 2011. – Vol. 133, iss. 6. – Art. ID 064502 (10 p.). <https://doi.org/10.1115/1.4003155>

6. Muzychka, Y. S. Thermal Resistance Models for Non-Circular Moving Heat Sources on a Half Space / Y. S. Muzychka, M. M. Yovanovich // *J. Heat Transfer*. – 2001. – Vol. 123. – P. 624–632. <https://doi.org/10.1115/1.1370516>
7. Zubair, S. M. Temperature solutions due to time-dependent moving line heat sources / S. M. Zubair, M. A. Chaudhry // *Heat Mass Transfer*. – 1996. – Vol. 31. – P. 185–189. <https://doi.org/10.1007/BF02333318>
8. Аттетков, А. В. Осесимметричное температурное поле изотропного полупространства при локальном нестационарном нагреве внешней средой / А. В. Аттетков, И. К. Волков, Е. С. Тверская // *Теплофизика высоких температур*. – 2010. – Т. 48, № 4. – С. 612–616.
9. Ravi, T. Optimization of Heat Transfer through Rectangular Duct / T. Ravi, F. Z. Pathan, M. Vahadne // *Int. Res. J. Eng. Technol.* – 2015. – Vol. 2, iss. 4. – P. 1906–1910.
10. Ahire, Y. M. Three-Dimensional Unsteady State Temperature Distribution of Thin Rectangular Plate with Moving Point Heat Source / Y. M. Ahire, K. P. Ghadle // *Indian J. Mater. Sci.* – Vol. 2016. – Art. ID 7563215. <https://doi.org/10.1155/2016/7563215>
11. Немчинский, А. Л. Тепловые расчеты термической обработки / А. Л. Немчинский. – Л.: Судпром, 1953. – 106 с.
12. Strengthened layer at plasma hardening during whole-rolled wheel / T. E. Sarsembaeva [et al.] // *Вестн. науки Казах. агротехн. ун-та им. С. Сейфуллина*. – 2019. – № 4 (103). – С. 154–161.
13. Kanaev, A. T. Formation of Gradient-Foliated Structures under High-Temperature Thermomechanical Treatment and Surface Plasma Quenching of Carbon Steel / A. T. Kanaev, T. E. Sarsembaeva, M. A. Saidullaeva // *Steel in Translation*. – 2021. – Vol. 51. – P. 677–682.
14. Веремейчик, А. И. Влияние формы выходного сечения сопла источника высокоэнергетической струи на уровни температуры в зоне термического воздействия / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // *Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст.* – Брест: Изд-во БрГТУ, 2022. – С. 217–220.
15. Белинин, Д. С. Особенности структурообразования при плазменной поверхностной закалке на большую глубину изделий из стали 40X13 / Д. С. Белинин, Ю. Д. Щицын // *Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук*. – 2012. – Т. 14, № 4 (5). – С. 1202–1205.
16. Иванцовский, В. В. Управление структурным и напряженным состоянием поверхностных слоев деталей машин при их упрочнении с использованием концентрированных источников нагрева и финишного шлифования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09 / В. В. Иванцовский. – Новосибирск, 2012. – 425 с.
17. Балановский, А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А. Е. Балановский. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – 180 с.
18. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

References

1. Rykalin N. N., Uglov A. A., Zuev I. V., Kokora A. N. *Laser and Electron Beam Processing of Materials*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 440 p. (in Russian).
2. Rykalin N. N. *Calculations of Thermal Processes During Welding*. Moscow, State Scientific and Technical Publishing House of machine-building literature, 1951. 296 p. (in Russian).
3. Boley B. A., Weiner J. H. *Theory of Thermal Stresses*. John Wiley & Sons, 1960. 586 p.
4. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford University Press, 1959. 310 p.
5. Akbari M., Sinton D., Bahrami M. Geometrical Effects on the Temperature Distribution in a Half Space Due to a Moving Heat Source. *Journal of Heat Transfer*, 2011, vol. 133, iss. 6, art. ID 064502. <https://doi.org/10.1115/1.4003155>.
6. Muzychka Y. S., Yovanovich M. M. Thermal resistance models for non-circular moving heat sources on a half space. *Journal of Heat Transfer*, 2001, vol. 123, no. 4, pp. 624–632. <https://doi.org/10.1115/1.1370516>
7. Zubair S. M., Chaudhry M. A. Temperature solutions due to time-dependent moving line heat sources. *Heat and Mass Transfer*, 1996, vol. 31, pp. 185–189. <https://doi.org/10.1007/BF02333318>
8. Attetkov A. V., Volkov I. K., Tverskaja E. S. Axisymmetric temperature field of isotropic half-space under local unsteady-state heating by environment. *High Temperature*, 2010, vol. 48, no. 4, pp. 583–587. <https://doi.org/10.1134/S0018151X10040164>
9. Ravi T., Pathan F. Z., Vahadne M. Optimization of Heat Transfer through Rectangular Duct. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2015, vol. 2, iss. 4, pp. 1906–1910.
10. Ahire Y. M., Ghadle K. P. Three-Dimensional Unsteady State Temperature Distribution of Thin Rectangular Plate with Moving Point Heat Source. *Indian Journal of Materials Science*, vol. 2016, art. ID 7563215. <https://doi.org/10.1155/2016/7563215>
11. Nemchinskii A. L. *Thermal Calculations of Heat Treatment*. Leningrad, Sudprom Publ., 1953. 106 p. (in Russian).
12. Sarsembaeva T. E., Bogomolov A. V., Kanaev A. T., Topolyansky P. A. Strengthened layer at plasma hardening during whole-rolled wheel. *Vestnik nauki Kazakhskogo agrotekhnicheskogo universiteta im. S. Seifullina = Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University*, 2019, no. 4 (103), pp. 154–161.
13. Kanaev A. T., Sarsembaeva T. E., Saidullaeva M. A. Formation of Gradient-Foliated Structures under High-Temperature Thermomechanical Treatment and Surface Plasma Quenching of Carbon Steel. *Steel in Translation*, 2021, vol. 51, pp. 677–682. <https://doi.org/10.3103/s0967091221090059>

14. Verameichyk A. I., Holodar' B. G. Influence of the shape of the outlet section of the nozzle of a high-energy jet source on the temperature levels in the zone of thermal exposure. *Novye tekhnologii i materialy, avtomatizaciya proizvodva: sbornik statei* [New Technologies and Materials, Production Automation: Collection of Articles]. Brest, Brest State Technical University Publ., 2022, pp. 217–220 (in Russian).
15. Belinin D. S., Shchicyn Yu. D. Features of structure formation during plasma surface hardening to a greater depth of 40X13 steel products. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 4, pp. 1202–1205 (in Russian).
16. Ivancivskii V. V. *Control of the Structural and Stress State of the Surface Layers of Machine Parts During Their Hardening Using Concentrated Sources of Heating and Finishing Grinding*. Novosibirsk, 2012. 425 p. (in Russian).
17. Balanovskii A. E. *Plasma Surface Hardening of Metals*. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2006. 180 p. (in Russian).
18. Korn G. A., Korn T. M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. McGraw-Hill Book Company, 1961. 943 p.