



УДК 621.7.04  
DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-109-116

Поступила 11.04.2019  
Received 11.04.2019

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

*М. Н. ВЕРЕЩАГИН, С. Н. ЦЕЛУЕВА, УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», г. Гомель, Беларусь, пр-т Октября, 48. E-mail: tselueva@gmail.com,  
М. Ю. ЦЕЛУЕВ, ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого»  
НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь, ул. Кирова, 32а*

*Воздействие лазерного излучения приводит к изменению температурного поля обрабатываемого вещества. Характер нагрева, определяющийся скоростями изменения температуры, температурных градиентов, временем достижения температур структурных и фазовых переходов, оказывается различным в зависимости от свойств обрабатываемого материала и условий обработки.*

*При модифицировании поверхностных слоев высокоэнергетической обработкой изменением мощности и времени воздействия лазерного излучения можно получить широкий спектр структурных состояний обрабатываемых участков поверхности материала.*

*Показано, что форма ТВП-диаграмм и кривые охлаждения прецизионных сплавов на поверхности двухслойной металлической системы после нагрева их лазерным излучением определяются конкурированием двух процессов, действующих в противоположных направлениях: увеличением движущей силы процесса кристаллизации с ростом переохлаждения и снижением поверхности атомов.*

*Метод модифицирования поверхности движущимся лазерным излучением позволяет получать аморфные функциональные слои из прецизионных сплавов на поверхности металлических изделий.*

**Ключевые слова.** Лазерное излучение, высокоэнергетическая обработка, лазерная закалка, температурный профиль, ТВП-диаграмма.

**Для цитирования.** Верещагин, М. Н. Модифицирование поверхностных слоев высокоэнергетической обработкой / М. Н. Верещагин, С. Н. Целуева, М. Ю. Целуев // *Литье и металлургия*. 2019. № 2. С. 109–116. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-109-116.

## MODIFICATION OF SURFACE LAYERS BY HIGH ENERGY TREATMENT

*M. N. VERESCHAGIN, S. N. TSELUEVA, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoy, Gomel, Belarus, 48, October ave. E-mail: tselueva@gmail.com,  
M. Yu. TSELUEV, V. A. Belyi Metal-polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus, 32a, Kirov str.*

*Exposure to laser radiation leads to a change in the temperature field of the substance being treated. The nature of heating, which is determined by the rate of change of temperature, temperature gradients, the time to reach the temperatures of structural and phase transitions, is different depending on the properties of the material being processed and the processing conditions.*

*When modifying the surface layers by high-energy processing by changing the power and time of exposure to laser radiation, you can get a wide range of structural states of the treated surface areas of the material.*

*It is shown that the shape of TVP diagrams and cooling curves of precision alloys on the surface of a two-layer metal system after heating them with laser radiation are determined by the competition of two processes acting in opposite directions: an increase in the driving force of the crystallization process with an increase in supercooling and a decrease in the surface of atoms.*

*The method of surface modification by moving laser radiation allows to obtain amorphous functional layers of precision alloys on the surface of metal products.*

**Keywords.** Laser radiation, high-energy processing, laser hardening, temperature profile, TVP-diagram.

**For citation.** Vereschagin M. N., Tselueva S. N., Tseluev M. Yu. Modification of surface layers by high energy treatment. *Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 109–116. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-109-116.

Лазерное излучение – это вынужденное электромагнитное монохроматическое излучение широкого диапазона длин волн. Наряду с волновой природой лазерное излучение проявляет также и корпускулярные свойства.

Одним из основных результатов воздействия лазерного излучения является изменение температурного поля обрабатываемого вещества. Характер нагрева, определяющийся скоростями изменения температуры, температурных градиентов, временем достижения температур структурных и фазовых переходов и другими параметрами процесса, оказывается различным в зависимости от свойств обрабатываемого материала и условий обработки.

Лазерная обработка включает различные технологические процессы, отличающиеся результатом воздействия излучения на поверхность материала, характером протекающих процессов, условиями обработки и т. д. При обработке лазерным лучом различают закалку, легирование и нанесение покрытий, а также ударно-импульсное упрочнение. Улучшение эксплуатационных свойств металлических материалов при данном виде высокоэнергетической обработки связано с изменением структурного состояния, фазового и химического состава поверхностных слоев обрабатываемых изделий. В ряде случаев лазерная обработка позволяет получать на поверхности материалов слои с составом, структурой и свойствами, которые недостижимы или труднодостижимы традиционными методами обработки.

Лазерная закалка может осуществляться без оплавления и с оплавлением поверхности. Метод поверхностной закалки из жидкого состояния получил название «лазерное глазурование» [1]. Для осуществления данного процесса, как правило, используют непрерывное излучение с плотностью мощности  $10^4$ – $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. При перемещении обрабатываемой поверхности под лучом лазера (или луча по поверхности изделия) тонкие слои материала расплавляются, а затем быстро затвердевают за счет передачи тепла нижележащим холодным слоям металлической основы. Изменяя мощность и время воздействия лазерного излучения на обрабатываемые участки поверхности материала, можно получить широкий спектр структурных состояний: ультрамикроструктурные структуры, пересыщенные твердые растворы, структуры с повышенной гомогенностью, тонкие дендритные структуры. При экстремально высоких скоростях охлаждения, наблюдаемых при лазерном глазуровании, на кристаллической основе сплава могут быть зафиксированы аморфные структуры.

Результаты лазерной закалки (равномерность по глубине, качество поверхности) определяются не только теплофизическими свойствами материала, энергетическими (мощность излучения для непрерывных лазеров или энергия импульса для твердотельных лазеров) и технологическими факторами (скорость перемещения детали или луча, коэффициент поглощения излучения данной длины волны), но и характером распределения излучения в сечении лазерного пучка.

Для закалки наибольший интерес представляет распределение излучения, близкое к прямоугольному и имеющее небольшую величину пространственных и временных флуктуаций. Для обеспечения равномерного распределения энергии в пучке применяют сканирование лазерного пучка, например, за счет вибрации зеркала с большой частотой [1].

Лазерную обработку со сканированием лазерного луча по поверхности следует осуществлять высококонцентрированным потоком энергии с большими скоростями его перемещения. В этом случае нагретая область имеет малую ширину и представляет собой узкую полосу, вытянутую по траектории перемещения лазерного луча, а тепло распространяется в основном в направлении, перпендикулярном поверхности обработки. Это обстоятельство позволяет перейти к рассмотрению упрощенной (одномерной) задачи нагрева лазерным излучением двухслойной металлической системы с различными теплофизическими параметрами слоев металла:

$$\frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2}, \tag{1}$$

$$\frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2}, \tag{2}$$

где  $T_1(x, t)$ ,  $T_2(x, t)$  – соответственно температурное поле покрытия и основы;  $a_1$ ,  $a_2$  – соответственно коэффициент теплопроводности материала покрытия и основы.

Начальное условие системы (1), (2) примет вид

$$T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = T_0, \tag{3}$$

а граничные условия

$$\frac{\partial T_1(0,t)}{\partial x} = \frac{qA}{\lambda_1}, \quad (4)$$

где  $q = P/\pi r_{\text{л}}^2$  – равномерно распределенная по сечению пучка лазерного излучения плотность мощности;  $P$  – мгновенная мощность лазерного излучения;

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(h,t)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(h,t)}{\partial x}; \quad (5)$$

$$T_1(h,t) = T_2(h,t), \quad (6)$$

$$T_2(\infty,t) = T_0, \quad (7)$$

где  $h$  – толщина покрытия.

Приводя систему (1) – (7) к начальным нулевым условиям заменой

$$U_1(x,t) = T_1(x,t) - T_0, \quad (8)$$

$$U_2(x,t) = T_2(x,t) - T_0, \quad (9)$$

а затем применяя интегральное преобразование Лапласа [2] по переменной времени:

$$U(x,s) = \int_0^{\infty} T(x,t)e^{-st} dt, \quad (10)$$

для системы (1) – (7) получаем:

$$\frac{\partial^2 U_1(x,s)}{\partial x^2} - \frac{s}{a_1} U_1(x,s) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 U_2(x,s)}{\partial x^2} - \frac{s}{a_2} U_2(x,s) = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial U_1(0,s)}{\partial x} = -\frac{qa}{\lambda_1 s}, \quad (13)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial U_1(h,s)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial U_2(h,s)}{\partial x}, \quad (14)$$

$$U_1(h,s) = U_2(h,s), \quad (15)$$

$$U_2(\infty,s) = 0. \quad (16)$$

Общие решения однородных дифференциальных уравнений второго порядка (11) и (12) имеют вид [3]:

$$U_1(x,s) = Ae^{-x\sqrt{s/a_1}} + Be^{x\sqrt{s/a_1}}, \quad (17)$$

$$U_2(x,s) = Ce^{-x\sqrt{s/a_2}} + De^{x\sqrt{s/a_2}}, \quad (18)$$

где  $A, B, C, D$  – постоянные интегрирования.

Определяя постоянные величины, входящие в равенства (17), (18), с помощью граничных условий (13)–(16), частные решения уравнений (11) и (12) запишем в виде

$$U_1(x,s) = \frac{qA\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \left( \frac{e^{-x\sqrt{s/a_1}}}{s\sqrt{s}} + He^{-h\sqrt{s/a_1}} \frac{e^{x\sqrt{s/a_1}} + e^{-x\sqrt{s/a_1}}}{e^{h\sqrt{s/a_1}} - He^{-h\sqrt{s/a_1}}} \right), \quad (19)$$

$$U_2(x,s) = \frac{qA\sqrt{a_1}}{\lambda_1} e^{(h-x)\sqrt{s/a_2}} \left( e^{-h\sqrt{s/a_1}} + He^{-h\sqrt{s/a_1}} \frac{e^{h\sqrt{s/a_1}} + e^{-h\sqrt{s/a_1}}}{e^{h\sqrt{s/a_1}} - He^{-h\sqrt{s/a_1}}} \right), \quad (20)$$

где

$$H = \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} - 1}{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} + 1}. \quad (21)$$

Поскольку  $|H| < 1$ , используя разложение [3]:

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=1}^{\infty} x^{n-1}, \quad (22)$$

справедливое при  $|x| < 1$ , представим один из множителей, входящих во второе слагаемое равенств (19) и (20), в виде

$$\frac{1}{e^{h\sqrt{s/a_1}} - He^{-h\sqrt{s/a_1}}} = \frac{e^{-h\sqrt{s/a_1}}}{1 - He^{-2h\sqrt{s/a_1}}} = \sum_{n=1}^{\infty} H^{n-1} e^{-(2n-1)\sqrt{s/a_1}h}. \quad (23)$$

С учетом (23) равенства (19) и (20) представим в виде

$$U_1(x,s) = \frac{qA\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \left( \frac{e^{-x\sqrt{s/a_1}}}{s\sqrt{s}} + \frac{\sum_{n=1}^{\infty} H^n \left( e^{-(2hn-x)\sqrt{s/a_1}} + e^{-(2hm+x)\sqrt{s/a_1}} \right)}{s\sqrt{s}} \right), \quad (24)$$

$$U_2(x,s) = \frac{qA\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \left( \frac{e^{\left(\frac{h-x}{\sqrt{a_2}} - \frac{h}{\sqrt{a_1}}\right)\sqrt{s}}}{s\sqrt{s}} + \frac{\sum_{n=1}^{\infty} H^n \left( e^{\left(\frac{h-x}{\sqrt{a_2}} - \frac{2n-1}{\sqrt{a_1}}h\right)\sqrt{s}} + e^{\left(\frac{h-x}{\sqrt{a_2}} - \frac{2n+1}{\sqrt{a_1}}h\right)\sqrt{s}} \right)}{s\sqrt{s}} \right). \quad (25)$$

Используя известное свойство обратного преобразования Лапласа [2]:

$$L^{-1} \left( \frac{e^{-k\sqrt{s}}}{s\sqrt{s}} \right) = 2\sqrt{t} \operatorname{ierfc} \left( \frac{k}{2\sqrt{t}} \right), \quad (26)$$

где  $\operatorname{ierfc}(x) = \int_0^{\infty} \operatorname{erfc}(\xi) d\xi$  – интегральная функция ошибок [4];  $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$  – дополнительная функция ошибок [4].

Для оригиналов изображений (24) и (25) с учетом равенств (8) и (9) получаем:

$$T_1(x,s) = T_0 + \frac{2qA\sqrt{a_1}t}{\lambda_1} \left( \operatorname{ierfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a_1}t} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} H^n \left( \operatorname{ierfc} \left( \frac{2hn-x}{2\sqrt{a_1}t} \right) + \operatorname{ierfc} \left( \frac{2hn+x}{2\sqrt{a_1}t} \right) \right) \right), \quad (27)$$

$$T_2(x,s) = T_0 + \frac{2qA\sqrt{a_1}t}{\lambda_1} \left( \operatorname{ierfc} \left( \frac{\frac{h}{\sqrt{a_1}} - \frac{h-x}{\sqrt{a_2}}}{2\sqrt{t}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} H^n \left( \operatorname{ierfc} \left( \frac{\frac{(2n-1)h}{\sqrt{a_1}} - \frac{h-x}{\sqrt{a_2}}}{2\sqrt{t}} \right) + \operatorname{ierfc} \left( \frac{\frac{(2n+1)h}{\sqrt{a_1}} - \frac{h-x}{\sqrt{a_2}}}{2\sqrt{t}} \right) \right) \right). \quad (28)$$

Температурный профиль по глубине стальной заготовки с покрытием из сплава системы Fe–Cr–Ni–Mo–Co–B–Si при сканировании лазерного излучения по поверхности заготовки представлен на рис. 1. Выбор технологических режимов воздействия определяется сочетанием скорости сканирования лазерного луча и мощности излучения (рис. 2).

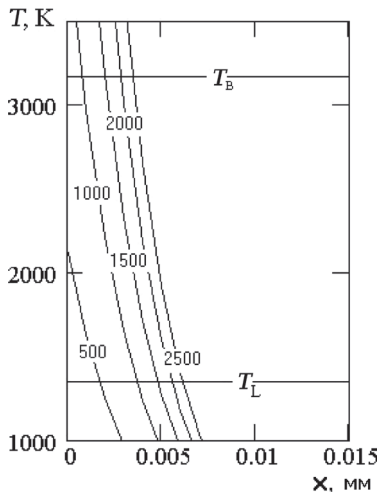


Рис. 1. Температурный профиль по глубине стальной заготовки с покрытием из сплава системы Fe–Cr–Ni–Mo–Co–B–Si при сканировании лазерного излучения по поверхности (режим обработки:  $V = 200$  см/с;  $d_{\text{л}} = 0,5$  мм;  $T_L$  – температура плавления;  $T_B$  – температура кипения; цифры на кривых – мощность излучения, Вт)

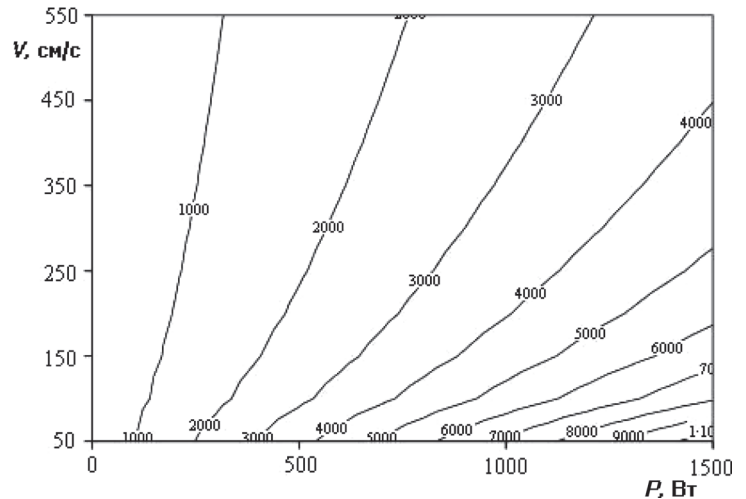


Рис. 2. Температура поверхности стальной заготовки с покрытием из сплава системы Fe–Cr–Ni–Mo–Co–B–Si в центре пятна лазерного излучения в зависимости от скорости сканирования и мощности излучения ( $d_{\text{л}} = 0,5$  мм; цифры на кривых – температура, К)

После прекращения подвода тепловой энергии к образцу происходит сверхбыстрое охлаждение и затвердевание расплавленной зоны, что при соответствующих условиях обуславливает образование метастабильных кристаллических и аморфных фаз.

Рассмотрим задачу охлаждения полубесконечного тела после окончания действия импульса лазерного излучения с нормальным законом распределения плотности мощности по сечению луча. Математически задачу охлаждения сформулируем в следующем виде:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2}, \quad (29)$$

где  $T(x, y, z, t)$  – температурное поле охлаждаемого полубесконечного тела.

При начальном условии:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 + f(x, y, z), \quad (30)$$

где  $f(x, y, z)$  – функция, описывающая температурный профиль полубесконечного тела в конце действия источника тепла.

Температурное поле в цилиндрической системе координат полубесконечного тела в любой момент времени действия импульса тепла определяется выражением:

$$f(x, y, z) = \frac{q_m A}{4k\lambda\sqrt{\pi a}} \int_0^T e^{-\frac{x^2}{4at} - \frac{y^2+z^2}{4a(t+t_0)}} \frac{1}{\sqrt{t(t+t_0)}} dt, \quad (31)$$

где  $t$  – длительность импульса теплового источника.

Граничные условия для дифференциального уравнения теплопроводности (29) имеют вид

$$\frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x} = \frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial y} = \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z}, \quad (32)$$

$$T(\infty, y, z, t) = T(x, \infty, z, t) = T(x, y, \infty, t). \quad (33)$$

Применяя тройное косинус-преобразование Фурье по пространственным координатам, для системы (29) – (33) получаем:

$$\frac{\partial U(n, p, s, t)}{\partial t} + (n^2 + p^2 + s^2)aU(n, p, s, t) = 0, \quad (34)$$

$$U(n, p, s, 0) = -\frac{q_m A \pi}{4k\lambda} \frac{e^{-(p^2+s^2)at_0} (e^{-(n^2+p^2+s^2)at} - 1)}{n^2 + p^2 + s^2}. \quad (35)$$

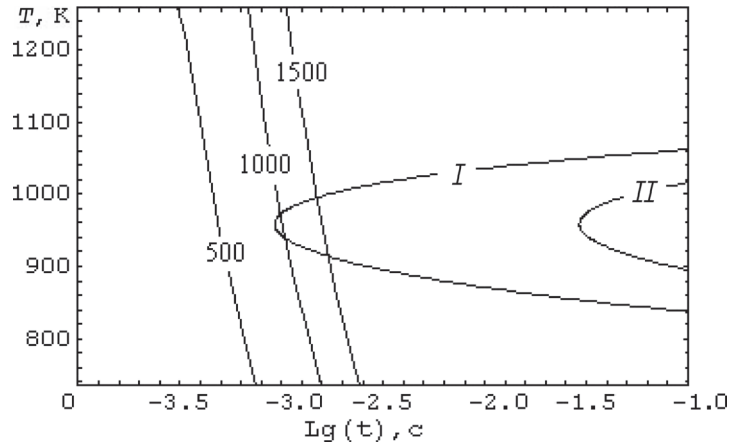


Рис. 3. ТВП-диаграмма (I-II) и кривые охлаждения поверхности металлического (Fe-Cr-Ni-Mo-Co-B-Si) изделия при его обработке движущимся источником лазерного излучения (I – начало кристаллизации; II – окончание кристаллизации; цифры на кривых – мощность источника излучения, Вт; параметры обработки:  $d_{\text{л}} = 0,5 \text{ мм}$ ;  $V = 200 \text{ см/с}$ )

Общее решение однородного дифференциального уравнения первого порядка (34) имеет вид

$$U(n, p, s, t) = C e^{-(n^2+p^2+s^2)at}, \tag{36}$$

в котором постоянную интегрирования  $C$  определяем из условия (35):

$$C = \frac{q_m A \pi}{4k\lambda} \cdot \frac{e^{-(p^2+s^2)at_0} (1 - e^{-(n^2+p^2+s^2)at})}{n^2 + p^2 + s^2}. \tag{37}$$

С учетом (36) и (37) частное решение уравнения (34) примет вид

$$U(n, p, s, t) = \frac{q_m A \pi}{4k\lambda} e^{-(p^2+s^2)at_0} \frac{1 - e^{-(n^2+p^2+s^2)at}}{n^2 + p^2 + s^2} e^{-(n^2+p^2+s^2)at}. \tag{38}$$

В области оригиналов будем искать решение для первой производной равенства (38) по времени:

$$\frac{\partial U(n, p, s, t)}{\partial t} = \frac{q_m A \pi a}{4k\lambda} e^{-(p^2+s^2)at_0} (e^{-(n^2+p^2+s^2)at} - 1) e^{-(n^2+p^2+s^2)at}, \tag{39}$$

для этого применим к выражению (39) тройное обратное косинус-преобразование Фурье по пространственным координатам. В результате вычислений получаем:

$$\frac{\partial U(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{q_m A}{4k\lambda \sqrt{\pi a}} \left( \frac{e^{-\frac{x^2}{4a(t+t_0)} - \frac{y^2+z^2}{4a(t+t_0)}}}{(t+t_0)\sqrt{t}} - \frac{e^{-\frac{x^2}{4at} - \frac{y^2+z^2}{4a(t+t_0)}}}{\sqrt{t}(t+t_0)} \right). \tag{40}$$

Равенство (40) описывает мгновенное изменение температурного поля в охлаждаемом теле. Используя принцип наложения мгновенных источников [5] с учетом (30), получаем следующую зависимость температурного поля в охлаждаемом материале в цилиндрической системе координат ( $r^2 = y^2 + z^2$ ):

$$T(x, r, t) = T_0 + \frac{q_m A}{4k\lambda \sqrt{\pi a}} \int_t^t \frac{e^{-\frac{x^2}{4at} - \frac{r^2}{4a(t+t_0)}}}{\sqrt{t}(t+t_0)} dt. \tag{41}$$

Скорость охлаждения полубесконечного тела в случае сканирования по его поверхности лазерного пучка можно получить из равенства (41) в случае квазистационарного состояния путем дифференцирования его по времени.

На рис. 3–5 показаны ТВП-диаграммы (I-II) и кривые охлаждения прецизионных сплавов на поверхности двухслойной металлической системы после нагрева их лазерным излучением. При построении диаграмм использовали методику работы [6].

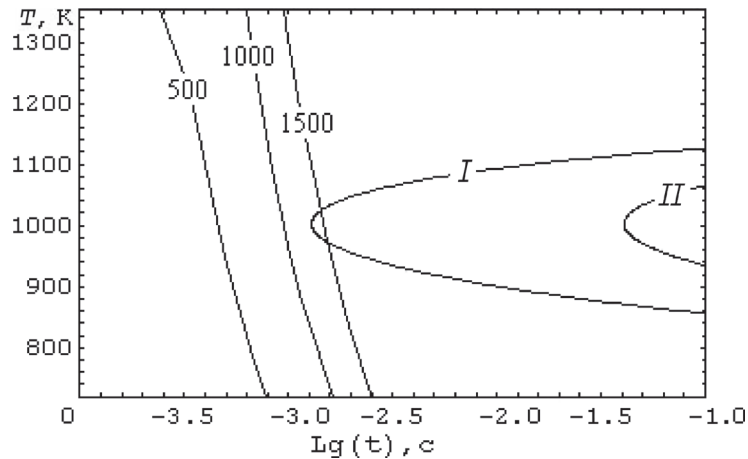


Рис. 4. ТВП-диаграмма (I-II) и кривые охлаждения поверхности металлического (Fe-Cr-Ni-Mo-Mn-Al-B-C) изделия при его обработке движущимся источником лазерного излучения (I – начало кристаллизации; II – окончание кристаллизации; цифры на кривых – мощность источника излучения, Вт; параметры обработки:  $d_{II} = 0,5$  мм;  $V = 200$  см/с)

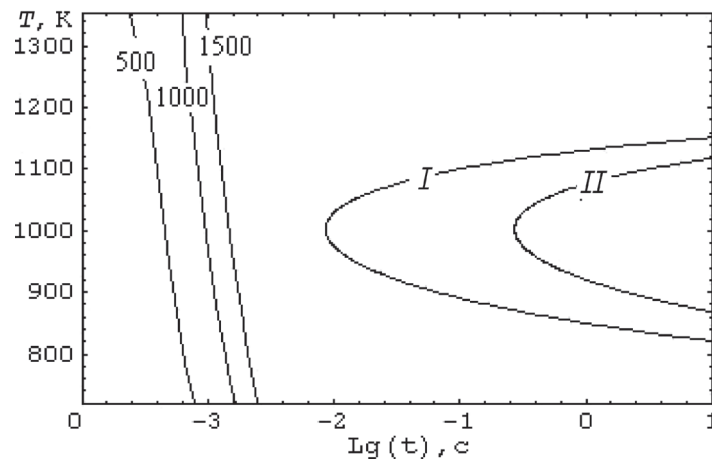


Рис. 5. ТВП-диаграмма (I-II) и кривые охлаждения поверхности металлического (Fe-Al-P-C) изделия при его обработке движущимся источником лазерного излучения (I – начало кристаллизации; II – окончание кристаллизации; цифры на кривых – мощность источника излучения, Вт; параметры обработки:  $d_{II} = 0,5$  мм;  $V = 200$  см/с)

Форма ТВП-диаграмм определялась конкурированием двух процессов, действующих в противоположных направлениях: увеличением движущей силы процесса кристаллизации с ростом переохлаждения и снижением подвижности атомов [6].

Для получения аморфной структуры кривые, характеризующие тепловые условия охлаждения сплава, должны находиться левее линии ТВП-диаграммы.

Анализ кривых ТВП показывает, что метод модифицирования поверхности движущимся лазерным излучением позволяет получать аморфные функциональные слои из изучаемых сплавов на поверхности металлических изделий. Скорость охлаждения металла после нагрева одиночным импульсом излучения более высока, чем в случае сканирования луча по поверхности. Таким образом, обработка деталей импульсным излучением обеспечивает получение аморфных поверхностных слоев на металлических изделиях большей толщины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев П. А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов / П. А. Леонтьев, Н. Г. Чеканова, М. Г. Хан. М.: Металлургия, 1986. 142 с.
2. Бейтмен Г. Таблицы интегральных преобразований. В 2-х т. / Г. Бейтмен, А. Эрдейн. М.: Наука, 1969–1970. Т. 1. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина, 1969. 344 с.
3. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука, 1968. 720 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
5. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
6. Верещагин М. Н. Структурообразование прецизионных сплавов при быстрой закалке из расплава / М. Н. Верещагин, М. Ю. Целуев, С. Н. Целуева // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019.

**REFERENCES**

1. **Leont'ev P. A., Chekanova N. G., Han M. G.** *Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986. 142 p.
2. **Bejtmen G., Jerdejn A.** *Tablicy integral'nyh preobrazovanij: Vol. 2 t.* [Integral Conversion Tables. In 2 tons]. Moscow, Nauka Publ., 1969–1970. Vol. 1. *Preobrazovanija Fur'e, Laplasa, Mellina* [Fourier, Laplace, Mellin Transformations], 1969. 344 p.
3. **Korn G., Korn T.** *Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov* [Math Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 720 p.
4. **Lykov A. V.** *Teorija teploprovodnosti* [Heat conduction theory]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1967. 600 p.
5. **Grigor'janc A. G.** *Osnovy lazernoj obrabotki materialov* [Basics of laser material processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 304 p.
6. **Vereschagin M. N., Tseluev M. Ju., Tselueva S. N.** *Strukturoobrazovanie precizionnyh splavov pri bystroj zakalke iz rasplava* [Structure formation of precision alloys during rapid melt quenching]. *Vestnik GGTU im. P. O. Suhogo = Bulletin GGTU named after P. O. Sukhoj*, 2019.