

УДК 537.533+661.8/061/1+661/571+546.302
DOI 10.18101/2306-2363-2018-2-3-55-63

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ-1 ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ВАКУУМЕ

© **Лапина Анна Евгеньевна**

аспирант,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: anna2-11-90@mail.ru

© **Смирнягина Наталья Назаровна**

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: smirnyagina09@mail.ru

© **Дашеев Доржо Эрдэмович**

научный сотрудник,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: fokter@mail.ru

Рассматриваются этапы построения математической модели тепловых полей, возникающих в образце в ходе электронно-лучевой обработки. Проведено исследование особенностей ввода электронного пучка в титановый сплав марки ВТ-1. Были проанализированы вопросы и особенности взаимодействия электронного пучка с веществом (тепловые процессы в зоне обработки). Расчет температур и графики распределения температурных полей производились с помощью математической среды Maple (18.0). Воздействие электронным пучком проводилось с помощью мощной электронно-лучевой установки с аксиальной пушкой на термокатодах и импульсной установки SOLO. Полученные численные результаты позволили исследовать закономерности распределения температуры и скорости её изменения от действия электронного пучка.

Ключевые слова: математическое моделирование; тепловые процессы; титановый сплав марки ВТ-1; электронно-лучевая обработка; высококонцентрированные потоки энергии; электронный пучок.

1. Введение

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, т. е. во всем диапазоне термического воздействия, ведение процесса в вакууме, что обеспечивает чистоту обрабатываемого материала, а также возможность полной автоматизации процесса.

Использование электронного пучка как источника нагрева позволяет значительно расширить возможности поверхностной модификации сплавов и металлов [1].

Общее признано [2], что электронно-лучевое воздействие на металлы приво-

дит к их нагреву, плавлению и испарению с высокими скоростями, поскольку диапазоны мощности и концентрации энергии в пучке велики. Передача энергии по мере проникновения электрона вглубь вещества происходит неравномерно. Поэтому мощность, поглощаемая в единице объема вещества, является функцией расстояния от поверхности.

При анализе теплового воздействия высококонцентрированными источниками энергии (КПЭ) часто вводятся те или иные допущения (одно- или двумерная постановка, постоянные коэффициенты, и так далее), упрощающие вид уравнения теплопроводности. Это снижает эффективность учёта и описания, присущих действию КПЭ особенностей, таких как высокие скорости процессов, фазовые превращения, структурная неоднородность [3].

В данной работе рассмотрены этапы построения математической модели тепловых полей, возникающих в образце в ходе электронно-лучевой обработки.

1. Постановка задачи. Особенности исследования.

Решение любой технологической задачи начинается с выбора методики расчета и анализа исходных данных.

Для определения физической модели процесса обработки концентрированными потоками энергии учитывали целый ряд параметров:

а) Мощность воздействия электронного пучка – P [Вт].

б) Скорость обработки детали – $V_{\text{обр}}$ [м/с].

в) Время воздействия в зоне облучения – $t_{\text{об}}$ [с].

г) Данные по размерам детали – $d \times l$ (15X7 мм) (диаметр и высота образца),

д) Глубина проникновения электронов в образец – $h = 2.1 \cdot 10^{-12} \cdot U^2 / \rho$, глубина максимального энерговыделения – $h = 0.75 \cdot S$ [м].

Частоту сканирования на электронно-лучевой установке с аксиальной пушкой на термокатадах можно варьировали от 50 до 500 Гц, что позволяет рассматривать воздействие электронным пучком как импульсное при малых частотах [4].

Следующим важным шагом для решения поставленной задачи является анализ теплофизических характеристик выбранного материала. Основные теплофизические свойства титанового сплава ВТ-1 взяты из справочника [5]: теплопроводность $\lambda = 22.3$ [Вт/м*К], теплоемкость $c_p = 530$ [Дж/кг*К], плотность $\rho_m = 4505$ [кг/м³] и температуропроводность – $9.3 \cdot 10^6$ [м/с²], которая связана с

предыдущими параметрами формулой: $\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho_m}$.

Далее производили оценку:

1. Расстояния, на которое распространяется тепловой фронт $h_T = \sqrt{\alpha t}$

2. Скорости распространения теплового фронта в материале детали за время обработки. $V_T = \sqrt{\alpha/t}$

Сравнение полученных данных позволило определиться с выбором модели [2]:

Вид источника нагрева:

1) Точечный: $r_n < h_T$, т. е. необходимо было учитывать отвод тепла из-под электронного пучка по поверхности детали, который значительно уменьшает температуру нагрева в зоне воздействия.

2) Распределенный (пространственный): при $r_n \gg h_T$. В этом случае можно было пренебречь отводом тепла из зоны воздействия электронного пучка за время $t = d_n / V_{обр}$.

3) Точечный движущийся источник: $V_{обр} < V_T$. Требовался учет отвода тепла по всем трем направлениям X, Y и Z.

4) Мощный быстродвижущийся источник: $V_{обр} > V_T$. В этом случае отводом тепла по направлению X движения электронного пучка можно пренебречь. Присчитывали распространение тепла только перпендикулярно движению луча и вглубь материала детали.

Для моделирования процесса электронно-лучевой обработки выбраны образцы, имеющие цилиндрическую форму (рис.1). По условиям электронно-лучевой обработки электронный пучок вначале фокусируется на поверхности цилиндрического образца, а затем с помощью блока управления электронным пучком преобразуется в растр и сканируется по всему диаметру [6].

Таким образом, можно представить, что в окружность вписывается квадрат.

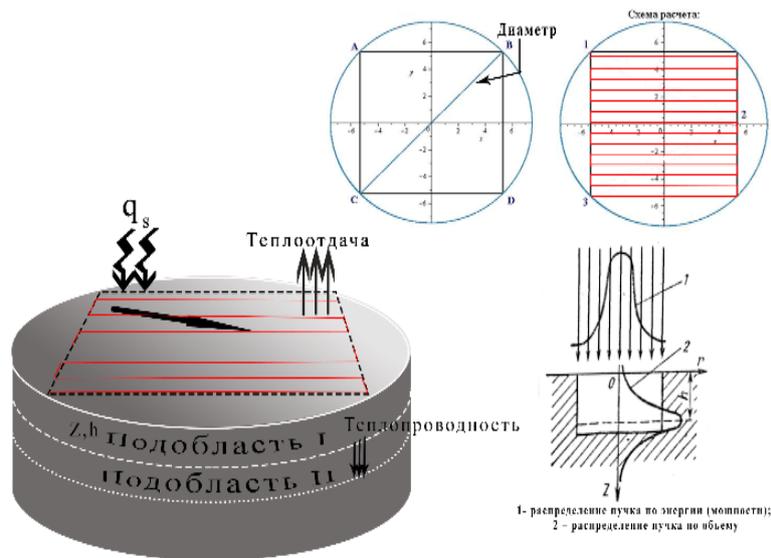


Рис. 1. Схема ввода электронного пучка и расчета тепловых полей.

2. Результаты и их обсуждение.

При выполнении расчетов определяли следующие величины: температуру $T(0,t)$ на поверхности детали, температуру $T(x,t)$ на глубине максимального энерговыделения – x (или z), скорости нагрева $V_{наг} = dT/dt$ материала, скорости охлаждения $V_{охл}$ материала и ряд других параметров.

1. Импульсная обработка точечным неподвижным источником.

Импульсная электронно-лучевая обработка однородных материалов при использовании модели полу бесконечного твердого тела позволяет получить методом интегральных преобразований аналитически точное решение соответствующее

щей тепловой задачи при условии, что интенсивность электронного источника не зависит от времени [2].

Распределение температуры вглубь материала на стадии нагрева рассчитывали по формуле :

$$T(z, t) = (2 \cdot A \cdot q_0 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t} / \lambda) \times \text{ierfc}[z / (2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t})] \quad (1)$$

На рис. 2. показаны температуры на стадии нагрева в начальный момент импульса и в момент его окончания.

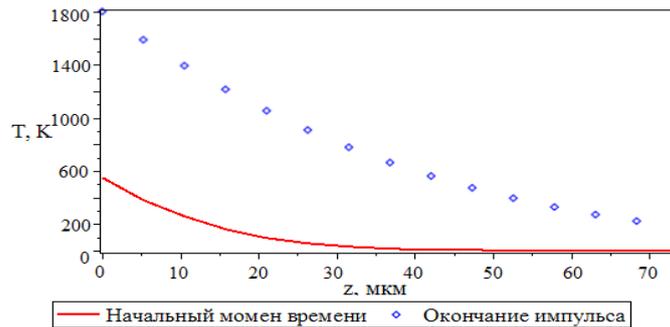


Рис.2. Температура на стадии нагрева T(z) при импульсной обработке точечным электронным пучком

Скорость нагрева, как функции координаты и времени рассчитывали по формуле [1]:

$$V_T = \left(\frac{q_0 \cdot A}{\lambda} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{\alpha}{t}} \cdot \text{ierfc}[z / (2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t})] + \frac{z \cdot \text{erfc}[z / (2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t})]}{2 \cdot t} \right) \quad (2)$$

Процесс высокоскоростной, нагрев происходит поверхностно, а не объемно (рис.3). В результате такой электронно-лучевой обработки можно наблюдать образование закалочной структуры в обрабатываемом металлическом сплаве.

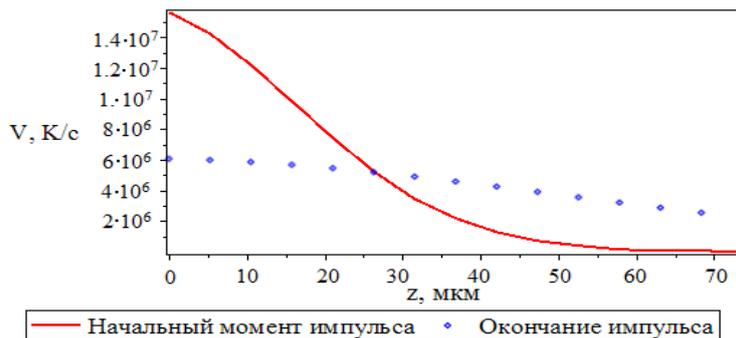


Рис. 3. Скорость на стадии нагрева V(z) при импульсной обработке точечным электронным пучком

Распределение температуры вглубь материала на стадии охлаждения рассчитывали по формуле [1]:

$$T(z, t) = \left(\frac{2 \cdot A \cdot q_0}{\lambda}\right) \cdot \left\{ \sqrt{\alpha \cdot t} \cdot \operatorname{ierfc}\left[\frac{z}{2 \cdot \sqrt{\alpha t}}\right] - \sqrt{\alpha \cdot t - \tau} \cdot \operatorname{ierfc}\left[\frac{z}{2 \cdot (\sqrt{\alpha \cdot t - \tau})}\right] \right\} \quad (3)$$

На рис. 4. изображены графики температур в начальный момент времени и в момент окончания импульса на стадии охлаждения. Из-за ввода энергии в начальный момент импульса охлаждение происходит плавно по всей глубине воздействия импульса, а в момент окончания импульса охлаждение образца протекает с постепенным уменьшением скорости.

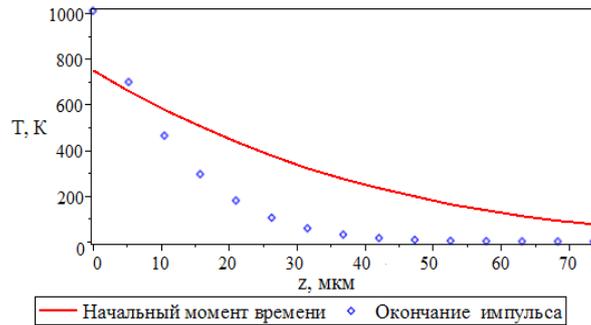


Рис.4. Температура на стадии охлаждения $T(z)$ при импульсной обработке точечным электронным пучком

Скорость охлаждения, как функция координаты и времени рассчитывали по формуле [1]:

$$V_T = \left(\frac{A}{t} \cdot q\right) \cdot \left[\sqrt{\frac{\alpha}{t}} \cdot \operatorname{ierfc}\left[\frac{z}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t}}\right] + \frac{z \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t}}\right]}{2 \cdot (t - \tau)} - \sqrt{\frac{\alpha}{t - \tau}} \cdot \operatorname{ierfc}\left[\frac{z}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t - \tau}}\right] - \frac{z \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t - \tau}}\right]}{2 \cdot (t - \tau)} \right] \quad (4)$$

где A - коэффициент поверхностного поглощения; λ - теплопроводность; q_0 - плотность мощности импульсного воздействия; α - температуропроводность; τ - время импульсного воздействия; t - текущее время; z - глубина проникновения.

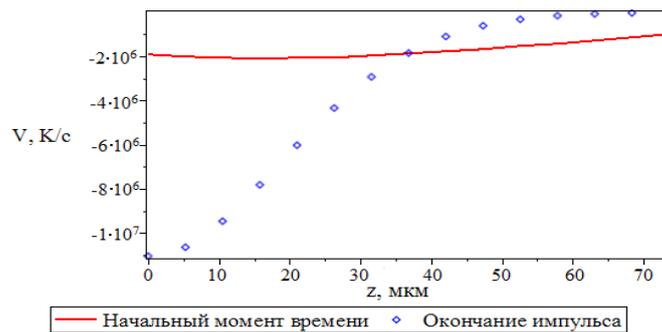


Рис.5. Скорость охлаждения $V(z)$ при импульсной обработке точечным электронным пучком

На рис. 6. показано распределение температур при импульсной обработке точечным электронным пучком на стадии нагрева (рис.6.а) и на стадии охлаждения (рис.6. б) вглубь материала в зависимости от времени $T(z, t)$. В момент оконча-

ния импульса нагрев происходит не только по поверхности материала, но и по объему. Температура поднимается до 2000 К. На стадии охлаждения поверхность образца охлаждается до 1600 К.

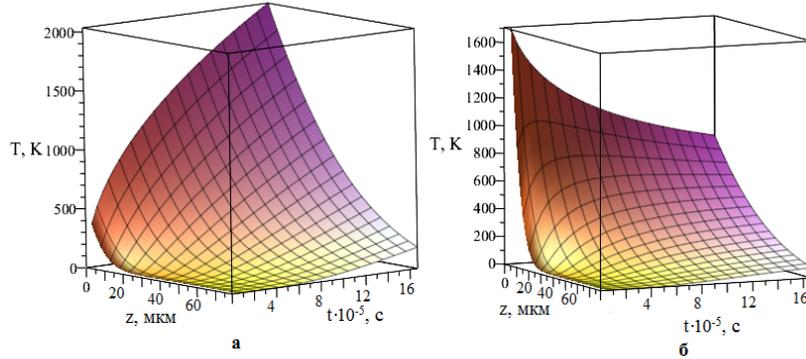


Рис. 6. Распределение температур при импульсной обработке точечным электронным пучком вглубь материала в зависимости от времени: а – на стадии нагрева, б – на стадии охлаждения.

II. *Обработка Гауссовым распределенным источником (импульсный режим, цилиндрическая симметрия).*

Распределение температуры рассчитывали по формуле [1]:

$$T = \frac{2 \cdot P \cdot A}{c\rho \cdot (4 \cdot \pi \cdot \alpha)^{\frac{3}{2}}} \times \int_0^t \exp\left[-\frac{x}{-4 \cdot \alpha} + \frac{z^2 + (\sqrt{x^2 + y^2})^2}{t + x}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{x} \cdot (t + x)} dx \quad (5)$$

Скорость нагрева рассчитывали по формуле:

$$V = 2 \cdot A \cdot \frac{q \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{t}}}{\lambda \cdot [\sqrt{\pi} \cdot (1 + 4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \frac{t}{rp^2})]} \cdot \exp\left[\frac{-z^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} - \frac{(\sqrt{x^2 + y^2})^2}{4 \cdot \alpha \cdot t + rp^2}\right] \quad (6)$$

На рис. 7. изображены графики распределения температур и скоростей по глубине проникновения. (r – расстояние от центра координат)

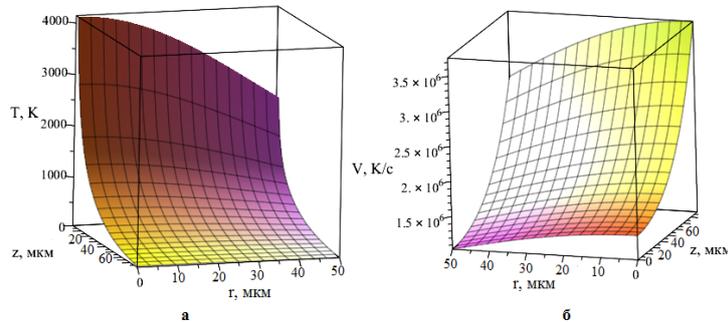


Рис. 7. Распределение по глубине проникновения: а – температур $T(r,z)$, б — скоростей $V(r,z)$.

III. Электронно-лучевая обработка мощным быстродвижущимся источником.

Обработка мощным быстродвижущимся источником соответствует случаю воздействия на материал сканирующего по поверхности электронного пучка. Электронный пучок рассматривался, как объемный тепловой источник, для которого можно рассчитать распределение температуры по глубине проникновения (цилиндрическая система координат) по формуле [1]:

$$T(x, y, z, t) = 2 \cdot P \cdot \frac{\exp(-\frac{Vx}{\alpha})}{c\rho \cdot (4 \cdot \pi \cdot \alpha)^{\frac{3}{2}}} \times \int_0^x \exp[-\frac{(\frac{z^2}{t+x} + \frac{(\sqrt{x^2 + y^2})^2}{t+x}) + Vx^2 \cdot (t+x)}{-4 \cdot \alpha}] \cdot \frac{1}{\sqrt{x \cdot (t+x)}} dx \quad (7)$$

где P - мощность электронного пучка; Vx – скорость сканирования электронного пучка по поверхности; сρ - объемная теплоемкость; α – температуропроводность; t- текущее время; x,y,z - текущие координаты.

Процесс распределения температуры T(z,r), быстродвижущимся пучком описывается следующим выражением:

$$T(r, z) = \frac{2 \cdot A \cdot P}{c\rho \cdot V} \cdot \frac{\exp(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}) \cdot \exp(-\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot (t+t_0)})}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot t} \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot (t+t_0)}} \quad (8)$$

На рис.8. представлено распределение температуры по глубине и в перпендикулярном направлении движению пучка в пределах теплового воздействия T(r,z).

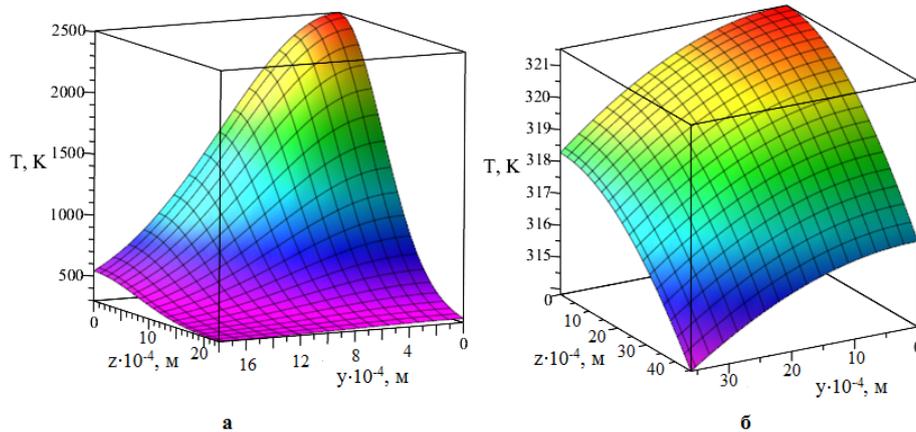


Рис.8. Распределение температуры при обработке быстродвижущимся пучком по глубине и в перпендикулярном направлении движению пучка T(r,z). а - в момент вхождения электронного пучка (по фронту). б - по истечении времени t, когда пучок вернется в точку x=0, т.е совершит один проход по одной строчке.

Скорость нагрева на поверхности (z=0) в момент времени t рассчитывали по формуле:

$$V = \frac{q}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \pi \cdot t}} \quad (9)$$

Скорость охлаждения на поверхности ($z=0$):

$$V = \frac{q}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \pi}} \cdot \left(\frac{1}{t_2^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{\sqrt{t_2 - t}} \right) \quad (10)$$

На рис. 9. представлены скорости нагрева и охлаждения в пределах пятна (гр) на поверхности образца. Как следует из рисунков, скорости зависят от степени рассеяния энергии быстро движущегося электронного пучка.

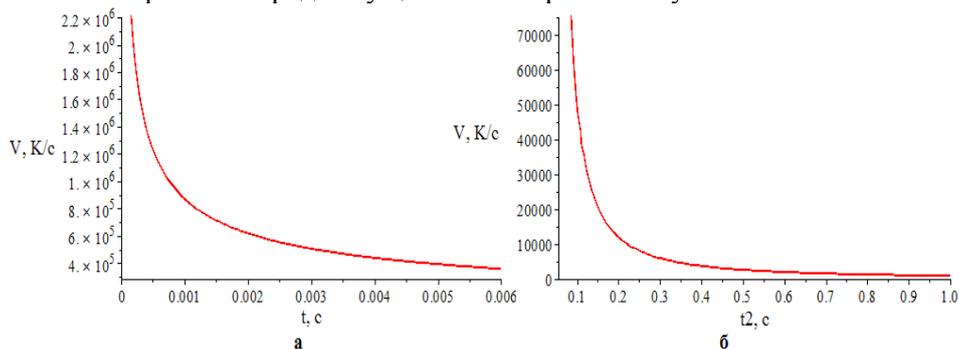


Рис. 9. Скорости нагрева и охлаждения в пределах пятна (гр) на поверхности образца при обработке быстро движущимся электронным пучком: *а* – скорости нагрева; *б* – скорости охлаждения.

3. Выводы

1. Смоделирован процесс импульсной обработки точечным неподвижным источником.

2. Рассчитаны температуры на стадии нагрева и охлаждения, скорости нагрева и охлаждения, температуры при воздействии быстро движущегося сфокусированного электронного пучка, при воздействии объемным точечным и Гауссовым распределенным источником (в среде Maple 18).

3. Рассмотрены вопросы взаимодействия электронного пучка с веществом (тепловые процессы в зоне обработки), особенности взаимодействия электронного пучка с материалами.

Исследовано распределение температуры и скорости её изменения от действия электронного пучка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 15-48-04217- сибирь-а.

Литература

1. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
2. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
3. Багмутов В. П., Захаров И. Н. Моделирование тепловых процессов при поверхностной обработке неоднородных металлических тел высокотемпературным движущимся импульсным источником // Вычислительная механика сплошных сред. 2011. Т. 4, № 1. С. 5–16.
4. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя / под ред. И. Н. Жестковой. М.: Машиностроение, 2001. Т. 1. 920 с.

А. Е. Лапина, Н. Н. Смирнягина, Д. Э. Дашеев. Моделирование тепловых процессов при обработке титанового сплава VT-1 электронным пучком в вакууме

5. Семенов А. П., Смирнягина Н. Н., Сизов И. Г. Установка для электронно-лучевой химико-термической обработки // *Технология металлов*. 2001. № 4. С. 32–34.

6. Полуконова А. Е., Смирнягина Н. Н., Дашеев Э. Д. Моделирование тепловых процессов при электронно-лучевой обработке низкоуглеродистой стали, сфокусированных электронными пучками // *Сборник ИТОН-4*. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2015. С. 57–65

7. Лапина А. Е., Смирнягина Н. Н., Дашеев Д. Э. Моделирование тепловых процессов при электронно-лучевой обработке титанового сплава VT-1 // *Сб. докл. XIII конф. по фундаментальным и прикладным проблемам физики (молодых ученых, аспирантов и студентов)*. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. С. 17–19.

THERMAL PROCESSES MODELING ЦПУТ TITANIUM ALLOY VT-1 PROCESSED BY AN ELECTRON BEAM IN VACUUM

Anna E. Lapina

postgraduate,
Institute of Physical Materials Science SB RAS
6 Sahyanova str., Ulan-Ude, 670047, Russia
E-mail: anna2-11-90@mail.ru

Natalya N. Smirnyagina

Doctor of Technical Sciences, associate Professor, chief Researcher
Institute of Physical Materials Science SB RAS
6 Sahyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russia
E-mail: smirnyagina09@mail.ru

Dorzho E. Dasheev

researcher,
Institute of Physical Materials Science SB RAS
6 Sahyanova str., Ulan-Ude, 670047, Russia

In this article, stages of creation of mathematical model of the thermal fields arising in an exemplar during electron beam processing are considered. The research of features of electron beam input in titanium alloy VT-1 is conducted. Questions and features of interactions of the electron beam with the substance (thermal processes in the processing zone) were analyzed. Calculation of temperatures and graphics of distribution of temperature fields were made by means of the mathematical Maple (18.0) environment. The electron beam impact was carried out by means of powerful electron beam installation with an axial gun on thermo cathodes and pulse installation SOLO. The received numerical results allowed investigating regularities of temperature distribution and its speed change depending on action of the electron beam.

Keywords: mathematical modeling, thermal processes, titanium alloy VT-1, electron beam processing, the high-concentrated energy streams, electron beam.