

А. Е. Лапина, Н. Н. Смирнягина, Д. Э. Дашеев. Разработка теплофизической модели электронно-лучевой обработки титанового сплава BT-1 ...

УДК 537.533+661.8/061/1+661/571+546.302
doi: 10.18101/2306-2363-2017-2-3-17-23

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT-1 С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ Maple 18

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

© *А. Е. Лапина*

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

© *Н. Н. Смирнягина*

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

© *Д. Э. Дашеев*

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

Выполнено математическое моделирование тепловых полей при электронно-лучевой обработке титанового сплава BT-1 в вакууме. Произведен расчет энергии активации, диффузии из постоянного источника, из источника ограниченной мощности. Проанализирована зависимость толщины диффузионного слоя от времени борирования. Воздействие электронным пучком проводилось с помощью электронно-лучевой установки специальной конструкции, укомплектованной мощной электронной пушкой на термокатадах с блоком управления электронным лучом (БУЭЛ) и высоковольтным выпрямителем.

Ключевые слова: математическое моделирование, электронно-лучевая обработка, титановый сплав BT-1, электронный пучок, тепловые процессы, диффузия, борирование.

Получение изделий с оптимизированными под заданные условия функционирования свойствами и структурой является актуальной задачей современных производств.

При анализе теплового воздействия высококонцентрированными источниками энергии часто вводятся различные допущения, которые упрощают вид уравнения теплопроводности. В результате снижается эффективность учёта и описания особенностей характерных для воздействия электронным пучком, таких как высокие скорости процессов, фазовые превращения, структурная неоднородность [1].

Постановка задачи. Особенности исследования

Для моделирования процесса электронно-лучевой обработки выбраны образцы, диаметром 15 мм и высотой 7 мм, имеющие форму, представленную на рис. 1 [2].

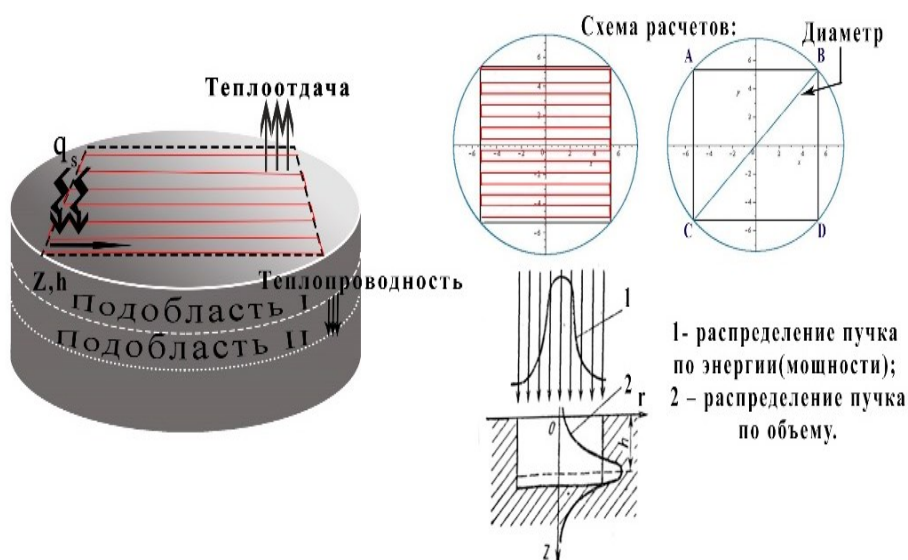


Рис. 1. Блок схема

Для определения физической модели процесса электронно-лучевой обработки учитывается целый ряд параметров [3]:

1. Мощность воздействия электронного пучка — P [Вт].
2. Скорость обработки детали — $V_{обр}$ [м/с].
3. Время воздействия в зоне облучения — $t_{обр}$ [с].
4. Данные по размерам детали — $d \times l$ (15 x 7 мм) (диаметр и высота образца).
5. Глубина проникновения электронов в образец — $h = 2.1 \cdot 10^{-12} \cdot U^2 / \rho$, глубина максимального энерговыделения — $h = 0.75 \cdot S$ [м].

Основные теплофизические свойства титанового сплава ВТ-1 [4-5]: теплопроводность λ — 22.3 [Вт/м·К], теплоемкость c — 530 [Дж/кг·К], плотность ρ_m — 4505 [кг/м³] и температуропроводность — $9.3 \cdot 10^6$ [м/с²], которая связана с предыдущими параметрами формулой: $\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m}$.

Результаты и их обсуждение

Электронно-лучевая обработка мощным быстродвижущимся источником.

При расчете технологических режимов определяли следующие величины: температура $T(0, t)$ на поверхности детали, температуру $T(x, t)$ на глубине максимального энерговыделения — x (или z), скорость нагрева материала, скорость охлаждения $V_{охл}$ материала зоны обработки, необходимая мощность для достижения требуемых результатов обработки и ряд других параметров [6].

Электронный пучок рассматривался, как объемный тепловой источник, для которого можно рассчитать распределение температуры по глубине проникновения (цилиндрическая система координат):

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

где P — мощность электронного пучка; V_x — скорость сканирования электронного пучка по поверхности; $c\rho$ — объемная теплоемкость; α — температуропроводность; t — текущее время; x, y, z — текущие координаты.

Процесс распределения температуры $T(z, r)$, быстро движущимся пучком описывается следующим выражением:

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

На рис. 2. представлено распределение температуры по глубине и в перпендикулярном направлении движению пучка в пределах теплового воздействия $T(z, r)$.

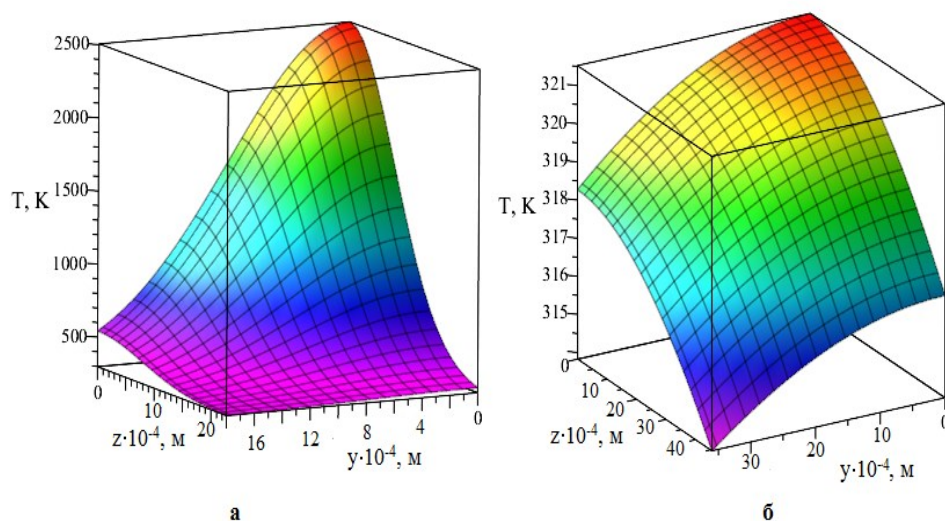


Рис. 2. Распределение температуры по глубине и в перпендикулярном направлении движению пучка $T(z, r)$. а — в момент вхождения электронного пучка (по фронту); б — по истечении времени t , когда пучок вернется в точку $x = 0$, т. е. совершит один проход по одной строчке

Скорость нагрева на поверхности ($z = 0$) в момент времени t :

$$V = \frac{q}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \pi \cdot t}} \quad (3)$$

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

$$V = \frac{q}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \pi}} \cdot \left(\frac{1}{t_2^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{\sqrt{t_2 - t}} \right) \quad (4)$$

На рис. 3. представлены скорости нагрева и охлаждения в пределах пятна rp на поверхности образца. Скорости зависят от степени рассеяния энергии электронного пучка.

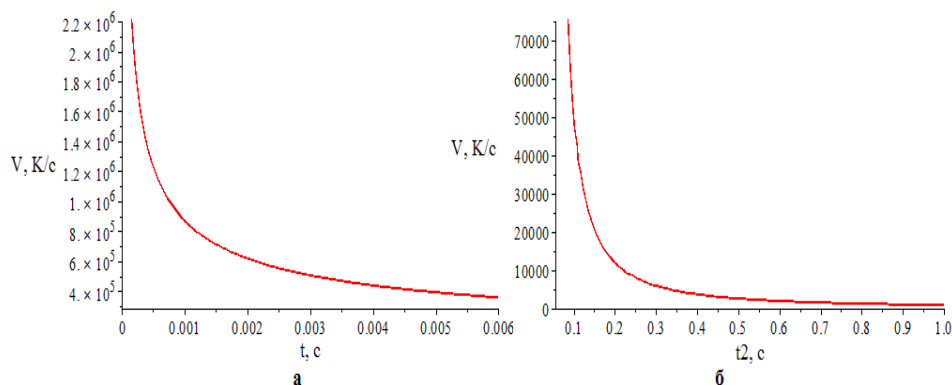


Рис. 3. Скорости нагрева и охлаждения в пределах пятна rp на поверхности образца
а — скорости нагрева. б — скорости охлаждения

Полученные скорости нагрева и охлаждения имеют порядок 10^4 - 10^6 степени, что подтверждает, что процесс действительно высокоскоростной.

1. Диффузия.

Влияние борирования на механические свойства титана зависит от фазового состава, химического состава титана, способа и метода борирования, структуры и толщины боридного слоя (максимальная возможная толщина слоя боридов зависит от температуры процесса насыщения и марки материала) [7].

Для большинства расчетов можно воспользоваться эмпирической зависимостью толщины диффузионного слоя:

$$h^2 = D \cdot \tau \quad (5)$$

h — толщина диффузионного покрытия; D — коэффициент диффузии; τ — продолжительность процесса.

Рост толщины боридного покрытия:

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \quad (6)$$

D_0 — константа диффузии; e — основание натурального логарифма; Q — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная.

Извлекая натуральный логарифм из выражения (6), получаем:

$$\ln D = \ln D_0 - \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (7)$$

Формула для расчета толщины слоя:

$$h = \sqrt{D_0 \cdot t \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}} \quad (8)$$

D_0 — константа диффузии; t — время, Ω — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная, T — температура.

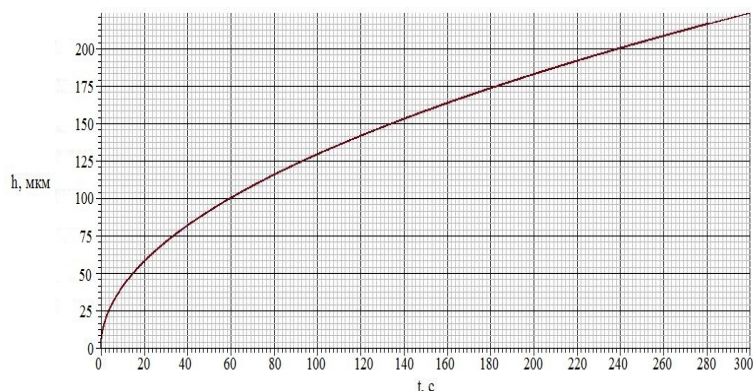


Рис. 4. Зависимость толщины диффузионного слоя от времени.

Коэффициент диффузии является основным показателем скорости диффузии и кинетики формирования диффузионного слоя. И может быть рассчитан путем решения уравнения Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (9)$$

Возможен выбор двух различных типов граничных условий, которым соответствуют следующие решения:

1. Диффузия из поверхностного источника бесконечной мощности.

Распределение концентрации примеси по глубине диффузионного слоя в момент времени t описывается выражением:

$$C_{z,t} = C_0 \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{Dt}} \quad (10)$$

При этом начальное и граничные условия для решения дифференциального уравнения диффузии имеет вид:

$$C_{z,t} = 0 \text{ при } t = 0$$

$$C_{0,t} = C_0 \text{ при } t = 0 \text{ и } z = 0.$$

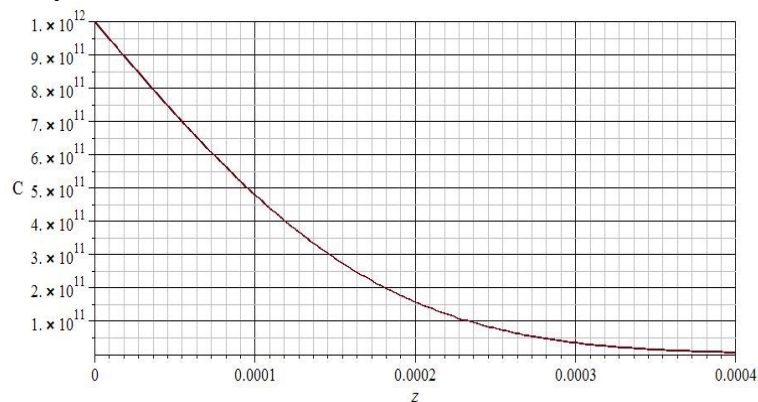


Рис. 5. Распределение концентрации бора по глубине диффузионного слоя

2. Диффузия из поверхностного источника ограниченной мощности. Начальное и граничные условия можно записать следующим образом:

при $t=0$ и $z>0$ $C_{x,t}=0$; при $t>0$ и $z\rightarrow\infty$ и $C_{x,t}=0$;

при $z=0$ и $0\leq t\leq\infty$ $\frac{dC}{dz}=0$; при $0\leq t\leq\infty$ $\int_0^{\infty} C_{x,t} dx = Q$.

При решении уравнения диффузии распределение концентрации примеси получается в виде функции Гаусса:

$$C_{z,t} = C_0 \exp\left(-\frac{z^2}{4Dt}\right); \quad (11)$$

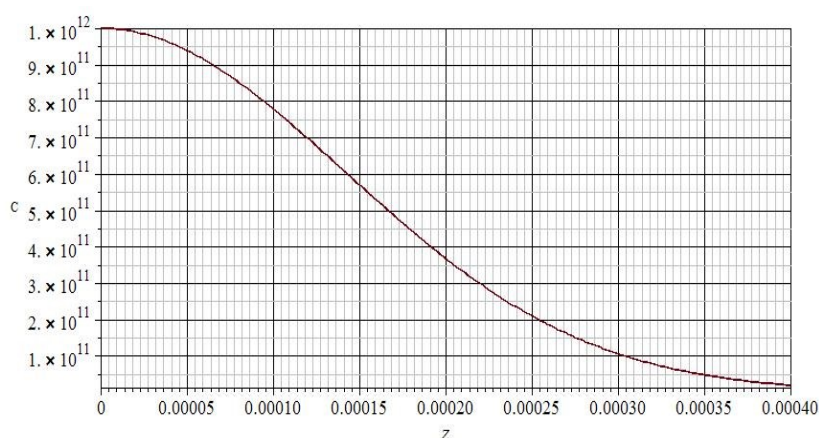


Рис. 6. Распределение концентрации бора по глубине диффузионного слоя.

Заключение

Рассмотрены особенности ввода электронного пучка в титановый сплав ВТ-1, рассчитаны температуры $T(x, t)$, скорости нагрева $V_{\text{наг}} = dT/dt$ материала, скорости охлаждения $V_{\text{охл}}$, энергия активации, коэффициенты диффузии, концентрации при диффузии из постоянного источника, из источника ограниченной мощности и ряд других параметров. Показана зависимость образования толщины диффузного слоя от времени борирования. Выполнено математическое моделирование тепловых полей при электронно-лучевой обработке титанового сплава в условиях вакуума.

Литература

1. 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, 2015. — С. 117-122.
2. Семенов А. П., Смирнягина Н. Н., Сизов И. Г. Установка для электронно-лучевой химико-термической обработки // Технология металлов. — 2001. — № 4. — С. 32-34.
3. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В. Основы электронно-лучевой обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 239 с.

4. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах, Том 1. — 8-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И. Н. Жестковой. — М.: Машиностроение, 2001. — 920 с.

5. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.

6. 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.

7. Лапина А. Е., Смирнягина Н. Н., Дашеев Э. Д. Моделирование процесса образования боридов железа и тепловых процессов при электронно-лучевой обработке низкоуглеродистой стали электронным пучком // Сборник материалов Шестой Всероссийской конф. по наноматериалам. — М., 2016. — С. 211-212.

8. Иванова Т. Г. Изучение диффузии бора в углеродистых и легированных сталях: дис. ... канд. физ.-математ. наук. — Барнаул, 2015. — 218 с.

DEVELOPMENT OF A THERMOPHYSICAL MODEL
OF ELECTRON-BEAM TREATMENT OF TITANIUM ALLOY VT-1 USING
MATHEMATICAL ENVIRONMENT Maple 18

A. E. Lapina

junior researcher, Institute of Physical Materials Science SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoi Str., 6

N. N. Smirnyagina

Doctor of Technical Sciences, associate Professor, Chief researcher,
Institute of Physical Materials Science SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoi Str., 6

D. E. Dasheev

research associate, Institute of Physical Materials Science SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoi Str., 6

Mathematical modeling of thermal fields at electron beam processing of titanium VT-1 alloy in vacuum is fulfilled. Energy of activation, diffusion from a constant source, from a source of limited power are calculated. Dependence of thickness of a diffusive layer on borating time is analysed. Electron beam effect was carried out by means of electron beam installation of the special design completed with the powerful electronic gun on thermocathodes with the control unit of the electronic beam (BUEL) and the high-voltage rectifier.

Keywords: mathematical modeling, electron beam processing, titanium alloy VT-1, electron beam, thermal processes, diffusion, borating.