

УДК 669.295-15:621.7.072

С.Г. Молотков<sup>1</sup>, Л.П. Бащенко<sup>2</sup>, Е.А. Будовских<sup>2</sup>, В.Е. Громов<sup>2</sup><sup>1</sup> Кузбасская государственная педагогическая академия<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМУ ЛЕГИРОВАНИЮ, ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ\*

**Аннотация.** Рассмотрена модель нагрева поверхности титана, подвергнутого электровзрывному науглероживанию, при последующей электронно-пучковой обработке. Модель учитывает импульсно-периодический характер обработки и позволяет рассчитывать поле температуры на поверхности с учетом плотности мощности электронного пучка, длительности импульсов и частоты их следования. Проведена оценка времени растворения частиц углеродных волокон при электронно-пучковой обработке, внесенных в оплаваемый поверхностный слой при электровзрывном науглероживании.

**Ключевые слова:** электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, модель нагрева поверхности, углеродное волокно, титан, карбид титана.

## MODELING OF SURFACE HEATING OF METAL AFTER ELECTROEXPLOSIVE ALLOYING AT THE SUBSEQUENT ELECTRON-BEAM TREATMENT

**Abstract.** A model of heating of titanium surface subjected to electroexplosive carburization at subsequent electron-beam treatment is considered. The model takes into account the pulse-periodic nature of treatment and allows to calculate the temperature field on the surface when accounting density of electron beam power, pulse duration and their frequency. The estimation of time of dissolution of particles of carbon fibers by electron-beam treatment is made for melted surface layer.

**Keywords:** electroexplosive alloying, electron-beam treatment, model, heating of the surface metal, carbon fiber, titanium, titanium carbide.

Одним из перспективных методов упрочнения поверхности металлов и сплавов является электровзрывное легирование (ЭВЛ) [1], которое проводится с оплавлением поверхности основы. В работе [2] рассмотрено моделирование нагрева поверхности металла при электровзрывном легировании с учетом формы теплового импульса. При науглероживании титана с использованием электрического взрыва углеродных волокон упрочнение достигается при образовании в зоне оплавления и легирования частиц второй фазы (карбида титана). Вследствие импульсного характера обработки конденсированные частицы продуктов взрыва углеродных волокон, проникающие в расплав, не успевают полностью раствориться в нем и образуют одну из фаз зоны легирования. Уменьшить содержание структурно-свободного углерода и повысить объемное содержание карбида титана в зоне легирования возможно при использовании последующей импульсно-периодической обработки низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (при электронно-пучковой обработке (ЭПО)) [3].

Целью настоящей работы явился анализ режимов и особенностей электронно-пучковой обработки зоны электровзрывного науглероживания поверхности титана.

При ЭПО основную роль играет диффузия; параметры, описывающие этот процесс, имеют большой разброс значений, поэтому температурное поле основы анализировали при следующих условиях.

1. Суммарный тепловой эффект энергии теплового излучения с поверхности основы, энергии экзотермической реакции, выделяющейся при взаимодействии титана с углеродом, и скрытой теплоты плавления, выделяющейся при кристаллизации, равен нулю.

2. Диаметр зоны электронного облучения поверхности титановой основы много больше глубины слоя расплава.

3. Растворение частиц непрореагировавшего с титаном углерода происходит в объеме расплавленного слоя при каждом импульсе ЭПО.

Учет первого условия приводит к однородному дифференциальному уравнению теплопроводности, а второго – к случаю нагрева одномерного полубесконечного объема плоским тепловым источником.

Уравнение теплопроводности, граничное условие второго рода для плотности мощности и начальное условие для температуры облучаемой поверхности имеют следующий вид:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - a \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T = 0; \quad (1)$$

$$q(T) = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad T(x, 0) = 300 \text{ К}, \quad (2)$$

\* Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.

где  $a = \lambda/(c\rho)$  – температуропроводность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность.

В расчетах использованы следующие параметры для титана [4]:  $\lambda = 24$  Вт/(м·К);  $c = 700$  Дж/(кг·К);  $\rho = 4320$  кг/м<sup>3</sup>;  $T_{пл} = 1944$  К – температура плавления.

Решение одномерного уравнения (1) с условиями (2) для полубесконечной среды ( $0 \leq x < \infty$ ) может быть записано в следующем виде [5]:

$$T(x, t) = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^t \frac{q(t-\xi)}{\sqrt{\xi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\xi}\right) d\xi, \quad (3)$$

где  $\xi$  – переменная интегрирования.

Рассмотрим решение (3) уравнений (1), (2) в частном случае, когда плотность мощности имеет вид (рис. 1):

$$q(t) = E_s \sum_{i=1}^N p_i(t);$$

$$p_i(t) = \begin{cases} 1, & (\tau + t_1)(i-1) \leq t < \tau + (\tau + t_1)(i-1); \\ 0, & \tau + (\tau + t_1)(i-1) \leq t < (\tau + t_1)i, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\tau = 200$  мкс – время одного импульса;  $t_i = 1/f$  – время между импульсами;  $E_s = 2,25 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup> – максимальная плотность мощности;  $f = 0,3$  Гц – частота следования импульсов;  $i$  – номер текущего импульса;  $N = 20$  – общее число импульсов ЭПО.

На рис. 2 показано поле температуры поверхности основы в зависимости от координаты и от времени. Вследствие большой разницы между временем импульса (200 мкс) и временем между импульсами (3,3 с) на одном графике невозможно увидеть форму поля температуры основы после каждого импульса ЭПО, поэтому максимальная температура в импульсах не показана. Видно, что несмотря на большую скважность импульсов, общее повышение температуры пропорционально величине  $\sqrt{t}$ , как и показано в работе [6].

На рис. 3 представлена структура поля температуры основы после первого импульса ЭПО. Структура поля температуры после остальных импульсов имеет аналогичный вид, различие (согласно рис. 2) заключается в начальной температуре каждого импульса.

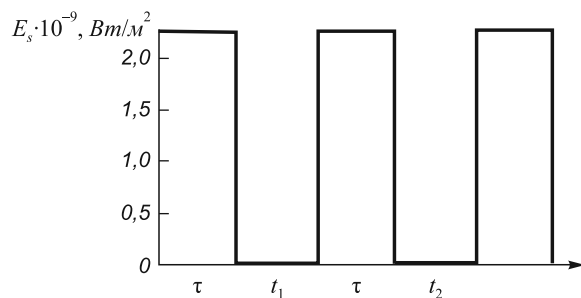


Рис. 1. Плотность мощности при электронно-пучковой обработке поверхности титановой основы

На рис. 4 показано поле температуры подложки, превышающей температуру плавления.

Согласно данным, приведенным в работах [7, 8], образование фазы TiC начинается при диффузии углерода в титане при достижении температуры 1173 К.

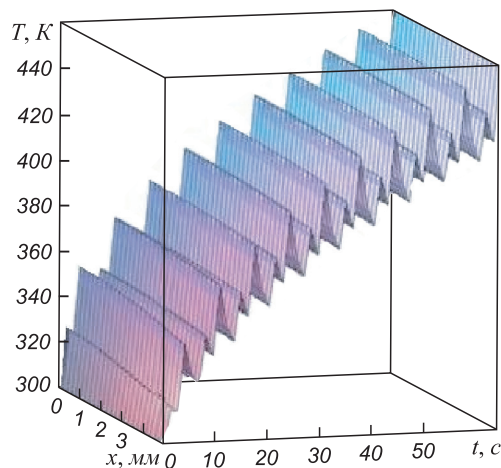


Рис. 2. Поле температуры основы в зависимости от координаты  $x$  и от времени  $t$

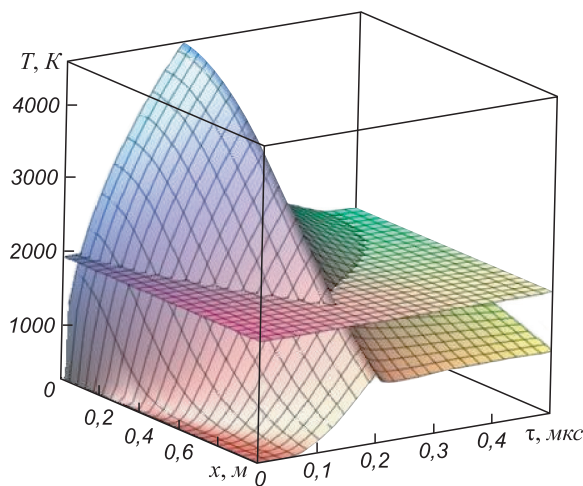


Рис. 3. Поле температуры основы после первого импульса ЭПО (плоскость соответствует температуре плавления титана)

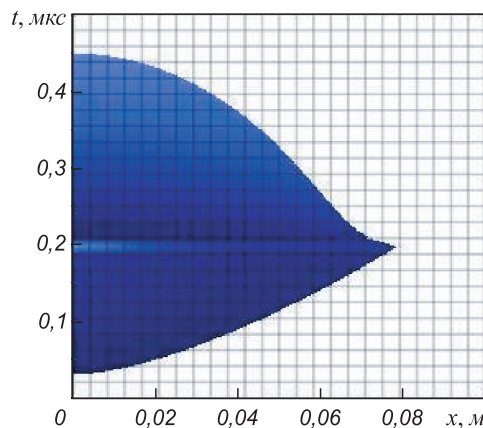


Рис. 4. Поле температуры, превышающей температуру плавления титана, после последнего импульса облучения

На рис. 5 показано поле температуры, превышающей температуру начала образования фазы TiC.

Для оценки времени растворения частицы углеродного волокна в расплаве титана воспользуемся формулой [8] для диффузионного режима, при котором время растворения обусловлено временем подвода титана к поверхности частицы посредством диффузии:

$$t = \frac{4\rho_C r^2}{3\rho D},$$

где  $\rho_C = 2,66 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность углерода;  $D$  – коэффициент диффузии углерода в титане, значение которого в предельном случае диффузионного режима принималось равным  $D_0$ ;  $D_0 = 2,08 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  [4] – предэкспоненциальный множитель в коэффициенте диффузии углерода в титане;  $r = 20 \text{ мкм}$  – линейный размер частицы углеродного волокна.

По оценке время растворения этой частицы углерода составляет 7,8 мкс. Сравнение этого времени с характерными временами процессов, представленных на рис. 4, 5, показывает, что при данных условиях ЭПО частицы углеродных волокон размерами менее 20 мкм полностью растворяются. Толщину  $h$  диффузионного слоя можно оценить как  $h \approx \sqrt{Dt} = 1,5 \text{ мкм}$ . Примерно такие же величины времени и размеров можно получить, пользуясь соотношениями из работы [9].

**Выводы.** Проведен анализ модели одномерного нагрева поверхности титана, содержащего частицы структурно-свободного углерода вследствие электро-взрывного науглероживания, при импульсно-периодической электронно-пучковой обработке. Показано, что зависимость температуры основы от времени подчиняется закону  $\sqrt{t}$ . Показана структура поля температуры каждого единичного импульса и поле температуры, превышающей температуру начала образования карбида титана вследствие диффузии углерода в титан. Проведены оценки времени растворения частиц структурно-свободного углерода в титане и характерного размера диффузионного слоя.

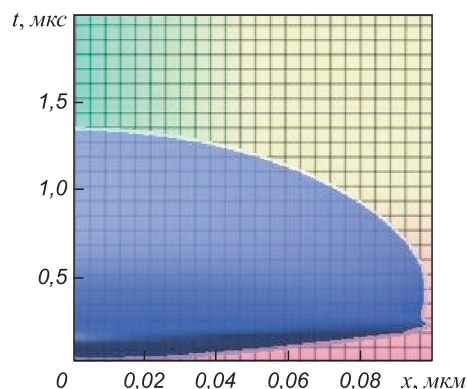


Рис. 5. Поле температуры после последнего импульса облучения (температура, превышающая температуру начала образования фазы TiC, показана темным цветом). Начало отсчета времени ведется от момента начала последнего импульса

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 301 с.
2. Молотков С.Г., Бащенко Л.П., Будовских Е.А., Громов В.Е. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 44 – 46.
3. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.И. Структура и свойства перспективных металлических материалов / Под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: изд. НТД, 2007. – 580 с.
4. Свойства элементов. Справочник / Под ред. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1984. – 671 с.
5. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
7. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
8. Пашков Л.Т. Основы теории горения. Учебное пособие. – М.: изд. МЭИ (ТУ), 2002. – 137 с.
9. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Лапшин О.В., Колобова Е.Г. // Изв. Томского политех. ун-та. 2004. Т. 307. № 6. С. 75 – 80.

© 2013 г. С.Г. Молотков, Л.П. Бащенко,  
Е.А. Будовских, В.Е. Громов  
Поступила 30 апреля 2013 г.