

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Чан Ми Ким Ан, Нгуен Бао Хынг  
Научный руководитель – Коваль Т.В.  
Томский политехнический университет  
email: [tranmykiman@gmail.com](mailto:tranmykiman@gmail.com)

### Введение

Для поверхностного упрочнения материала применяются способы комбинированной обработки, сочетающей электровзрывное легирование и последующее облужение электронным пучком [1], или циклический процесс нанесения покрытия и воздействия потом энергии низкоэнергетического электронного пучка. Электровзрывное легирование, преобразует структурно-фазовое состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала и поверхности. Электронно-пучковая обработка, сопровождающаяся диффузией атомов легированного элемента в объем материала, оказывают влияние на его механические свойства. Последующая электронно-пучковая обработка поверхности позволяет устранить капельную фракцию распыляемого материала и управлять градиентом концентрации легирующего элемента.

Математическое моделирование воздействия потоков энергии на материалы в зависимости от круга практических задач включает в себя модели теплового и термоупругого воздействия, структурно-фазовых превращений, физико-химических процессов и др. В этой работе проводится математическое моделирование электронно-пучковой обработки поверхностного слоя стали, сформированного после электровзрывного легирования медью. Проводится сравнение результатов расчета и эксперимента [1].

### Математическая постановка

Математическая модель термодиффузионных процессов в условиях воздействия импульсов электронного потока высокой мощности включает уравнения теплопроводности и диффузии с учетом фазовых переходов при плавлении и испарении, изменения теплофизических коэффициентов от количества легирующего элемента.

Уравнение теплопроводности [2]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = V_f \frac{\partial E}{\partial x} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad T = \begin{cases} \frac{E}{c\rho}, & E \leq E_m \\ T_m, & E_m < E \leq E_m + L_m\rho, \\ T_m + \frac{E - (E_m + L_m\rho)}{c\rho}, & \end{cases} \quad (1)$$

где  $E(x,t)$  – тепловая составляющая внутренняя энергия;  $T(x,t)$  – температура;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности;  $c(T)$  – удельная теплоемкость;  $\rho(T)$  – плотность;  $t$  – время;  $T_m$  и  $L_m$  – температура

и удельная теплота плавления;  $E_m = T_m c\rho$ ;  $V_f(T) = c^* (3/4\pi)^{1/3} \exp(-(\lambda^* A)/(RT))$  – скорость фронта испарения;  $c^*$  – скорость звука в газе;  $\lambda^*$  – удельная теплота испарения при температуре 0°K;  $A$  – атомный вес материала;  $R$  – универсальная газовая постоянная;

Эффективные теплофизические коэффициенты записываются в виде:

$$\eta = \begin{cases} \eta_s, & T < T_m - \Delta T_s \\ \eta_s + \gamma_s \frac{T - (T_m - \Delta T_s)}{\Delta T_s}, & T_m - \Delta T_s \leq T \leq T_m \\ \eta_l, & T > T_m. \end{cases}$$

Индексы  $s$  и  $l$  – относятся к твердому и жидкому состояниям;  $\Delta T_s$  – температурные интервалы, в котором модель находится в двухфазном состоянии;  $\eta = \{c\rho, \lambda\}$ ,  $\gamma_s = \{L_s/T_m, (\lambda_l - \lambda_s)\}$ ,  $L_s$  – теплота фазового перехода. Эффективные величины теплофизических параметров  $P = \{c, \rho, \lambda\}$  определялись в соответствии с аддитивным законом:  $P = (nP_d + mP_b)/(n+m)$ , где  $P_d$  и  $P_b$  – соответствующие параметры легирующего элемента и основы,  $n$  и  $m$  – соответствующий им процентный состав.

Начальное условие:  $T(x,0) = T_0, 0 \leq x \leq L$

Граничные условия:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q(t) - \rho V_f \Delta H, \quad \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0,$$

где  $q(t > t_0) = 0$ ,  $q(t \leq t_0) = E_0/t_0$  – плотность мощности в импульсе длительностью  $t_0$ ;  $\Delta H = \lambda^* RT/2A$ ,  $E_0$  – плотность потока энергии;  $L$  – длина модели.

Уравнение диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(T,C) \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

где  $C(x,t)$  – концентрация меди;  $D(T,C) = D_0(C) \exp(-E_a/RT)$  – коэффициент диффузии;  $E_a$  – энергия активации. Граничные условия для диффузии – нулевые потоки на обеих границах. В начальный момент времени распределение концентрации меди в приповерхностной области  $l \ll L$  задается функцией  $C(0,x) = f(x)$  в соответствии распределению легирующего элемента в металле,  $0 \leq x \leq l$ .

### Результаты моделирования

Численное решение уравнений (1)-(2) проводилось с применением пакета MATLAB в диапазоне энергий  $15 \div 30$  Дж/см<sup>2</sup>.

При плотности энергии пучка электронов 15

Дж·см<sup>-2</sup> практически не происходит плавления и также изменения градиента концентрации меди по сравнению с начальным. Воздействие плотности энергии пучка электронов 20÷30 Дж·см<sup>-2</sup> сопровождается плавлением поверхностного слоя, а при плотности энергии 30 Дж·см<sup>-2</sup> температура поверхности превышает температуру испарения меди (рис.1).

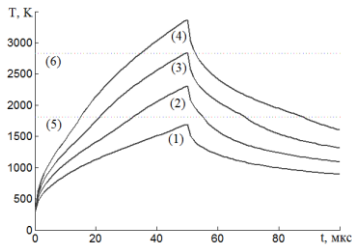


Рис.1. Температура поверхности стали легированной медью (1-4), температура плавления железа (5) и испарения меди(6); 1 –  $E_0 = 15$ ; 2 – 20; 3 – 25, 4 – 30 Дж·см<sup>-2</sup>

Толщина легированного слоя увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов с 7.75 мкм при  $E_0=20$  Дж·см<sup>-2</sup> до 17 мкм при  $E_0=30$  Дж·см<sup>-2</sup>, т.е. электронно-пучковая обработка поверхности стали после электровзрывного легирования при вариации плотности энергии электронного пучка  $E_0 > 15$  Дж·см<sup>-2</sup> сопровождается диффузией атомов меди в объем материала (рис.2). С увеличением количества действующих импульсов зона диффузии расширяется (рис.3). Результаты расчетов соответствуют экспериментальным измерениям [1] (рис.4).

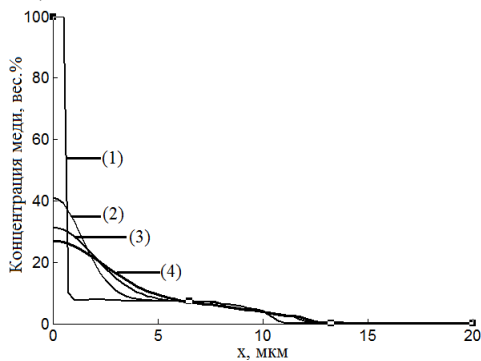


Рис.2. Расчетные градиенты концентрации меди в стали после импульса с плотностью энергии: (1) – 15 (начальное распределение), (2) – 20, (3) – 25 и (4) – 30 Дж·см<sup>-2</sup>.

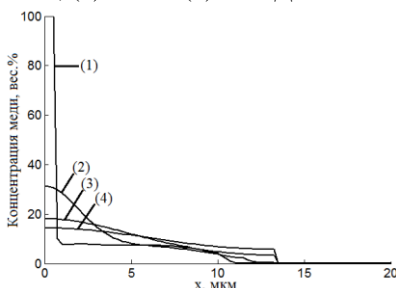


Рис.3. Расчетные градиенты концентрации меди при разном числе импульсов: (2) – 1, (3) – 5, (4) – 10; (1) – начальное распределение;  $E_0=25$  Дж·см<sup>-2</sup>

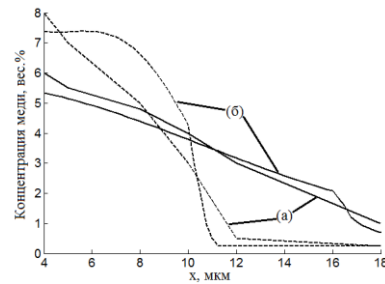


Рис.4. Градиенты концентрации меди стали 45, подвергнутой электровзрывному легированию и последующей электронно-пучковой обработке при  $E_0=15$  Дж·см<sup>-2</sup> (пунктирные линии) и 30 Дж·см<sup>-2</sup> (сплошные кривые), (а) – расчет, (б) – эксперимент [1] (10 импульсов)

### Заключение

Моделирование термодиффузии, включающей в себя задачи теплопроводности и диффузии, позволяет контролировать градиент концентрации легированного элемента при импульсной электронно-пучковой обработке и, следовательно, микротвердость поверхностных слоев. Сравнение численных расчетов с экспериментом показывает, что электронно-пучковая обработка поверхности стали 45 подвергнутой электровзрывному легированию при вариации плотности энергии электронного пучка при  $E_0 > 15$  Дж·см<sup>-2</sup> сопровождается диффузией атомов меди в объем материал.

### Список использованных источников

1. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке/под ред. В.Е. Громова.– Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 212 с.
2. Блейхер Г.А., Кривоногов В.П. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц. – Нов-ск: Наука, 2014. – 245 с.