

УДК 669.017

В.А. Путилин, А.М. Штеренберг

МАССОПЕРЕНОС В МЕТАЛЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРА

Исследуется взаимодействие короткоимпульсного лазерного излучения с металлической мишенью. Экспериментально исследован массоперенос меди в никеле, инициируемый лазерно-индуцированной ударной волной. Аналитически рассмотрен процесс транспорта атомов вещества из поверхностного слоя в объем полубесконечного образца под действием поля напряжений плоской ударной волны и градиента температуры. Результаты численного расчета для плотности мощности лазерного излучения 10^9 Вт/см² и длительности импульса 30 нс хорошо согласуются с результатами эксперимента, проведенного в идентичных условиях.

Высокий темп ввода энергии, характерный для взаимодействия мощного короткоимпульсного лазерного излучения с металлами, и значительные скорости нагрева и охлаждения, достигающие величин порядка 10^{10} К/с, приводят к тому, что внутри материала формируются ударные волны высокого давления и значительные температурные градиенты. Однако лишь небольшое число работ посвящено изучению массопереноса в металлах, протекающего при таких условиях [1-4]. Поэтому возникает необходимость теоретического анализа кинетического уравнения массопереноса с учетом бародиффузии и термодиффузии и экспериментальной проверки результатов теории.

При определенных допущениях и ограничениях [5] лазерно-индуцированную ударную волну можно считать плоской. Рассмотрим процесс транспорта атомов вещества из поверхностного слоя в объем полубесконечного металлического образца под действием поля напряжений плоской ударной волны и градиента температуры.

Уравнение массопереноса с учетом бародиффузии и термодиффузии можно записать в виде

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\kappa_p}{P} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\kappa_T}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где c – концентрация; D – коэффициент диффузии; P – давление; $\kappa_p \cdot D$ – коэффициент бародиффузии; $\kappa_T \cdot D$ – коэффициент термодиффузии.

В операторной форме это уравнение имеет вид

$$\hat{L}c = 0, \quad (2)$$

где

$$\hat{L} = -\frac{\partial}{\partial t} + D \frac{\partial^2}{\partial x^2} + D_1 \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} + D_1 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} + D_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2};$$

$$D_1 = \frac{DV_0}{kT_0}, \quad D_2 = \frac{DQ_i}{kT_0^2}. \quad (3)$$

Здесь V_0 – парциальный объем; k – постоянная Больцмана; T_0 – абсолютная температура поверхности образца в момент прекращения действия лазерного луча; Q_i – поток тепла.

Уравнение (2) – линейное, параболического типа, с переменными коэффициентами, решаемое по методу "параметрикса" [6]. Параметрикс в первом приближении можно записать в виде

$$\Gamma(x, t, \xi, \tau) = Z_0(x, t, \xi, \tau) + Z(x, t, \xi, \tau);$$

$$Z_0(x, t, \xi, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D(t-\tau)}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-\xi)^2}{4D(t-\tau)} \right] + \exp \left[-\frac{(x+\xi)^2}{4D(t-\tau)} \right] \right\};$$

$$Z(x, t, \xi, \tau) = \int_{\tau}^t \int_0^{\infty} Z_0(x, t, \eta, \sigma) \hat{L} Z_0(\eta, \sigma, \xi, \tau) d\eta d\sigma, \quad (4)$$

где $Z_0(x, t, \xi, \tau)$ - фундаментальное решение уравнения Фика для полубесконечного образца. Используя начальные условия

$$c(x, 0) = \begin{cases} c_0, & 0 \leq x \leq d; \\ 0, & x > d, \end{cases} \quad (5)$$

где d - толщина приповерхностного слоя, в котором равномерно распределено вещество с начальной концентрацией c_0 , можно найти его концентрационное распределение после лазерного воздействия как функциональную зависимость вида $c = c(x, t)$:

$$c(x, t) = \int \Gamma(x, t, \xi, 0) c(\xi, 0) d\xi. \quad (6)$$

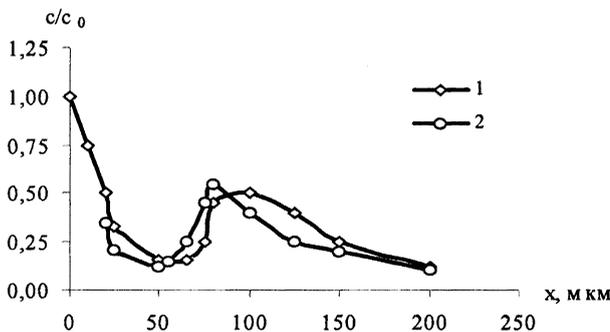
Для решения уравнения (6) импульс давления принимался в виде солитона, а тепловая волна описывалась ступенчатой функцией Хевисайда:

$$P(x, t) = P_0 c h^{-2} \left(\frac{x - vt - x_s}{x_0} \right); \quad (7)$$

$$T(x, t) = T_0 \theta(v_T \cdot t - x), \quad (8)$$

где v и v_T - скорость распространения ударной и тепловой волн, P_0 - пиковое значение давления, x_s - расстояние между ударной и тепловой волной в начальный момент времени, x_0 - полуширина ударного импульса.

Результаты численного расчета по уравнению (6) для плотности мощности лазерного излучения 10^9 Вт/см² и длительности импульса 30 нс представлены на рисунке кривой 1. Обнаружен концентрационный пик на глубине порядка 100 мкм, а полная глубина проникновения атомов составляет около 300 мкм.



Расчетное концентрационное распределение по глубине металлического образца вещества, транспортированного лазерно-индуцированной ударной волной (1) и экспериментально полученное концентрационное распределение меди в никеле (2)

Скорость нагружения оценивалась как $\sim 10^7$ с⁻¹.

После облучения образцы разрезались по диаметру пятна для исследования приповерхностных слоев в зоне воздействия. С целью исключения возможного шаржирования поверхности микрошлифа частицами меди в процессе механического полирования проводилась дополнительная химическая полировка поверхности микрошлифа.

Далее был осуществлен количественный микрорентгеноспектральный анализ распределения меди в никеле по глубине облученной зоны на микроанализаторе "Суперпроб - 739". В образцах после лазерного воздействия была хорошо выявлена зона твердого раствора меди в никеле. В распределении меди наблюдается четко выраженный максимум на глубине около 80 мкм от поверхности (см. рисунок, кривая 2), а полная глубина проникновения атомов меди была порядка 300 мкм, что хорошо согласуется с приведенными выше теоретическими выкладками.

Наличие концентрационного пика в распределении меди в никеле, по мнению авторов, указывает на то, что перенос вещества осуществляется непосредственно фронтом лазерно-индуцированной ударной волны. Приближенный расчет показывает, что за время действия лазерного импульса ($\tau = 30$ нс) фронт ударной волны (скорость $v > 6 \cdot 10^3$ м/с) переместится на расстояние $\Delta > 180$ мкм. Глубина залегания концентрационного пика меди в никеле имеет тот же порядок величины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гуревич М.Т., Ларинов Л.Н., Мазанков В.Ф. и др.* Влияние многократного лазерного воздействия на массоперенос в железе // *Металлофизика*. 1986. Т.3. С.80–83.
2. *Мазанко В.Ф., Погдрелов А.Е.* Миграция атомов церия в железе при лазерном воздействии // *Металлофизика*. 1986. Т.6. С.108–109.
3. *Бекренев А.Н., Камашев А.В., Путилин В.А.* Массоперенос в металлах при короткоимпульсном лазерном воздействии // *Письма в ЖТФ*. 1993. Т.19. Вып.13. С.14–15.
4. *Путилин В.А., Камашев А.В.* Анализ кинетического уравнения массопереноса, инициируемого короткими импульсами лазера // *Письма в ЖТФ*. 1997. Т.23. Вып.5. С.84–87.
5. *Анисимов С.И., Кравченко В.А.* Структура и свойства лазерно-индуцированных ударных волн // *Препринт АН СССР*. 1984. 15 с.
6. *Крестелев А.И., Бекренев А.Н.* Массоперенос в металлах под действием ударных волн // *ФХОМ*. 1985. Вып.2. С.58–60.