

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НЕУПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ В СОСТАРЕННЫХ СПЛАВАХ

В.Н. Варюхин¹⁾, В.В. Малащенко^{1), 2)}, Т.И. Малащенко³⁾

¹⁾Донецкий физико-технический институт им. Галкина,

ул. Р. Люксембург 72, Донецк 283114, malashenko@donfti.ru

²⁾Донецкий государственный университет, ул. Университетская 24, Донецк 283001

³⁾Донецкий национальный технический университет, ул. Артема 58, Донецк 283001

В работе проанализировано надбарьерное скольжение ансамбля краевых дислокаций под действием мощного лазерного излучения в состаренном бинарном сплаве с высоким содержанием зон Гинье-Престона. Исследуемый механизм диссипации заключается в переходе кинетической энергии дислокации в энергию ее поперечных колебаний. Сила динамического торможения дислокации структурными дефектами, определяющая предел текучести и другие механические свойства материала, зависит не только от их концентрации, но и от спектра колебаний дислокации, в первую очередь от наличия в нем щели. Получена аналитическая зависимость динамического предела текучести бинарного сплава от плотности дислокаций при высокой концентрации зон Гинье-Престона. Получены условия, при которых эта зависимость является немонотонной и имеет минимум и максимум. Минимум имеет место при переходе от доминирования динамического торможения дислокации точечными дефектами к доминированию торможения другими дислокациями (тейлоровское упрочнение). Положение максимума соответствует значению плотности дислокаций, при которой их вклад в формирование спектральной щели становится доминирующим.

Ключевые слова: лазер; дислокация; пластическая деформация; бинарные сплавы; дефекты.

EFFECT OF LASER IRRADIATION ON INELASTIC PROCESSES IN AGED ALLOYS

V.N. Varyukhin¹⁾, V.V. Malashenko^{1), 2)}, T.I. Malashenko³⁾

¹⁾Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering,

72 R. Luxemburg Str., 283114 Donetsk, malashenko@donfti.ru,

²⁾Donetsk State University, 283001 Donetsk

³⁾Donetsk National Technical University, 283001 Donetsk

The motion of dislocation ensemble in aged binary alloy under irradiation of high-power laser pulses is theoretically analyzed. The analysis was carried out within the framework of the theory of dynamic interaction of defects (DID). Dislocations make over-barrier sliding with such irradiation. This is a dynamic mode of dislocation movement. Dislocations overcome potential barriers without the help of thermal fluctuations. The dissipation mechanism under study consists in the transition of the kinetic energy of a dislocation to the energy of its transverse vibrations in the slip plane. The force of dynamic dragging of a dislocation by structural defects depends not only on their concentration, but also on the spectrum of dislocation vibrations, primarily on the presence of a gap in it. An analytical dependence of the dynamic yield stress of a binary alloy on the dislocation density is obtained. Typically, the dynamic yield stress increases with increasing dislocation density. This dependence is described by the Taylor ratio. But at high strain rate deformation of aged binary alloys, this ratio can be violated. It is shown that such dependence under certain conditions becomes nonmonotonic and can have a maximum and minimum. The position of the maximum is determined by the dislocation density, at which the interdislocation interaction becomes dominant during the formation of a gap in the vibrational spectrum. The minimum takes place at the transition from the dominance of dynamic drag of a dislocation by point defects to the dominance of drag by other dislocations (Taylor hardening).

Keywords: laser; dislocation; plastic deformation; binary alloys; defects.

Введение

Плотность дислокаций является важным параметром деформируемого кристалла, во многом определяющим его

механические свойства. Повышение плотности дислокаций при квазистатическом деформировании обычно приводит к упрочнению материала. Такое упрочнение

описывается соотношением Тейлора, согласно которому прочность растет пропорционально квадратному корню из дислокационной плотности. Соотношение Тейлора является довольно универсальным. Оно выполняется как при квазистатическом деформировании функциональных материалов, так и при высокоскоростной деформации. Однако в случае высокоскоростной деформации состаренных бинарных сплавов с высоким содержанием зон Гинье-Престона, реализуемой в условиях мощного лазерного облучения, зависимость прочности и пластичности от плотности дислокаций становится значительно более сложной. При высокоскоростной деформации неупругое поведение кристаллов во многом определяется динамическими эффектами в дефектной системе кристалла. Эти эффекты адекватно описываются в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия структурных дефектов (ДВД) [1-3].

Лазерные импульсы позволяют контролируемым образом влиять на изменение в системе структурных дефектов, тем самым оказывая существенное влияние на неупругие процессы в состаренных сплавах [4].

Основная часть

Рассмотрим скольжение системы бесконечных краевых дислокаций под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 в плоскостях параллельных XOZ с постоянной скоростью v в состаренном бинарном сплаве, содержащем хаотически распределенные зоны Гинье-Престона и атомы второго компонента. Линии дислокаций параллельны оси OZ , их векторы Бюргерса имеют координаты $\mathbf{b} = (b, 0, 0)$. Положение k -ой дислокации определяется функцией

$$W_k(z, t) = vt + w_k(z, t) \quad (1)$$

Здесь $w_k(z, t)$ – случайная величина, описывающая поперечные колебания

дислокации, возбужденные ее взаимодействием с дефектами.

Зоны Гинье-Престона будем считать одинаковыми, имеющими радиус R и распределенными случайным образом в плоскостях, параллельных плоскости скольжения дислокации XOZ с объемной концентрацией n_G .

Уравнение движения k -ой дислокации может быть представлено в следующем виде:

$$m \left\{ \frac{\partial^2 W_k}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 W_k}{\partial z^2} \right\} = F_k$$

$$F_k = b \left[\sigma_0 + \sigma_{xy}^d + \sigma_{xy}^G + \sigma_{xy}^{dis} \right] - Bv \quad (2)$$

где σ_{xy}^d , σ_{xy}^G , σ_{xy}^{dis} – компоненты тензора напряжений, создаваемых на линии k -ой дислокации соответственно точечными дефектами, зонами Гинье-Престона и другими дислокациями ансамбля. m – масса единицы длины дислокации, c – скорость звука в кристалле, B – фонная константа демпфирования.

Вклад каждого типа дефектов в величину предела текучести будем вычислять во втором порядке теории возмущений:

$$\tau_{def} = \left\langle \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial X} w \right\rangle = \left\langle \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial X} G \sigma_{xy} \right\rangle \quad (3)$$

где G – функция Грина уравнения движения дислокации. Фурье-образ этой функции имеет вид:

$$G(\omega, q) = \frac{1}{\omega^2 + i\beta\omega - c^2 q^2}; \beta = \frac{B}{m} \quad (4)$$

Далее рассмотрим область скоростей деформации, которая ограничена неравенством:

$$\dot{\epsilon} < \rho b^2 c \sqrt{\rho + \rho_0} \quad (5)$$

В этой области сила динамического торможения дислокации зонами Гинье-Престона не зависит от скорости дислокационного движения. Соответственно, τ_G не зависит от скорости пластической деформации.

В нашем случае спектр колебаний дислокации является нелинейным: в нем возникает щель:

$$\omega^2(q_z) = c^2 q_z^2 + \Delta^2 \quad (6)$$

Наличие спектральной щели означает, что дислокация совершает колебания в яме, которая перемещается по кристаллу вместе с ней. При воздействии лазерных импульсов плотность дислокаций достигает значений $10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Выполняя необходимые вычисления, получим аналитическое выражение зависимости динамического предела текучести бинарного сплава от плотности дислокаций:

$$\tau = \frac{D}{\sqrt{\rho + \rho_0}} + \frac{K}{\rho(\rho + \rho_0)} + \alpha \mu b \sqrt{\rho} \quad (7)$$

$$D = \mu n_G b R; \quad K = \frac{\mu n_d \chi^2 \dot{\epsilon}}{b^3 c} \quad (8)$$

Здесь μ – модуль сдвига, ρ – плотность дислокаций, n_G – объёмная концентрация зон Гинье-Престона, n_d – безразмерная концентрация атомов второго компонента, χ – параметр их размерного несоответствия. Именно наличие зон Гинье-Престона приводит к нарушению соотношения Тейлора в состаренных сплавах.

Заключение

Выполним численные оценки. Для типичных значений $n_G = 2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $\chi = 10^{-1}$, $b = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $R = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, $\dot{\epsilon} = 10^6 \text{ с}^{-1}$, $\rho = 10^{15} \text{ м}^{-2}$ получим, что вклад зон Гинье-Престона в величину

динамического предела текучести составляет 10^8 Па , т.е. наличие таких структурных дефектов повышает предел текучести на десятки процентов. Проведенный анализ показывает, что наличие максимума и минимума зависимости динамического предела текучести от плотности дислокаций может наблюдаться в случае предельно высоких значений объёмной концентрации зон Гинье-Престона $n_G = 10^{23} - 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и изменении плотности дислокаций в широких пределах – от 10^{11} м^{-2} до 10^{15} м^{-2} .

Таким образом, наличие зон Гинье-Престона оказывает существенное влияние как на величину динамического предела текучести сплава, так и на его зависимость от характеристик материала, в частности, от плотности дислокаций, в условиях лазерного облучения.

Библиографические ссылки

1. Malashenko V.V. The effect of Guinier–Preston zones on the dynamic yield stress of alloys under the shock-wave load. *Technical Physics* 2017; 62(5): 810–811.
2. Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects. *Physica B: Phys. Cond. Mat.* 2009; 404(2): 3890–3892.
3. Malashenko V.V. Dynamic drag of dislocation by point defects in near-surface crystal layer. *Modern Phys. Lett. B* 2009; 23(16): 2041–2047.
4. Tapasa K., Bacon D. J. and Osetsky Yu. N. Computer simulation of dislocation–solute interaction in dilute Fe–Cu alloys. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 2006; 14: 1153–1166.