

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В.Н. Варюхин¹⁾, В.В. Малашенко^{1), 2)}, Т.И. Малашенко³⁾

¹⁾Донецкий физико-технический институт им. О.О. Галкина,
ул. Р. Люксембург 72, 83114 Донецк, malashenko@fti.dn.ua

²⁾Донецкий национальный университет, ул. Университетская 24, 83001 Донецк

³⁾Донецкий национальный технический университет, ул. Артема 58, 83001 Донецк

В работе решена задача о движении ансамбля краевых дислокаций в состаренном бинарном сплаве под действием мощного лазерного излучения. 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. При мощном лазерном облучении главный вклад в формирование щели вносит междислокационное взаимодействие. Получена аналитическая зависимость динамического предела текучести бинарного сплава от плотности дислокаций. Показано, что такая зависимость при определенных условиях становится немонотонной и может иметь максимум.

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

INFLUENCE OF DISLOCATION DENSITY ON THE DYNAMIC YIELD STRESS OF ALLOYS UNDER LASER IRRADIATION

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

¹⁾O.O. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering,
72 R. Luxemburg Str., 283114 Donetsk, malashenko@donft.ru

²⁾Donetsk National University, 283001 Donetsk

³⁾Donetsk National Technical University, 283001 Donetsk

The motion of dislocation ensemble in a binary alloy under irradiation with high-power laser pulses is theoretically analyzed. 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. Under high-power laser irradiation, the main contribution to the formation of the gap is made by interdislocation interaction. 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. 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.

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

Введение

При увеличении плотности дислокаций происходит упрочнение деформируемого материала, которое весьма удовлетворительно может быть описано 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 высо-

коскоростной деформации. Однако, как показано в настоящей работе, в случае высокоскоростной деформации состаренных бинарных сплавов, реализуемой в условиях мощного лазерного облучения, возможно нарушение соотношения Тейлора. В этом случае на формирование механических свойств кристаллов большое влияние оказывают динамические эффекты, которые для широкого круга задач дислокационной динамики могут быть проанализированы в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия структурных дефектов [1-4].

Использование лазеров дает возможность управлять изменениями в системе структурных дефектов, которые влияют на механические свойства материалов [5-7].

Результаты и их обсуждение

Проанализируем движение ансамбля бесконечных краевых дислокаций в положительном направлении оси OX 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 Бюргера имеют координаты $\mathbf{b} = (b, 0, 0)$. Ансамбль совершает скольжение в плоскости XOZ . Положение k -ой дислокации определяется функцией

$$X_k(y=0, z, t) = vt + w_k(y=0, z, t) \quad (1)$$

Здесь $w_k(y=0, z, t)$ – случайная величина, описывающая изгибные 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:

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

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

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 – фононная константа демпфирования.

Вклад каждого типа структурных дефектов в величину предела текучести можно вычислить по формуле:

$$\tau = \beta n \int d^3 q |q_x| \cdot |\sigma_{xy}|^2 \delta(q_x^2 v^2 - \omega^2(q_z)) \quad (3)$$

Здесь $\omega(q_z)$ – спектр дислокационных колебаний, σ_{xy} – Фурье-образ компоненты тензора напряжений, созданных дефектами данного типа, n – объемная концентрация этих дефектов.

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

$$\omega^2(q_z) = c^2 q_z^2 + \Delta^2 \quad (4)$$

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 $10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$. При этом именно коллективное взаимодействие дислокаций вносит главный вклад в формирование спектральной щели:

$$\Delta = \Delta_{dis} = c \sqrt{\frac{2\pi^3 \rho}{3(1-\gamma) \ln \frac{L}{b}}}, \quad (5)$$

где γ – коэффициент Пуассона, μ – модуль сдвига, ρ – плотность дислокаций, L – величина порядка длины дислокации. Выполняя необходимые вычисления, получим аналитическое выражение зависимости динамического предела текучести бинарного сплава от плотности дислокаций:

$$\tau = \frac{D}{\sqrt{\rho + \rho_0}} + \alpha \mu b \sqrt{\rho} \quad (6)$$

Здесь D – константа, зависящая от концентрации зон Гинье-Престона и упругих модулей сплава. Анализ полученного выражения показывает, что зависимость предела текучести состаренного бинарного сплава становится немонотонной функцией, имеющей максимум, положение которого определяется плотностью дислокаций, при которой дислокационное взаимодействие начинает вносить главный вклад в формирование спектральной щели. 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.

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

Библиографические ссылки/ References

1. Malashenko V.V. Dependence of Dynamic Yield Stress of Binary Alloys on the Dislocation Density under High-Energy Impacts. *Physics of the Solid State*. 2020; 62(10): 1886-1888.
2. 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.
3. 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.
4. Malashenko V.V. Dynamic drag of dislocation by point defects in near-surface crystal layer. *Modern Phys. Lett. B*. 2009; 23(16): 2041-2047.
5. Tramontina D., Bringa E., Erhart P., Hawreliak J., Germann T., Ravelo R., Higginbotham A., Suggit M., Wark J., Park N., Stukowski A., Tang Y. Molecular dynamics simulations of shock-induced plasticity in tantalum. *High Energy Density Physics*. 2014; 10: 9-15.
6. 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.
7. Batani D., Stabile D., Ravasio A. Ablation pressure scaling at short laser wavelength. *Phys. Rev. E*. 2003; 68(6): 067403-067406.