

ОСОБЕННОСТИ НАДБАРЬЕРНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ КРАЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В.В. Малашенко^{1, 3)}, Т.И. Малашенко²⁾, К.Г. Джанджгава³⁾, А.Н. Эсауленко³⁾

¹⁾Донецкий физико-технический институт имени Галкина,

ул. Р. Люксембург 72, 83114 Донецк, Украина, malashenko@fti.dn.ua,

²⁾Донецкий национальный технический университет, ул. Артема 58, 83001 Донецк, Украина

³⁾Донецкий национальный университет, ул. Университетская 24, 83001 Донецк, Украина

Теоретически исследовано взаимодействие движущейся краевой дислокации с зонами Гинье-Престона. Получено аналитическое выражение вклада этого взаимодействия в величину динамического предела текучести.

Введение

Использование лазеров дает возможность управлять изменениями в системе структурных дефектов, которые влияют на механические свойства материалов [1]. При облучении кристаллов мощными лазерными импульсами образуется ударная волна, при этом генерация точечных дефектов происходит во всем объеме твердого тела. Изменяя мощность лазерного воздействия, мы можем в широких пределах изменять плотность дефектов.

В последние годы все более широкое применение находит высокоскоростная пластическая деформация [2, 3], которая реализуется, в частности, при воздействии на кристаллы лазерными импульсами высокой мощности [4]. В ходе этих процессов скорость пластической деформации достигает значений $10^3 - 10^7 \text{ s}^{-1}$, а изменение механических свойств кристаллов определяется главным образом движением дислокаций и их взаимодействием с элементарными возбуждениями кристалла и потенциальными барьерами, создаваемыми различными дефектами структуры. При этом дислокации движутся со скоростями $v \geq 10^{-2}c$, где c – скорость распространения поперечных звуковых волн в кристалле. Это так называемая динамическая область скоростей. Механизм диссипации при динамическом взаимодействии со структурными дефектами заключается в необратимом переходе кинетической энергии дислокации в энергию ее изгибных колебаний в плоскости скольжения [5-7]. Этот механизм весьма чувствителен к виду спектра дислокационных колебаний. При высокоскоростной деформации плотность дислокаций достигает весьма больших значений, а взаимодействие дислокаций между собой приводит к перестройке дислокационного спектра, что в свою очередь оказывает существенное влияние на динамическое взаимодействие движущихся дислокаций со структурными дефектами и механические свойства материалов.

Существенное влияние на движение дислокаций, а, следовательно, и на механические свойства кристаллов, оказывает динамическое взаимодействие дислокаций с зонами Гинье-Престона, образующимися в сплавах в результате искусственного или естественного старения [8].

В работах [8, 9] методом молекулярной динамики анализировалось движение краевой дисло-

кации в упругом поле зон Гинье-Престона. В настоящей работе показано, что возрастание плотности подвижных дислокаций при высокоскоростном деформировании в условиях воздействия на сплав мощных лазерных импульсов приводит к возникновению эффекта сухого трения при их динамическом взаимодействии с зонами Гинье-Престона, в результате чего происходит упрочнение сплава.

Основная часть

Пусть бесконечные краевые дислокации совершают скольжение в положительном направлении оси OX с постоянной скоростью v в кристалле, содержащем хаотически распределенные зоны Гинье-Престона. Линии дислокаций параллельны оси OZ, их векторы Бюргерса $\mathbf{b} = (b, 0, 0)$ одинаковы и параллельны оси OX. Плоскость скольжения дислокаций совпадает с плоскостью 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 хаотически распределенными дефектами.

Зоны Гинье-Престона будем считать одинаковыми, имеющими радиус R и распределенными случайным образом в плоскостях, параллельных плоскости скольжения дислокации XOZ. Такая ситуация реализуется, например, в сплавах Al-Si, где зоны Гинье-Престона имеют форму пластинок моноатомной толщины. [9].

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

$$m \left\{ \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right\} = b [\sigma_0 + \sigma_{xy}^G] + F_k - B \frac{\partial X}{\partial t}, \quad (2)$$

где σ_{xy}^G – компонента тензора напряжений, создаваемых на линии дислокации зонами Гинье-Престона, F_k – сила, действующая на дислокацию со стороны остальных дислокаций ансамбля, m – масса единицы длины дислокации, c – скорость распространения в кристалле поперечных звуковых волн, B – константа демпфирования,

обусловленная фоновыми, магнотными или электронными механизмами диссипации.

Воспользовавшись методом, развитым в работах [5-7], силу динамического торможения движущейся краевой дислокации зонами Гинье-Престона вычислим по формуле:

$$F_{def} = \frac{n_G b^2}{8\pi^2 m} \int d^3 q |q_x| \cdot |\sigma_{xy}^G(\mathbf{q})|^2 \delta(q_x^2 v^2 - \omega^2(q_z)), \quad (3)$$

где $\omega(q_z)$ – спектр дислокационных колебаний, $\sigma_{xy}^G(\mathbf{q})$ – Фурье-образ компоненты тензора напряжений, созданных зонами Гинье-Престона, n_G – объемная концентрация этих зон.

В рассматриваемом нами случае спектр дислокационных колебаний имеет вид:

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

При воздействии на кристалл лазерными импульсами высокой мощности плотность подвижных дислокаций может достигать значений $\xi = 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Именно коллективное взаимодействие дислокаций в этом случае вносит главный вклад в формирование спектральной щели, величина которой согласно [5] определяется формулой:

$$\Delta = \Delta_{dis} = \pi \sqrt{\frac{2\mu\xi}{3\rho \ln \frac{L}{b}}}, \quad (5)$$

где μ – модуль сдвига, ρ – плотность кристалла, L – величина порядка длины дислокации. Выполняя вычисления, получим, что в интервале $v < v_G = R\Delta_{dis}$, где R – средний радиус зоны Гинье-Престона, сила динамического торможения дислокации этими зонами приобретает характер сухого трения и ее вклад в величину динамического предела текучести может быть описан выражением:

$$\sigma_G = K \frac{n_G R}{\sqrt{\xi}}, \quad (6)$$

где K – коэффициент, зависящий от упругих модулей кристалла.

Заключение

Полученное выражение справедливо при скоростях движения дислокации $v < v_G$. Оценим величину характерной скорости v_G . Для значений $\xi = 10^{15} \text{ м}^{-2}$, $b = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $c = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $R = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ получим $v_G = 10^{-1} \text{ с}$.

Выполним численную оценку вклада исследуемого механизма диссипации в величину динамического предела текучести. Для типичных значений $\mu = 5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $b = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $R = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, $n_G = 4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ получим $\tau_G = 10^8 \text{ Па}$, т.е. вклад динамического торможения зонами Гинье-Престона может достигать десятков процентов.

Таким образом, высокоскоростная деформация состаренных сплавов, осуществляемая при воздействии лазерных импульсов высокой мощности, весьма чувствительна к наличию зон Гинье-Престона, оказывающих существенное влияние на динамику дислокаций.

Список литературы

1. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. // УФН. 1996. Т. 166. С. 3-32.
2. Lee J., Veysset D., Singer J., Retsch M., Saini G., Pezeril T., Nelson K., Thomas E. // Nature Communications. 2012. № 3. P. 1164.
3. Hallberg H., Rytberg K., Ristinmaa M. // ASCE J. Eng. Mech. 2009. V. 135. № 4. P. 345-357.
4. Tramontina D., Bringa E., Erhart P., Hawrelak J., Germann T., Ravelo R., Higginbotham A., Suggit M., Wark J., Park N., Stukowski A., Tang Y. // High Energy Density Physics. 2014. V. 10. P. 9-15.
5. Малашенко В.В. // ФТТ. 2014. Т. 56. № 8. С. 1528-1530.
6. Малашенко В.В. // ПЖТФ. 2012. Т. 38. № 19. С. 61-65.
7. Malashenko V.V. // Physica B: Phys. Cond. Mat. 2009. V. 404. № 2. P. 3890-3892.
8. Singh C.V., Warner D.H. // Acta Materialia. V. 58. № 17. P. 5797-5805.
9. Куксин А.Ю., Янилкин А.В. // МТТ. 2015. № 1. С. 54-65.

SPECIFICITY OF THE OVER-BARRIER GLIDE OF EDGE DISLOCATIONS IN SOLID SOLUTIONS UNDER EFFECT OF LASER PULSES

V.V. Malashenko^{1, 3)}, T.I. Malashenko²⁾, K.G. Dzhandzhgava³⁾, A.N. Esaulenko³⁾

¹⁾Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin, 72 R. Luxemburg str., 83114 Donetsk, Ukraine, malashenko@fti.dn.ua,

²⁾Donetsk National Technical University, 58 Artema str., 83001 Donetsk, Ukraine

³⁾Donetsk National University, 24 University str., 83001 Donetsk, Ukraine

The interaction of a moving edge dislocation with the Guinier-Preston zones is studied theoretically. An analytical expression for the contribution of this interaction to the value of the dynamic yield stress is obtained.