

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

В.В. Малашенко<sup>1, 3)</sup>, Т.И. Малашенко<sup>2)</sup>, К.Г. Джанджгава<sup>3)</sup>, А.Н. Эсауленко<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Донецкий физико-технический институт имени Галкина,

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

<sup>2)</sup>Донецкий национальный технический университет, ул. Артема 58, 83001 Донецк, Украина

<sup>3)</sup>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 ОХ с постоянной скоростью  $v$  в кристалле, содержащем хаотически распределенные зоны Гинье-Престона. Линии дислокаций параллельны оси ОZ, их векторы Бюргерса  $\mathbf{b} = (b, 0, 0)$  одинаковы и параллельны оси ОХ. Плоскость скольжения дислокаций совпадает с плоскостью ХОZ. 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 ХОZ. 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  $\sigma_{xy}^G$  – 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 фонными, магннными 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  $\mu$  – модуль сдвига,  $\rho$  – 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<sup>1, 3)</sup>, T.I. Malashenko<sup>2)</sup>, K.G. Dzhandzhgava<sup>3)</sup>, A.N. Esaulenko<sup>3)</sup>

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

<sup>2)</sup>Donetsk National Technical University, 58 Artema str., 83001 Donetsk, Ukraine

<sup>3)</sup>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.