

05

Эффект сухого трения при высокоскоростной пластической деформации твердых растворов

© В.В. Малашенко

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк,
Украина
Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина
E-mail: malashenko@fti.dn.ua

Поступило в Редакцию 31 мая 2016 г.

Исследовано движение дислокаций в поле хаотически распределенных точечных дефектов и зон Гинье–Престона при высокоскоростной деформации твердых растворов. Показано, что при определенных условиях динамическое торможение дислокаций зонами Гинье–Престона может иметь характер сухого трения и оказывать существенное влияние на процесс пластической деформации.

Высокоскоростная пластическая деформация является одним из эффективных и перспективных методов улучшения механических свойств кристаллов [1,2]. Такая деформация имеет место, в частности, при ударно-волновом воздействии на металлы [3–5], при воздействии на кристаллы лазерными импульсами высокой мощности [6] и при использовании метода динамического канального углового прессования [7,8].

В ходе этих процессов скорость пластической деформации достигает значений $10^3–10^5 \text{ s}^{-1}$ [7], 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 [9], и преодолевают эти барьеры без помощи тепловых флуктуаций. 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 [10–13]. Этот механизм весьма чувствителен к виду спектра дислокационных колебаний. Примесные атомы, распределенные в виде твердого раствора, и зоны Гинье–Престона (Guinier–Preston zones) затрудняют движение дислокаций, что значительно повышает внешние напряжения, необходимые для пластической деформации сплава. В работе [14] методом молекулярной динамики анализировалось движение краевой дислокации в упругом поле точечных дефектов и зон Гинье–Престона. В настоящей работе показано, что совместное воздействие на дислокацию таких дефектов при определенных условиях приводит к возникновению эффекта сухого трения дислокации, и выполнены численные оценки вклада этого эффекта в величину деформирующих напряжений.

Пусть бесконечная краевая дислокация совершает скольжение под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 в положительном направлении оси OX с постоянной скоростью v в плоскости XOZ . Кристалл содержит хаотически распределенные точечные дефекты и зоны Гинье–Престона. Зоны Гинье–Престона будем считать одинаковыми, имеющими радиус R и распределенными случайным образом в плоскостях, параллельных плоскости скольжения дислокации XOZ .

Линии дислокаций параллельны оси OZ , их векторы Бюргерса $\mathbf{b} = (b, 0, 0)$ одинаковы и параллельны оси OX . Положение k -й дислокации определяется функцией

$$X_k = vt + w_k. \quad (1)$$

Здесь w_k — случайная величина, описывающая изгибные колебания дислокации, возбужденные ее взаимодействием с хаотически распределенными дефектами. Среднее значение этой величины по длине дислокации и по хаотическому распределению дефектов равно нулю.

Уравнение движения дислокации может быть представлено в следующем виде:

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

где σ_{xy}^d — компонента тензора напряжений, создаваемых точечными дефектами на линии дислокации; σ_{xy}^G — компонента тензора напряжений, создаваемых на линии дислокации зонами Гинье–Престона; m — масса единицы длины дислокации (массы всех дислокаций считаем одинаковыми); c — скорость распространения в кристалле поперечных звуковых волн; B — константа демпфирования, обусловленная фононными, магнанными или электронными механизмами диссипации.

Воспользовавшись методами, развитыми ранее в работах [10–13], силу динамического торможения (drag) движущейся краевой дислокации зонами Гинье–Престона вычислим по формуле

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

где $\omega(q_z)$ — спектр дислокационных колебаний, n_G — объемная концентрация зон Гинье–Престона.

Наиболее интересен случай, когда спектр колебаний дислокации является нелинейным, т. е. в нем возникает щель

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

Возникновение этой щели может быть обусловлено, в частности, коллективным взаимодействием точечных дефектов с дислокацией. Спектральная щель, обусловленная этим взаимодействием, в твердых растворах имеет вид

$$\Delta = \Delta_{def} = \frac{c}{b} (n_{0d} \varepsilon^2)^{1/4}, \quad (5)$$

где ε — параметр несоответствия дефекта, n_{0d} — безразмерная концентрация точечных дефектов.

В области скоростей $v < v_G = R\Delta$ сила динамического торможения дислокации зонами Гинье–Престона имеет вид силы сухого трения, т. е.

не зависит от скорости скольжения дислокации

$$F_G = \frac{n_G \mu b^2 R c}{2(1 - \gamma)^2 \Delta}, \quad (6)$$

где μ — модуль сдвига, γ — коэффициент Пуассона.

Вклад этого механизма диссипации в величину деформирующих напряжений определяется выражением

$$\sigma_G = \frac{n_G \mu b^2 R}{2(1 - \gamma)^2 (n_{0d} \varepsilon^2)^{1/4}}. \quad (7)$$

Оценим величину характерной скорости

$$v_G = R \Delta_{def} = \frac{R}{b} c (n_{0d} \varepsilon^2)^{1/4}. \quad (8)$$

Для типичных значений $b = 3 \cdot 10^{-10}$ м, $\varepsilon = 10^{-1}$, $n_{0d} = 10^{-2}$, $R = 3 \cdot 10^{-9}$ м получим $v_G = c$, т.е. при этих значениях эффект сухого трения должен наблюдаться практически во всем динамическом диапазоне скоростей.

Выполним оценку вклада исследуемого механизма диссипации в величину деформирующих напряжений. Для типичных значений $\mu = 5 \cdot 10^{10}$ Па, $\varepsilon = 10^{-1}$, $b = 3 \cdot 10^{-10}$ м, $R = 3 \cdot 10^{-9}$ м, $n_G = 2 \cdot 10^{24}$ м⁻³, $n_{0d} = 10^{-2}$, $\gamma = 0.3$ получим $\sigma_d = 10^8$ Па, т.е. вклад динамического торможения зонами Гинье–Престона может составлять десятки процентов.

Таким образом, коллективное воздействие точечных дефектов на краевую дислокацию приводит к перестройке спектра дислокационных колебаний, а именно к появлению щели в дислокационном спектре. Изменение спектра влияет на характер динамического торможения дислокации другими дефектами, в частности зонами Гинье–Престона, в результате чего торможение этими зонами приобретает характер сухого трения. Итак, для возникновения эффекта сухого трения необходимо выполнение двух условий: в спектре дислокационных колебаний должна возникнуть щель, и скорость движения дислокации должна быть ниже некоторой критической скорости v_G .

Проведенный анализ показывает, что при высокоскоростной деформации зоны Гинье–Престона способны оказывать существенное влияние на процесс пластической деформации твердых растворов.

Список литературы

- [1] *Lee J., Veysset D., Singer J. et al.* // Nat. Commun. 2012. N 3. P. 1164.
- [2] *Hallberg H., Rytberg K., Ristinmaa M.* // ASCE J. Eng. Mech. 2009. V. 135. N 4. P. 345–357.
- [3] *Жиляев П.А., Куксин А.Ю., Стегайлов В.В., Янилкин А.В.* // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 8. С. 1508–1512.
- [4] *Zaretsky E.V., Kanel G.I.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 083 511.
- [5] *Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В.* // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 809–830.
- [6] *Tramontina D., Bringa E., Erhart P. et al.* // High Energy Density Phys. 2014. V. 10. P. 9–15.
- [7] *Бородин И.Н., Майер А.Е.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 8. С. 76–80.
- [8] *Зельдович В.И., Шорохов Е.В., Добаткин С.В. и др.* // ФММ. 2011. Т. 111. № 2. С. 439–447.
- [9] *Куксин А.Ю., Стегайлов В.В., Янилкин А.В.* // ДАН. 2008. Т. 420. № 4. С. 467–471.
- [10] *Малашенко В.В.* // ФТТ. 2014. Т. 56. В. 8. С. 1528–1530.
- [11] *Малашенко В.В.* // ФТТ. 2015. Т. 57. В. 12. С. 2388–2390.
- [12] *Малашенко В.В.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 19. С. 61–65.
- [13] *Malashenko V.V.* // Physica B: Phys. Cond. Mat. 2009. V. 404. N 2. P. 3890–3892.
- [14] *Куксин А.Ю., Янилкин А.В.* // МТТ. 2015. № 1. С. 54–65.