

05

Влияние неравновесных вакансий, генерированных лазерными импульсами высокой мощности, на высокоскоростную пластическую деформацию металлов и сплавов

© В.В. Малашенко

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Украина

Донецкий национальный университет, Донецк, Украина

E-mail: malashenko@fti.dn.ua

Поступило в Редакцию 10 мая 2017 г.

Исследовано влияние неравновесных вакансий, генерируемых лазерными импульсами, на движение дислокаций в условиях высокоскоростной деформации. Получено аналитическое выражение для вклада этих вакансий в динамический предел текучести металлов и сплавов и показано, что динамическое торможение (drag) дислокаций неравновесными вакансиями приводит к значительному возрастанию предела текучести.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44944.16862

Уникальные свойства лазерного излучения позволили кардинальным образом изменить многие технологические процессы и оказывать целенаправленное влияние на свойства многих функциональных материалов [1,2]. Решение проблемы получения материалов с заданными механическими свойствами требует новых исследований в области физики прочности и пластичности, а уровень ее развития определяется степенью понимания элементарных процессов пластической деформации. Пластические свойства реального кристалла определяются главным образом наличием и движением в нем дислокаций — линейных дефектов, способных сравнительно легко перемещаться под нагрузкой, а также их взаимодействием с другими дефектами решетки [3]. При этом как на их движение, так и на формирование дефектной структуры кристалла существенное влияние оказывает облучение лазерными им-

пульсами высокой мощности. Результатом такого воздействия является высокоскоростная деформация кристалла, скорость которой может достигать 10^3-10^7 s^{-1} , а плотность дислокаций возрастает до значений $\rho = 10^{14}-10^{15} \text{ m}^{-2}$ [2,4]. Использование лазеров позволяет управлять изменениями в дефектной системе кристалла [5]. Мощные лазерные импульсы обеспечивают высокий темп ввода энергии в среду: скорость нагрева в зоне лазерного облучения достигает $10^6 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$. Это приводит к интенсивной генерации вакансий и междоузлий. В случае мощных лазерных импульсов ($10^7-10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) возникает ударная волна, при этом генерация вакансий происходит по всему объему твердого тела. При лазерном воздействии плотность точечных дефектов может превысить равновесное значение на несколько порядков. В основном это относится к вакансиям, поскольку междоузельные атомы быстро выходят на поверхность или поглощаются стоками внутри кристалла [5]. Лазерное воздействие позволяет в широких пределах изменять плотность неравновесных дефектов, что дает возможность целенаправленно влиять на механические свойства материалов. Как известно, при низких скоростях деформирования, когда дислокации преодолевают барьеры с помощью тепловых флуктуаций, закалочные вакансии могут повышать величину деформирующих напряжений в несколько раз [6]. В работе [7] с помощью численных методов были получены зависимости коэффициента динамического торможения дислокаций от концентрации вакансий при высокоскоростном деформировании. Целью настоящей работы является получение аналитического выражения для вклада замороженных неравновесных вакансий в динамический предел текучести металлов и сплавов.

Пусть бесконечные краевые дислокации совершают скольжение под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 в положительном направлении оси OX с постоянной скоростью v в кристалле, содержащем хаотически распределенные вакансии. 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 -й дислокации определяется функцией

$$X_k(y=0, z, t) = vt + w_k(y=0, z, t).$$

Здесь $w_k(y=0, z, t)$ — 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.

Если мощным лазерным импульсом нагреть кристалл, а затем быстро охладить, то часть неравновесных вакансий не успеет перейти в равновесное состояние. Такой кристалл будет содержать замороженные неравновесные вакансии. Охлаждение должно происходить за время, меньшее времени диффузионного движения вакансий между источниками и стоками. В работе [8] показано, что существует оптимальная длительность лазерного импульса, при которой количество замороженных вакансий максимально. Она определяется тем, что при коротких импульсах не успевает генерироваться достаточное количество вакансий, а при длинных снижается скорость охлаждения, вследствие чего значительная доля вакансий не замораживается. Согласно [8], оптимальная длительность импульса для железа, алюминия и некоторых других металлов составляет 10^{-3} .

Уравнение движения k -й дислокации ансамбля в упругом поле хаотически распределенных замороженных вакансий может быть представлено в следующем виде:

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

где σ_{xy} — компонента тензора напряжений, создаваемых вакансиями на линии дислокации, F_k — сила, действующая на единицу длины k -й дислокации со стороны других дислокаций ансамбля, 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.

Используя результаты и методику теории динамического взаимодействия структурных дефектов [9–12], получим выражение для вклада вакансий в динамический предел текучести кристалла при высокоскоростной деформации с помощью формулы

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

где $\omega(q_z)$ — спектр дислокационных колебаний, n — объемная концентрация вакансий. После выполнения вычислений получаем выражение

для вклада вакансий в следующем виде:

$$\sigma = \frac{2(1-\gamma)n_0\chi^2\mu}{\rho^2b^3c}\dot{\epsilon}. \quad (1)$$

Здесь χ — размерный фактор вакансии, γ — коэффициент Пуассона, μ — модуль сдвига, $\dot{\epsilon}$ — скорость пластической деформации, ρ — плотность дислокаций, n_0 — безразмерная концентрация вакансий, $n_0 = nb^3$.

Для сравнения полученного нами результата с результатами работы [7] запишем полученное нами выражение для коэффициента динамического торможения дислокации вакансиями

$$B = \frac{2(1-\gamma)n_0\chi^2\mu}{\rho bc}.$$

Как следует из данной формулы, коэффициент динамического торможения линейно зависит от концентрации вакансий, что согласуется с результатами численного эксперимента работы [7]. При надбарьерном скольжении дислокаций, которое реализуется при высокоскоростной деформации, именно коэффициент B определяет величину динамического предела текучести. Выполним численную оценку этого коэффициента. Для типичных значений $b = 3 \cdot 10^{-10}$ м, $\chi = 10^{-1}$, $n_0 = 10^{-4}$, $\gamma = 0.3$, $\mu = 3 \cdot 10^{10}$ Па, $c = 3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho = 10^{15}$ м⁻² получим 10^{-5} Па · с, т.е. вклад данного механизма диссипации при указанных значениях имеет тот же порядок, что и вклад фононного трения, которое является основным механизмом диссипации в динамической области скоростей. Это значит, что наличие замороженных вакансий приводит к значительному росту динамического предела текучести металлов и сплавов.

Выполним численные оценки динамического предела текучести, воспользовавшись формулой (1). Для значений $b = 3 \cdot 10^{-10}$ м, $\chi = 10^{-1}$, $n_0 = 10^{-4}$, $\gamma = 0.3$, $c = 3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho = 10^{14}$ м⁻², $\mu = 5 \cdot 10^{10}$ Па при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 10^5$ с⁻¹ получим $\sigma = 10^7$ Па, а при скорости $\dot{\epsilon} = 10^6$ с⁻¹ — $\sigma = 10^8$ Па.

Таким образом, можно сделать вывод, что генерируемые лазерными импульсами вакансии могут оказывать существенное влияние на процесс высокоскоростной пластической деформации металлов и сплавов.

Список литературы

- [1] *Batani D.* // Europhys. Lett. 2016. V. 114. N 6. P. 65001 (1–7).
- [2] *Tramontina D., Bringa E., Erhart P., Hawreliak J., Germann T., Ravelo R., Higginbotham A., Suggit M., Wark J., Park N., Stukowski A., Tang Y.* // High Energy Density Phys. 2014. V. 10. P. 9–15.
- [3] *Куксин А.Ю., Стегайлов В.В., Янилкин А.В.* // ДАН. 2008. Т. 420. № 4. С. 467–471.
- [4] *Бородин И.Н., Майер А.Е.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 8. С. 76–80.
- [5] *Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А.* // УФН. 1996. Т. 166. № 1. С. 3–32.
- [6] *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.
- [7] *Куксин А.Ю., Янилкин А.В.* // МТТ. 2015. № 1. С. 54–65.
- [8] *Маркевич М.И., Чапланов А.М.* // Металлофизика. 1985. № 7. С. 100–104.
- [9] *Malashenko V.V.* // Physica B. 2009. V. 404. № 2. P. 3890–3892.
- [10] *Малашенко В.В.* // ФТТ. 2016. Т. 58. В. 10. С. 1973–1976.
- [11] *Малашенко В.В.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 20. С. 1–5.
- [12] *Малашенко В.В.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 5. С. 791–792.