

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ СОСТАРЕННЫХ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В.В.Малашенко

DYNAMIC YIELD STRENGTH OF AGED BINARY ALLOYS UNDER EXPOSURE TO POWERFUL LASER PULSES

V.V.Malashenko

Донецкий физико-технический институт Академии наук Украины, malashenko@fti.dn.ua

Исследовано влияние зон Гинье—Престона на динамический предел текучести состаренных бинарных сплавов при воздействии лазерных импульсов высокой мощности. Получено аналитическое выражение вклада зон Гинье—Престона в величину динамического предела текучести. Рассмотрены случаи доминирующего влияния коллективного взаимодействия легирующих примесей и дислокаций ансамбля на формирование колебательного спектра. Вклад зон Гинье—Престона линейно возрастает с увеличением их концентрации и убывает с увеличением концентрации легирующих примесей и плотности дислокаций. Численные оценки показывают, что зоны Гинье—Престона оказывают существенное влияние на динамический предел текучести бинарных сплавов.

Ключевые слова: дислокации, точечные дефекты, высокоскоростная деформация, лазер, зоны Гинье—Престона

The influence of the Guinier-Preston zones on the dynamic yield strength of aged binary alloys under the exposure to high-power laser pulses was investigated. An analytical expression of the contribution of the Guinier-Preston zones to the value of the dynamic yield strength is obtained. The cases of the dominant influence of the collective interaction of dopants and dislocations of the ensemble on the formation of the vibrational spectrum are considered. The contribution of the Guinier-Preston zones increases linearly with an increase of their concentration and decreases with an increase of the concentration of dopants and the density of dislocations. Numerical estimates show that the Guinier-Preston zones have a significant impact on the dynamic yield strength of binary alloys.

Keywords: dislocations, point defects, high strain rate, laser, Guinier-Preston zones

Бинарные сплавы являются важными функциональными материалами, нашедшими широкое применение в различных отраслях промышленности, а воздействие на них лазерными импульсами высокой мощности способно оказывать существенное влияние на их свойства, в том числе механические [1-4]. При этом дислокации, движение которых является основой пластической деформации, совершают надбарьерное движение в поле структурных дефектов, преодолевая их динамическим образом без помощи термических флуктуаций. Движение дислокаций в динамической области может быть описано на основе теории динамического взаимодействия структурных дефектов, которая позволила в рамках единого подхода не только объяснить ряд экспериментально наблюдающихся закономерностей, но и предсказать существование новых динамических эффектов, необходимость обнаружения которых может оказать стимулирующее воздействие на целенаправленную постановку новых экспериментов [5-8].

При искусственном или естественном старении сплавов в них образуются зоны Гинье—Престона, оказывающие существенное влияние на упрочнение сплавов.

Анализ высокоскоростной деформации в настоящее время выполняется в основном с помощью численного моделирования на основе метода молекулярной динамики [9,10]. Аналитические выражения для вклада зон Гинье—Престона в величину динамического предела текучести бинарных сплавов, под-

верженных действию мощных лазерных импульсов, ранее получены не были.

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 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 . Плоскости скольжения дислокаций параллельны плоскости XOZ . 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

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

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, σ_{xy}^{dis} — компонента, создаваемая на линии дислокации другими дислокациями ансамбля, m — масса единицы длины дислокации (массы всех дислокаций считаем одинаковыми), c — скорость распространения в кристалле поперечных звуковых волн, B — константа демпфирования, обусловленная фоонными, магнотонными или электронными механизмами диссипации.

Механизм диссипации при динамическом взаимодействии со структурными дефектами заключается в необратимом переходе кинетической энергии дислокации в энергию ее изгибных колебаний в плоскости скольжения [5]. Этот механизм весьма чувствителен к виду спектра дислокационных колебаний. Как следует из теории динамического взаимодействия дислокаций со структурными дефектами [5–8], динамика дислокаций при таком механизме диссипации зависит от вида спектра дислокационных колебаний, в первую очередь от наличия щели в дислокационном спектре

$$\omega^2(q_z) = c^2 q_z^2 + \Delta^2. \quad (3)$$

Главную роль в рассматриваемой задаче играют коллективное взаимодействие растворенных атомов с дислокацией и коллективное взаимодействие остальных дислокаций ансамбля с этой дислокацией. Конкуренция этих взаимодействий определяет и формирование спектральной щели, и величину силы динамического торможения дислокаций.

Спектральная щель, обусловленная коллективным взаимодействием атомов второго компонента с дислокацией, в бинарном сплаве имеет вид

$$\Delta = \Delta_d = \frac{c}{b} (n_{0d} \chi^2)^{1/4}, \quad (4)$$

где χ — параметр несоответствия атомов второго компонента, n_{0d} — их безразмерная концентрация.

Коллективное взаимодействие движущихся дислокаций ансамбля с каждой отдельной дислокацией также способно влиять на формирование колебательного спектра. Вклад этого взаимодействия в величину щели определяется формулой

$$\Delta_{dis} = \pi b \sqrt{\frac{\mu \rho}{6 \pi m (1 - \gamma)}} \approx c \sqrt{\rho}, \quad (5)$$

где ρ — плотность подвижных дислокаций, μ — модуль сдвига, γ — коэффициент Пуассона.

Воспользовавшись теорией динамического взаимодействия структурных дефектов, определим вклад структурных дефектов в величину динамического предела текучести по формуле

$$\sigma_d = \left\langle \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial X} G \sigma_{xy} \right\rangle, \quad (6)$$

где G — функция Грина уравнения (2), символ $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по длине дислокации и случайному расположению дефектов

$$\langle F(r_i) \rangle = \frac{1}{L} \int_L dz \int_V F(r_1) \frac{dr_1}{V} \cdot \int_V F(r_2) \frac{dr_2}{V} \cdot \int_V F(r_3) \frac{dr_3}{V} \dots \int_V F(r_N) \frac{dr_N}{V}. \quad (7)$$

Для определения силы динамического торможения дислокации необходимо вычислить Фурье-образ тензора напряжений, создаваемых зоной Гинье—Престона. Поле смещений этого дефекта может быть представлено в виде интеграла по поверхности, опирающейся на контур зоны

$$u_i(\mathbf{r}) = -c_{jklm} b_m \int_{S_0} n_l \frac{\partial}{\partial x_k} G_{ij}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') dS', \quad (8)$$

где $G_{ij}(\mathbf{r})$ — тензор Грина уравнений равновесия данной упругой среды. Наиболее простую и наглядную форму это выражение принимает в изотропном случае

$$G_{ij}(\mathbf{r}) = \frac{1}{8\pi\mu} \left(\frac{2\delta_{ij}}{r} - \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 r}{\partial x_i \partial x_j} \right), \quad (9)$$

$$c_{jklm} = \lambda \delta_{jk} \delta_{lm} + \mu (\delta_{jl} \delta_{km} + \delta_{jm} \delta_{kl}), \quad (10)$$

где λ и μ — коэффициенты Ляме.

После выполнения вычислений получим Фурье-образ необходимой нам компоненты в следующем виде

$$\sigma_{xy}(q_x, q_z, y) = -i\pi\mu b_0 a |y| J_1(qa) \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu} q_x \exp(-q|y|), \quad (11)$$

где $J_1(qa)$ — функция Бесселя первого рода, $q = \sqrt{q_x^2 + q_z^2}$.

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

$$F_G = \frac{n_G \mu b^2 R c}{2(1 - \gamma)^2 \Delta}. \quad (12)$$

Здесь μ — модуль сдвига, γ — коэффициент Пуассона.

Оценим величину характерной скорости

$$v_G = R \Delta_{def} = \frac{R}{b} c (n_{0d} \chi^2)^{1/4}. \quad (13)$$

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

Если основной вклад в формирование спектральной щели вносит коллективное взаимодействие атомов второго компонента с дислокацией, т.е. выполняется условие $\Delta_d > \Delta_{dis}$, то вклад зон Гинье—Престона в увеличение динамического предела текучести сплава определяется выражением

$$\sigma_G = \frac{n_G \mu b^2 R}{2(1 - \gamma)^2 (n_{0d} \chi^2)^{1/4}}. \quad (14)$$

Если же выполняется условие $\Delta_d < \Delta_{dis}$, т.е. основной вклад в формирование спектра вносит коллективное взаимодействие дислокаций ансамбля с каждой дислокацией, то в этом случае вклад зон Гинье—Престона имеет вид

$$\sigma_G = \frac{n_G \mu b R}{2(1 - \gamma)^2 \sqrt{\rho}}. \quad (15)$$

Выполним оценку вклада зон Гинье—Престона в величину динамического предела текучести бинарного сплава. Для типичных значений $\mu = 5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $\chi = 10^{-1}$, $b = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $R = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, $n_G = 2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $\rho = 10^{14} - 10^{15} \text{ м}^{-2}$, $n_{0d} = 10^{-2}$, $\gamma = 0,3$ получим $\sigma_d = 10^8 \text{ Па}$, т.е. вклад динамического торможения зонами Гинье—Престона может составлять десятки процентов.

Проведенный анализ показывает, что при высокоскоростной деформации, инициированной мощным лазерным излучением, зоны Гинье—Престона оказывают существенное влияние на возрастание динамического предела текучести состаренных бинарных сплавов, а возрастание концентрации атомов второго компонента и плотности подвижных дислокаций снижают это влияние.

1. Lee J., Veyssset D., Singer J. et al High strain rate deformation of layered nanocomposites // Nature Communications. 2012. №3. P.1164 (1-9).
2. Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers // EPL. 2016. V.114. №6. P.65001 (1-7).
3. Smith R.F., Eggert J.H., Rudd R.E. et al. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins // Journal of Applied Physics. 2011. V.110. Issue 12. P.123515 (1-11).
4. Tramontina D., Bringa E., Erhart P. et al. Molecular dynamics simulations of shock-induced plasticity in tantalum // High Energy Density Physics. 2014. V.10. №1. P.9-15.
5. Варюхин В.Н., Малашенко В.В. Динамические эффекты в дефектной системе кристалла // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т.82. №9. С.1213-1218.
6. Малашенко В.В. Концентрационная зависимость динамического предела текучести состаренных алюминий-медных сплавов при высокоскоростном деформировании // Письма в ЖТФ. 2018. Т.44. №18. С.47-52.
7. Malashenko V.V. Dynamic drag of dislocation by point defects in near-surface crystal layer // Modern Phys. Lett. B. 2009. Vol.23. №16. P.2041-2047.
8. Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B: Phys. Cond. Mat. 2009. Vol. 404. №21. P.3890-3893.
9. Stroeve A.Yu., Gorbato O.I., Gornostyrev Yu.N. and Korzhavyi P.A. Solid solution decomposition and Guinier-

Preston zone formation in Al-Cu alloys: A kinetic theory with anisotropic interactions // Phys. Rev. Materials. 2018. V.2. P.033603.

10. Verestek W., Prskalo A.-P., Hummel M. et al. Molecular dynamics investigations of the strengthening of Al-Cu alloys during thermal ageing // Phys. Mesomechanics. 2017. V.20. №3. P.291-304.

References

1. Lee J., Veyssset D., Singer J., Retsch M., Saini G., Pezeril T., Nelson K., Thomas E. High strain rate deformation of layered nanocomposites. Nature Communications, 2012, no. 3. P.1164.
2. Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers. EPL, 2016, vol. 114, no. 6. P. 65001(1-7).
3. Smith R. F., Eggert J. H., Rudd R. E., Swift D. C., Bolme C. A. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins. Journal of Applied Physics, 2011, vol. 10, no.1. P. 123515(1-11).
4. 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, vol., 10, no. 1, pp. 9-15.
5. Varyukhin V.N., Malashenko V.V. Dinamicheskiye efekty v defektnoy sisteme kristala [Dynamic Effects in a Defective System of Crystal]. Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya – Proceedings of RAS. A Series of Physics, 2018, vol. 82, no. 9, pp. 37– 42.
6. Malashenko V.V. Kontsentratsionnaya zavisimost' dinamicheskogo predela tekuchesti sostarenykh alyuminiyevo-mednykh spлавov pri vysokoskorostnom deformirovani [Concentration Dependence of the Dynamic Yield Stress of Aged Aluminum–Copper Alloys under High-Rate Deformation Conditions]. Letters to the Journal of Technical Physics (TECHNICAL PHYSICS. THE RUSSIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS), 2018, vol.44, no.18, pp. 47- 52.
7. Malashenko V.V. Dynamic drag of dislocation by point defects in near-surface crystal layer. Modern Phys. Lett. B., 2009 vol. 23, no.16, pp. 2041–2047.
8. Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects. Physica B: Phys. Condensed Matter, 2009, vol. 404, no. 21, pp. 3890–3893.
9. Stroeve A.Iu., Gorbato O.I., Gornostyrev Yu.N., and Korzhavyi P.A. Solid solution decomposition and Guinier-Preston zone formation in Al-Cu alloys: A kinetic theory with anisotropic interactions Phys. Rev. Materials, 2018, vol. 2. P.033603.
10. Verestek W., Prskalo A.P., Hummel M., Binkel P., & Schmauder S. Molecular dynamics investigations of the strengthening of Al-Cu alloys during thermal ageing. Phys. Mesomechanics, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 291-304.