

ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА НЕУПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ В СОСТАРЕННЫХ СПЛАВАХ

В.В. Малашенко¹, Т.И. Малашенко²

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»

83114, Россия, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

²ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

83001, Россия, Донецк, ул. Артема, 58

malashenko@donfti.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.754

Аннотация: Теоретически проанализирована высокоскоростная деформация состаренного сплава с высокой концентрацией зон Гинье-Престона. Анализ проведен в рамках теории динамического взаимодействия дефектов. Получено аналитическое выражение зависимости динамического предела текучести от концентрации атомов второго компонента. Проанализированы причины различного влияния зон Гинье-Престона на неупругие процессы при различных скоростях деформации. Показано, что при высокоскоростной деформации наноразмерные дефекты влияют на характер зависимости динамического предела текучести от концентрации атомов второго компонента. Эта зависимость становится немонотонной и имеет минимум и максимум. Максимум соответствует переходу от доминирующего влияния коллективного взаимодействия дислокаций на формирование спектральной щели к доминированию влияния коллективного взаимодействия атомов второго компонента. Минимум соответствует переходу от доминирования торможения дислокации зонами Гинье-Престона к доминированию торможения атомами второго компонента. Выполнены численные оценки вклада зон Гинье-Престона в величину предела текучести. Показано, что при высокой концентрации зон Гинье-Престона этот вклад является весьма существенным. Выполнены численные оценки концентрации атомов второго компонента, при которой концентрационная зависимость имеет максимум и минимум.

Ключевые слова: высокоскоростная деформация, дислокации, зоны Гинье-Престона, точечные дефекты, наноматериалы.

1. Введение

Зоны Гинье-Престона являются наноразмерными структурными дефектами, способными оказывать весьма существенное влияние на неупругие процессы и механические свойства состаренных сплавов. Эти зоны образуются на первой стадии искусственного или естественного старения сплавов. Такое влияние обусловлено взаимодействием зон Гинье-Престона с ансамблями движущихся дислокаций, движение и размножение которых во многом определяет как особенности пластической деформации, так и формирование механических свойств материалов. При этом влияние зон Гинье-Престона является различным в условиях квазистатической и высокоскоростной деформации. Такое различие обусловлено, во-первых, изменением механизма диссипации в условиях высокоскоростной деформации, а во-вторых, влиянием коллективных динамических эффектов. Высокоскоростная деформация

реализуется в условиях высокоэнергетических внешних воздействий (резка, ковка, штамповка, сварка взрывом, лазерные импульсы, ударные воздействия, динамическое канально-угловое прессование) [1-6]. При анализе влияния зон Гинье-Престона на динамику дислокаций в условиях высокоскоростной деформации обычно используется метод молекулярной динамики [5, 6]. Этот метод помогает визуализировать процессы взаимодействия структурных дефектов, однако он не позволяет работать с большим количеством дислокаций и получать аналитические зависимости механических свойств материалов от их дефектной структуры. Для целого ряда практически важных задач такие зависимости удаётся получить в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [7-11]. Целью настоящей работы является анализ влияния зон Гинье-Престона на характер зависимости динамического предела текучести состаренных сплавов от концентрации легирующей примеси.

2. Постановка задачи и результаты

Поставленная задача решается в рамках теории ДВД. Фактически это модифицированная струнная модель Гранато-Люкке. Она не позволяет учесть все особенности пластической деформации. В частности, она не учитывает процессы аннигиляции и зарождения дислокаций и предполагает, что плотность дислокаций остаётся постоянной. Но эта теория правильно описывает механизм диссипации при надбарьерном движении дислокаций и эффекты коллективного взаимодействия структурных дефектов в динамической области. Это обстоятельство позволило качественно объяснить ряд экспериментальных зависимостей, в частности, зависимости динамического предела текучести сплава от концентрации второго компонента, плотности дислокаций, скорости пластической деформации.

Рассмотрим бесконечные краевые дислокации, которые под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 движутся в плоскостях параллельных XOZ с постоянной скоростью v в кристалле, содержащем атомы второго компонента и зоны Гинье-Престона. Линии дислокаций параллельны оси OZ . Положение k -ой дислокации определяется функцией

$$S_k(z, t) = vt + s_k(z, t). \quad (1)$$

Здесь $s_k(z, t)$ – случайная величина, описывающая поперечные колебания дислокации, которые возникают при её взаимодействии с хаотически распределенными дефектами структуры. Среднее значение этой величины по длине дислокации и по хаотическому распределению дефектов равно нулю.

Скольжение дислокации описывается следующим уравнением

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

Здесь m – масса единицы длины дислокации, B – константа демпфирования, обусловленная фоновыми, магннными, электронными либо иными механизмами диссипации, характеризующимися линейной зависимостью силы торможения дислокации от скорости ее скольжения, c – скорость распространения поперечных звуковых волн в кристалле, σ_{xy}^p , σ_{xy}^{dis} , σ_{xy}^G – компоненты тензора напряжений, создаваемых на линии k -й дислокации соответственно точечными дефектами (атомы второго компонента), другими дислокациями и зонами Гинье-Престона.

Плоскости зон Гинье-Престона параллельны плоскости скольжения дислокаций, а их центры распределены в кристалле случайным образом. Будем считать, что все зоны имеют радиус R , одинаковую толщину равную диаметру атома второго компонента, одинаковые векторы Бюргера $\mathbf{b}_0 = (0, -b_0, 0)$ параллельные оси OY .

После выполнения необходимых вычислений получим выражение для вклада силы динамического торможения дислокаций зонами Гинье-Престона в величину динамического предела текучести

$$\sigma_G = \frac{n_G \mu b_0 R}{\sqrt{\rho \varphi(n_d)}}, \quad \varphi(n_d) = 1 + \sqrt{n_d / n_1}. \quad (3)$$

Здесь n_G – объемная концентрация зон Гинье-Престона, μ – модуль сдвига, ρ – плотность дислокаций, n_1 – безразмерная концентрация атомов второго компонента.

Аналогичным образом можем получить выражение для вклада силы динамического торможения дислокации атомами второго компонента

$$\sigma_d = \frac{n_d \mu \chi^2 \varepsilon}{\rho^2 b^3 c \varphi(n_d)}. \quad (4)$$

Здесь χ – параметр несоответствия атомов второго компонента, ε – скорость пластической деформации.

Используя полученные результаты, выражение для динамического предела текучести бинарных сплавов можно представить в следующем виде

$$\sigma = \frac{B\varepsilon}{\rho b^2} + \frac{\gamma}{\sqrt{\varphi(n_d)}} + \frac{\beta n_d}{\varphi(n_d)}. \quad (5)$$

Здесь введены обозначения:

$$\gamma = \frac{n_G \mu b_0 R}{\sqrt{\rho}}, \quad \beta = \frac{\mu \chi^2 \varepsilon}{\rho^2 b^3 c}. \quad (6)$$

Динамический предел текучести является немонотонной функцией

концентрации атомов второго компонента и имеет максимум при $n_d = n_1$ и минимум при $n_d = n_2$

$$n_2 = \chi^2 (n_G b^3 R \rho c / \varepsilon)^{\frac{4}{3}}. \quad (7)$$

Максимум соответствует переходу от доминирующего влияния коллективного взаимодействия дислокаций на формирование спектральной щели к доминированию влияния коллективного взаимодействия атомов второго компонента. Минимум полученной функции соответствует переходу от доминирования торможения дислокации зонами Гинье-Престона к доминированию торможения атомами второго компонента. Полученная зависимость экспериментально наблюдалась авторами работы [12].

Выполним численные оценки. Возникновение двух экстремумов концентрационной зависимости возможно в случае высокой концентрации зон Гинье-Престона и высокой плотности дислокаций, поэтому для оценки положим $n_G = 10^{23} - 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $\rho = 6 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Для остальных величин используем типичные значения $b = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $\gamma = 0,3$, $\chi = 10^{-1}$, $R = 10b$, $c = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $\varepsilon = 10^6 \text{ с}^{-1}$. Выполняя вычисления, получим $n_1 = 10^{-3} - 10^{-4}$ и $n_2 = 10^{-1} - 10^{-2}$.

3. Заключение

Проведенный в рамках теории ДВД анализ позволяет сделать вывод, что в состаренных сплавах в условиях высокоскоростной деформации зоны Гинье-Престона оказывают весьма существенное и нетривиальное влияние на пластическую деформацию и формирование механических свойств этих сплавов. Такое влияние имеет место при высоком значении концентрации зон Гинье-Престона и проявляется не только в существенном увеличении динамического предела текучести состаренного сплава, но и в качественном изменении зависимости данного предела текучести от концентрации легирующей примеси, которая становится в этом случае немонотонной и имеет максимум и минимум. Специфика влияния зон Гинье-Престона на характер неупругих процессов в условиях высокоскоростной деформации обусловлена, во-первых, изменением механизма диссипации, во-вторых, действием коллективных динамических эффектов, роль которых значительно возрастает при увеличении скорости деформации.

Полученные результаты могут быть полезными при анализе высокоскоростной деформации состаренных сплавов.

Библиографический список:

1. Li, P. The life prediction of notched aluminum alloy specimens after laser shock peening by TCD / P. Li, L. Susmel, M. Ma // International Journal of Fatigue. – 2023. – V. 176. – Art. № 107795. DOI:

- 10.1016/j.ijfatigue.2023.107795.
2. **Batani, D.** Matter in extreme conditions produced by lasers / D. Batani // *Europhysics Letters*. – 2016. – V. 114. – № 6. – P. 65001-p1-650001-p7. DOI: 10.1209/0295-5075/114/65001.
 3. **Lee, J.H.** High strain rate deformation of layered nanocomposites / J.H. Lee, D. Veysset, J.P. Singer, et al. // *Nature Communications*. – 2012. – V. 3. – Art. № 1164. – 9 p. DOI: 10.1038/ncomms2166.
 4. **Smith, R.F.** High strain-rate plastic flow in Al and Fe / R.F. Smith, J.H. Eggert, R.E. Rudd, et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – V. 110. – I. 12. – P. 123515-1-123515-11. DOI: 10.1063/1.3670001.
 5. **Kanel, G.I.** Effects of temperature and strain on the resistance to high-rate deformation of copper in shock waves / G.I. Kanel, A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov // *Journal of Applied Physics*. – 2020. – V. 128. – I. 11. – P. 115901-1-115901-8. DOI: 10.1063/5.0021212.
 6. **Yanilkin, A.V.** Dynamics and kinetics of dislocations in Al and Al-Cu alloy under dynamic loading / A.V. Yanilkin, V.S. Krasnikov, A.Yu. Kuksin, A.E. Mayer // *International Journal of Plasticity*. – 2014. – V. 55. – P. 94-107. DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.09.008.
 7. **Малашенко, В.В.** Влияние наноразмерных дефектов на динамический предел текучести сплавов / В.В. Малашенко, Т.И. Малашенко // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2020. – Вып. 12. – С. 136-141. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.136.
 8. **Малашенко, В.В.** Особенности высокоскоростной деформации состаренных сплавов / В.В. Малашенко // *Физика твёрдого тела*. – 2023. – Т. 65. – Вып. 8. – С. 1375-1378. DOI: 10.21883/FTT.2023.08.56156.70.
 9. **Malashenko, V.V.** Dependence of dynamic yield stress of binary alloys on the dislocation density under high-energy impacts / V.V. Malashenko // *Physics of the Solid State*. – 2020. – V. 62. – I. 10. – P. 1886-1888. DOI: 10.1134/S1063783420100200.
 10. **Malashenko, V.V.** Dynamic drag of dislocation by point defects in near-surface crystal layer / V.V. Malashenko // *Modern Physics Letters B*. – 2009. – V. 23. – I. 16. – P. 2041-2047. DOI: 10.1142/S0217984909020199.
 11. **Malashenko, V.V.** Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects / V.V. Malashenko // *Physica B: Condensed Matter*. – 2009. – V. 404. – I. 21. – P. 3890-3893. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122.
 12. **Morris, D.G.** Work hardening in Fe–Al alloys / D.G. Morris, M.A. Muñoz-Morris, L.M. Requejo // *Materials Science and Engineering: A*. – 2007. – V. 460-461. – P. 163-173. DOI: 10.1016/j.msea.2007.01.014.

References:

1. Li P., Susmel L., Ma M. The life prediction of notched aluminum alloy specimens after laser shock peening by TCD, *International Journal of Fatigue*, 2023, vol. 176, art. no. 107795, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107795.
2. Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers, *Europhysics Letters*, 2016, vol. 114, no. 6, pp. 65001-p1-650001-p7. DOI: 10.1209/0295-5075/114/65001.
3. Lee J.H., Veysset D., Singer J.P. et al. High strain rate deformation of layered nanocomposites, *Nature Communications*, 2012, vol. 3, art. no. 1164, 9 p. DOI: 10.1038/ncomms2166.
4. Smith R.F., Eggert J.H., Rudd R.E. et al. High strain-rate plastic flow in Al and Fe, *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 110, issue 12, pp. 123515-1-123515-11. DOI: 10.1063/1.3670001.
5. Kanel G.I., Savinykh A.S., Garkushin G.V., Razorenov S.V. Effects of temperature and strain on the resistance to high-rate deformation of copper in shock waves, *Journal of Applied Physics*, 2020, vol. 128, issue 11, pp. 115901-1-115901-8. DOI: 10.1063/5.0021212.
6. Yanilkin A.V., Krasnikov V.S., Kuksin A.Yu., Mayer A.E. Dynamics and kinetics of dislocations in Al and Al-Cu alloy under dynamic loading, *International Journal of Plasticity*, 2014, vol. 55, pp. 94-107. DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.09.008.
7. Malashenko V.V., Malashenko T.I. Vliyanie nanorazmernykh defektov na dinamicheskij predel tekuchesti splavov [The effect of nanoscale defects on the dynamic yield stress of alloys], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue 12, pp. 136-141. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.136. (In Russian).
8. Malashenko V.V. Osobennosti vysokoskorostnoy deformatsii sostarennykh splavov [Peculiarities of high strain rate deformation of aged alloys], *Fizika tverdogo tela [Physics of the solid state]*, 2023, vol. 65, issue 8, pp. 1375-1378. DOI: 10.21883/FTT.2023.08.56156.70. (In Russian).
9. Malashenko V.V. Vliyanie vodoroda na mekhanicheskie svoystva metallov v usloviyakh vysokoskorostnoy deformatsii [The effect of hydrogen on the mechanical properties of metals under high strain rate deformation],

Fizika tverdogo tela [Physics of the Solid State], 2022, vol. 64, issue 11, pp. 1804-1806. DOI: 10.21883/FTT.2022.11.53337.416. (In Russian).

10. Malashenko V.V. Dynamic drag of dislocation by point defects in near-surface crystal layer, *Modern Physics Letters B*, 2009, vol. 23, issue 16, pp. 2041-2047. DOI: 10.1142/S0217984909020199.

11. Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects, *Physica B: Condensed Matter*, 2009, vol. 404, issue 21, pp. 3890-3893. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122.

12. Morris D.G., Muñoz-Morris M.A., Requejo L.M. Work hardening in Fe–Al alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 460-461, pp. 163-173. DOI:10.1016/j.msea.2007.01.014.

Short Communication

EFFECT OF NANOSCALE DEFECTS ON INELASTIC PROCESSES IN AGED ALLOYS

V.V. Malashenko¹, T.I. Malashenko²

¹*Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin, Donetsk, Russia*

²*Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.754

Abstract: The high strain rate deformation of an aged alloy with a high concentration of Guinier-Preston zones is theoretically analyzed. The analysis was carried out within the framework of the theory of dynamic interaction of defects. An analytical expression for the dependence of the dynamic yield strength on the concentration of impurity atoms has been obtained. The reasons of the different influence of Guinier-Preston zones on inelastic processes at different strain rates are analyzed. It is shown that under high strain rate deformation, nanosized defects affect the nature of the dependence of the dynamic yield stress on the concentration of impurity atoms. This dependence becomes nonmonotonic and has a minimum and a maximum. The maximum corresponds to the transition from the dominant influence of the collective interaction of dislocations on the spectral gap to the dominance of the influence of the collective interaction of impurity atoms. The minimum corresponds to the transition from dominance of dislocation drag by Guinier-Preston zones to dominance of drag by impurity atoms. Numerical estimates of the contribution of the Guinier-Preston zones to the yield strength are made. It is shown that at a high concentration of Guinier-Preston zones, this contribution is very significant. Numerical estimates are made of the concentration of impurity atoms, at which the concentration dependence has a maximum and a minimum.

Keywords: *high strain rate deformation, dislocations, Guinier-Preston zones, point defects, nanomaterials.*

Малашенко Вадим Викторович – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник отдела «Теория кинетических и электронных свойств нелинейных систем», ГБУ «Донецкий физико-технический институт имени А.А. Галкина»

Малашенко Татьяна Ивановна – старший преподаватель кафедры физики, ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

Vadim V. Malashenko – Dr. Sc., Professor, Chief Researcher of the Department «Theory of kinetic and electronic properties of nonlinear systems», Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin

Tatyana I. Malashenko – Senior Lecturer, Department of Physics, Donetsk National Technical University

Поступила в редакцию/received: 26.08.2023; после рецензирования/revise: 02.10.2023; принята/accepted: 05.10.2023.