

УДК 539.5

Краткое сообщение

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ СПЛАВОВ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДЕФЕКТАМИ ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В.В. Малащенко^{1,2}, Т.И. Малащенко^{3,4}

¹ГУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»
83114, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

²ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
283001, Донецк, ул. Университетская, 24

³ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
83001, Донецк, ул. Артема, 58

⁴ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли
им. Михаила Туган-Барановского»
83050, Донецк, ул. Щорса, 31
malashenko@donfti.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.176

Аннотация: Выполнен теоретический анализ неупругих процессов в состаренных сплавах в условиях интенсивных внешних воздействий. Анализ проведен в рамках теории динамического взаимодействия дефектов. Получено аналитическое выражение зависимости динамического предела текучести от плотности дислокаций. Определена причина различного влияния наноструктурных дефектов на движение дислокаций при высокоскоростной и квазистатической деформации. Показано, что при высокоскоростной деформации наноразмерные дефекты влияют на характер зависимости динамического предела текучести от плотности дислокаций. Эта зависимость становится немонотонной и имеет минимум. В точке минимума происходит переход от доминирования торможения дислокации зонами Гинье-Престона к доминированию её торможения другими дислокациями. 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 плотности дислокаций, при которой нарушается соотношение Тейлора.

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

1. Введение

В условиях высокоэнергетических внешних воздействий металлы и сплавы подвергаются высокоскоростной деформации, которая существенно отличается от квазистатической деформации [1-6]. Это отличие связано прежде всего с изменением механизма диссипации энергии движущихся дислокаций, которые являются основными носителями пластической деформации. Именно движение дислокационных ансамблей и их взаимодействие с другими структурными дефектами определяет формирование механических свойств металлов и сплавов. В условиях высокоскоростной деформации большую роль в формировании

механических свойств играют динамические эффекты взаимодействия дислокаций с дефектами, которые существенно зависят от времени такого взаимодействия. В свою очередь время взаимодействия определяется как скоростью движения дислокаций, которая в динамической области достигает значений в десятки, сотни и даже тысячи метров в секунду, так и размерами структурных дефектов. В связи с этим особый интерес представляет исследование сплавов, содержащих наноразмерные дефекты, поскольку время взаимодействия с ними может на порядок и более превышать время взаимодействия с точечными дефектами, в частности, с атомами легирующих добавок. Зоны Гинье-Престона являются одним из типов наноразмерных дефектов. Изучению их влияния на сплавы, в которых они возникают в результате искусственного или естественного старения, посвящено огромное количество работ, однако основная часть этих исследований посвящена анализу квазистатической деформации. При исследовании высокоскоростной деформации чаще всего используется численные методы, такие как метод молекулярной динамики [1, 2]. Численные методы позволяют визуализировать высокоскоростные процессы, однако они не дают возможность получать аналитические выражения для механических характеристик сплава и выяснить роль динамических процессов в ходе деформирования. Такие задачи в целом ряде случаев могут быть решены в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [7-11]. Высокоскоростная деформация реализуется при ковке, штамповке, резке, сварке взрывом, различных ударно-волновых воздействиях, возникающих в процессе эксплуатации. В настоящей работе получена аналитическая зависимость динамического предела текучести состаренного сплава от плотности дислокаций и показано, что наличие наноструктурных дефектов типа зон Гинье-Престона при определённых условиях приводит к нарушению соотношения Тейлора и возникновению немонотонной зависимости предела текучести от дислокационной плотности.

2. Постановка задачи и результаты

Поставленная задача решается в рамках теории ДВД, которая базируется на струнной модели Гранато-Люкке и по сути является теорией конкурирующих взаимодействий. Основным механизмом диссипации при высокоскоростной деформации сплавов является возбуждение дислокационных колебаний в плоскости скольжения в результате взаимодействия дислокации со структурными дефектами. Амплитуда раскачки дислокации может на несколько порядков превосходить амплитуду тепловых колебаний, при этом раскачка собственных колебаний

происходит тем эффективней, чем большее искажение вносят структурные дефекты в решетку кристалла.

Поскольку данный механизм диссипации реализуется благодаря возбуждению колебаний дислокации, он оказывается весьма чувствительным к виду дислокационного колебательного спектра, в частности, его эффективность зависит от наличия щели в этом спектре. Наличие спектральной щели означает, что дислокация совершает колебания, находясь в параболической потенциальной яме. Задачи о колебаниях дислокации в потенциальной яме рассматривались и другими авторами, в частности, задача о дислокационных колебаниях в рельефе Пайерлса. Однако в рамках развитой нами теории решаются задачи о движении дислокации, совершающей колебания в потенциальной яме, перемещающейся по кристаллу вместе с ней. Такая яма может быть создана в результате коллективного взаимодействия точечных дефектов с движущейся дислокацией, коллективного взаимодействия дислокаций движущегося ансамбля с каждой отдельной дислокацией, магнитоупругого взаимодействия дислокации с магнитной подсистемой кристалла, действия сил изображения на дислокацию, скользящую в приповерхностном слое. В перечисленных выше случаях спектр дислокационных колебаний с частотой ω имеет вид

$$\omega^2(q_z) = c^2 q_z^2 + \Delta^2, \quad (1)$$

где c – скорость распространения поперечных звуковых волн в исследуемом сплаве, q_z – волновой вектор, Δ – спектральная щель, которая по порядку величины равна $\Delta = c/L$ (L – характерный масштаб взаимодействия, вносящего главный вклад в формирование щели). Именно величина этой щели определяет глубину параболической потенциальной ямы, в которой колеблется дислокация, совершающая надбарьерное скольжение. Ограничивая размах дислокационных колебаний, эта яма оказывает существенное влияние на эффективность динамического торможения дислокации. Таким образом, суммарная сила торможения дислокации зависит от вклада каждого типа дефектов в эту силу, а также от величины спектральной щели, которая в свою очередь тоже зависит от взаимодействия дислокации с различными дефектами. Конкуренция этих взаимодействий как при формировании силы торможения, так и при формировании дислокационного колебательного спектра (а именно спектральной щели), и определяет зависимость суммарной силы торможения от различных параметров деформирования, в частности, от концентрации легирующих добавок и зон Гинье-Престона, параметра несоответствия, плотности дислокаций.

Воспользовавшись результатами теории ДВД, проанализируем высокоскоростную деформацию состаренного бинарного сплава,

содержащего зоны Гинье-Престона, распределённые по объёму сплава случайным образом. Вклад зон Гинье-Престона в величину динамического предела текучести бинарного сплава вычислим по формуле

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

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, m – масса единицы длины дислокации, b – модуль вектора Бюргерса дислокации, интегрирование выполняется по всему импульсному пространству.

Рассмотрим ситуацию, когда зоны Гинье-Престона дают основной вклад в динамическое торможение, а коллективное взаимодействие дислокаций вносит главный вклад в формирование спектральной щели. Этот случай может быть реализован при высоких значениях плотности дислокаций и концентрации зон Гинье-Престона: $\rho = 10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$, $n_G = 10^{23} - 10^{24} \text{ м}^{-3}$. При этом зависимость динамического предела текучести сплава от плотности дислокаций является немонотонной и имеет минимум, т.е. соотношение Тейлора в этом случае нарушается

$$\tau = \mu \frac{n_G b R}{\sqrt{\rho}} + \alpha \mu b \sqrt{\rho}, \quad (3)$$

μ – модуль сдвига, R – средний радиус зоны Гинье-Престона, α – безразмерный коэффициент порядка единицы.

В рассмотренном выше случае сила динамического торможения дислокаций зонами Гинье-Престона имеет характер сухого трения, т.е. не зависит от скорости дислокационного скольжения, а, следовательно, и от скорости пластической деформации. Динамический предел текучести становится минимальным при значении дислокационной плотности

$$\rho_{\min} = \frac{n_G R}{\alpha}. \quad (4)$$

Выполним численную оценку. Для значений $n_G = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $R = 10^{-9} \text{ м}$ получим $\rho_{\min} = 10^{14} \text{ м}^{-2}$. В точке минимума происходит переход от доминирования торможения дислокации зонами Гинье-Престона к доминированию её торможения другими дислокациями.

Если же скорость пластической деформации $\dot{\varepsilon}$ достигает больших значений, отклонение от соотношения Тейлора возможно даже в чистых металлах. Реализация подобной ситуации возможна при значениях $B = 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$, где B – константа фононного торможения дислокации, $\dot{\varepsilon} = 10^8 - 10^9 \text{ с}^{-1}$, $\rho = 10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$. В этом случае зависимость динамического предела текучести от плотности дислокаций имеет следующий вид

$$\tau = \frac{\dot{\varepsilon} B}{\rho b^2} + \alpha \mu b \sqrt{\rho}. \quad (5)$$

Такая зависимость действительно наблюдалась экспериментально [12]. Формула (5) качественно согласуется с аналогичной формулой, полученной в работе [12], и отличается от неё лишь численным коэффициентом порядка единицы. При этом положение минимума определяется следующим значением дислокационной плотности

$$\rho_{\min} = \left(\frac{2 \dot{\varepsilon} B}{\alpha \mu b^3} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (6)$$

Выполним численные оценки. Для значений $\rho = 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$, $\mu = 5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $b = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $n_d = 10^{-2}$, $\chi = 10^{-1}$, $c = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $B = 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\dot{\varepsilon} = 10^6 \text{ с}^{-1}$ получим значение динамического предела текучести $\tau = 10^8 \text{ Па}$, что по порядку величины соответствует экспериментальным значениям [12].

3. Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в сплавах, подверженных высокоэнергетическим внешним воздействиям, влияние на неупругие процессы таких наноразмерных дефектов, как зоны Гинье-Престона, существенно отличается от их влияния в условиях квазистатической деформации. Высокая концентрация зон Гинье-Престона приводит не только к значительному увеличению динамического предела текучести состаренного сплава, но и качественно меняет характер зависимости этого предела от плотности дислокаций, что приводит, в частности, к возникновению немонотонной зависимости, нарушающей соотношение Тейлора. Это является результатом действия коллективных динамических эффектов, при которых возрастает значение такого параметра, как время взаимодействия дислокации с дефектом. Наличие в сплаве структурных дефектов, размеры которых отличаются на порядок и более, приводят к наличию различных времён взаимодействия, величина которых также отличается на порядок.

Полученные результаты могут быть полезными при исследовании механических свойств состаренных сплавов в условиях высокоэнергетических внешних воздействий.

Библиографический список:

1. **Singla, A.** Hugoniot elastic limit of single-crystal tantalum at normal and elevated temperatures subjected to extreme strain rates / A. Singla, A. Ray // *Physical Review B*. – 2022. – V. 105. – I. 6. – Art. № 064102. – 19 p. DOI: 10.1103/PhysRevB.105.064102.
2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **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.
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.** Влияние водорода на механические свойства металлов в условиях высокоскоростной деформации / В.В. Малашенко // *Физика твердого тела*. – 2022. – Т. 64. – Вып. 11. – С. 1804-1806. DOI: 10.21883/FTT.2022.11.53337.416.
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. 3890-38932. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122.
12. **Fan, H.** Strain rate dependency of dislocation plasticity / H. Fan, Q. Wang, J. A. El-Awady, D. Raabe, M. Zaiser // *Nature Communication*. – 2021. – V. 12. – Art. № 1845. – 11 p. DOI: 10.1038/s41467-021-21939-1.

References:

1. Singla A., Ray A., Hugoniot elastic limit of single-crystal tantalum at normal and elevated temperatures subjected to extreme strain rates, *Physical Review B*, 2022, vol. 105, issue 6, art. no. 064102, 19 p. DOI: 10.1103/PhysRevB.105.064102.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
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. The influence of collective effects on the concentration dependence of the yield stress of alloys under high-energy impacts, *Technical Physics Letters*, 2020, vol. 46, issue 9, pp. 925-927. DOI: 10.1134/S1063785020090242.
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], *[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. 3890-38932. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122.

12. Fan H., Wang Q., El-Awady J.A., Raabe D., Zaiser M. Strain rate dependency of dislocation plasticity, *Nature Communication*, 2021, vol. 12, art. no. 1845, 11 p. DOI: 10.1038/s41467-021-21939-1.

Short Communication

**EFFECT OF DISLOCATION DENSITY ON THE DYNAMIC YIELD STRENGTH OF
ALLOYS WITH NANOSCALE DEFECTS UNDER HIGH ENERGY EXTERNAL ACTIONS**

V.V. Malashenko^{1,2}, T.I. Malashenko^{3,4}

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

²*Donetsk National University, Donetsk*

³*Donetsk National Technical University, Donetsk*

⁴*Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovskiy,
Donetsk*

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.176

Abstract: A theoretical analysis of inelastic processes in aged alloys under intense external influences is carried out. 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 dislocation density has been obtained. The reason for the different influence of nanostructural defects on the dislocation motion under high strain rate deformation and quasi-static deformation is determined. It is shown that under high strain rate deformation, nanosized defects affect the nature of the dependence of the dynamic yield strength on the dislocation density. This dependence becomes nonmonotonic and has a minimum. At the minimum point, there is a transition from the dominance of the drag of the dislocation by Guinier-Preston zones to the dominance of its drag by other dislocations. 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 dislocation density at which the Taylor relation is violated.

Keywords: *high-speed deformation, dislocations, Guinier-Preston zones, point defects, nanomaterials, Taylor ratio.*

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», профессор кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»

Малашенко Татьяна Ивановна – старший преподаватель кафедры физики, ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», старший преподаватель кафедры естествознания и безопасности жизнедеятельности, ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского»

*Vadim V. Malashenko – Dr. Sc., Professor, Chief Researcher, Department «Theory of kinetic and electronic properties of nonlinear systems», Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin, Professor, Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies, Donetsk National University
Tatyana I. Malashenko – Senior Lecturer, Department of Physics, Donetsk National Technical University, Senior Lecturer, Department of Natural Sciences and Life Safety, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovskiy*

Поступила в редакцию/received: 22.08.2022; после рецензирования/revised: 29.09.2022; принята/accepted 02.10.2022.