

# РАДИОФИЗИКА

УДК 539.5

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).457-461

ГРНТИ 30.19.57

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ДИСЛОКАЦИЙ В СОСТАРЕННЫХ СПЛАВАХ

Малашенко В. В.

*Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия)*

**Аннотация** Теоретически проанализирована высокоскоростная деформация состаренных сплавов, содержащих легирующие элементы. Получено выражение для вклада зон Гинье-Престона в величину динамического предела текучести. Динамические эффекты оказывают существенное влияние на движение дислокационных ансамблей. Динамический предел текучести при определенных условиях не зависит от скорости пластической деформации. Концентрационная зависимость динамического предела текучести определяется конкуренцией взаимодействия дислокации с легирующими элементами и дислокациями ансамбля. Если доминирует взаимодействие с легирующими элементами, динамический предел текучести убывает с ростом их концентрации. Если преобладает коллективное взаимодействие дислокаций, предел текучести убывает при возрастании их плотности.

**Ключевые слова:** дислокации, сплавы, зоны Гинье-Престона, высокоскоростная деформация

**Для цитирования:** Малашенко В. В. Особенности динамики дислокаций в состаренных сплавах // Вестник НовГУ. 2023. 3(132). 457-461. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).457-461

Research Article

## FEATURES OF DISLOCATION DYNAMICS IN AGED ALLOYS

Malashenko V. V.

*Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering (Donetsk, Russia)*

**Abstract** The high-speed deformation of aged alloys containing alloying elements has been theoretically analyzed. An expression for the contribution of the Guinier-Preston zones to the value of the dynamic yield strength has been obtained. Dynamic effects have a significant influence on the motion of dislocation ensembles. The dynamic yield strength under certain conditions does not depend on the rate of plastic deformation. The concentration dependence of the dynamic yield strength is determined by the competition between the interaction of dislocations with alloying elements and dislocations of the ensemble. If the interaction with alloying elements dominates, the dynamic yield strength decreases with increasing their concentration. If the collective interaction of dislocations dominates, the yield strength decreases as their density increases.

**Keywords:** dislocations, alloys, Guinier-Preston zones, high strain rate deformation

**For citation:** Malashenko V. V. Features of dislocation dynamics in aged alloys // Vestnik NovSU. 2023. 3(132). 457-461. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).457-461

### Введение

Старение металлических сплавов является апробированным методом улучшения их механических свойств и находит широкое применение в различных отраслях промышленности. На первой стадии старения в сплавах образуются зоны

Гинье-Престона. Взаимодействуя с движущимися по кристаллу дислокационными ансамблями, они оказывают существенное влияние на механические свойства сплавов, в частности, на их прочность и пластичность. Взаимодействие дислокаций с зонами Гинье-Престона при квазистатическом деформировании сплавов исследовано довольно обстоятельно, но в условиях высокоскоростной деформации оно имеет существенные отличия, обусловленные действием коллективных динамических эффектов и изменением механизма диссипации энергии внешних воздействий. Таким воздействиям состаренные сплавы могут подвергаться как на стадии обработки и изготовления деталей (ковка, штамповка, резка, высокоскоростная обработка), так и в процессе их эксплуатации [1-4]. При этом дислокационные ансамбли совершают надбарьерное скольжение, перемещаясь со скоростями от десятков до тысяч метров в секунду, а скорость пластической деформации может достигать  $10^3$ – $10^8$  с<sup>-1</sup>. Обычно эти процессы анализируют методом молекуллярной динамики, однако он не позволяет оперировать большим числом дислокаций и получать аналитические зависимости механических свойств материала от характеристик материала. В ряде случаев получить такие зависимости удаётся в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [5-7]. Целью настоящей работы является получение аналитического выражения для вклада зон Гинье-Престона в величину динамического предела текучести состаренного сплава.

Рассмотрим движение ансамбля бесконечных краевых дислокаций под действием постоянного внешнего напряжения  $\sigma_0$  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  $k$ -ой дислокации определяется функцией

$$W_k = vt + w_k \quad (1)$$

Здесь  $w_k$  – случайная величина, описывающая поперечные 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

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

где  $\sigma_{xy}^d$  – компонента тензора напряжений, создаваемых точечными дефектами на линии дислокации,  $\sigma_{xy}^G$  – 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, магнонными или электронными механизмами диссипации.

Воспользовавшись результатами теории ДВД, вклад зон Гинье-Престона в величину динамического предела текучести состаренного сплава вычислим по формуле

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

где  $n_G$  – объемная концентрация зон Гинье-Престона,  $\omega(q_z)$  – спектр дислокационных колебаний,  $\sigma_{xy}^G(\mathbf{q})$  – компонента тензора напряжений, создаваемых на линии дислокации зоной Гинье-Престона.

Наиболее интересен случай, когда спектр колебаний дислокации является нелинейным, т. е. в нём 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

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

где  $\chi$  – 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, соответственно, вклад этих зон в динамический предел текучести не зависит от скорости пластической деформации

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

Здесь  $\mu$  – модуль сдвига,  $\gamma$  – коэффициент Пуассона.

В случае, когда щель создаётся коллективным взаимодействием точечных дефектов, получим

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

Оценим величину характерной скорости

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

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

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

В случае высокой плотности дислокаций именно их взаимодействие вносит главный вклад в формирование спектральной щели. Это имеет место при значениях плотности  $\rho > \rho_0$ , где

$$\rho_0 = \frac{\sqrt{n_{0d}\chi^2}}{b^2}. \quad (9)$$

Спектральная щель при этом описывается следующим выражением

$$\Delta = \Delta_{dis} = b \sqrt{\frac{\rho\mu}{2\pi m(1-\gamma)}} \quad (10)$$

В этом случае выражение для вклада зон Гинье -Престона примет вид

$$\tau_G = \frac{n_G\mu b R}{2(1-\gamma)^2\sqrt{\rho}} \quad (11)$$

Полученные формулы показывают, что вклад зон Гинье-Престона в величину динамического предела текучести состаренного сплава зависит от концентрации легирующих добавок и плотности дислокаций. При высокой концентрации легирующей примеси этот вклад уменьшается с ростом её концентрации и не зависит от плотности дислокаций. При высокой плотности дислокаций он не зависит от концентрации примесей и понижается с ростом дислокационной плотности.

### Заключение

Коллективное воздействие точечных дефектов и дислокаций ансамбля на каждую 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 свойства состаренных сплавов.

### Список литературы

1. Tapasa K., Bacon D. J., Ossetsky Y. N. Computer simulation of dislocation-solute interaction in dilute Fe–Cu alloys // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2006. 14(7). 1153-1166. DOI: 10.1088/0965-0393/14/7/004
2. Walgraef D. Rate equation approach to dislocation dynamics and plastic deformation // Materials Science and Engineering. 2002. 322(1). 167-175. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01676-8
3. Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers // EPL (Europhysics Letters). 2016. 114(6) 65001(1-7). DOI: 10.1209/0295-5075/114/65001
4. Tramontina D., Bringa E., Erhart P., Hawrelak 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. 10(9). 9-15. DOI: 10.1016/j.hedp.2013.10.007
5. Малашенко В. В. Нарушение соотношения Тейлора в условиях высокоэнергетических внешних воздействий // Физика твёрдого тела. 2022. 64(8). 1012-1017. DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52699.340
6. Варюхин В. Н., Малашенко В. В. Динамические эффекты в дефектной системе кристалла // Известия РАН. Серия физическая. 2018. 82(9). 1213-1218. DOI: 10.1134/S0367676518090259
7. Malashenko V. V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B: Condensed Matter. 2009. 404(21). 3890-3893. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122

### References

1. Tapasa K., Bacon D. J., Ossetsky Y. N. Computer simulation of dislocation-solute interaction in dilute Fe–Cu alloys // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2006. 14(7). 1153-1166. DOI: 10.1088/0965-0393/14/7/004
2. Walgraef D. Rate equation approach to dislocation dynamics and plastic deformation // Materials Science and Engineering. 2002. 322(1). 167-175. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01676-8
3. Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers // EPL (Europhysics Letters). 2016. 114(6) 65001(1-7). DOI: 10.1209/0295-5075/114/65001
4. Tramontina D., Bringa E., Erhart P., Hawrelak 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. 10(9). 9-15. DOI: 10.1016/j.hedp.2013.10.007
5. Malashenko V. V. Narusheniye sootnosheniya Teylora v usloviyakh vysokoenergeticheskikh vneshnikh vozdeystviy [Violation of the Taylor ratio under conditions of high-energy external influences] // Physics of the Solid State. 2022. 64(8). 1012-1017. DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52699.340
6. Varyukhin V. N., Malashenko V. V. Dinamicheskiye effekty v defektnej sisteme kristala [Dynamic effects in a defective crystal system] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2018. 82(9). 1213-1218. DOI: 10.1134/S0367676518090259
7. Malashenko V. V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B: Condensed Matter. 2009. 404(21). 3890-3893. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122

### Информация об авторе

Малашенко Вадим Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0001-7073-8762, malashenko@donfti.ru