

РАДИОФИЗИКА

УДК 539.5

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).400-407

Поступила в редакцию / Received 05.05.2025

ГРНТИ 30.19.15

Специальность ВАК 1.3.4.

Принята к публикации / Accepted 24.09.2025

Научная статья

НЕМОНОТОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ ОБЛУЧЕННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Малашенко В. В.

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

Аннотация. В рамках теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) выполнен анализ пластической деформации облученных металлов и сплавов в условиях высоких внешних нагрузок. Получено аналитическое выражение зависимости динамического предела текучести от концентрации призматических дислокационных петель и точечных дефектов. Зависимость динамического предела текучести от концентрации точечных дефектов является немонотонной и имеет минимум. Положение минимума определяется конкуренцией сил динамического торможения дислокаций различными типами структурных дефектов.

Ключевые слова: дислокации, высокоскоростная деформация, облученные металлы, радиационные дефекты, динамический предел текучести

Для цитирования: Малашенко В. В. Немонотонная концентрационная зависимость динамического предела текучести облученных металлов и сплавов // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 400–407. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).400-407

Research Article

NONMONOTONE CONCENTRATION DEPENDENCE OF THE DYNAMIC YIELD STRENGTH OF IRRADIATED METALS AND ALLOYS

Malashenko V. V.

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

Abstract. Within the framework of the theory of dynamic interaction of defects (DID), an analysis of plastic deformation of irradiated metals and alloys under the high-energy impacts is performed. An analytical expression for the dependence of the dynamic yield strength on the concentration of prismatic dislocation loops and point defects is obtained. The dependence of the dynamic yield strength on the concentration of point defects is nonmonotonic and has a minimum. The position of the minimum is due to the competition between the dynamic drag forces of dislocations caused by different types of structural defects.

Keywords: *dislocations, high strain rate deformation, irradiated metals, radiation defects, dynamic yield stress*

For citation: Malashenko V. V. Nonmonotone concentration dependence of the dynamic yield strength of irradiated metals and alloys // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 400–407. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).400-407

Введение

Радиационное облучение металлов и сплавов оказывает значительное влияние на структуру этих материалов, порождая огромное количество дефектов, в частности, призматических дислокационных петель и точечных дефектов [1]. Такие дефекты оказывают большое влияние на неупругие процессы и формирование механических свойств этих функциональных материалов. В процессе обработки и эксплуатации изделия из металлов и сплавов могут подвергаться высокоэнергетическим внешним воздействиям, порождающим высокоскоростную деформацию этих материалов [2–5]. При высокоскоростном деформировании дислокации совершают надбарьерное скольжение, преодолевая встречающиеся на их пути дефекты динамическим образом, т. е. без помощи тепловых флюктуаций. В этой области возрастает роль коллективных динамических эффектов, в результате чего влияние структурных дефектов на формирование механических свойств приобретает специфические особенности, не проявляющиеся в условиях квазистатической деформации.

Целью настоящей работы является получение аналитической зависимости динамического предела текучести облученных металлов и сплавов от концентрации точечных радиационных дефектов.

Основная часть

Быстротекущие процессы, характерные для высокоскоростной деформации, чаще всего анализируются с помощью компьютерного моделирования в рамках метода молекулярной динамики (ММД) [6]. Этот метод признан весьма эффективным, он имеет массу достоинств, позволяет визуализировать быстротекущие процессы и делать их весьма наглядными. Однако он, как и любой метод, имеет свои ограничения. В частности, не позволяет работать с большим количеством атомов и получать аналитические выражения зависимостей механических характеристик материала от состояния его дефектной системы и условий деформирования, например, от скорости пластической деформации. Для широкого круга задач динамики дислокаций проблема получения аналитических зависимостей весьма успешно решается в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [7–9]. Эта теория является феноменологической и тоже имеет свои ограничения. В частности, она не учитывает процессы зарождения и аннигиляции дислокаций в процессе пластической деформации и не дает точное численное значение исследуемых характеристик, позволяя определять только порядок их величины. Однако теория ДВД адекватно описывает механизм диссипации в условиях больших нагрузок и эффекты коллективного взаимодействия различных типов структурных дефектов. Кроме того, теория ДВД является весьма наглядной и физически прозрачной. Благодаря этому удалось дать удовлетворительное

объяснение большому числу экспериментальных результатов, а также предсказать новые динамические эффекты, проверка которых может оказать стимулирующее действие на целенаправленную постановку новых экспериментов. Кроме того, физическая прозрачность данной теории позволила выявить общие черты динамического поведения весьма сильно отличающихся физических систем.

Теория ДВД базируется на хорошо известной и хорошо зарекомендовавшей себя теории Гранато-Люкке. Эти исследователи рассматривали дислокацию как упругую струну, имеющую линейное натяжение и массу полевого происхождения. По порядку величины масса струны равна массе материала, заключенного в трубке с радиусом равным модулю вектора Бюргерса. Для грубых оценок обычно принимают линейную плотность дислокации равной 10^{-16} кг/м. Одним из основных отличий теории ДВД от струнной теории Гранато-Люкке является учет нелинейности спектра дислокационных колебаний, ранее в задачах по динамике дислокаций этого не делалось, рассматривался только линейный спектр

$$\omega(q_z) = cq_z, \quad (1)$$

где ω – частота дислокационных колебаний, q_z – компонента волнового вектора параллельная линии дислокации, c – скорость распространения в металле поперечных звуковых волн. Учет эффектов коллективного взаимодействия точечных дефектов с исследуемой скользящей дислокацией либо коллективного взаимодействия других дислокаций движущегося скопления с данной дислокацией приводит к тому, что спектр колеблющейся дислокации становится нелинейным: в нем появляется спектральная щель Δ

$$\omega(q_z) = \sqrt{c^2 q_z^2 + \Delta^2}. \quad (2)$$

Наличие щели в дислокационном колебательном спектре является следствием того факта, что дислокация колеблется в потенциальной яме параболического сечения и любые смещения дислокационного элемента от положения равновесия приводят к возникновению квазиупругой силы, пропорциональной величине смещения и направленной против него. До создания теории ДВД нелинейный спектр дислокационных колебаний анализировался лишь однажды – в задаче о колебаниях дислокации в рельефе Пайерлса [10]. Однако этот рельеф неподвижен, и дислокация совершила в нем малые колебания, не перемещаясь по кристаллу. Теория ДВД позволяет решать задачи о колебаниях дислокации в подвижной потенциальной яме, которая перемещается по деформируемому кристаллу вместе с движущейся дислокацией. Как было отмечено выше, такая яма может быть создана коллективным воздействием на данную дислокацию других дислокаций ансамбля либо точечных дефектов. Кроме того, она может возникнуть в результате магнитоупругого

взаимодействия с магнитной системой либо в результате действия сил изображения в приповерхностной области.

В настоящей работе в рамках теории ДВД анализируется скольжение ансамбля краевых дислокаций в облученном металле, содержащем как точечные радиационные дефекты, так и призматические дислокационные петли радиационного происхождения. Как известно, наиболее высокая концентрация этих петель достигается именно в результате облучения. Все петли для простоты будем считать одинаковыми и имеющими радиус R . Внешнее напряжение обозначим σ_0 , именно оно перемещает дислокации вдоль оси OX с постоянной скоростью v . Векторы Бюргерса краевых дислокаций равны по модулю b и параллельны оси OX , а дислокационные линии параллельны оси OZ . Дислокации перемещаются в плоскостях параллельных плоскости XOZ . Положение дислокации определяет функция

$$X(y = 0, z, t) = vt + w(y = 0, z, t). \quad (3)$$

Функция $w(z, t)$ описывает поперечные дислокационные колебания, возбуждаемые структурными дефектами, которые дислокация преодолевает в ходе перемещения по кристаллу.

Поскольку исследуемая нами дислокация является упругой струной, уравнение ее движения представляет собой неоднородное волновое уравнение, в правой части которого содержится сумма всех сил, действующих на данную дислокацию

$$m \left\{ \frac{\partial X^2}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right\} = F_{dis} + b[\sigma_0 + \sigma_{xy}^L + \sigma_{xy}^d] - B \frac{\partial X}{\partial t}, \quad (4)$$

где F_{dis} – суммарная сила, которая действует на исследуемую дислокацию со стороны всех других дислокаций ансамбля, σ_{xy}^L – компонента тензора напряжений, которые создаются на дислокационной линии дислокационными петлями, σ_{xy}^d – компонента тензора напряжений, созданных на этой линии радиационными точечными дефектами, m – масса единицы длины движущейся дислокации, B – константа фононного торможения.

Поскольку в настоящей работе рассматриваются малые дислокационные колебания, силу динамического торможения дислокации структурными дефектами определенного типа можно вычислить, разлагая в ряд исходное выражение до второго порядка с последующим усреднением полученного выражения по случайному распределению точечных дефектов и по длине дислокации. Так как функция $w(z, t)$ является величиной случайной, ее среднее значение будет равняться нулю.

Процедура усреднения заключается в вычислении следующих интегралов:

$$\langle f(r_i) \rangle = \frac{1}{L_{dis}} \int_L dz \int_V \prod_{i=1}^N f(r_i) \frac{dr_i}{V^N}, \quad (5)$$

где N – число структурных дефектов в металле, V – объем исследуемого образца, L_{dis} – дислокационная длина.

Вклад силы торможения дислокаций структурными дефектами определенного типа также можно определить с помощью теории возмущений

$$\tau = \langle \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial X} w_x \rangle. \quad (6)$$

Входящая в данное выражение функция $w_x(z, t)$ может быть вычислена с помощью функции Грина

$$w_x = \iint dt' dz' G(z - z', t - t') \frac{b}{m} \sigma_{xy}(z', t'), \quad (7)$$

где G – функция Грина уравнения движения исследуемой краевой дислокации. Фурьеобраз этой функции имеет вид

$$G(\omega, q_z) = \frac{1}{\omega^2 + iBm^{-1}\omega - c^2q_z^2 - \Delta^2}. \quad (8)$$

Вклад каждого типа дефектов в динамический предел текучести облученного металла после выполнения необходимых математических преобразований может быть записан в следующем виде

$$\tau = \frac{n_L b}{8\pi^2 m} \int d^3 q |q_x| \cdot |\sigma_{xy}(\mathbf{q})|^2 \delta(q_x^2 v^2 - c^2 q_z^2 - \Delta^2), \quad (9)$$

где n – объемная концентрация структурных дефектов данного типа, $\sigma_{xy}(\mathbf{q})$ – Фурьеобраз компоненты тензора напряжений, создаваемых дефектом этого типа.

Как было отмечено выше, щель в дислокационном спектре может создана коллективным воздействием на дислокацию точечных дефектов. В этом случае она определяется следующим выражением

$$\Delta = \Delta_{def} = \frac{c}{b} \sqrt[4]{n_{0d} \chi^2}, \quad (10)$$

где n_{0d} – безразмерная концентрация точечных дефектов, χ – параметр их размерного несоответствия.

Если же главный вклад в формирование спектральной щели вносит коллективное взаимодействие дислокаций, то

$$\Delta = \Delta_{dis} = \pi b \sqrt{\frac{\mu \rho}{6\pi m(1-\gamma)}}, \quad (11)$$

где μ – модуль сдвига, γ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность дислокаций в кристалле.

Динамический предел текучести металлов и сплавов равен сумме вкладов торможения дислокаций точечными дефектами, другими дислокациями кристалла и призматическими дислокационными петлями.

Проанализируем случай, когда доминирующее влияние на формирование щели оказывает коллективное взаимодействие точечных дефектов: $\Delta_{dis} < \Delta_{def}$. Такое доминирование имеет место при значениях $\rho \leq 10^{14} \text{ м}^{-2}$, $n_{0d} = 10^{-2} - 10^{-4}$ и скоростях пластической деформации $\dot{\varepsilon} < \rho b^2 \Delta_{def}$, при которых взаимодействие точечных дефектов с дислокацией имеет коллективный характер. Это скорости $\dot{\varepsilon} = 10^4 - 10^5 \text{ с}^{-1}$. Отметим, что при таких скоростях динамическое торможение дислокаций призматическими петлями имеет характер сухого трения. Выполняя необходимые математические преобразования, получим выражение для динамического предела текучести облученного металла в следующем виде

$$\tau = \alpha \mu b \sqrt{\rho} + D \frac{n_L R}{\sqrt[4]{n_{0d} \chi^2}} + K \sqrt{n_{0d} \chi^2}, \quad (12)$$

$$K = \frac{2(1-\gamma)\mu\dot{\varepsilon}}{\rho^2 b^3 c}, \quad D = \frac{\mu b^2}{(1-\gamma)^2}. \quad (13)$$

Анализ полученного выражения показывает, что зависимость динамического предела текучести облученного металла от концентрации точечных дефектов является немонотонной и имеет минимум, положение которого определяется выражением

$$n_{min} = \left(\frac{\rho R c n_L b^3}{\dot{\varepsilon} \sqrt{\chi^3}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (14)$$

Полученный результат согласуется с выводом теории ДВД, согласно которому минимум на зависимости механических свойств от характеристик материала наблюдается при смене доминирующей силы торможения. В нашем случае в точке минимума имеет место переход от доминирования торможения дислокаций

призматическими дислокационными петлями к доминированию торможения точечными радиационными дефектами.

Для значений $b = 4 \cdot 10^{-10}$ м, $\gamma = 0,3$, $\chi = 10^{-1}$, $R = 10b$, $n_L = 10^{24}$ м⁻³, $\rho = 10^{13}$ м⁻², $c = 3 \cdot 10^3$ м/с, $\varepsilon = 10^4$ с⁻¹ получим $n_{min} = 10^{-2}$

Заключение

Призматические дислокационные петли и точечные дефекты, в большом количестве возникающие при облучении металлов и сплавов, оказывают огромное влияние на формирование механических свойств этих материалов в условиях высоких нагрузок. Они являются причиной возникновения немонотонной зависимости динамического предела текучести металлов и сплавов от концентрации точечных дефектов.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе высокоскоростной деформации облученных металлов и сплавов.

Список литературы

1. Abernethy R. G., Gibson I. S. K.-L, Giannattasio A. Effects of neutron irradiation on the brittle to ductile transition in single crystal tungsten // Journal of nuclear materials. 2019. 527. 151799.
2. Prabhakaran S., Kulkarni A., Vasanth G. Laser shock peening without coating induced residual stress distribution, wettability characteristics and enhanced pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel // Applied surface science. 2017. 428. 17–30.
3. 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. 176. 107795.
4. Smith R. F., Eggert J. H., Rudd R. E., Swift D. C., Bolme C. A., Collins G. W. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins // Journal of applied physics. 2011. 110. 123515 (1–11).
5. Tapasa K., Bacon D. J. and Ossetsky Yu. N. Computer simulation of dislocation–solute interaction in dilute Fe–Cu alloys // Modelling and simulation in materials science and engineering. 2006. 14. 1153–1166.
6. Fan H., El-Awady J. A., Wang Q., Raabe D., Zaiser M. Strain rate dependency of dislocation plasticity // Nature communications. 2021. 12 (1). 1–11. DOI: 10.1038/s41467-021-21939-1
7. Малашенко В. В. Влияние плотности дислокаций на динамический предел текучести облученных металлов с гигантской магнитострикцией // Физика твердого тела. 2024. 66 (8). 1403–1407. DOI: 10.61011/FTT.2024.11.59336.246
8. Варюхин В. Н., Малашенко В. В. Динамические эффекты в дефектной системе кристалла // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. 82 (9). 1213–1218. DOI: 10.1134/S0367676518090259
9. 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

10. Косевич А. М. Дислокации в теории упругости. Киев: Наукова думка, 1978. 220 с.

References

1. Abernethy R. G., Gibson I. S. K.-L, Giannattasio A. Effects of neutron irradiation on the brittle to ductile transition in single crystal tungsten // Journal of nuclear materials. 2019. 527. 151799.
2. Prabhakaran S., Kulkarni A., Vasanth G. Laser shock peening without coating induced residual stress distribution, wettability characteristics and enhanced pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel // Applied surface science. 2017. 428. 17–30.
3. 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. 176. 107795.
4. Smith R. F., Eggert J. H., Rudd R. E., Swift D. C., Bolme C. A., Collins G. W. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins // Journal of applied physics. 2011. 110. 123515 (1–11).
5. Tapasa K., Bacon D. J. and Ossetsky Yu. N. Computer simulation of dislocation–solute interaction in dilute Fe–Cu alloys // Modelling and simulation in materials science and engineering. 2006. 14. 1153–1166.
6. Fan H., El-Awady J. A., Wang Q., Raabe D., Zaiser M. Strain rate dependency of dislocation plasticity // Nature communications. 2021. 12 (1). 1–11. DOI: 10.1038/s41467-021-21939-1
7. Malashenko V. V. Influence of the misfit parameter of point defects on the dynamic yield strength of metals and alloys // Physics of the solid state. 2024. 66 (8). 1403–1407. DOI: 10.61011/FTT.2024.11.59336.246
8. Varyukhin V. N., Malashenko V. V. Dynamic effects in a defective system of crystal // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: physics. 2018. 82 (9). 1101–1105. DOI: 10.3103/S1062873818090253
9. 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
10. Kosevich A. M. Dislocations in the theory of elasticity. Kiev: Nauchnaya dumka Publ., 1978. 220 p.

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