УДК 539.5 *Оригинальная статья*

Влияние облучения на динамическую неустойчивость дислокационного скольжения в металлах

В.В. Малашенко
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»
283114, Россия, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72
malashenko@donfti.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.264

Аннотация: В рамках теории динамического взаимодействия дефектов проанализировано надбарьерное движение краевых дислокаций в облучённом металле, который содержит радиационные точечные и наноразмерные дефекты (призматические дислокационные петли). Интенсивные внешние нагрузки порождают высокоскоростную деформацию облучённых металлов. В процессе высокоскоростной деформации дислокации разгоняются до высоких скоростей, их кинетическая энергия превосходит высоту потенциальных барьеров, которые порождаются структурными дефектами. При надбарьерном движении дислокаций энергия внешних воздействий переходит в энергию дислокационных колебаний. Этот механизм диссипации существенно отличается от механизма диссипации в области низких скоростей движения. Наличие щели в спектре колебаний дислокации оказывает существенное влияние на эффективность этого механизма. В данной работе рассматривается случай, когда щель порождается коллективным взаимодействием точечных радиационных дефектов. Получено аналитическое выражение, определяющее скоростную зависимость динамического предела текучести в облучённом металле. Предсказана новая область динамической неустойчивости дислокационного движения, обусловленная высокой концентрацией призматических дислокационных петель. Эта динамическая неустойчивость является причиной возникновения скачков пластической деформации. Получены аналитические выражения, определяющие границы области динамической неустойчивости. Выполнены численные оценки граничных значений.
Ключевые слова: облучённые металлы, дислокации, дислокационные петли, радиационные дефекты, высокоскоростная деформация.

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

Original paper

The effect of irradiation on the dynamic instability of dislocation slip in metals

V.V. Malashenko
Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Donetsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.264

Abstract: Within the framework of the theory of dynamic interaction of defects., the above-barrier motion of edge dislocations in an irradiated metal containing radiation point and nanoscale defects (prismatic dislocation loops) is analyzed. Intense external loads generate high strain rate deformation of irradiated metals. During high strain rate deformation, dislocations accelerate to high velocities, and their kinetic energy exceeds the height of potential barriers generated by structural defects. During above-barrier motion of dislocations, the energy of external loads is converted into the energy of dislocation oscillations. This dissipation mechanism differs significantly from the dissipation mechanism in the low-velocity region. The presence of a gap in the dislocation oscillation spectrum significantly affects the efficiency of this mechanism. This paper considers the case where the gap is generated by the collective interaction of radiation point defects. An analytical expression defining the

© В.В. Малашенко, 2026

rate dependence of the dynamic yield strength in irradiated metal is obtained. A new region of dynamic instability of dislocation motion was predicted, caused by a high concentration of prismatic dislocation loops. This dynamic instability is the cause of plastic deformation jumps. Some analytical expressions defining the boundaries of the dynamic instability region are obtained, and numerical estimates of the boundary values are performed.
Keywords: irradiated metals, dislocations, dislocation loops, radiation defects, high-speed deformation.

Vadim V. Malashenko – Dr. Sc., Professor, Chief Researcher of the Department «Theory of kinetic and electronic properties of nonlinear systems», Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, ORCID: 0000-0001-7073-8762

Поступила в редакцию/received: 01.06.2026; после рецензирования/revised: 23.06.2026; принята/accepted: 29.06.2026.

1. Введение

Анализу неустойчивости процесса пластической деформации исследователи начали уделять значительное внимание ещё в девятнадцатом веке, когда она была экспериментально обнаружена. Большое внимание исследователей это явление привлекает и в настоящее время [1-3]. Понимание сущности, причин и закономерностей деформационной неустойчивости является весьма важным как с точки зрения фундаментальной науки, так и в чисто практической плоскости. Результатом этой неустойчивости являются полосы сдвига, которые образуются вследствие немонотонности и неоднородности пластической деформации. Одной из причин возникновения неустойчивости пластической деформации является так называемая отрицательная скоростная зависимость силы динамического торможения дислокаций, являющихся, как известно, основными носителями пластической деформации. Отрицательная скоростная зависимость означает, что сила торможения дислокации уменьшается при увеличении скорости её движения. Торможение дислокации осуществляется структурными дефектами различного типа, его величина определяется в первую очередь концентрацией и мощностью этих дефектов. При реализации высокоэнергетических внешних воздействий на металлы и сплавы дислокации разгоняются до огромных скоростей, составляющих десятки и даже сотни метров в секунду, а скорость пластической деформации может при этом достигать значений от 10^3 с$^{-1}$ до 10^9 с$^{-1}$. В результате кинетическая энергия дислокаций превосходит энергию взаимодействия со структурными дефектами, поэтому дислокации преодолевают их динамическим образом, то есть без помощи тепловых флуктуаций. Такое дислокационное движение принято называть надбарьерным или динамическим. Высокоэнергетическим нагрузкам металлы и сплавы могут быть подвержены как на стадии производства (штамповка, ковка, динамическое канально-угловое прессование, высокоскоростная обработка, резка), так и в процессе эксплуатации [4-10]. В динамической

области характер взаимодействия дислокаций со структурными дефектами изменяется весьма существенно. Такие изменения связаны, во-первых, с изменением механизма диссипации энергии в этой области, во-вторых, со специфическими коллективными эффектами взаимодействия дефектов. Механизм диссипации сводится к перекачке энергии внешних нагрузок в энергию дислокационных колебаний. Коллективные эффекты в динамической области адекватно описывает теория динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [11-13]. В процессе эксплуатации металлы и сплавы могут быть подвержены радиационному облучению, что приводит к появлению специфических особенностей протекания в них неупругих процессов. Это связано с генерацией огромного количества радиационных дефектов, как точечных (вакансии, междоузельные атомы), так и наноразмерных (дислокационные петли) [2, 3].

Целью настоящей работы является анализ влияния радиационного облучения на динамическую неустойчивость движения краевых дислокаций в условиях высокоскоростной деформации металлов и сплавов.

2. Постановка задачи и результаты

Рассмотрим облучённый металл, подверженный высокоскоростному деформированию сдвиговой нагрузкой σ_{xy}^{0}. Ансамбль краевых дислокаций совершает надбарьерное скольжение вдоль оси *OX*. Плоскости дислокационного скольжения параллельны *XOZ*. Дислокационные линии параллельны оси *OZ*, векторы Бюргерса дислокаций параллельны *OX*, скорость скольжения v. Все дислокации имеют одинаковые векторы Бюргерса, модуль которых равен b. Металл содержит радиационные дефекты, как точечные, так и призматические круговые дислокационные петли, которые случайным образом распределены в плоскостях параллельных *XOZ*.

В рамках теории ДВД движение k-ой дислокации ансамбля может быть описано неоднородным волновым уравнением:

$$m\left\{\frac{\partial^2 S_k}{\partial t^2}-c^2\frac{\partial^2 S_k}{\partial z^2}\right\}=b\sum_i \sigma_{xy}^{i}-B\frac{\partial S_k}{\partial t}, \tag{1}$$

$$\sum_i \sigma_{xy}^{i}=b\left[\sigma_{xy}^{0}+\sigma_{xy}^{L}+\sigma_{xy}^{d}+\sigma_{xy}^{dis}\right]. \tag{2}$$

Здесь m – масса единицы длины дислокации, $S_k(z,t)$ – функция, определяющая положение k-ой дислокации ансамбля, c – скорость звука в металле, σ_{xy}^{L} – компонента тензора напряжений, создаваемых на линии κ-й дислокации круговыми дислокационными петлями, σ_{xy}^{d} – создаваемых там же точечными дефектами, σ_{xy}^{dis} – создаваемых другими дислокациями

ансамбля, B – фононная константа демпфирования. Функция $S_k(z,t)$ может быть представлена в виде:

$$S_k(z,t) = w_k(z,t) + vt\,. \tag{3}$$

Здесь $w_k(z,t)$ – функция, описывающая колебания дислокации, её среднее значение равно нулю.

Динамический предел текучести облучённого металла определяется полной силой динамического торможения дислокации. Эта сила сумме вкладов всех типов структурных дефектов, а каждый из этих вкладов в рамках теории ДВД может быть вычислен следующим образом:

$$F_i = Kn\int d^3q\,|q_x|\cdot\left|\sigma^i_{xy}(\vec{q})\right|^2\,\delta(q_x^2v^2-\omega^2(q_z))\,. \tag{4}$$

Здесь K – константа, зависящая от упругих модулей металла, n – объемная концентрация соответствующих структурных дефектов, $\omega(q_z)$ – спектр дислокационных колебаний, $\sigma^i_{xy}(\vec{q})$ – Фурье-образ соответствующей компоненты тензора напряжений, создаваемых дефектом данного типа.

Для вычисления этих вкладов нам необходимо знать тензор упругих напряжений, который создаётся каждым типом рассматриваемых дефектов. Наиболее сложное выражение имеют упругие поля, создаваемые зонами Гинье-Престона, которые возникают в сплавах на первой стадии старения.

Необходимую нам компоненту тензора напряжений зоны Гинье-Престона радиуса R, находящейся в плоскости *XOZ*, запишем в виде:

$$\sigma_{xy}(\mathbf{r}) = -\frac{\mu b_0 y\cos\varphi}{2(1-\gamma)R^2}J(1,1;2)\,. \tag{5}$$

Здесь γ – коэффициент Пуассона, μ – модуль сдвига, $\mathbf{r}=(x,y,z)$, $\rho=\sqrt{x^2+z^2}$, $x=\rho\cos\varphi$, $z=\rho\sin\varphi$, $J(m,n;p)$ – интегралы Лифшица-Ханкеля:

$$J(m,n;p) = \int_0^\infty J_m(k)J_n(k\frac{\rho}{R})\exp(-k\frac{|y|}{R})k^p dk\,. \tag{6}$$

Здесь $J_m(k)$ – функция Бесселя. Мы использовали преобразование Фурье:

$$f(\mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi)^2}\iint f(q_x,q_z,y)\exp(i\mathbf{q}\boldsymbol{\rho})dq_x dq_z\,. \tag{7}$$

После выполнения вычислений получим следующее выражение:

$$\sigma_{xy}(q_x,q_z,y) = \pi\mu b_0 R J_1(qR)\frac{q_x q_z}{q^2}\exp(-q\,|\,y\,|)\left(\frac{q\,|\,y\,|-\gamma}{1-\gamma}\right), \tag{8}$$

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

Как было отмечено выше, энергия внешних воздействий при надбарьерном движении дислокации перекачивается в энергию дислокационных колебаний. Эффективность этого диссипативного механизма зависит от наличия щели Δ в колебательном спектре и

значительно снижается при её появлении:

$$\omega^2(q_z) = c^2 q_z^2 + \Delta^2 . \quad (9)$$

В облучённом металле такая щель может быть создана коллективным взаимодействием с дислокацией точечных радиационных дефектов, концентрация которых может достигать весьма больших значений:

$$\Delta^2 = \chi \left(\frac{c}{b} \right)^2 \sqrt{n_p} , \quad (10)$$

здесь n_p – безразмерная концентрация точечных радиационных дефектов, χ – параметр их несоответствия.

После выполнения вычислений и математических преобразований мы можем получить следующее выражение для вклада призматических дислокационных петель в динамический предел текучести облучённого металла:

$$\sigma_L = \frac{D}{1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_L}} ; \; D = \frac{\mu n_L b^2 R}{\sqrt[4]{n\chi^2}} ; \; \dot{\varepsilon}_L = \rho R c \sqrt[4]{n\chi^2} . \quad (11)$$

Здесь μ – модуль сдвига, ρ – плотность дислокаций, $\dot{\varepsilon}$ – скорость пластической деформации, n_L – объёмная плотность дислокационных петель.

Вклад точечных радиационных дефектов может быть описан следующим выражением:

$$\sigma_p = \frac{K}{1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_p} \right)^2} ; \; K = \frac{4}{3} \frac{\mu \sqrt{n_p} \chi \dot{\varepsilon}}{\rho b c} ; \; \dot{\varepsilon}_p = \rho b c \sqrt[4]{n_p \chi^2} . \quad (12)$$

С учётом вклада точечных радиационных дефектов и фононного трения выражение, определяющее динамический предел текучести облучённого сплава, примет следующий вид:

$$\sigma = \frac{D}{1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_L}} + \frac{B}{\rho b^2} \dot{\varepsilon} + \frac{K}{1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_p} \right)^2} . \quad (13)$$

Анализ полученной зависимости показывает, что наличие в металле призматических дислокационных петель приводит к возникновению второй области отрицательной скоростной зависимости. Первая, как известно, имеет место в области независимых столкновений дислокации с точечными дефектами [13]. В этой области возникает динамическая неустойчивость дислокационного скольжения, в результате которой появляются скачки пластической деформации. Вторая область

динамической неустойчивости, как следует из полученной в данной работе формулы (13), своим появлением обязана высокой концентрации призматических дислокационных петель радиационного происхождения. Размеры этой области определяются неравенствами

$$\dot{\varepsilon}_1 < \dot{\varepsilon} < \dot{\varepsilon}_2 ;\ \dot{\varepsilon}_1 = \sqrt[4]{n_p \chi^2}\,\rho R c ;\ \dot{\varepsilon}_2 = \rho b \sqrt{\frac{\mu b c}{B}\left(\frac{n_L b R^2}{(1-\gamma)^2} + \frac{\pi}{3} n_p \chi^2\right)}. \qquad (14)$$

Здесь γ – коэффициент Пуассона.

Выполним численные оценки. Для значений $n_d = 10^{-4}$, $\chi = 3\cdot10^{-2}$, $\rho = 10^{12}$ м$^{-2}$, $R = 3\cdot10^{-9}$ м, $c = 3\cdot10^{3}$ м/с, $b = 3\cdot10^{-10}$ м, $\mu = 5\cdot10^{10}$ Па, $B = 3\cdot10^{-5}$ Па·с, $\gamma = 3\cdot10^{-1}$, $n_L = 10^{23}$ м$^{-3}$ получим $\dot{\varepsilon}_1 = 9\cdot10^{4}$ с$^{-1}$, $\dot{\varepsilon}_2 = 15\cdot10^{4}$ с$^{-1}$.

3. Заключение

Анализ надбарьерного скольжения ансамбля краевых дислокаций в облучённом металле, выполненный в рамках теории ДВД, позволяет сделать вывод о том, что призматические радиационные петли, имеющие нанометровые размеры, в случае высокой концентрации приводят к возникновению новой области динамической неустойчивости дислокационного движения, которая в свою очередь порождает скачки пластической деформации. Получены выражения, определяющие границы данной области, и выполнены численные оценки.

Полученные результаты могут быть полезными при исследовании высокоскоростной деформации облучённых металлов.

Библиографический список:

1. **Verschueren, J.** Instabiities of high speed dislocations / J. Verschueren, B. Gurrutxaga-Lerma, D.S. Balint et al. // Physics Review Letters. – 2018. – V. 121. – I. 14. P. 145502-1-145502-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.145502.
2. **Griffiths, M.** Effect of neutron irradiation on the mechanical properties, swelling and creep of austenitic stainless steels / M. Griffiths // Materials. – 2021. – V. 14. – I. 10. – Art. № 2622. – 47 p. DOI: 10.3390/ma14102622.
3. **Abernethy, R.G.** Effects of neutron irradiation on the brittle to ductile transition in single crystal tungsten / R.G. Abernethy, J.S.K.-L. Gibson, A. Giannattasio et al. // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – V. 527. – Art. №151799. – 12 p. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.151799.
4. **Gurrutxaga-Lerma, B.** Quantum statistical theory of dislocation mobility in discrete lattices / B. Gurrutxaga-Lerma // Physics Review Materials. – 2025. – V. 9. – I. 12. – P. 123605-1-123605-40. DOI: 10.1103/zzct-418n.
5. **Gurrutxaga-Lerma, B.** The mechanics and physics of high-speed dislocations: a critical review / B. Gurrutxaga-Lerma, J. Verschueren, A.P. Sutton, D. Dini // International Materials Reviews. – 2020. – V. 66. – I. 4. – P. 215-255. DOI: 10.1080/09506608.2020.1749781.
6. **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. – 22 p. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107795.
7. **Prabhakaran, S**. Laser shock peening without coating induced residual stress distribution, wettability characteristics and enhanced pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel / S. Prabhakaran, A. Kulkarni, G. Vasanth et al. // Applied Surface Science. – 2017. – V. 428. – P. 17-30. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.09.138.
8. **Walgraef, D.** Rate equation approach to dislocation dynamics and plastic deformation / D. Walgraef //

Materials Science and Engineering: A. – 2002. – V. 322. – I. 1-2. – P. 167-175. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01676-8.
9. **Tapasa, K**. Computer simulation of dislocation–solute interaction in dilute Fe–Cu alloys / K. Tapasa, D.J. Bacon, Yu.N. Osetsky // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2006. – V. 14. № 7. – P. 1153-1166. DOI: 10.1088/0965-0393/14/7/004.
10. **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. – P. 064102-1-064102-19. DOI: 10.1103/PhysRevB.105.064102.
11. **Малашенко, В.В.** Особенности сухого трения дислокаций в облучённых металлах с гигантской магнитострикцией / В.В. Малашенко // Физика твёрдого тела. – 2025. –Т. 67. – Вып. 10. – С. 1947-1950. DOI: 10.61011/FTT.2025.10.61975.259-25.
12. **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.
13. **Варюхин, В.Н.** Динамические эффекты в дефектной системе кристалла / В.Н. Варюхин, В.В. Малашенко // Известия РАН. Серия физическая. – 2018. – Т. 82. – Вып. 9. – С. 37-42. DOI: 10.1134/S0367676518090259.

References:

1. Verschueren J., Gurrutxaga-Lerma B., Balint D.S. et al. Instabiities of high speed dislocations, *Physics Review Letters*, 2018, vol. 121, issue 14, pp. 145502-1-145502-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.145502.
2. Griffiths M. Effect of neutron irradiation on the mechanical properties, swelling and creep of austenitic stainless steels, *Materials*, 2021, vol. 14, issue 10, art. no. 2622, 47 p. DOI: 10.3390/ma14102622.
3. Abernethy R.G., Gibson I.S.K.-L, Giannattasio A. et al. Effects of neutron irradiation on the brittle to ductile transition in single crystal tungsten, *Journal of Nuclear Materials*, 2019, vol. 527, art. no. 151799, 12 p. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.151799.
4. Gurrutxaga-Lerma B. Quantum statistical theory of dislocation mobility in discrete lattices, *Physics Review Materials*, 2025, vol. 9, issue 12, pp. 123605-1-123605-40. DOI: 10.1103/zzct-418n.
5. Gurrutxaga-Lerma B, Verschueren J., Sutton A.P. et al. The mechanics and physics of high-speed dislocations: a critical review, *International Materials Reviews*, 2020, vol. 66, issue 4, pp. 215-255. DOI: 10.1080/09506608.2020.1749781.
6. 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, 22 p. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107795.
7. Prabhakaran S., Kulkarni A., Vasanth G. et al. Laser shock peening without coating induced residual stress distribution, wettability characteristics and enhanced pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel*, Applied Surface Science,* 2017, vol. 428, pp. 17-30. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.09.138.
8. Walgraef D. Rate equation approach to dislocation dynamics and plastic deformation, *Materials Science and Engineering: A*, 2002, vol. 322, issue 1-2, pp. 167-175. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01676-8.
9. Tapasa K., Bacon D. J., Osetsky Yu. N. Computer simulation of dislocation–solute interaction in dilute Fe–Cu alloys, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2006, vol. 14, no. 7, pp. 1153-1166. DOI: 10.1088/0965-0393/14/7/004.
10. 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, pp. 064102-1-064102-19. DOI: 10.1103/PhysRevB.105.064102.
11. Malashenko V.V. Features of dry friction of dislocations in irradiated metals with giant magnetostriction, *Physics of the Solid State*, 2025, vol. 67, issue 10, pp. 1873-1875. DOI: 10.61011/PSS.2025.10.62640.259-25.
12. 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.
13. Varyukhin V.N., Malashenko V.V. Dynamic effects in a defective system of crystal, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics,* 2018, vol. 82, issue 9, pp. 1101-1105. DOI: 10.3103/S1062873818090253.