https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-39-107-112

ВЛИЯНИЕ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ ПРИ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ВИНТОВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В БЕЗДИССИПАТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ

Дежин В.В.
Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Ключевые слова: винтовая дислокация, изгибные колебания, собственные колебания, радиационное торможение, точечные дефекты, обобщенная восприимчивость, внутреннее трение.
Аннотация. С учетом влияния короткодействующего упругого взаимодействия винтовой дислокации с цепочками точечных дефектов найдено выражение обобщенной восприимчивости винтовой дислокации, совершающей изгибные колебания в долине рельефа Пайерлса бездиссипативного кристалла. Получено выражение для внутреннего трения в кристалле, вызванного радиационным торможением изгибных колебаний винтовой дислокации. Построены графики частотной зависимости внутреннего трения для конкретного кристалла.

INFLUENCE OF POINT DEFECTS ON INTERNAL FRICTION DURING BENDING VIBRATIONS OF SCREW DISLOCATION IN NON-DISSIPATIVE CRYSTAL

Dezhin V.V.
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Keywords: screw dislocation, bending vibrations, natural vibrations, radiation braking, point defects, generalized susceptibility, internal friction.
Abstract. Taking into account influence of short-range elastic interaction of screw dislocation with chains of point defects, expression found for generalized susceptibility of screw dislocation performing bending vibrations in the Peierls relief valley of non-dissipative crystal. Expression obtained for internal friction in crystal caused by radiation braking of screw dislocation bending vibrations. Graphs of internal friction frequency dependence for specific crystal were constructed.

Введение. Изгибные колебания краевых и винтовых дислокаций исследовались в основном в изотропной сплошной среде [1]. В реальных кристаллах препятствие движению дислокаций оказывают потенциал Пайерлса [2] и точечные дефекты [2, 3]. При колебаниях и ускоренном движении дислокаций возникает сила сопротивления за счет излучения дислокацией упругих волн (радиационное трение) [4]. Эта сила является одной из причин внутреннего трения в кристаллах. При исследовании внутреннего трения [5] упругое взаимодействие дислокаций с точечными дефектами до сих пор не рассматривалось. В связи с этим в данной статье на основе работ [6-8] изучается влияние упругого взаимодействия винтовой дислокации с точечными дефектами на малые изгибные колебания дислокации и радиационное внутреннее трение.

Вывод расчетных формул. Проведем ось Oz вдоль равновесного положения винтовой дислокации и рассмотрим малые изгибные колебания винтовой дислокации в плоскости xOz. Рассмотрим далее две цепочки точечных дефектов типа «атомы замещения» с линейной плотностью c вдоль линии дислокации в плоскости yOz на расстоянии d от дислокации. При изгибных колебаниях точки дислокации смещаются на расстояние $\xi(z,t)$ от равновесного положения, причем $\xi(z,t) << d$, так как рассматриваем малые изгибные колебания в одной долине Пайерлса. Упругое взаимодействие винтовой дислокации с точечными дефектами в изотропном случае является близкодействующим и осуществляется за счет размерного эффекта и модульного эффекта [2, 3]. Учитывая взаимодействие с цепочками точечных дефектов и напряжение Пайерлса аналогично работам [7, 8] в уравнении колебаний винтовой дислокации [6], получим выражение для обратной обобщенной восприимчивости винтовой дислокации:

$$\alpha^{-1}(k_z,\omega)=\pi\sigma_P+\frac{\mu_1\Omega_1 cb^2}{2\pi^2 d^4}\left[\frac{1-\nu}{1-2\nu}(\Omega_2/\Omega_1-1)-(\mu_2/\mu_1-1)\right]-$$

$$-\frac{\mu_1 b^2}{8\pi}\left[-k_z^2+\left(\frac{\omega^2}{s_t^2}-3k_z^2\right)\ln\frac{k_m^2}{k_z^2-\omega^2/s_t^2}+4\gamma k_z^2\ln\frac{k_m^2}{k_z^2-\omega^2/s_l^2}-4\frac{k_z^4 s_t^2}{\omega^2}\ln\frac{k_z^2-\omega^2/s_t^2}{k_z^2-\omega^2/s_l^2}\right].(1)$$

Здесь k_z – компонента волнового вектора вдоль линии дислокации, ω – частота изгибных колебаний винтовой дислокации, σ_P – напряжение Пайерлса кристалла-растворителя, μ_1 – модуль сдвига растворителя, Ω_1 – объем атома растворителя, b – длина вектора Бюргерса винтовой дислокации, ν – коэффициент Пуассона растворителя, Ω_2 – объем атома замещения, μ_2 – модуль сдвига кристалла атомов замещения, s_t и s_l – скорости поперечных и продольных звуковых волн в растворителе, k_m – максимальное волновое число, $\gamma = s_t^2/s_l^2$.

Рассмотрим два возможных случая излучения упругих волн колеблющейся дислокацией (появление мнимой части в выражении (1)). В случае $|k_z| < \omega/s_l$ аналогично [8] получим для внутреннего трения:

$$Q_1^{-1}=8\pi^2\rho_d\theta\left[\frac{\omega^2}{s_t^2}-(3-4\gamma)k_z^2\right]\left(\left\{-8\pi^2\frac{\sigma_P}{\mu_1 b^2}-4\frac{\Omega_1 c}{\pi d^4}\left[\frac{1-\nu}{1-2\nu}\left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1}-1\right)-\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}-1\right)\right]-\right.\right.$$

$$\left.-k_z^2+\left(\frac{\omega^2}{s_t^2}-3k_z^2\right)\ln\frac{k_m^2}{\omega^2/s_t^2-k_z^2}+4\gamma k_z^2\ln\frac{k_m^2}{\omega^2/s_l^2-k_z^2}-4\frac{k_z^4 s_t^2}{\omega^2}\ln\frac{\omega^2/s_t^2-k_z^2}{\omega^2/s_l^2-k_z^2}\right\}^2+$$

$$\left.+\pi^2\left[\frac{\omega^2}{s_t^2}-(3-4\gamma)k_z^2\right]^2\right)^{-1}, \qquad (2)$$

где ρ_d – плотность винтовых дислокаций, θ – ориентационный фактор винтовых дислокаций. В случае $\omega/s_l < |k_z| < \omega/s_t$ получим:

$$Q_2^{-1} = 8\pi^2 \rho_d \theta \left[\frac{\omega^2}{s_t^2} - 3k_z^2 + 4\frac{k_z^4 s_t^2}{\omega^2} \right] \left(\left\{ -8\pi^2 \frac{\sigma_P}{\mu_1 b^2} - 4\frac{\Omega_1 c}{\pi d^4} \left[\frac{1-\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1} - 1 \right) - \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right) \right] - \right.\right.$$

$$\left. -k_z^2 + \left(\frac{\omega^2}{s_t^2} - 3k_z^2 \right) \ln \frac{k_m^2}{\omega^2/s_t^2 - k_z^2} + 4\gamma k_z^2 \ln \frac{k_m^2}{k_z^2 - \omega^2/s_l^2} - 4\frac{k_z^4 s_t^2}{\omega^2} \ln \frac{\omega^2/s_t^2 - k_z^2}{k_z^2 - \omega^2/s_l^2} \right\}^2 +$$

$$\left. + \pi^2 \left[\frac{\omega^2}{s_t^2} - 3k_z^2 + 4\frac{k_z^4 s_t^2}{\omega^2} \right]^2 \right)^{-1} . \qquad (3)$$

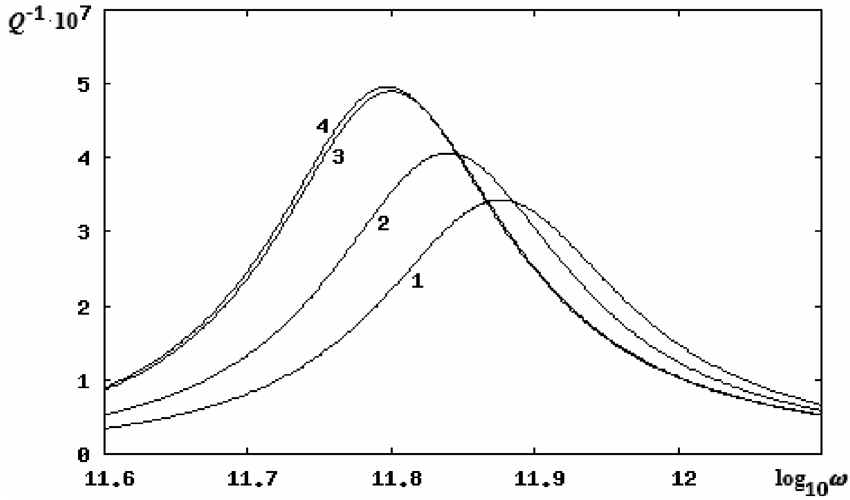
Частоту собственных колебаний винтовой дислокации для различных значений k_z находим из решения дисперсионного уравнения

$$\mathrm{Re}\,\alpha^{-1}(k_z, \omega) = \pi\sigma_P + \frac{\mu_1 \Omega_1 c b^2}{2\pi^2 d^4} \left[\frac{1-\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1} - 1 \right) - \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right) \right] - \frac{\mu_1 b^2}{8\pi} \left[4\gamma k_z^2 \ln \frac{k_m^2}{\left| k_z^2 - \omega^2/s_l^2 \right|} - \right.$$

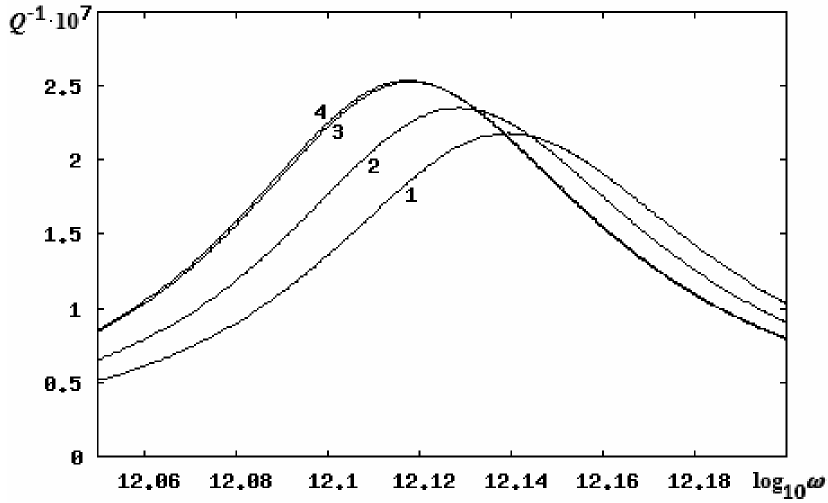
$$\left. -k_z^2 + \left(\frac{\omega^2}{s_t^2} - 3k_z^2 \right) \ln \frac{k_m^2}{\left| k_z^2 - \omega^2/s_t^2 \right|} - 4\frac{k_z^4 s_t^2}{\omega^2} \ln \left| \frac{k_z^2 - \omega^2/s_t^2}{k_z^2 - \omega^2/s_l^2} \right| \right] = 0 . \qquad (4)$$

Материал для вычислительного эксперимента. Проведем вычисления согласно полученным формулам (2-4) для кристалла меди, легированного алюминием. Кристаллы меди и алюминия имеют ГЦК решетку, кристалл меди является растворителем, атомы алюминия являются атомами замещения. Для кристалла алюминия: $\Omega_2 = 1.66 \cdot 10^{-29}$ м^3, $\mu_2 = 2.65 \cdot 10^{10}$ Па. Данные для кристалла меди: $\Omega_1 = 1.18 \cdot 10^{-29}$ м^3, параметр решетки $a = 3.615 \cdot 10^{-10}$ м, $\mathbf{b} = (a/2)[110]$, $b = 2.556 \cdot 10^{-10}$ м, $\mu_1 = 4.61 \cdot 10^{10}$ Па, $\nu = 0.35$, $s_t = 2270$ м/с, $s_l = 5010$ м/с [9], $\sigma_P/\mu_1 = 5 \cdot 10^{-4}$ [2]. Выбор кристалла меди в качестве растворителя и атомов алюминия в качестве точечных дефектов обусловлен условием решаемой задачи – точечные дефекты должны притягиваться к винтовой дислокации. Это осуществляется в случае $\Omega_2 > \Omega_1$ и $\mu_2 < \mu_1$ [3], что и выполняется для выбранных материалов.

Результаты и обсуждение. По формулам (2) и (3), принимая значения $k_m = 10^{10}$ м$^{-1}$, $\rho_d = 10^{10}$ м$^{-2}$, $\theta = 0.5$, построим графики частотной зависимости внутреннего трения $Q^{-1}(\omega)$ для $|k_z| < \omega/s_l$ (рис. 1,а) и $\omega/s_l < |k_z| < \omega/s_t$ (рис. 1, б) при различных значениях d и c. Находим частоты ω_m, соответствующие максимумам внутреннего трения на кривых 1-4 (рис. 1), и частоты ω_0 собственных изгибных колебаний винтовой дислокации из решения дисперсионного уравнения (4) при $k_z = 10^3$ м$^{-1}$ и $k_z = 10^{8.5}$ м$^{-1}$ для различных значений d и c (табл. 1).



а



б

Рис. 1. График $Q^{-1}(\omega)$ при $k_z = 10^3$ м$^{-1}$ (а) и $k_z = 10^{8.5}$ м$^{-1}$ (б);
1 – $d = a = 3.615 \cdot 10^{-10}$ м, $c = 2 \cdot 10^8$ м$^{-1}$; 2 – $d = 3.615 \cdot 10^{-10}$ м, $c = 10^8$ м$^{-1}$;
3 – $d = 2a = 7.23 \cdot 10^{-10}$ м, $c = 10^8$ м$^{-1}$; 4 – $d = 7.23 \cdot 10^{-10}$ м, $c = 10^7$ м$^{-1}$

Табл. 1. Значения частот ω_m и ω_0 для различных k_z, d и c

d, м	c, м$^{-1}$	$k_z = 10^3$ м$^{-1}$		$k_z = 10^{8.5}$ м$^{-1}$	
		ω_m, Гц	ω_0, Гц	ω_m, Гц	ω_0, Гц
$3.615 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^8$	$7.513 \cdot 10^{11}$	$8.013 \cdot 10^{11}$	$1.376 \cdot 10^{12}$	$1.412 \cdot 10^{12}$
$3.615 \cdot 10^{-10}$	10^8	$6.920 \cdot 10^{11}$	$7.350 \cdot 10^{11}$	$1.346 \cdot 10^{12}$	$1.375 \cdot 10^{12}$
$7.23 \cdot 10^{-10}$	10^8	$6.302 \cdot 10^{11}$	$6.685 \cdot 10^{11}$	$1.312 \cdot 10^{12}$	$1.340 \cdot 10^{12}$
$7.23 \cdot 10^{-10}$	10^7	$6.265 \cdot 10^{11}$	$6.640 \cdot 10^{11}$	$1.311 \cdot 10^{12}$	$1.338 \cdot 10^{12}$

Малая величина относительной разницы $\omega_0 - \omega_m$ объясняется малой величиной радиационного торможения и свидетельствует о резонансном типе пиков внутреннего трения на рисунке 1. При рассмотрении кривых $1 \to 4$ видно, что высота максимумов внутреннего трения возрастает и максимумы сдвигаются влево по частоте. Это объясняется уменьшением взаимодействия винтовой дислокации с точечными дефектами. Точечные дефекты, расположенные в плоскости yOz, притягивают к себе винтовую дислокацию и пытаются вернуть ее в положение равновесия. С уменьшением взаимодействия винтовой дислокации с точечными дефектами снижается эффективная жесткость винтовой дислокации. В результате уменьшается частота собственных изгибных колебаний винтовой дислокации. При этом увеличивается амплитуда колебаний винтовой дислокации, а значит, увеличивается излучаемая энергия за период колебаний. Это объясняет возрастание высоты максимумом кривых внутреннего трения. Кривые 3 и 4 практически сливаются, поскольку влияние точечных дефектов становится незначительным по сравнению с влиянием барьера Пайерлса. Столь быстрое снижение влияния точечных дефектов является следствием короткодействующего взаимодействия винтовой дислокации с точечными дефектами в изотропном случае.

Выводы. В результате исследования влияния точечных дефектов на внутреннее трение за счет радиационного затухания изгибных колебаний винтовой дислокации установлено: с увеличением расстояния между винтовой дислокацией и точечными дефектами и уменьшением линейной плотности точечных дефектов частота собственных изгибных колебаний винтовой дислокации уменьшается, высота максимумов внутреннего трения возрастает, и максимумы смещаются по частоте влево; пики внутреннего трения являются пиками резонансного типа; при выбранной схеме расположения точечные дефекты усиливают влияние барьера Пайерлса и эффективная жесткость винтовой дислокации увеличивается.

Эти результаты могут быть использованы для дальнейшего развития теории внутреннего трения, а также для лучшего понимания процессов в металлах при вибрационных воздействиях.

Список литературы

1. Косевич А.М. Физическая механика реальных кристаллов. – Киев: Наукова думка, 1981. – 328 с.
2. Судзуки Т., Есинага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. – М.: Мир, 1989. – 296 с.
3. Nabarro F.R.N. Solution and precipitation hardening // The physics of metals. – Cambridge: Cambridge University Press, 1975. – P. 152-188.
4. Нацик В.Д. Радиационное торможение дислокационных петель // Физика твердого тела. – 1966. – Т. 8, № 7. – С. 2244-2246.
5. Blanter M.S., Golovin I.S., Neuhäuser H., Sinning H.-R. Internal friction in metallic materials. – Berlin: Springer-Verlag, 2007. – 539 p.

6. Батаронов И.Л., Дежин В.В., Рощупкин А.М. Влияние центров пиннинга и рельефа Пайерлса на обобщенную восприимчивость дислокаций в реальных кристаллах // Известия РАН. Серия физическая. – 1993. – Т. 57, № 11. – С. 97-105.
7. Батаронов И.Л., Дежин В.В. Обобщенная восприимчивость и колебания дислокации в рельефе Пайерлса // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 500-505.
8. Дежин В.В. Собственные колебания прямолинейной краевой дислокации и дислокационное внутреннее трение в бездиссипативном кристалле при взаимодействии с точечными дефектами // Фундаментальные основы механики. – 2023. – № 12. – С. 101-105.
9. CRC Handbook of chemistry and physics / Edited by W.M. Haynes. – Boca Raton: Taylor & Francis, 2014. – 2663 p.

References

1. Kosevich A.M. Physical mechanics of real crystals. – Kyiv: Naukova Dumka, 1981. – 328 p.
2. Suzuki T., Takeuchi S., Yoshinaga H. Dislocation dynamics and plasticity. – Berlin: Springer-Verlag, 1991. – 228 p.
3. Nabarro F.R.N. Solution and precipitation hardening // The physics of metals. – Cambridge: Cambridge University Press, 1975. – P. 152-188.
4. Natsik V.D. Radiation braking of dislocation loops // Soviet Physics Solid State. 1967, vol. 8, pp. 1786-1788.
5. Blanter M.S., Golovin I.S., Neuhäuser H., Sinning H.-R. Internal friction in metallic materials. – Berlin: Springer-Verlag, 2007. – 539 p.
6. Bataronov I.L., Dezhin V.V., Roshchupkin A.M. Effect of pinning centers and Peierls relief on generalized susceptibility of dislocations in real crystals // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 1993, vol. 57, pp. 1947-1955.
7. Bataronov I.L., Dezhin V.V. Generalized susceptibility and dislocation oscillations in the Peierls relief // Fundamental problems of modern materials science. 2018, vol. 15, no. 4, pp. 500-505.
8. Dezhin V.V. Natural oscillations of rectilinear edge dislocation and dislocation internal friction in non-dissipative crystal upon interaction with point defects // Fundamental principles of mechanics. 2023, no. 12, pp. 101-105.
9. CRC Handbook of chemistry and physics / Edited by W.M. Haynes. – Boca Raton: Taylor & Francis, 2014. – 2663 p.

Дежин Виктор Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент	**Dezhin Viktor Vladimirovich** – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor
viktor.dezhin@mail.ru	

Received 20.12.2023