

О лабораторной работе по моделированию частотной зависимости внутреннего трения при колебаниях дислокационного сегмента

В. В. Дежин, email: viktor.dezhin@mail.ru

Воронежский государственный технический университет

***Аннотация.** Приведен пример лабораторной работы для студентов материаловедческих специальностей. В лабораторной работе с помощью компьютерной графики исследованы зависимости динамических характеристик дислокационного сегмента от частоты колебаний и длины дислокационного сегмента, построены графики частотной зависимости внутреннего трения при колебаниях дислокационного сегмента в диссипативной среде с учетом нелокальности динамических характеристик. Рассмотрены случаи жесткого закрепления дислокационного сегмента на точках фиксации и упругого взаимодействия сегмента дислокации с точками фиксации.*

***Ключевые слова:** Лабораторная работа, моделирование, колебания дислокационного сегмента, эффективная жесткость, эффективная масса, внутреннее трение.*

Введение

Рассматриваемая лабораторная работа является продолжением комплекса лабораторных работ, разработанных для студентов материаловедческих специальностей (например, работа, обсужденная в статье [1]). Цель данной лабораторной работы – ознакомить студентов с новыми результатами теории внутреннего трения (ВТ), дать наглядное представление о зависимости динамических характеристик дислокационного сегмента от частоты колебаний и длины дислокационного сегмента (нелокальность динамических характеристик), научить строить графики частотной зависимости ВТ.

Известно [2], что метод ВТ может быть использован для решения многих металловедческих и металлофизических задач. В частности, ВТ может предоставить интересную информацию о дислокационной структуре. Оно зависит от частоты колебаний и имеет резонансный дислокационный максимум. Резонансные максимумы появляются на высоких частотах $\sim 10^7$ - 10^{11} Гц. Их описание основано на теории Келера-Гранато-Люкке (К-Г-Л) [3, 4]. В этой теории предполагалось, что эффективная масса и эффективное натяжение дислокации постоянны.

На основе этой теории рассчитано ВТ и исследована его частотная зависимость [5]. Но, как отмечено в работах [6-9], эффективная масса и эффективное натяжение не являются локальными характеристиками дислокации. Оценки, сделанные в [6, 7], показали, что эти величины логарифмически зависят от характерной длины дислокации. В последующие годы было проведено дальнейшее развитие теории дислокационного ВТ. Отметим здесь работы [10-13]. В статье [14], используя результаты работ [15, 16], установлена нелокальность динамических характеристик дислокационного сегмента и их зависимость от расстояния между дислокацией и точками закрепления. В рассматриваемой лабораторной работе на основе результатов работы [14] и общей формулы из [17] проведено компьютерное исследование динамических характеристик и ВТ в зависимости от частоты колебаний и длины дислокационного сегмента. Также исследована зависимость ВТ от расстояния между дислокацией и точками закрепления.

1. Жесткое закрепление сегмента дислокации на точках фиксации

Из результатов работы [14] получены выражения для динамических характеристик дислокационного сегмента: C – эффективной жесткости и M – эффективной массы

$$C = \frac{\mu b^2}{4\pi} \left(1 + 2\gamma \ln \frac{q_m l}{2\pi} \right), \quad (1)$$

$$M = \frac{\rho b^2}{4\pi} \frac{5}{6} (1 + \gamma^2) \left[\ln \frac{c_t q_m}{\omega} - \frac{\gamma^2}{2} \ln \gamma + \frac{1}{5} \ln \frac{q_m l}{2\pi} - \frac{1}{20} (1 + 3\gamma^2) \right]. \quad (2)$$

Здесь μ – модуль сдвига, b – краевая компонента вектора Бюргера дислокации, $\gamma = c_t^2 / c_l^2$, c_t и c_l – скорости поперечных и продольных звуковых волн, q_m – максимальное волновое число, l – длина дислокационного сегмента, ρ – плотность вещества кристалла, ω – частота. Из формул (1) и (2) видно, что эффективная жесткость и эффективная масса дислокации не являются постоянными как в модели К-Г-Л, а зависят от длины сегмента и частоты колебаний. С целью наглядного представления этих зависимостей в лабораторной работе строятся соответствующие графики для различных металлов (по вариантам). На рис. 1-3 приведены зависимости для кристалла алюминия с параметрами: $\mu = 2,65 \cdot 10^{10}$ Па, $b = 2,86 \cdot 10^{-10}$ м, $c_t = 3130$ м/с, $c_l = 6400$ м/с, $\rho = 2700$ кг/м³; принято $q_m = 10^{10}$ м⁻¹.

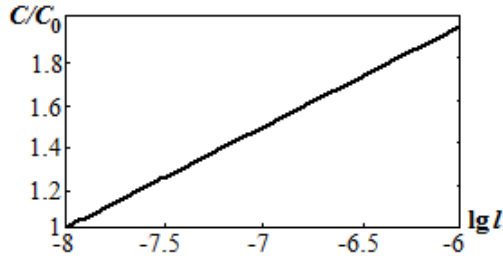
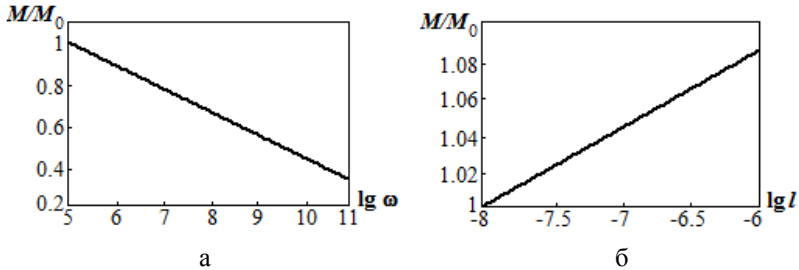


Рис. 1. Зависимость относительной эффективной жесткости дислокационного сегмента c/c_0 от логарифма длины дислокационного сегмента l , $c_0 = c (l = 10^{-8} \text{ м})$



а – $l = 10^{-7} \text{ м}$, $M_0 = M (\omega = 10^5 \text{ Гц})$, б – $\omega = 10^9 \text{ Гц}$, $M_0 = M (l = 10^{-8} \text{ м})$

Рис. 2. Зависимости относительной эффективной массы дислокационного сегмента m/m_0 от логарифма частоты ω и от логарифма длины дислокационного сегмента l

При вычислении ВТ использована формула из [17] для потерь энергии за период колебаний и результаты работы [14]. Получена следующая расчетная формула:

$$Q^{-1} = \frac{5}{6} \frac{b^2 \rho_d \mu \theta \omega B}{\left(\frac{10}{l^2} C - \omega^2 M \right)^2 + \omega^2 B^2}, \quad (3)$$

где ρ_d – плотность дислокаций, θ – ориентационный фактор, B – коэффициент торможения дислокации. На рис. 3 показана частотная зависимость внутреннего трения (3) для различных значений длины

дислокационного сегмента в предположении $\rho_d = 10^{10} \text{ м}^{-2}$, $\theta = 1$.
 Использовано значение $B = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ [18] для коэффициента
 электронного торможения дислокации в алюминии.

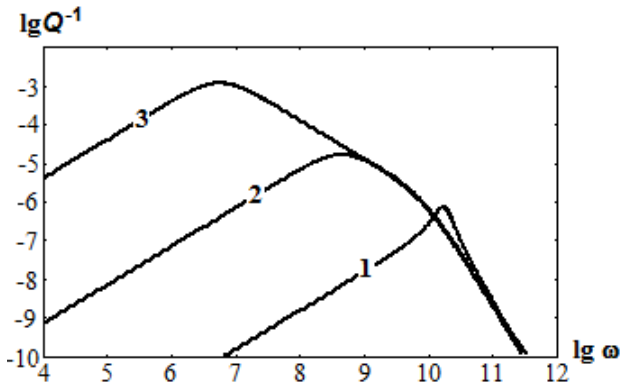


Рис. 3. Зависимость внутреннего трения Q^{-1} от частоты ω в
 логарифмических координатах для различных длин сегмента
 дислокации: 1 – $l = 10^{-8} \text{ м}$, 2 – $l = 10^{-7} \text{ м}$, 3 – $l = 10^{-6} \text{ м}$

2. Упругое взаимодействие сегмента дислокации с точками закрепления

В этом случае точки фиксации расположены на некотором
 расстоянии d от линии дислокации. Тогда, как следует из результатов
 работы [14], происходит перенормировка динамических характеристик:

$$C' = C\chi, \quad (4)$$

$$M' = \frac{\rho b^2}{4\pi} \frac{5}{6} (1 + \gamma^2) \left[\ln \frac{c_l q_m}{\omega} - \frac{\gamma^2}{2} \ln \gamma + \frac{\chi^2}{5} \ln \frac{q_m l}{2\pi} - \frac{\chi^2}{20} (1 + 3\gamma^2) \right]. \quad (5)$$

Коэффициент торможения дислокации также перенормируется:

$$B' = B(5 + \chi^2)/6. \quad (6)$$

В формулах (4)-(6) использован коэффициент χ , характеризующий силу
 упругой связи дислокации с точками закрепления. Если $\chi = 1$, то точки
 закрепления расположены на линии дислокации ($d = 0$) и мы имеем
 случай жесткого закрепления дислокационного сегмента, при
 увеличении расстояния d коэффициент χ уменьшается.

Для ВТ в случае упругого взаимодействия дислокации с точками закрепления использована следующая формула:

$$Q^{-1} = \frac{5}{6} \frac{b^2 \rho_d \mu \theta \omega B'}{\left(\frac{10}{l^2} C' - \omega^2 M' \right)^2 + \omega^2 B'^2}. \quad (7)$$

На рис. 4 представлены графики частотной зависимости внутреннего трения (7) для различных значений коэффициента χ .

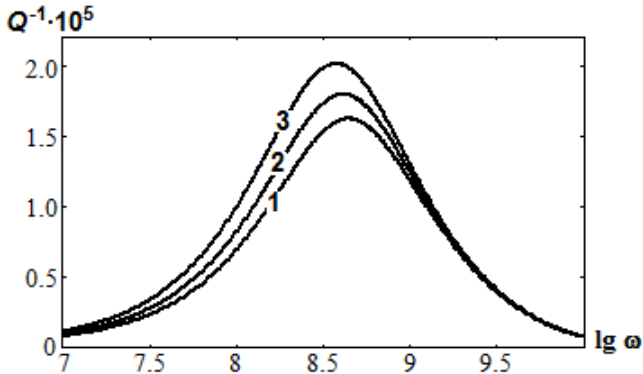


Рис. 4. Зависимость внутреннего трения Q^{-1} от логарифма частоты ω при $l = 10^{-7}$ для различных значений коэффициента упругой связи: 1 – $\chi = 1$; 2 – $\chi = 0,9$; 3 – $\chi = 0,8$

Заключение

В результате выполнения рассмотренной лабораторной работы получены следующие результаты:

- с увеличением длины сегмента дислокации эффективная жесткость значительно увеличивалась (рис. 1), а эффективная масса увеличивалась незначительно (рис. 2, б);

- с увеличением частоты эффективная масса значительно уменьшалась (рис. 2, а);

- с увеличением длины сегмента дислокации пик внутреннего трения увеличивался и смещался влево (рис. 3);

- основной эффект упругого взаимодействия дислокации с точками закрепления сводится к изменению эффективной жесткости (4);

- с уменьшением коэффициента упругой связи пик внутреннего трения увеличивался и смещался влево (рис. 4).

Автор надеется, что разработанная лабораторная работа позволит студентам материаловедческих специальностей лучше усвоить соответствующие разделы спецкурсов, изучить математические методы, освоить навыки компьютерного моделирования, а также будет полезна для дальнейшей профессиональной деятельности.

Отметим, что для построения графиков использовался пакет *Mathima* отличающийся простотой и доступностью.

Список литературы

1. Дежин, В. В. О лабораторной работе по моделированию диаграмм трехфазного равновесия с эвтектикой / В. В. Дежин // Матер. XVII Междунар. научно-методич. конф. «Информатика: проблемы, методология, технологии». Т. 5: VIII Школа-конф. «Информатика в образовании» (Воронеж, 9-10 февраля 2017 г.). – Воронеж: Издат. дом ВГУ, 2017. – С. 180-184.
2. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях / М. С. Блантер [и др.] – М. : Металлургия, 1991. – 248 с.
3. Koehler, J. S. The influence of dislocations and impurities on the damping and the elastic constants of metal single crystals / J. S. Koehler // *Imperfections in Nearly Perfect Crystals*. – New York : Wiley, 1952. P. 197-212.
4. Granato, A. V. Theory of mechanical damping due to dislocations / A. V. Granato, K. Lücke // *J. Applied Physics*. – 1956. – V. 27. – P. 583-593.
5. Granato, A. V. Application of dislocation theory to internal friction phenomena at high frequencies / A. V. Granato, K. Lücke // *J. Applied Physics*. – 1956. – V. 27. – P. 789-805.
6. Eshelby, J. D. The equation of motion of a dislocation / J. D. Eshelby // *Physical Review*. – 1953. – V. 90. – P. 248-255.
7. Косевич, А. М. Динамическая теория дислокаций / А. М. Косевич // *Успехи физических наук*. – 1964. – Т. 84, № 4. – С. 579-609.
8. Bross, H. Continuum theory and string model of moving dislocations / H. Bross, G. Stenzel // *Physics Letters A*. – 1967. – V. 25. – Is. 3. – P. 236-237.
9. Ninomiya, T. Eigenfrequencies in a dislocated crystal / T. Ninomiya // *Fundamental aspects of dislocations theory*. – New York : National Bureau of Standards. – 1970. – Special Publication 317. – V. 1. – P. 315-357.
10. Камаева, О. В. Амплитудно-независимое дислокационное внутреннее трение при случайных внешних воздействиях / О. В. Камаева, В. М. Чернов // *Физика твердого тела*. – 2002. – Т. 44, вып. 9. – С. 1601-1608.

11. Красильников, В. В. Внутреннее трение солитонной модели дислокационной динамики в кристаллах / В. В. Красильников, С. Е. Савотченко, И. В. Удовенко // Известия Тульского государственного университета. Сер. Физика. – 2005. – № 5. – С. 71-79.
12. Churochkin, D. V. Low-temperature internal friction and thermal conductivity in plastically deformed metals due to dislocation dipoles and random stresses / D. V. Churochkin, S. Sahling, V. A. Osipov // Physical Review B. – 2005. – V. 72. – P. 014116.
13. Interaction between an elastic wave and a single pinned dislocation / A. Maurel [et al.] // Physical Review B. – 2005. – V. 72. – P. 174110.
14. Батаронов, И. Л. Динамические характеристики дислокации и дислокационное АНВТ / И. Л. Батаронов, В. В. Дежин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2006. – Т. 2, № 8. – С. 15-18.
15. Батаронов, И. Л. Влияние центров пиннинга и рельефа Пайерлса на обобщенную восприимчивость дислокаций в реальных кристаллах / И. Л. Батаронов, В. В. Дежин, А. М. Рощупкин // Известия Российской академии наук. Сер. физическая. – 1993. – Т. 57, № 11. – С. 97-105.
16. Батаронов, И. Л. Функция отклика дислокации, взаимодействующей с точечными дефектами / И. Л. Батаронов, В. В. Дежин, А. М. Рощупкин // Известия Российской академии наук. Сер. физическая. – 1995. – Т. 59, № 10. – С. 60-64.
17. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т. V. Статистическая физика. Ч. 1. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2002. – 616 с.
18. Hikata, A. Interaction of dislocations with electrons and with phonons / A. Hikata, R. A. Johnson, C. Elbaum // Physical Review B. – 1970. – V. 2. – P. 4856-4863.