О ДИНАМИЧЕСКОМ ТОРМОЖЕНИИ ИЗГИБНЫХ КОРОТКОВОЛНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДИСЛОКАЦИЙ

Батаронов И.Л., Дежин В.В.

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
viktor.dezhin@mail.ru

В работе исследовались изгибные коротковолновые колебания дислокаций, вызванные внешним воздействием произвольной частоты. Линия дислокации располагалась вдоль оси z. Рассматривались малые колебания дислокаций в диссипативной среде. Для этого случая, используя результаты работы [1], записано выражение мнимой части обратной обобщенной восприимчивости дислокации в диссипативном кристалле:

$$\begin{aligned}
\operatorname{Im} g^{-1}\left(k_z,\omega\right) = &-\frac{\mu b_s^2}{2\pi}\omega\int_{|k_z|}^{k_m} k\,dk\left\{\frac{\gamma_t}{c_t^2k^2}+\frac{1}{\left(c_t^2k^2-\omega^2\right)^2+4\omega^2\gamma_t^2}\left(\frac{\omega^4\gamma_t}{c_t^2k^2}+\right.\right.\\
&\left.+3k_z^2c_t^2\gamma_t-\frac{4k_z^4c_t^2\gamma_t}{k^2}+\frac{12k_z^2\omega^2\gamma_t^3}{c_t^2k^4}-\frac{16k_z^4\omega^2\gamma_t^3}{c_t^2k^6}-\frac{6k_z^2\omega^2\gamma_t}{k^2}+\frac{8k_z^4\omega^2\gamma_t}{k^4}\right)+\\
&+\frac{1}{\left(c_l^2k^2-\omega^2\right)^2+4\omega^2\gamma_l^2}\left(4k_z^2c_t^2\gamma_l-\frac{4k_z^4c_t^2\gamma_l}{k^2}-\frac{16k_z^2\omega^2\gamma_t^2\gamma_l}{c_t^2k^4}+\right.\\
&\left.\left.+\frac{16k_z^4\omega^2\gamma_t^2\gamma_l}{c_t^2k^6}-8k_z^2c_l^2\gamma_t+\frac{8k_z^2\omega^2\gamma_t}{k^2}+\frac{8k_z^4c_l^2\gamma_t}{k^2}-\frac{8k_z^4\omega^2\gamma_t}{k^4}\right)\right\}-\\
&-\frac{\mu b_e^2}{2\pi}\omega\int_{|k_z|}^{k_m} k\,dk\left\{\frac{\gamma_t}{c_t^2k^2}-\frac{2\gamma_t}{c_l^2k^2}+\frac{c_t^2\gamma_l}{c_l^4k^2}+\frac{\omega^2\gamma_t^2}{\left(c_t^2k^2-\omega^2\right)^2+4\omega^2\gamma_t^2}\left(\frac{\omega^2}{c_t^2k^2\gamma_t}+\right.\right.\\
&\left.+\frac{k_z^4c_t^2}{k^2\omega^2\gamma_t}+\frac{4k_z^4\gamma_t}{c_t^2k^6}-\frac{2k_z^4}{k^4\gamma_t}\right)+\frac{\omega^2\gamma_l^2}{\left(c_l^2k^2-\omega^2\right)^2+4\omega^2\gamma_l^2}\left(\frac{2c_t^2}{c_l^2\gamma_l}-\frac{c_t^2\omega^2}{c_l^4k^2\gamma_l}-\right.\\
&-\frac{4c_t^2\gamma_l}{c_l^4k^2}-\frac{2c_t^2k_z^2}{\omega^2\gamma_l}+\frac{k_z^4c_t^2}{k^2\omega^2\gamma_l}+\frac{8k_z^2\gamma_t^2}{c_t^2k^4\gamma_l}-\frac{4\gamma_t^2}{c_t^2k^2\gamma_l}-\frac{4k_z^4\gamma_t^2}{c_t^2k^6\gamma_l}-\frac{2\gamma_t}{\gamma_l^2}+\\
&\left.\left.+\frac{2\omega^2\gamma_t}{c_l^2k^2\gamma_l^2}+\frac{4k_z^2c_l^2\gamma_t}{\omega^2\gamma_l^2}-\frac{4k_z^2\gamma_t}{k^2\gamma_l^2}+\frac{8\gamma_t}{c_l^2k^2}-\frac{2k_z^4c_l^2\gamma_t}{k^2\omega^2\gamma_l^2}+\frac{2k_z^4\gamma_t}{k^4\gamma_l^2}\right)\right\}.
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь μ – модуль сдвига кристалла, b_s и b_e – винтовая и краевая компоненты вектора Бюргерса дислокации, k – волновое число, k_z – компонента волнового вектора вдоль линии дислокации, k_m – максимальное волновое число, $\gamma_t(k)$ и $\gamma_l(k)$ – коэффициенты затухания поперечных и продольных звуковых волн в диссипативной среде, c_t и c_l – скорости поперечных и продольных звуковых волн в бездиссипативном кристалле, ω – частота. Проведена оценка записанных интегралов для механизма электронного торможения дислокаций. Тогда в рассматриваемом коротковолновом случае ($1 \ll |k_z l| \ll k_m l$) коэффициенты затухания $\gamma_t(x)=\dfrac{4}{3\pi}\gamma_0 x$ и $\gamma_l(x)=\dfrac{\pi}{6}\gamma_0 x$ [2], где l – длина свободного пробега электрона, $x=kl$ – безразмерная переменная, γ_0 – константа, зависящая от материала. Учет главных по k членов в выражении (1) приводит к необходимости вычисления интегралов

$$\int\limits_{|k_z l|}^{k_m l} dx\,,\quad \int\limits_{|k_z l|}^{k_m l} \frac{x^2dx}{\left(x^2-\dfrac{l^2\omega^2}{c_t^2}\right)^2+\dfrac{64 l^4\omega^2\gamma_0^2}{9\pi^2 c_t^4}x^2}\,,\quad \int\limits_{|k_z l|}^{k_m l} \frac{x^2dx}{\left(x^2-\dfrac{l^2\omega^2}{c_l^2}\right)^2+\dfrac{\pi^2 l^4\omega^2\gamma_0^2}{9 c_l^4}x^2}\,. \tag{2}$$

Первый интеграл в (2) соответствует торможению прямолинейной дислокации и дает следующий вклад в мнимую часть обратной обобщенной восприимчивости дислокации:

$$-\omega B_s-\omega B_e=-\frac{2}{3\pi}\frac{\mu b_s^2}{c_t^2}\omega\gamma_0(k_m l)-\frac{1}{2\pi}\frac{\mu b_e^2}{c_t^2}\omega\gamma_0\left(\frac{3}{4\pi}-\frac{8}{3\pi}\frac{c_t^2}{c_l^2}+\frac{\pi}{6}\frac{c_t^2}{c_l^2}\right)(k_m l)\,. \tag{3}$$

Второй и третий интегралы в (2) дают вклад в мнимую часть обратной обобщенной восприимчивости дислокации, соответствующий дополнительной диссипации энергии за счет изгибных колебаний дислокации:

$$-\frac{3}{4\pi}b_s^2\frac{\mu(k_z l)^2}{l^2}\operatorname{arctg}\frac{8l^2\omega\gamma_0}{3\pi c_t^2|k_z l|}+\left(\frac{16}{\pi^3}-\frac{1}{\pi}\frac{c_t^2}{c_l^2}\right)b_s^2\frac{\mu(k_z l)^2}{l^2}\operatorname{arctg}\frac{\pi l^2\omega\gamma_0}{3c_l^2|k_z l|}-$$
$$-\left(\frac{8}{\pi^3}-\frac{1}{2\pi}\frac{c_t^2}{c_l^2}\right)b_e^2\frac{\mu(k_z l)^2}{l^2}\operatorname{arctg}\frac{\pi l^2\omega\gamma_0}{3c_l^2|k_z l|}\,. \tag{4}$$

В итоге для мнимой части обратной обобщенной восприимчивости дислокации в диссипативном кристалле получено:

$$\operatorname{Im} g^{-1}(k_z,\,\omega)=-\frac{2}{3\pi}\rho b_s^2\omega\gamma_0(k_m l)-\frac{1}{2\pi}\left(\frac{3}{4\pi}-\frac{8}{3\pi}\frac{c_t^2}{c_l^2}+\frac{\pi}{6}\frac{c_t^2}{c_l^2}\right)\rho b_e^2\omega\gamma_0(k_m l)-$$
$$-\frac{3}{4\pi}b_s^2\frac{\mu(k_z l)^2}{l^2}\operatorname{arctg}\frac{8l^2\omega\gamma_0}{3\pi c_t^2|k_z l|}+\left(\frac{8}{\pi^3}-\frac{1}{2\pi}\frac{c_t^2}{c_l^2}\right)\left(2b_s^2-b_e^2\right)\frac{\mu(k_z l)^2}{l^2}\operatorname{arctg}\frac{\pi l^2\omega\gamma_0}{3c_l^2|k_z l|}\,,$$

где ρ – плотность материала. Заметим, что при малых значениях частоты выражение (4) переходит в

$$-\left(\frac{2}{\pi^2}-\frac{48}{\pi^2}\frac{c_t^2}{c_l^2}+3\frac{c_t^4}{c_l^4}\right)\rho b_s^2\omega\gamma_0|k_z l|-3\left(\frac{8}{\pi^2}-\frac{1}{2}\frac{c_t^2}{c_l^2}\right)\frac{c_t^2}{c_l^2}\rho b_e^2\omega\gamma_0|k_z l|\,.$$

Этот результат с точностью до коэффициента совпадает с предельным результатом, полученным в работе [1].

Список литературы

1. Рощупкин, А.М. Обобщенная восприимчивость дислокации в диссипативном кристалле [Текст] / А.М. Рощупкин, И.Л. Батаронов, В.В. Дежин // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1995. Т. 59, № 10. С. 12-16.
2. Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел [Текст] / Чарльз Киттель; перевод с англ. А.А. Гусева. – М.: Наука, 1967. 492 с.