

УДК 539.67

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА АМПЛІТУДНОЗАЛЕЖНЕ ВНУТРІШНЄ ТЕРТЯ В ЦИНКУ

О. Г. Зільберман, В. Я. Платков

Залежність внутрішнього тертя від амплітуди коливань зумовлена відривом дислокацій від центрів закріплення. Цей самий процес істотно впливає на рух дислокацій у кристалі в області середніх і низьких значень швидкості. Тому дослідження амплітуднозалежного внутрішнього тертя може бути джерелом інформації про динамічну поведінку дислокації. У зв'язку з тим, що термічні флуктуації впливають на процес відривання дислокацій, важливе значення мають дані про вплив температури на амплітуднозалежне внутрішнє тертя і особливо в низькотемпературній області. Особливий інтерес являє одержання таких залежностей для монокристалів цинку, які мають декілька нерівноцінних систем ковзання.

У цій роботі досліджується вплив температури на дислокаційне амплітуднозалежне внутрішнє тертя монокристалів цинку.

Методика експерименту

Внутрішнє тертя вимірювалось методом подвійного складеного осцилятора на частоті 78 кгц [1, 2]. При вимірюванні цим методом дисипація енергії пружних коливань відбувається не тільки у зразку, але й у склейці зразка з кварцом. Щоб звести до мінімуму втрати у склейці і одержати істинну величину декременту загасання, треба розташувати місце склейки точно у вузлі напружень. Якщо зразок і кварц склеєні у вузлі напружень, то власні частоти пружних коливань зразка і кварцу збігаються. Втратами у склейці нехтують, коли різниця власних частот не перевищує величину $\Delta\nu = 0,005 \nu$ кв. Якщо вимірювання провадяться не при одній температурі, а в деякому інтервалі, то величина $\Delta\nu$ змінюється, оскільки при зміні температури частота власних коливань зразка змінюється, а частота власних коливань кварцу у таких вимірюваннях практично залишається постійною. Тому в даній роботі, щоб провести вимірювання при двох температурах T_1 і T_2 і щоб величина втрат у склейці при T_1 і T_2 була однією й тією ж, вихідне значення величини $\Delta\nu$ при T_1 вибиралось так, щоб при переході до T_2 величина $\Delta\nu$ спочатку зменшувалась, а потім, змінивши свій знак, знову зростала і при T_2 досягала значення $\Delta\nu$. При цьому амплітуда напружень у площині склейки при T_1 дорівнювала амплітуді при T_2 , втрати в склейці при T_1 і T_2 були однаковими і, якщо декремент загасання при переході від T_1 до T_2 змінювався, то це було наслідком зміни поглинання у самому зразку. Відмітимо, що, якщо не враховувати зміни величини $\Delta\nu$ з температурою, то втрати у склейці сильно спотворюють результати по впливу температури на амплітуднозалежне внутрішнє тертя.

Монокристали цинку вирощувались з сировини чистотою 99,99% у вакуумі методом Бріджмена у розбірній графітовій формі. Переріз монокристала дорівнював перерізу кварцу.

Результати і їх обговорення

Досліджувалась амплітудна залежність внутрішнього тертя монокристалів цинку різної орієнтації. На рис. 1 наведено вимірювання при кімнатній температурі амплітудну залежність внутрішнього тертя зразків з різним Θ , де Θ — кут між віссю зразка і кристалографічною віссю шостого порядку. Амплітуднозалежне внутрішнє тертя зразків з різним Θ має істотні відмінності. В міру збільшення Θ амплітудна залежність внутрішнього тертя стає більш яскраво вираженою. Крім того, на кривій амплітудної залежності внутрішнього тертя спостерігається макси-

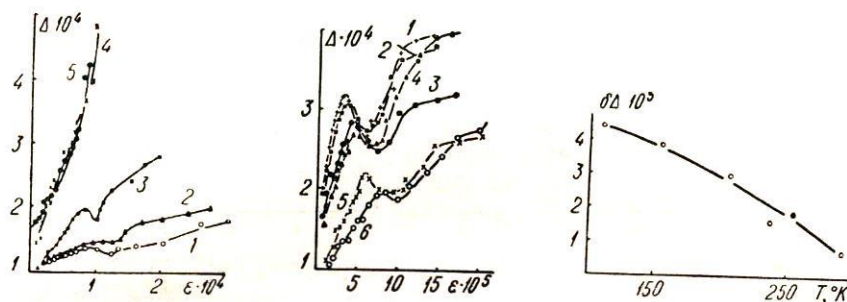


Рис. 1. Амплітудна залежність внутрішнього тертя монокристалів цинку різної орієнтації при $T=295^\circ\text{K}$: 1 — $\Theta=0^\circ$, 2 — $2^\circ30'$, 3 — $15^\circ30'$, 4 — 19° , 5 — 30° .

Рис. 2. Вплив температури на амплітуднозалежне внутрішнє тертя монокристала з $\Theta=15^\circ30'$: 1 — 109, 2 — 153, 3 — 206, 4 — 236, 5 — 257, 6 — 295°K .

Рис. 3. Залежність висоти максимуму внутрішнього тертя від температури ($\Theta=15^\circ30'$).

мум, який збільшується в міру зростання кута Θ від 0 до 20° . При подальшому збільшенні Θ такий максимум не спостерігається, а декремент загасання амплітуди.

Вплив орієнтації на внутрішнє тертя цинку докладно досліджувався тільки в амплітуднозалежній області [2—10]. Щодо амплітуднозалежного внутрішнього тертя монокристалів цинку різної орієнтації, то воно вивчалось обмежено [10—12], причому максимум на амплітудній залежності внутрішнього тертя раніше не спостерігався. У з'ясуванні механізмів, які відповідають за характер внутрішнього тертя, важлива роль належить даним про вплив температури на амплітудну залежність декременту загасання особливо в низькотемпературній області. Проте, такі дані відсутні. Тільки в роботі [12] досліджувалась зміна амплітуднозалежного внутрішнього тертя з температурою, але у високо-температурній області.

У цій роботі досліджувався вплив температури на амплітуднозалежне внутрішнє тертя в інтервалі $100\text{—}300^\circ\text{K}$. Результати вимірювань амплітуднозалежного внутрішнього тертя монокристалів з орієнтацією $\Theta=15^\circ30'$ наведено на рис. 2. Видно, що в міру збільшення температури висота максимуму зменшується і змінюється його положення. Важливо відмітити, що в області амплітуд $(1\text{—}5) \cdot 10^{-5}$ похідна $\frac{d\Delta}{d\varepsilon}$ в міру збіль-

шення температури зменшується. Аналогічна тенденція є і в області амплітуд, більших, ніж амплітуда, яка відповідає максимуму ε_m . При найбільших з використаних у наших дослідах амплітудах амплітуднозалежне внутрішнє тертя наближається до насичення у всьому температурному інтервалі. На рис. 3 наведено залежність висоти максимуму від температури, а з рис. 4 випливає, що збільшення температури супрово-

джується зростанням ε_m , тобто при підвищенні температури максимум зміщується в бік більших значень амплітуд. За висоту максимуму приймалась різниця значень декременту в максимумі і в наступному мінімумі.

Дослідження впливу температури на амплітудну залежність внутрішнього тертя монокристалів з малим Θ показало (рис. 5), що при зниженні температури на кривій амплітуднозалежного внутрішнього тертя починає з'являтися слабо виражений максимум. Однак висота цього максимуму навіть при найнижчій з використаних температур набагато менша, ніж висота максимуму для зразків з середніми значеннями кута

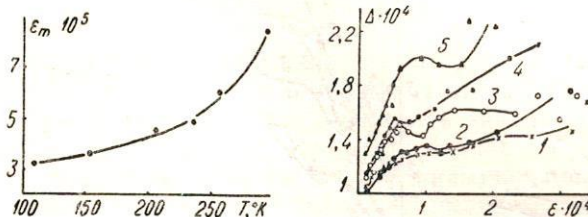


Рис. 4. Залежність ε_m від температури ($\Theta = 15^\circ 30'$).

Рис. 5. Вплив температури на амплітуднозалежне внутрішнє тертя монокристала з $\Theta = 0^\circ$: 1 — 295, 2 — 278, 3 — 234, 4 — 207, 5 — 167° К.

Θ . У той же час для зразків з малим Θ амплітуди, що відповідають максимумам, мають значення, близькі до значень для зразків з $\Theta \approx 15^\circ$. З рис. 5 також випливає, що при орієнтації $\Theta = 0^\circ$, як і при $\Theta \approx 15^\circ$, в інтервалі амплітуд $(1 \div 5) \cdot 10^{-5}$ похідна $\frac{d\Delta}{d\varepsilon}$ зменшується в міру збільшення температури.

При трактуванні результатів дослідження амплітуднозалежного внутрішнього тертя найбільше поширення одержала теорія Гранато і Люкке [13]. Ця теорія розглядає атермічне відривання дислокацій від центрів закріплення і передбачає монотонне збільшення втрат в міру зростання амплітуди. Розгляд у цій теорії обмежений порівняно невеликою областю амплітуд. Розвиток теорії дислокаційних амплітуднозалежних втрат з врахуванням термічної активації процесу відкріплення дислокацій наведено у роботах [14—18]. Спостережувану у наших дослідках зміну амплітуднозалежного внутрішнього тертя з температурою не вдається зрозуміти в рамках цих теорій, оскільки вони передбачають збільшення похідної $\frac{d\Delta}{d\varepsilon}$ в міру зростання температури, тобто протилежне тому, яке випливає з рис. 2 і 5. Теорії [13—15, 17, 18] не передбачають максимуму на амплітудній залежності внутрішнього тертя.

У роботах [16] і [19—21] запропоновано теорію амплітуднозалежного внутрішнього тертя, зумовленого термомеханічним відриванням дислокацій від ряду еквідистантно розташованих центрів закріплення. Розгляд проведено в широкому інтервалі амплітуд і температур, а в [19] показано відміну в процесах відкріплення дислокації в різних областях значень цих параметрів. Важливо відмітити, що теорія [19] передбачає яскраво виражену немонотонність амплітудної залежності внутрішнього тертя і у випадку довгих дислокаційних петель максимум на амплітудній залежності. Щодо цього максимуму, то його лівий і правий боки повинні істотно відрізнятися, лівий бік, описуваний експоненціальною залежністю, істотно крутіший, ніж правий, який описується

степеневую залежністю. Таке передбачення теорії не узгоджується з виглядом максимуму амплітуднозалежного внутрішнього тертя, спостережуваного у наших дослідах, який, як видно з рис. 2, симетричний. З [16, 19] випливає, що при збільшенні температури максимум повинен зміщуватись у бік менших амплітуд і при цьому, згідно з [19], лівий бік максимуму може істотно змінити свій вигляд. У наших же дослідах спостерігалось протилежне зміщення максимуму і при цьому його форма фактично не змінювалась. Ці факти свідчать про те, що у даному випадку або відривання дислокацій не є термофлуктуаційним і температурна залежність визначається температурною залежністю одного з параметрів, що впливають на процес відривання, або роль термоактиваційного процесу маскується сильною температурною залежністю такого параметра.

Відмітимо, що одержані результати не вдається зрозуміти не тільки в рамках існуючих конкретних теорій термоактивованого дислокаційного гістерезису, але й на основі загальних уявлень про термоактивований характер процесу відкріплення дислокацій. Тому результати обговорюватимемо, виходячи з уявлень про атермічне відкріплення дислокацій.

У роботі [22] при розгляді атермічного відкріплення дислокацій теорія дислокаційного гістерезису була поширена на випадок великих амплітуд і при цьому також було враховано зміну дислокаційних втрат динамічного типу при відриванні дислокації.

Спостережуваний у наших дослідах (рис. 1, 2, 5) немонотонний характер амплітудної залежності внутрішнього тертя узгоджується з уявленнями, розвинутими Роджерсом, і свідчить про те, що має місце відривання дислокацій різних типів. Дислокації одного типу більш рухомі в кристалі, відриваються від центрів закріплення при менших напруженнях і зумовлюють початкову ділянку амплітудної залежності. В міру збільшення амплітуди зростає число відкріплень дислокацій цього типу і збільшується внутрішнє тертя. Максимум внутрішнього тертя відповідає випадку, коли відбулися всі можливі відривання дислокацій цього типу, після чого починається зменшення амплітуднозалежного внутрішнього тертя. Початок нового збільшення внутрішнього тертя пов'язаний з відриванням дислокацій другого типу, причому відкріплення і рух цих дислокацій потребує істотно більших напружень, ніж дислокацій, які відповідають за початкову ділянку амплітуднозалежного внутрішнього тертя. Монокристали цинку мають декілька дислокаційних систем. З дослідження динаміки дислокацій у цинку випливає [23, 24], що найбільш рухомими дислокаціями є базисні (система ковзання $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$). Орієнтаційна залежність, наведена на рис. 1, свідчить про те, що дислокаціями першої системи ковзання є базисні дислокації, тому що в міру зростання компоненти напружень зсуву у площині базису при зростанні Θ амплітудна залежність в області амплітуд, нижчих від ϵ_m , стає більш яскраво вираженою. Відомо [24, 25], що в монокристалах цинку крім базисних дислокацій дуже рухомими є також пірамідальні дислокації (система ковзання $\{1122\} \langle 1123 \rangle$). Можливо ці дислокації відповідають дислокаціям другої системи.

Як вже відмічалось, у теорії Роджерса [22] не розглядалась зміна амплітуднозалежного внутрішнього тертя з температурою. У рамках цієї теорії спостережуваний вплив температури на амплітуднозалежне внутрішнє тертя можна зрозуміти, якщо врахувати температурну залежність параметрів, які впливають на процес відривання. Можливі зміни з температурою двох параметрів — коефіцієнта демпфування дислокацій і середньоефективної відстані між центрами закріплення. У ро-

боті [26] розглянуто інерційний безактиваційний механізм відривання дислокацій від центра закріплення. У цьому механізмі істотну роль відіграє динамічне гальмування дислокацій при її прогинанні між центрами закріплення: при збільшенні динамічного гальмування, яке характеризується коефіцієнтом демпфування, зменшується величина напруження, необхідного для відривання від центра закріплення. З теоретичного розгляду [27—29] механізмів гальмування дислокацій випливає, що коефіцієнт демпфування в області, що нас цікавить, сильно залежить від температури. Експериментальне дослідження [30, 31] температурної залежності в'язкого гальмування базисних дислокацій в цинку методом безпосереднього спостереження їх переміщення показує, що при зміні температури від 44 до 300° К величина коефіцієнта демпфування збільшується приблизно у вісім разів. Така зміна з температурою коефіцієнта демпфування може пояснити (в рамках інерціальної моделі) температурну залежність положення максимумів внутрішнього тертя і похідної $\frac{d\Delta}{d\epsilon}$.

Іншим можливим механізмом зміщення максимуму внутрішнього тертя може бути зміна кількості центрів закріплення на дислокації при зміні температури. Якщо при зниженні температури на дислокації додатково «конденсується» частина точкових дефектів, які знаходилися в об'ємі кристала, що приводить до зміни кількості центрів закріплення дислокації, то згідно з Роджерсом [22] таке збільшення кількості центрів закріплення повинно супроводжуватися зміщенням максимуму на амплітудній залежності внутрішнього тертя в бік великих амплітуд і крім того збільшення кількості центрів закріплення повинно супроводжуватися збільшенням висоти максимуму.

Таким чином одержані результати показують, що термічна активація процесу відкріплення дислокацій не визначає вплив температури на амплітуднозалежне внутрішнє тертя монокристалів цинку. Спостережувані важливі особливості дислокаційного поглинання можна зрозуміти в рамках атермічної теорії Роджерса, причому температурні зміни амплітуднозалежного внутрішнього тертя можуть бути наслідком або температурної залежності коефіцієнта демпфування дислокацій, або зміни з температурою кількості центрів закріплення вздовж лінії дислокації.

На закінчення вважаємо прийнятним обов'язком висловити подяку професору В. І. Старцеву за увагу до роботи і цінні дискусії і Ю. Г. Казарову за допомогу в експерименті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Е. Г. Швидковский, А. А. Дургарян, НДВШ, сер. физ.-мат., 5, 211, 1958.
2. В. Я. Платков, В. И. Старцев, ФТТ, 8, 1994, 1966.
3. T. A. Read, E. P. T. Tyndall, J. Appl. Phys., 17, 713, 1946.
4. I. H. Swift, J. E. Richardson, J. Appl. Phys., 18, 417, 1947.
5. C. A. Wert, J. Appl. Phys., 20, 29, 1949.
6. G. A. Alers, Phys. Rev., 97, 863, 1955.
7. P. C. Waterman, J. Appl. Phys., 29, 1190, 1958.
8. E. G. Henneke, R. E. Green, Jr., J. Appl. Phys., 40, 3632, 1969.
9. D. Lenz, K. Lücke, A. Osterman, W. A. Sibley, J. Acoust. Soc. America, 45, 1374, 1969.
10. Н. А. Тяпунина, С. М. Хзарджян, А. Н. Нгуен, Е. К. Наими, ФММ, 31, 872, 1971.
11. T. Read, Trans. AIME, 143, 30, 1941.
12. Я. М. Соيفер, В. Г. Штейнберг, ФММ, 29, 1274, 1970.
13. A. V. Granato, K. Lücke, J. Appl. Phys., 27, 583, 1956.
14. L. J. Teutonico, A. V. Granato, K. Lücke, J. Appl. Phys., 35, 220, 1964.

15. K. Lücke, A. V. Granato, L. J. Teutonico, *J. Appl. Phys.*, **39**, 5181, 1968.
16. P. Peguin, H. K. Birnbaum, *J. Appl. Phys.*, **39**, 4428, 1968.
17. L. J. Teutonico, K. Lücke, F. W. Heuser, A. V. Granato, *J. Acoust. Soc. America*, **45**, 1402, 1969.
18. В. Л. Инденбом, В. М. Чернов, зб. «Механизмы релаксационных явлений в твердых телах», М., «Наука», 1962, стор. 87.
19. D. G. Blair, T. S. Hutchison, D. H. Rogers, *Canad. J. Phys.*, **49**, 633, 1971.
20. D. G. Blair, T. S. Hutchison, D. H. Rogers, *Canad. J. Phys.*, **48**, 2943, 1970.
21. D. G. Blair, T. S. Hutchison, D. H. Rogers, *Canad. J. Phys.*, **48**, 2955, 1970.
22. D. H. Rogers, *J. Appl. Phys.*, **33**, 781, 1962.
23. K. H. Adams, T. Vreeland, Jr., D. S. Wood, *Mater. Sci. Eng.*, **2**, 37, 1967.
24. D. P. Pope, T. Vreeland, Jr., D. S. Wood, *J. Appl. Phys.*, **38**, 4011, 1967.
25. F. F. Lavrentev, O. P. Salita, V. L. Vladimirova, *Phys. Stat. Sol.*, **29**, 569, 1968.
26. A. V. Granato, *Phys. Rev. B*, **4**, 2196, 1971.
27. G. Leibfried, *Zs. Phys.*, **127**, 344, 1850.
28. В. И. Альшиц, *ФТТ*, **11**, 1336, 1969.
29. В. И. Альшиц, *ФТТ*, **11**, 2405, 1969.
30. D. P. Pope, T. Vreeland, Jr., *Phil. Mag.*, **20**, 1163, 1969.
31. K. M. Jassly, T. Vreeland, Jr., *Scripta Met.*, **5**, 1007, 1971.

Фізико-технічний інститут низьких температур АН УРСР,
м. Харків

Надійшла до редакції
29.XI 1972 р.

EFFECT OF TEMPERATURE ON AMPLITUDE-DEPENDENT INTERNAL FRICTION IN ZINC

O. G. Zilberman, V. Ya. Platkov

Summary

By the method of a double compound oscillator at a frequency of 78 kHz the amplitude-dependent internal friction is studied for zinc single crystals of different orientation. Maximum, the value of which depends on orientation, was observed on the curve of the amplitude-dependent internal friction. The effect of temperature (100°—300° K interval) is studied as applied to the amplitude dependence by using a peculiar procedure of making measurement of the temperature dependence for internal friction. With an increase in T the derivative $\frac{d\Delta}{d\varepsilon}$ (Δ — decrement, ε — amplitude) decreases; the amplitude at which the maximum was observed rises and the maximum height lowers. The results obtained show that in the present case the temperature dependence of internal friction is not determined by thermal activation of the process of dislocation detachment, but it may be understood within the framework of the inertial model of Granato. The presence of the maximum is in agreement with the representations developed in the theory of Rogers.