

откуда

$$r = \sqrt{\frac{(a^2 + b^2 r_0^2) e^{2b2t} - a^2}{b^2}}, \quad (12)$$

В уравнении (12) перед знаком радикала необходимо было бы поставить плюс, минус. Но учитывая, что величина радиуса является вещественной и по времени возрастающей, оставляем знак плюс.

После подстановки в уравнение (12) ранее принятых значений  $v^2$  и  $a^2$  и простых преобразований, получаем

$$r = \sqrt{\left(\frac{2V_{от}^2}{\omega^2} + \frac{gV_{от}}{\omega^3} + z_0^2\right) e^{2f\omega t} - \frac{2V_{от}^2}{\omega^2} - \frac{gV_{от}}{\omega^3}}, \quad (13)$$

Полученное уравнение (13) является уравнением кривой и полярных координатах, геометрия которой обеспечит постоянную скорость движения потока сыпучего корма по рабочим каналам.

Анализ уравнения (13) свидетельствует о том, что с возрастанием значений времени, начальной скорости и начального радиуса поступления частицы сыпучего корма в рабочий канал, а также значений коэффициента трения, возрастает и величина полярного радиуса. Значения угловой скорости вращения дозирующего диска входят в уравнение (13) в знаменателе, поэтому с возрастанием ее значения величина полярного радиуса уменьшается.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 906465 М. Кл<sup>3</sup> АОI К 5/02. Дозатор сыпучих кормов / И. Г. Бойко, И. С. Бабанских // Открытия. Изобретения, 1982. № 7.
2. Василенко П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: УСХА, 1960. 283 с.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. 6-е изд., стереотипное. М.: Гостехиздат, 1956. 608 с.

УДК 620.17:669.14.018.298

#### О МЕХАНИЗМЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПРИ МАЛЫХ АМПЛИТУДАХ ДЕФОРМАЦИИ

НОСОЛЕВ И. К., инж., ТОКИЙ В. В., профессор, докт. физ.-мат. наук,  
ПЛАТКОВ В. Я., профессор, докт. физ.-мат. наук

Неупругость, как свойство реального твердого тела, проявляется в виде двух тесно связанных эффектов — дефекта модуля упругости (ДМУ) и внутреннего трения (ВТ) [1]. Исследование неупругих эффектов является важным источником информации о дислокационной структуре твердого тела и о природе механизмов, контролирующей подвижность дислокаций в кристаллах [2]. Однако, в большинстве случаев исследуется лишь ВТ. При этом

обычно предполагается, что ДМУ никакой дополнительной информации о процессах неупругости не несет. Однако, в общем случае ВТ и ДМУ не являются тождественными характеристиками неупругости. Каждая из них отражает индивидуальную сторону процесса, например: степень раскрытия петли механического гистерезиса и нелинейность ее средней линии [1]. Поэтому наиболее полную информацию о поведении материала в условиях знакопеременного нагружения можно получить только путем одновременного измерения ВТ и ДМУ. Такие исследования были проведены лишь в небольшом числе работ [3, 4, 5]. В этих работах изучалось также отношение ВТ к ДМУ  $r$ . Теоретически оно рассматривалось в работах Гранато и Люкке [6] и К. Ишии [7].

Ранее нами [8] были предприняты исследования дислокационного ДМУ, внутреннего трения и их отношения  $r$  в широком интервале амплитуд колебаний ( $10^{-8} \div 10^{-5}$ ), в интервале  $80 \div 300$  К в отожженных и пластически деформированных монокристаллах цинка. Было установлено, что в исследуемом диапазоне температур отношение  $r$  принимает аномально высокие значения, увеличиваясь от 0,4 до  $8 \div 10$  с уменьшением амплитуды относительной циклической деформации  $\epsilon_0$ . Согласно К. Ишии [7] значение  $r$  не должно превышать 4. Полученное нами значение тем более не согласуется с теорией [6], в соответствии с которой отношение  $r$  — величина постоянная и равна единице. Для объяснения причин, приводящих к отклонению полученных результатов от существующих теоретических представлений необходимо провести одновременные измерения ВТ и ДМУ в области малых амплитуд колебаний.

## 2. Методика и экспериментальные результаты.

Одновременные измерения ВТ и ДМУ проводились на монокристаллах цинка трех ориентаций методом двойного составного вибратора на частоте продольных колебаний  $\sim 91$  кГц. Измерения проводились в интервале  $80 \div 300$  К при фиксированных значениях температуры. Точность задания и поддержания температуры была не хуже 0,1 К. Точность измерения  $\delta$  составляла  $\sim 6\%$ , точность измерения ДМУ примерно  $2 \times 10^{-3}\%$ . Измерения проводились в вакууме не хуже 13,3 Па. Ориентация образцов была такой, что обеспечивала преимущественный вклад в неупругие эффекты соответственно базисных, пирамидальных или призматических дислокаций. В соответствии с этим обозначаем образцы этих ориентаций через А, Б, В. Кроме того, измерения проводились на образцах, ориентированных таким образом, что плоскость базиса в них располагалась под углом  $38 \div 40^\circ$  к продольной оси образца. Образцы этой ориентации обозначим соответственно Г.

Результаты измерений ВТ и ДМУ в зависимости от амплитуды деформации в образцах ориентации Г при 100 К представлены на

рис. 1. Обращает внимание то, что в области малых амплитуд ( $10^{-8} \div 10^{-6}$ ) декремент  $\delta$  увеличивается с ростом амплитуды деформации  $\epsilon_0$ . При этом ДМУ в этом диапазоне амплитуд равен нулю, что подчеркивает необычный характер обнаруженного нами механизма поглощения. Согласно теории гистерезисных потерь Гранато — Люкке дислокационное АЗВТ сопровождается соответствующим ДМУ.

В настоящее время существует целый ряд представлений о механизмах поглощения, приводящих к гистерезисному ВТ в области малых амплитуд колебаний. Левин [9] и Супрун [10] объясняют действие механизма гистерезисного ВТ не отрывом, а обратимым диффузионным перемещением примесных атомов вдоль дислокации. Петухов и Поляков [11] показывают вклад геометрических перегибов в АЗВТ. Наими [12] объясняет неупругое поведение кристалла ангармонизмом вынужденных колебаний дислокаций при атермическом преодолении ими потенциальных барьеров, связанных с так называемыми «обобщенными силами покоя», что приводит к появлению амплитудной зависимости ВТ и ДМУ.

### 3. Обсуждение результатов.

Для получения дополнительной информации о природе обнаруженного нами в области малых амплитуд деформаций механизма поглощения был проведен анализ кривых ВТ и ДМУ в рамках теории Гранато — Люкке, согласно которой декремент гистерезисных потерь  $\delta_h$  зависит от степени деформации по закону:

$$\delta_h = \frac{C_1}{\epsilon_0} \exp\left(-\frac{C_2}{\epsilon_0}\right)$$

где  $\epsilon_0$  — текущая амплитуда деформации сдвига,  $C_1$  и  $C_2$  — константы материала.

С этой целью кривые  $\delta(\epsilon_0)$  и  $\frac{\Delta M}{M}(\epsilon_0)$  перестраивались в координатах  $\ln(\delta_h \cdot \epsilon_0) - \frac{1}{\epsilon_0}$  и  $\ln\left(\frac{\Delta M}{M} \cdot \epsilon_0\right) - \frac{1}{\epsilon_0}$ . Критерием применимости теории Гранато — Люкке является спрямление исследуемых зависимостей  $\delta(\epsilon_0)$  и  $\frac{\Delta M}{M}(\epsilon_0)$  в указанных координатах. Было установлено, что перестройка кривых  $\delta(\epsilon_0)$  и  $\frac{\Delta M}{M}(\epsilon_0)$  в координатах Гранато — Люкке в диапазоне  $4 \times 10^{-6} < \epsilon_0 < 3 \times 10^{-5}$  преобразует их в прямые линии с изломом, который делит их на два участка, относящихся к интервалам, охватывающим высокие ( $1 \times 10^{-5} < \epsilon_0^I < 3 \times 10^{-5}$ ) и средние ( $4 \times 10^{-6} < \epsilon_0^{II} < 1 \times 10^{-5}$ ) амплитуды деформации. В области малых амплитуд ( $10^{-8} < \epsilon_0 < 4 \times 10^{-6}$ ) зависимость  $\delta(\epsilon_0)$  не является прямой линией.

Из сказанного ясно, что во всем диапазоне исследуемых амплитуд действует три механизма ВТ, которые обозначим  $\delta_0$ ,  $\delta_1$  и  $\delta_{11}$  соответственно указанным выше интервалам амплитуд. Два механизма  $\delta_1$  и  $\delta_{11}$  являются дислокационными и связаны с представлениями о дислокации, как о струне, жестко закрепленной в узлах дислокационной сетки. Потери этого типа обусловлены механическим отрывом дислокаций от неосновных центров закрепления и называются гистерезисными. В настоящее время единого мнения о механизмах отрыва дислокаций от неосновных центров закрепления в условиях знакопеременного нагружения в области больших и средних амплитуд не существует. Так, Штерн и Гранато [13], а также Грузин и Жаров [14] предполагают существование двух типов закрепления дислокаций, один из которых сильнее, чем другой. Авторы [15] объясняют это явление различной ориентацией дислокаций к направлению приложенной силы. Кристалл и Троицкий [16] объясняют излом на зависимости  $\ln(\delta_n \cdot \epsilon_0)$  от  $\frac{1}{\epsilon_0}$  различным распределением примесных атомов в ядре и атмосфере дислокаций. При относительно малых амплитудах циклической деформации происходит отрыв дислокаций сначала от закрепляющих атомов ядра, а затем от атомов атмосферы.

Механизм  $\delta_0$ , как показывает анализ, не является струнным, поскольку в координатах Гранато — Люкке его нельзя аппроксимировать прямой линией. Действие этого механизма, как следует из эксперимента (см. рис. 1), в области малых амплитуд сопровождается отсутствием ДМУ:  $\frac{\Delta M}{M} = 0$ .

В отличие от теории гистерезисного ВТ, разработанной Гранато и Люкке для струнной модели дислокации, рассмотренные выше представления [9—12] о механизмах ВТ при малых амплитудах деформации основаны на вкладе в амплитудно-зависимое ВТ потерь, обусловленных взаимодействием упругой волны с элементами тонкого строения ядра дислокации (точечные дефекты вдоль линии дислокации, перегибы и т. д.), которые мы объединяем общим понятием — локализованные дефекты структуры.

Таким образом, можно предположить, что обнаруженный нами неструнный механизм поглощения  $\delta_0$  обусловлен, вероятнее всего, взаимодействием упругой волны с локализованными дефектами структуры. Это позволяет говорить об их определяющей роли в характере исследуемых явлений и, в частности, объяснить аномальное поведение отношения  $r(\epsilon_0)$ . Как показывает анализ, механизм  $\delta_0$  действует во всем диапазоне исследуемых амплитуд, увеличиваясь с ростом  $\epsilon_0$ . При этом относительный вклад его в процессы поглощения увеличивается с уменьшением амплитуды дефор-

мации  $\epsilon_0$  (рис. 2). При максимальной амплитуде деформации его роль в процессах поглощения становится минимальной, что и отражает вид зависимости  $r$  ( $\epsilon_0$ ), которая уменьшается по величине от  $8 \div 10$  до  $0,4$  по мере роста  $\epsilon_0$ . Методом локального анализа установлено, что именно учет неструнного механизма поглощения  $\delta$  дает значения  $r$ , близкие к единице и независимые от амплитуды деформации.

Как показали предварительные исследования, обнаруженный нами не струнный механизм поглощения действует во всем диапазоне исследуемых температур. Однако, количественных оценок по влиянию температуры и разориентации образцов на указанный механизм ВТ в этой работе мы не делали.

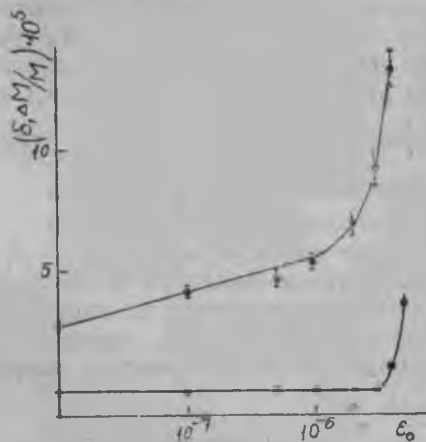


Рис. 1. Амплитудные зависимости ВТ (1) и ДМУ (2) в монокристаллах цинка (ориентация Г) при 100 К в области малых амплитуд деформаций.

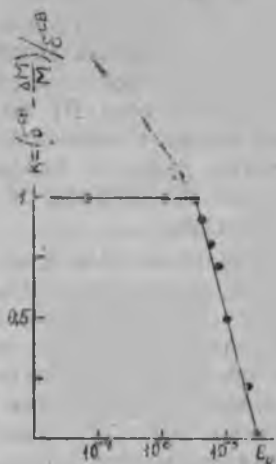


Рис. 2. Вклад не струнного механизма поглощения  $\delta$  в АЗВТ монокристаллов цинка (ориентация Г) при 100 К.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Головин С. А., Пушкар А., Левин Д. М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных материалов.—М.: Металлургия, 1987.—190 с.
  2. Никаноров С. П., Кардашев Б. К. Упругость, дислокационная неупругость кристаллов.—М.: Наука, 1985.—250 с.
  3. Полоцкий И. Г., Голуб Т. В., Кашевская О. Н. В сб. «Внутреннее трение в исследовании металлов, сплавов и неметаллических материалов»—М.: Наука, 1989—С. 133—137.
  4. Jop M. C., Mason W. P., Beshler D. N. J. Appl. Phys, 1976, v47, № 6, p 2337—2349.
  5. Van den Beukel A., den Otter G. I. Phys. Stat Sol (a), 1979, v56, № 3, p 117—127.
  6. Granato A. V., Lücke K. J. Appl. Phys, 1956, v27, № 2, p 583—592.
  7. Ishii K. J. Phys. Soc Japan, 1983, v52, № 1, p 141—148.
  8. Платков В. Я., И. К. Носолев, Известия АН. Сер. физическая. 1993, т. 57, № 11, с. 26—30.
  9. Левин Д. М. В Сб. «Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов», Тула, ТПИ, 1983, с. 17—21.
  10. Suprun I. T. Phys. Stat. Sol. (a), 1988, v107, № 1, p 141—152.
  11. Петухов Б. В., Поляков Ю. И. Кристаллография, 1990, т. 35, № 3, с. 559—563.
  12. Нанми Е. К. ФММ, 1982, т. 54, № 3, с. 601—604.
  13. Stern R. M., Granato A. V. Acta Metallurg., 1962, v10, № 4, p 358—369.
  14. Грузин П. Л., Жаров Ю. Д. ДАН СССР, 1965, т. 164, № 6, с. 1280 — 1286.
  15. Полоцкий И. Г., Беннева Т. А., Скопин В. С. УФЖ, 1968, т. 13, № 11, с. 1862—1867.
  16. Криштал М. А., Троицкий И. В. Физ. ХОМ, 1971, т. I, с. 55—63:
- УДК 669.295:620.18.620.17

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОСМЕНЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ЗМ

**ЛАВРЕНТЬЕВ Ф. Ф.**, профессор, доктор физ.-мат. наук, **НИКИ-  
ФОРЕНКО В. Н.**, канд. техн. наук, **ПЛАТКОВ В. Я.**, профессор,  
докт. физ.-мат. наук

Низкотемпературное термоциклирование и особенно циклирование под нагрузкой является перспективным методом формирования механических свойств металлических материалов. Особый интерес представляет изучение изменения при термоциклировании прочностных и пластических свойств высокоанизотропных металлов и сплавов. Тем не менее, такие сведения ограничены. В связи с этим целью нашей работы явилось исследование влияния теплосмен  $300 \rightleftharpoons 77$  К на пластические и прочностные свойства промышленного титанового сплава ЗМ, который нашел широкое применение в различных областях техники.

1. Объект и методы исследования.

Объектом исследования явился однофазный сплав титана (Ti+5%Al). Использовались стандартные круглые и плоские образцы, которые после приготовления отжигались при  $T=1000$  °С