

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АМПЛИТУДНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ АКУСТОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

© К.В.Сапожников, С.Б.Кустов

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
(Поступила в Редакцию 26 мая 1995 г.)

Зависимости величины акустопластического эффекта от амплитуды колебательной деформации измерены в широком диапазоне температур в процессе активного деформирования монокристаллов NaCl и примесного алюминия. Обнаружено возрастание эффективности ультразвукового воздействия на процесс пластического деформирования с ростом температуры. В качестве основного механизма акустопластического эффекта предлагается механическая активация необратимого движения подвижных дислокаций через дальнедействующие поля внутренних напряжений. Обсуждаются физические механизмы, определяющие зависимость величины акустопластического эффекта от температуры.

Несмотря на значительное число экспериментальных и теоретических исследований акустопластического эффекта (АПЭ) (см., например, обзор [1]), физические механизмы АПЭ остаются предметом дискуссий. Имеющиеся теоретические модели АПЭ [2-6] в основном базируются на принципе суперпозиции статических и динамических напряжений и зависимости аррениусовского типа скорости пластической деформации от напряжения. Они носят феноменологический характер и не могут объяснить всю совокупность имеющихся данных. Экспериментальные данные, в частности, по влиянию температуры на АПЭ [7-13] в свою очередь противоречивы. Настоящая работа посвящена исследованию влияния температуры на АПЭ в широком диапазоне температур и амплитуд колебаний для выявления основных физических механизмов АПЭ.

1. Методика экспериментов

Методика экспериментов подробно изложена в [14]. Отметим только, что совместная регистрация АПЭ и амплитудно-зависимого внутреннего трения (АЗВТ) производилась в процессе трехточечного изгиба образцов. Поскольку при такой схеме деформирования имеет место неоднородное напряженное состояние, в качестве меры АПЭ использовалась величина падения деформирующей нагрузки ΔP , а не деформирующего напряжения. Зависимости ΔP и АЗВТ от амплитуды колебательной деформации при различных температурах измерялись одновременно на одном и том же образце. Влияние степени предварительной деформации на величину АПЭ было меньше разброса измерений АПЭ в одном опыте (при одной температуре).

2. Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведены некоторые характерные экспериментальные зависимости величины АПЭ ΔP от амплитуды колебательной деформации ε_m для образца алюминия при различных температурах. Результаты обработки всех экспериментальных кривых представлены на рис. 2, где изображена температурная зависимость величины ΔP при фиксированной величине амплитуды колебательных напряжений σ_m ($\sigma_m = \varepsilon_m E_{100}$, где E_{100} — модуль Юнга в направлении [100]). Рис. 3 демонстрирует некоторые экспериментальные зависимости для образца NaCl; результаты обработки всех зависимостей для двух значений σ_m приведены на рис. 4.

Из рис. 2, 4 видно, что АПЭ в исследованном диапазоне температур довольно слабо зависит от температуры. В NaCl величина АПЭ отчетливо растет с увеличением температуры опыта. В случае Al эта зависимость в значительной степени маскируется разбросом экспериментальных точек. В то же время АЗВТ, измерявшееся одновременно с АПЭ, было весьма чувствительно к изменению температуры [14].

Наши данные (рис. 1, 3) подтверждают существование критической амплитуды начала проявления АПЭ, продемонстрированное в [15]. Однако отмеченное в [15] совпадение амплитуд начала проявления АПЭ и АЗВТ в наших экспериментах имело место только в области температур вблизи комнатной. При низких температурах АЗВТ начинало проявляться при меньших ε_m , чем АПЭ, а при высоких температурах — наоборот.

3. Обсуждение

Падение деформирующей нагрузки при наложении ультразвука в процессе активного деформирования происходит вследствие увеличения скорости пластической деформации. Согласно уравнению Орована, скорость пластической деформации может возрасти либо за счет увеличения средней скорости имеющихся подвижных дислокаций, либо за счет увеличения плотности подвижных дислокаций (размножение дислокаций или разблокировка состаренных дислокаций). Известно, что при размножении дислокаций возрастает фоновое внутреннее трение, так как его величина зависит от общей плотности дислокаций [16]. Однако этот критерий не всегда соблюдается. Когда общая плотность дислокаций велика, а плотность свежих дислокаций незначительна по сравнению с нею, фоновое внутреннее трение может оказаться недостаточно чувствительным к процессу размножения. Дополнительным критерием может служить наличие излома (с последующим более резким ростом) у АЗВТ, измеренного при увеличении амплитуды. Ни излом АЗВТ, ни изменение фонового трения в наших экспериментах [14] не наблюдались. Отметим, что разблокировка состаренных дислокаций требует приложения более высоких напряжений, чем облегчение движения подвижных дислокаций. Таким образом, исследуемый АПЭ был обусловлен ростом средней скорости подвижных дислокаций, а не их плотности.

Различие в температурном поведении АЗВТ и АПЭ показывает, что взаимодействие дислокаций с точечными дефектами, контролируру-

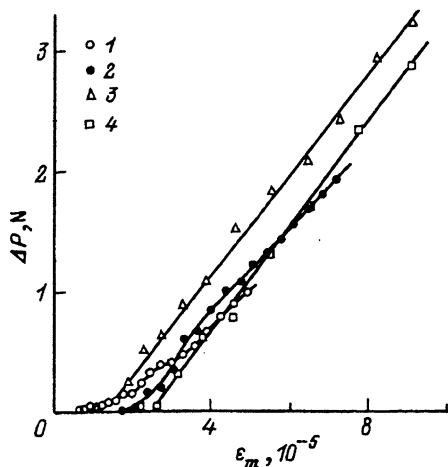


Рис. 1. Амплитудные зависимости величины АПЭ ΔP для образца алюминия, измеренные в процессе деформирования при различных температурах.
 T , (K): 1 — 160, 2 — 295, 3 — 366, 4 — 400.

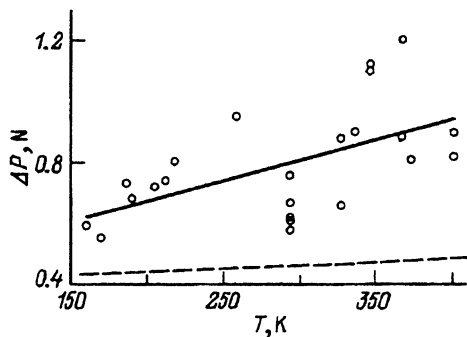


Рис. 2. Температурные зависимости величины АПЭ ΔP для образца алюминия при фиксированной величине амплитуды колебательных напряжений $\sigma_m = 2.5$ МПа.
 Данные аппроксимированы прямой линией. Штриховой линией показана зависимость величины $\Delta P(0)$, нормированной на обратную температурную зависимость модуля сдвига $G_{100}(T)$.

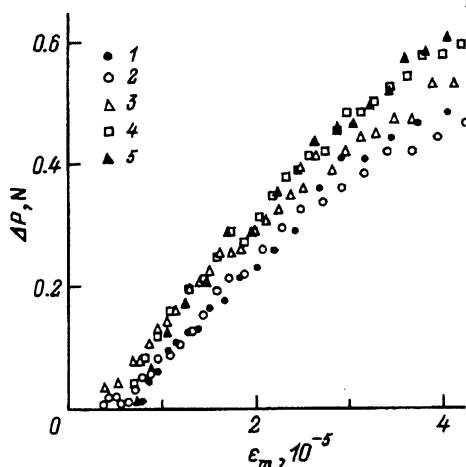


Рис. 3. Амплитудные зависимости величины АПЭ ΔP для образца NaCl при различных температурах.
 T (K): 1 — 255, 2 — 295, 3 — 345, 4 — 375, 5 — 400.

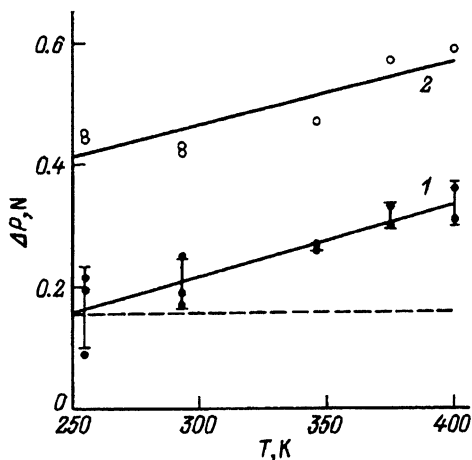


Рис. 4. Температурные зависимости величины АПЭ ΔP для образца NaCl при фиксированных величинах амплитуды колебательных напряжений.
 σ_m , (МПа): 1 — 0.75, 2 — 1.5. Данные аппроксимированы прямой линией. Штриховой линией показана зависимость величины $\Delta P(0)$, нормированной на обратную температурную зависимость модуля сдвига $G_{100}(T)$.

ющее АЗВТ [14], не является основным фактором, определяющим величину АПЭ в исследованном диапазоне температур. Более того, довольно слабая зависимость АПЭ от температуры свидетельствует о преимущественно атермическом характере АПЭ. Таким образом, в качестве основного механизма АПЭ в наших экспериментах следует признать облегчение необратимого преодоления подвижными дислокациями далекодействующих полей внутренних напряжений. Есть данные [17], что даже на ультразвуковых частотах часть АЗВТ связана с обратимым гистерезисом полей внутренних напряжений. При наличии дополнительного статического напряжения колебательное движение дислокаций в полях внутренних напряжений перестает быть полностью обратимым, так как статическое напряжение задает преимущественное направление движения. Взаимодействие же подвижных дислокаций с короткодействующими барьерами при колебательном движении нечувствительно к приложению статического напряжения вследствие эффекта короткодействия.

Рассмотрим возможные причины слабого усиления АПЭ с ростом температуры. В [11] усиление влияния ультразвука на предел прочности металлов с ростом температуры опыта предположительно связывалось с увеличением поглощения энергии колебаний в нагреваемом металле. Это предположение, по сути, является развитием принципа суперпозиции энергий [18], альтернативного принципу суперпозиции напряжений. Авторы [19] выдвинули предположение о пропорциональности величин АПЭ и АЗВТ, что также является развитием подхода [18]. Однако результаты настоящей работы свидетельствуют об отсутствии какой-либо связи между АПЭ и АЗВТ (в отсутствие размножения дислокаций под действием колебательной нагрузки) и несостоятельности энергетического подхода. Если АПЭ обусловлен только преодолением далекодействующих полей внутренних напряжений, то величина АПЭ может увеличиваться с ростом температуры лишь в силу температурной зависимости модуля сдвига. Однако в наших экспериментах АПЭ усиливается с ростом температуры быстрее, чем величина $\Delta P(0)G_{100}(0)/G_{100}(T)$, где $\Delta P(0)$ — условная величина АПЭ при $T = 0$ К, полученная экстраполяцией прямой линии, аппроксимирующей экспериментальные данные. Таким образом, можно предположить, что дополнительный вклад в температурную зависимость АПЭ дают процессы преодоления дислокациями точечных дефектов.

Ослабление АПЭ с ростом температуры, отмеченное в [7,10,12,13], не противоречит данным настоящей работы и [9,11]. Такое поведение наблюдалось при сравнительно высоких температурах, когда на величину АПЭ может оказывать влияние эффект динамического деформационного старения (ДДС). Согласно [4,12], чем меньше показатель степени m^* в уравнении $v = (\tau_e/\tau_0)^{m^*}$ (где τ_e — эффективное напряжение, τ_0 — константа, v — скорость движения дислокаций), тем меньше величина АПЭ, причем АПЭ исчезает при высоких температурах, когда m^* становится равным единице. Данные настоящей работы противоречат предсказанию модели [4], так как известно, что $m^* \propto 1/T$. С нашей точки зрения, смещение амплитудных зависимостей АПЭ к более высоким амплитудам колебаний при высоких температурах есть следствие эффекта ДДС. С ростом температуры атмосферы точечных дефектов вокруг подвижных дислокаций становятся все насыщенней,

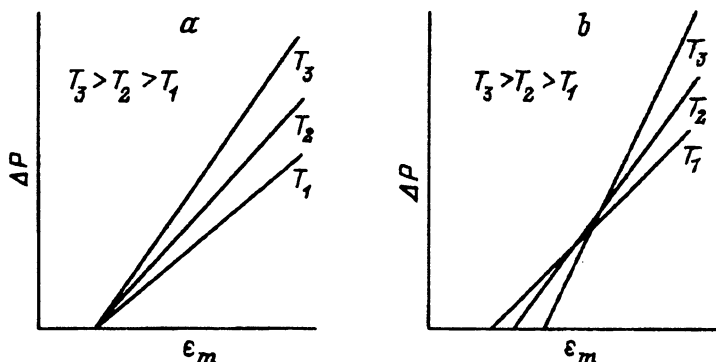


Рис. 5. Схематическое представление влияния температуры на амплитудные зависимости величины АПЭ $\Delta P(\epsilon_m)$ при умеренных (а) и высоких (б) температурах, когда накладывается влияние эффекта динамического деформационного сращения.

и скорость движения дислокаций все больше определяется скоростью диффузии атмосфер. Если температурное поведение АЗВТ является индикатором эффекта ДДС [14], то АПЭ гораздо менее чувствителен. Этот факт подтверждает предположение о том, что основной вклад в АПЭ дает движение дислокаций в дальнедействующем рельефе полей внутренних напряжений, поскольку при таком скачкообразном движении атмосферы могут теряться.

Исходя из полученных результатов и данных [7-13], можно следующим образом схематически изобразить влияние температуры на амплитудные зависимости АПЭ (рис. 5). При умеренных температурах (а) все зависимости $\Delta P(\epsilon_m)$ выходят приблизительно из одной точки на оси амплитуд, их наклон слабо увеличивается с ростом температуры. Влияние эффекта ДДС при высоких температурах (б) приводит к дополнительному смещению зависимостей вправо по оси амплитуд. Таким образом, температурная зависимость АПЭ имеет плавный максимум, причем при значительно более высокой температуре, чем температурная зависимость АЗВТ. Температура этого максимума зависит от многих параметров: материала, его примесного состава, частоты и амплитуды колебательной нагрузки, режима деформирования и др.

Полученные результаты показывают, что, даже когда АЗВТ и АПЭ обусловлены движением одних и тех же дислокаций, обсуждаемое в [1,16] совпадение критических амплитуд начала АЗВТ и АПЭ не обязательно, так как основные механизмы АЗВТ и АПЭ могут быть различными. Следовательно, факт совпадения или несовпадения критических амплитуд не позволяет делать вывод относительно общности барьеров для дислокаций при микро- и макродеформировании.

В заключение отметим, что предлагаемый основной механизм АПЭ ставит под сомнение возможность описания АПЭ, исходя из уравнения термоактивированной пластической деформации, как это было сделано в [2,3,5,6]. Автор [6] попытался учесть влияние внутренних напряжений. Однако описание процесса преодоления атермических препятствий уравнением термоактивированной пластической деформации представляется неправомерным. Формальные представления моделей

суперпозиции напряжений [2,3,5,6] не предполагают ни заметной температурной зависимости величины АПЭ, ни существования критической амплитуды АПЭ. Таким образом, имеется необходимость нового подхода к проблеме теоретического описания АПЭ. Такой подход должен учитывать возможность атермической (силовой, механически активируемой) пластичности [20,21]. Высокочастотное колебательное нагружение характеризуется высокими значениями величины σ , определяющей скорость атермической пластической деформации.

Авторы выражают благодарность С.Н.Голяндину за помощь в работе, А.Б.Лебедеву, С.П.Никанорову и Б.И.Смирнову за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Лебедев А.Б. ФТТ **35**, 9, 2305 (1993).
- [2] Baker G.S., Carpenter S.H. J. Appl. Phys. **38**, 4, 1586 (1967).
- [3] Friedrich R., Kaiser G., Pechhold W. Zs. Metallkunde **60**, 5, 390 (1969).
- [4] Endo T., Suzuki K., Ishikawa M. Trans. JIM **20**, 12, 706 (1979).
- [5] Козлов А.В., Мордюк Н.С., Селицер С.И. ФТТ **28**, 6, 1818 (1986).
- [6] Tanibayashi M. Phys. Stat. Sol. (a) **128**, 1, 83 (1991).
- [7] Lazan B.J. Proc. ASTM **49**, 757 (1949).
- [8] Nevill G.E., Jr., Brotzen F.R. Proc. ASTM **57**, 751 (1957).
- [9] Kamel R., Bessa F.A. Acta Met. **13**, 1, 19 (1965).
- [10] Sheffler K.D. Met. Trans. **3**, 1, 167 (1972).
- [11] Северденко В.П., Скрипниченко А.Л., Тявловский М.Д. Ультразвук и прочность. Минск (1979). 248 с.
- [12] Endo T., Tasaki M., Kubo M., Shimada T. Trans. JIM **23**, 11, 665 (1982).
- [13] Ушаков В.И., Омельяненко И.Ф. ФММ **65**, 5, 978 (1988).
- [14] Сапожников К.В., Кустов С.Б. ФТТ **37**, 9, 2819 (1995).
- [15] Лебедев А.Б., Кустов С.Б., Кардашев Б.К. ФТТ **24**, 10, 3169 (1982); **29**, 12, 3563 (1987).
- [16] Никаноров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М. (1985). 254 с.
- [17] Голяндин С.Н., Кустов С.Б. ФТТ **34**, 12, 3771 (1992).
- [18] Langenecker B., Jones V.O., Illiewich J. Proc. First Int. Symp. Highpower Ultrasonics / Ed. A.H.Crawford. Guildford (1972). P. 83.
- [19] Ohgaku T., Takeuchi N. Phys. Stat. Sol. (a) **105**, 1, 153 (1988).
- [20] Клявин О.В., Лихачев В.А., Никифоров А.В., Швецова В.А. Вестн. ЛГУ. Математика, механика, астрономия, 7, 75 (1978).
- [21] Alden T.H. Met. Trans. **A16**, 3, 375 (1985).