

# Влияние температуры и деформации на амплитудно-зависимое внутреннее трение высококчистого алюминия

© С.Н. Голяндин, С.Б. Кустов\*, К.В. Сапожников, Ю.А. Емельянов, А.Б. Синани, С.П. Никаноров, У.Х. Робинсон\*\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Institute de Génie Atomique, Département de Physique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,  
CH-1015 Lausanne, Switzerland

\*\* Penguin Engineering Ltd. (PEL),  
P.O.Box 33-093 Petone, New Zealand

E-mail: sapkov@ifuas.ioffe.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 10 апреля 1998 г.)

Дислокационное амплитудно-зависимое внутреннее трение (АЗВТ) высококчистого (99.999%) поликристаллического алюминия исследовано в интервале температур 7–300 К при амплитудах колебательной деформации  $10^{-7}$ – $10^{-4}$  для образцов в отожженном и деформированном состояниях (квазистатическим, ударно-волновым и ультразвуковым нагружением). В указанных интервалах температур и амплитуд колебаний АЗВТ является многостадийным. Анализ амплитудно-температурных спектров АЗВТ позволил выделить компоненты, обусловленные междислокационным взаимодействием, взаимодействием дислокаций с точечными стопорами и собственно дислокационной релаксацией (взаимодействием дислокаций с рельефом Пайерлса). Обнаружена немонотонная зависимость АЗВТ от величины предварительной квазистатической деформации, обусловленная процессами деформационного упрочнения и возврата.

Металлы с ГЦК решеткой являются классическими объектами исследований динамики материалов при высокоскоростном ударном нагружении [1]. С практической точки зрения, чистые ГЦК металлы с низкой температурой плавления являются также перспективными для использования в сейсмозащите в качестве рабочего тела демпферов экструзионного типа [2]. Метод внутреннего трения широко применяется при исследовании динамики дефектов в кристаллах. В настоящей работе исследовано влияние квазистатического, ударно-волнового и ультразвукового нагружения на амплитудно-зависимое внутреннее трение (АЗВТ) высококчистого (99.999%) алюминия. Исследования алюминия различной чистоты часто свидетельствуют о многостадийности АЗВТ, обусловленной вкладами различных микроструктурных механизмов [3–6]. К сожалению, анализ роли и взаимосвязи различных микроструктурных механизмов АЗВТ в широком интервале температур, амплитуд колебательных деформаций и после различных термомеханических обработок практически отсутствует. Чтобы получить более ясное представление о микромеханизмах АЗВТ и динамике дефектов в ГЦК металлах, было предпринято исследование АЗВТ высококчистого алюминия, подвергнутого различным механическим воздействиям, в широком интервале температур и амплитуд колебательной деформации.

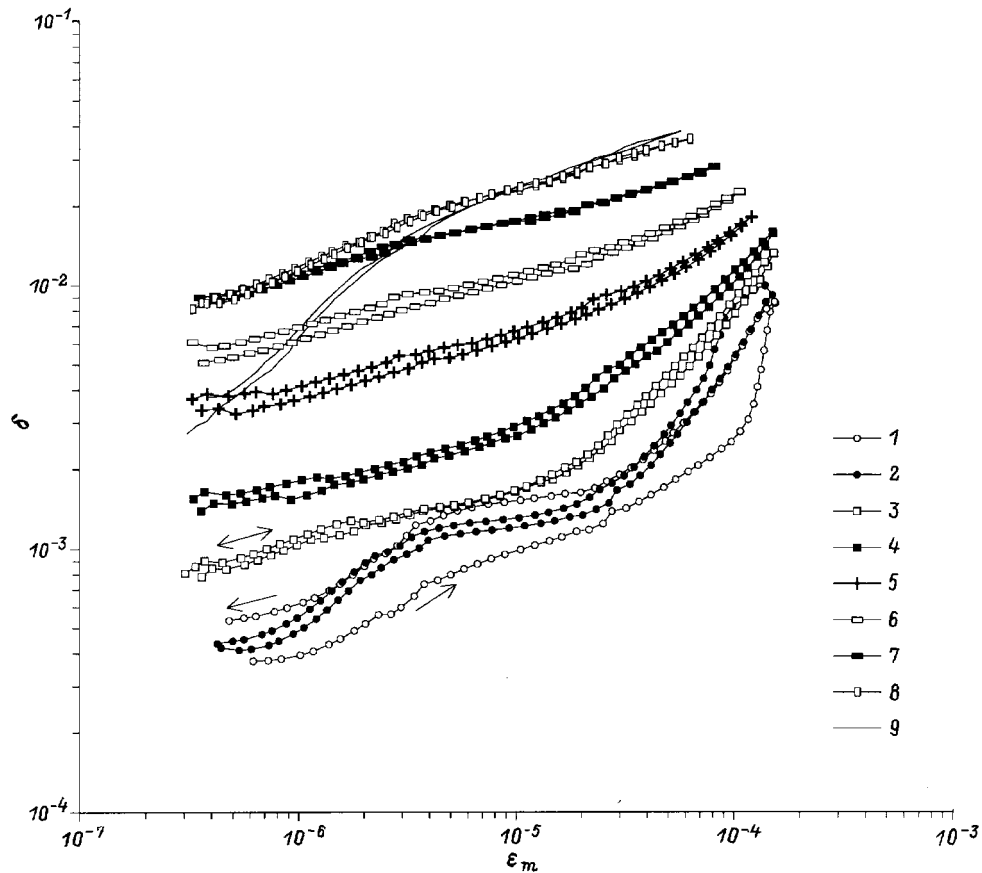
## 1. Методика эксперимента

Измерения внутреннего трения проводились методом составного пьезоэлектрического вибратора [7], использующего продольные колебания с частотой около

100 kHz. Автоматизированная установка [8] использовалась совместно с гелиевым криостатом, что позволяло одновременно регистрировать температурные спектры амплитудно-зависимого и амплитудно-независимого внутреннего трения, эффективного модуля Юнга и амплитудно-зависимого дефекта модуля Юнга в диапазоне температур 7–300 К, а также при произвольных температурах проводить измерения зависимостей внутреннего трения и дефекта модуля от амплитуды колебательной деформации в диапазоне  $10^{-7}$ – $10^{-4}$ . Скорость изменения температуры при измерениях составляла около 0.02 К/с.

Поликристаллические образцы размером около  $2 \times 3 \times 25$  mm вырезались из слитка высококчистого Al марки АЗ (чистота — 99.999%, средний размер зерна — 1 mm) электроискровым способом. После снятия поврежденного поверхностного слоя толщиной около 0.2 mm в концентрированном реактиве Келлера (100 ml  $\text{HNO}_3$ , 50 ml  $\text{HCl}$ , 1.5 ml  $\text{HF}$ ), образцы отжигались 7200 s при 420 К.

Квазистатическое деформирование образцов осуществлялось сжатием вдоль наименьшей оси в гидравлической испытательной машине "Инстрон 1341" со скоростью перемещения опор 0.002 mm/s. Высокоскоростное нагружение образцов плоской ударной волной проводилось в условиях, обеспечивающих неизменность формы образцов. Импульсы напряжения длительностью около  $2 \times 10^{-6}$  s и величиной в диапазоне  $\sigma_{\text{imp}} = 0.4$ –3.7 GPa создавались ударником, разгоняемым в легкогазовой пушке [9]. Акустическая методика позволяла производить ультразвуковое нагружение образцов с амплитудой колебательной деформации, превосходящей  $10^{-4}$ . Такая



**Рис. 1.** Зависимости декремента колебаний образца алюминия от амплитуды колебательной деформации, измеренные в процессе нагрева после деформации ультразвуком при температуре 10 К.  $T$  (К): 1 — 10, 2 — 24, 3 — 56, 4 — 86, 5 — 124, 6 — 154, 7 — 194, 8 — 255, 9 — 309.

амплитуда деформации для высокочистого алюминия соответствует диапазону, в котором имеют место микропластическое деформирование и усталостные явления [3].

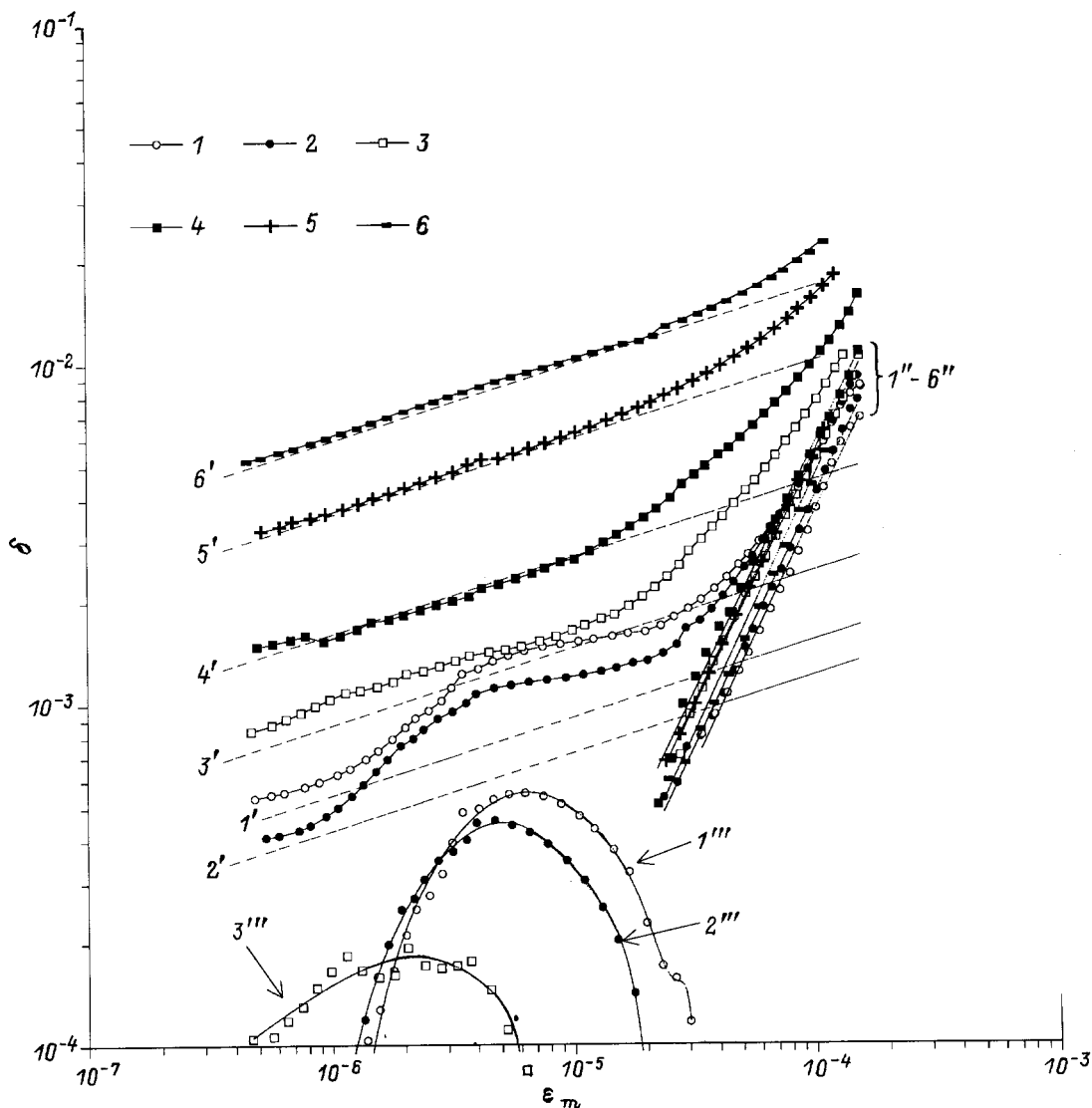
## 2. Влияние температуры на АЗВТ алюминия

На рис. 1 представлены зависимости декремента образца высокочистого алюминия от амплитуды колебательной деформации  $\varepsilon_m$ , измеренные на отожженном образце при 10 К и при последующем нагреве. Высокоамплитудное ультразвуковое нагружение отожженных кристаллов алюминия сопровождается резким ростом АЗВТ при  $\varepsilon_m > 10^{-4}$  и амплитудным гистерезисом АЗВТ (АЗВТ при возрастании амплитуды колебаний ниже, чем при последующем убывании). Пример такого поведения представляет кривая 1 на рис. 1, измеренная при 10 К. При температурах  $T < 180$  К амплитудный гистерезис АЗВТ практически отсутствует, если максимальное значение  $\varepsilon_m$  при измерениях не превышает величины, достигнутой при предшествующих низкотем-

пературных измерениях. Это свидетельствует о стабильности ответственной за АЗВТ дефектной структуры, сформированной высокоамплитудным нагружением при низких температурах.

Анализируя данные рис. 1, можно выделить три температурных диапазона. При низких температурах ( $T < 60$  К) АЗВТ демонстрирует многостадийное поведение. Насыщение роста АЗВТ, наблюдаемое при  $\varepsilon_m = 10^{-6} - 10^{-5}$ , сменяется резким ростом АЗВТ при более высоких амплитудах,  $\varepsilon_m \sim (2-3) \cdot 10^{-5}$ . При умеренных температурах ( $T = 60 - 180$  К) и амплитудах колебаний АЗВТ сильно зависит от температуры, но слабо зависит от  $\varepsilon_m$ , обнаруживая более или менее выраженную микропластическую стадию при высоких амплитудах колебаний ( $\varepsilon_m > 10^{-5}$ ). При высоких температурах ( $T > 180$  К) наблюдается тенденция к подавлению АЗВТ с ростом температуры, проявляющаяся только при низких и умеренных амплитудах колебаний.

Анализ данных, полученных при низких и умеренных температурах, позволяет выделить компоненты,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$ , ответственные за формирование амплитудно-температурных спектров АЗВТ. На рис. 2 представлены амплитудные зависимости внутреннего трения, изме-



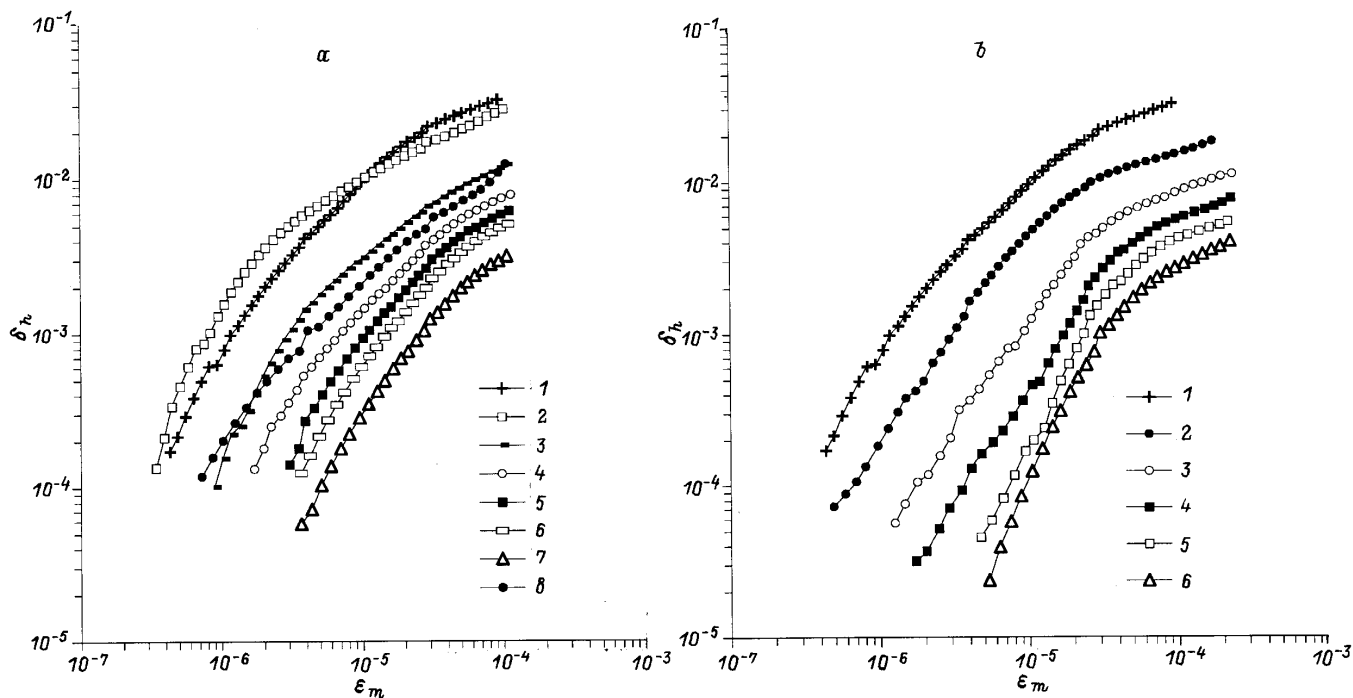
**Рис. 2.** Разложение амплитудных зависимостей декремента колебаний образца алюминия, измеренных при низких и умеренных температурах, на компоненты, обусловленные междислокационным взаимодействием, взаимодействием дислокаций с точечными стопорами и собственно дислокационной релаксацией (взаимодействием дислокаций с рельефом Пайерлса).  $T$  (К): 1 — 10, 2 — 24, 3 — 56, 4 — 86, 5 — 124, 6 — 154. Штриховые линии 1'–6' соответствуют аппроксимации  $\delta_1 = \varepsilon_m^n f_1(T)$  для  $T$ : 1–6; где  $n$  найдена из линий для  $T$ : 4, 5, 6. Прямые 1''–6'' соответствуют  $\delta_2 = \delta - \delta_1$  для  $T$ : 1–6. Кривые 1'''–3''' соответствуют  $\delta_3 = \delta - (\delta_1 + \delta_2)$  при низких температурах для  $T$ : 1, 2, 3.

ренные при увеличении амплитуды колебаний (кроме кривой 1, для  $T = 10$  К, измеренной при убывающей  $\varepsilon_m$ ). Амплитудно-независимый фон внутреннего трения в исследованном диапазоне  $\varepsilon_m$  не обнаруживается. АЗВТ при умеренных температурах и амплитудах колебаний (кривые 4–6 на рис. 2) хорошо аппроксимируются в широком диапазоне ( $\varepsilon_m = 5 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$ ) степенной зависимостью:

$$\delta_1 = \varepsilon_m^n f_1(T), \quad (1)$$

где  $n$  — коэффициент, не зависящий от температуры, а  $f_1(T)$  — некоторая функция температуры. Эти зависимости представлены на рис. 2 пунктирными линиями. При более высоких амплитудах колебаний наблю-

дается микропластическая стадия, сильнее выраженная при низких температурах. В этом диапазоне амплитуд температурная зависимость АЗВТ заметно ослабевает с увеличением  $\varepsilon_m$ . Следовательно, можно предположить, что высокоамплитудное АЗВТ имеет единую асимптоту, практически не зависящую от температуры. Чтобы проверить это предположение, было выполнено следующее разложение АЗВТ: а) АЗВТ при умеренных температурах (кривые 4–6 на рис. 2) было аппроксимировано степенными зависимостями (1); б) микропластическая компонента АЗВТ была получена вычитанием зависимостей (1) из исходных экспериментальных зависимостей. Полученная таким образом микропластическая компо-



**Рис. 3.** Влияние квазистатического (а) и ударно-волнового (б) нагружения на амплитудно-зависимую часть декремента образцов алюминия. а) Величина истинной деформации: 1 — 0, 2 — 0.01, 3 — 0.02, 4 — 0.046, 5 — 0.091, 6 — 0.223, 7 — 0.328, 8 — 0.693. б) Величина импульса напряжения (GPa): 1 — 0, 2 — 0.4, 3 — 0.6, 4 — 1.2, 5 — 2.9, 6 — 3.7.

нента АЗВТ также хорошо аппроксимируется степенной функцией

$$\delta_2 = \varepsilon_m^k f_2(T), \tag{2}$$

где показатель степени  $k \gg n$ , а  $f_2(T)$  — некоторая очень слабая функция температуры.

При  $T < 80$  К определение значений  $f_1(T)$  затруднено, так как АЗВТ является многостадийным в этом диапазоне температур даже при умеренных  $\varepsilon_m$ . Однако, поскольку микропластическая компонента АЗВТ при низких температурах выражена гораздо сильнее (заметьте, что масштаб на рис. 2 логарифмический), то выбор значений  $f_1(T)$  влияет только на начальную стадию получаемой амплитудной зависимости микропластической компоненты. Тогда, предположив, что  $n$  и  $k$  остаются постоянными вплоть до самых низких температур, можно разложить АЗВТ на компоненты, обеспечивая наилучшую аппроксимацию микропластической компоненты степенной зависимостью (2) с одним и тем же показателем степени  $k$  для всех температур. Результаты разложения представлены на рис. 2 (кривые 1–3). Они показывают, что существует третья компонента АЗВТ,

$$\delta_3 = \delta - (\delta_1 + \delta_2), \tag{3}$$

ответственная за особенности АЗВТ при низких температурах ( $T < 60$  К) и умеренных  $\varepsilon_m$ . Полученная в соответствии с (3) третья компонента АЗВТ демонстрирует максимум в зависимости от  $\varepsilon_m$ . Заметим, что, строго говоря, необходим пересчет АЗВТ с образца на материал.

Однако такой пересчет качественно не меняет полученные результаты. Особо следует отметить сильную температурную зависимость положения на амплитудной шкале и высоты максимума третьей компоненты АЗВТ, наблюдающуюся в условиях, когда дефектная структура, ответственная за АЗВТ, является стабильной (отсутствие амплитудного гистерезиса АЗВТ). Указанные особенности в деталях соответствуют теоретическим выводам [10] о нелинейном проявлении собственно дислокационной релаксации (взаимодействие дислокаций с рельефом Пайерлса). Они наблюдаются при температурах, много меньших температуры релаксации Бордони ( $\sim 150$  К в алюминии на частоте около 100 kHz), что согласуется с механизмом образования парных перегибов в присутствии точечных дефектов (вакансий) [11]. В наших опытах избыточная концентрация вакансий в алюминии образовалась в результате микропластического деформирования образца высокоамплитудным ультразвуком при 10 К.

Многостадийное поведение АЗВТ свидетельствует о смене механизмов АЗВТ при изменении температуры и/или амплитуды колебаний. При первом высокоамплитудном ультразвуковом нагружении при низкой температуре образуются свежие дислокации в результате либо размножения дислокаций, либо отрыва имеющихся состаренных дислокаций от закрепляющих атмосфер Коттрелла. Сформированная дислокационная структура остается стабильной при последующем нагреве до  $T \approx 180$  К. При  $T > 180$  К одновременно с резким

подавлением АЗВТ при низких и умеренных  $\varepsilon_m$  появляются временная зависимость и амплитудный гистерезис АЗВТ. Это свидетельствует об образовании атмосфер подвижных точечных дефектов у дислокаций, дающих вклад в АЗВТ. Следовательно, разумно предположить, что компонента АЗВТ, сильно зависящая от температуры и аппроксимированная на рис. 2 выражением (1), соответствует движению дислокаций, не имеющих закрепляющих атмосфер. Степенная зависимость  $\delta(\varepsilon_m)$  не спрямляется в координатах Гранато–Люкке, что типично для механизма "нелокализованного" трения [12]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что эта компонента АЗВТ обусловлена термоактивированным движением дислокаций в полях стопоров, случайным образом распределенных в плоскостях скольжения дислокаций.

Поскольку размножение дислокаций при низкотемпературных измерениях после первого высокоамплитудного нагружения кристалла алюминия не происходит, микропластическую компоненту АЗВТ, как и в поликристаллическом свинце [13], можно связать с междислокационным взаимодействием. Очень слабая температурная зависимость этой компоненты хорошо согласуется с атермической природой дальнедействующих междислокационных взаимодействий (строго говоря, следует учесть температурную зависимость модуля Юнга).

Термоактивированная компонента АЗВТ, обусловленная взаимодействием дислокаций с точечными дефектами, предшествует атермической микропластической компоненте по шкале  $\varepsilon_m$ . Важно отметить, что значительные изменения термоактивированной компоненты с температурой практически не влияют на микропластическую компоненту. Следовательно, эти компоненты являются практически независимыми на ультразвуковых частотах. Поэтому микропластическая компонента АЗВТ лучше всего выражена при низких температурах, когда термоактивированная компонента подавлена.

### 3. Влияние квазистатического и ударно-волнового нагружения на АЗВТ алюминия

На рис. 3 показано влияние квазистатического и ударно-волнового нагружения при комнатной температуре на АЗВТ высококачественного алюминия. Квазистатическое нагружение осуществлялось последовательным сжатием одного и того же образца. Влияние ударно-волнового нагружения исследовалось на нескольких образцах, подвергнутых импульсам напряжения различной величины. Можно выделить две стадии на амплитудных зависимостях внутреннего трения, показанных на рис. 3. Внутреннее трение растет довольно быстро с увеличением амплитуды колебаний при  $\varepsilon_m < (2-3) \cdot 10^{-5}$ . При более высоких  $\varepsilon_m$  рост АЗВТ становится более плавным. Сравнение рис. 3, *a* и *b* показывает, что первая стадия смещена к более высоким значениям  $\varepsilon_m$  в образцах, подвергнутых ударно-волновому нагружению.

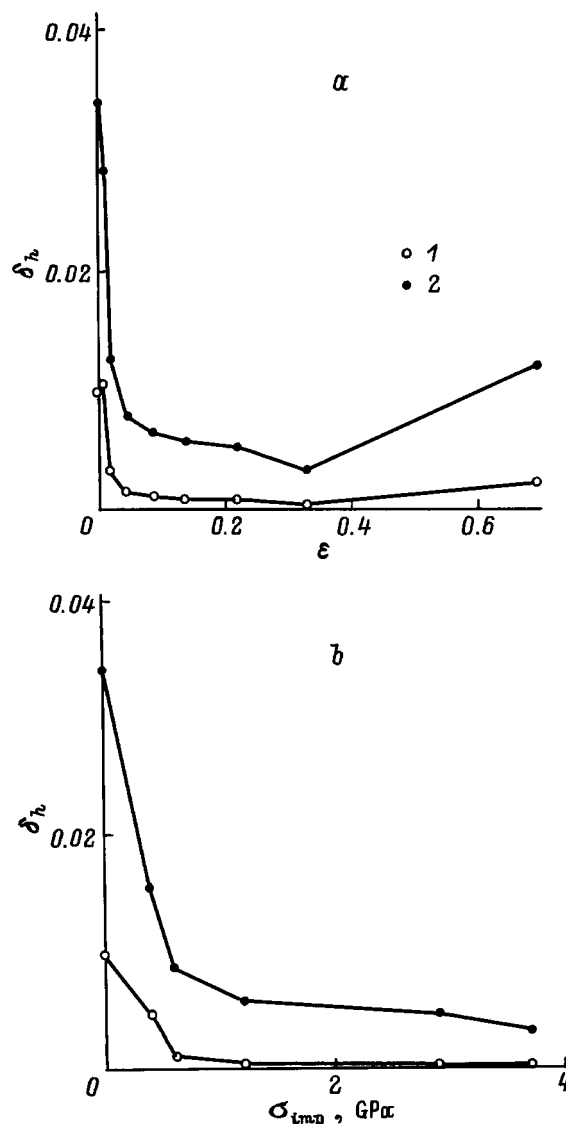


Рис. 4. Зависимости АЗВТ образцов алюминия при амплитуде колебательной деформации  $10^{-5}$  (1) и  $10^{-4}$  (2) от величины истинной деформации при квазистатическом нагружении (а) и от величины импульса напряжения при ударно-волновом нагружении (б).

Зависимость величины АЗВТ от величины истинной деформации при квазистатическом нагружении или от величины импульса напряжения при ударно-волновом нагружении для двух фиксированных значений  $\varepsilon_m$  представлены на рис. 4. АЗВТ немонотонно зависит от величины предварительной квазистатической деформации (рис. 4, *a*). При небольшой величине предварительной деформации ( $\sim 1\%$ ) наблюдается максимум АЗВТ, фиксируемый только при умеренных  $\varepsilon_m$  (см. также кривые 1, 2 на рис. 3, *a*). При дальнейшем деформировании наблюдается значительное падение АЗВТ во всем диапазоне  $\varepsilon_m$  (рис. 3, *a* и 4, *a*), которое сменяется ростом при максимальной величине предварительной деформации.

ции. Монотонное убывание АЗВТ с ростом величины импульса напряжения в ударной волне имеет место во всем исследованном диапазоне  $\sigma_{\text{imp}}$  (рис. 3, *b* и 4, *b*).

Анализ влияния температуры на АЗВТ высокочистого алюминия, проведенный в разделе 2, позволяет объяснить стадийность АЗВТ, наблюдаемую при комнатной температуре. Особенности АЗВТ при  $T > 180$  К позволяют заключить, что начальная стадия АЗВТ ( $\varepsilon_m < 5 \cdot 10^{-5}$ ) при комнатной температуре соответствует взаимодействию дислокаций с вакансионными атмосферами Коттрелла. Известно, что при этих температурах в алюминии наблюдается стадия III возврата электросопротивления, обусловленная объемной диффузией вакансий. Насыщение АЗВТ при высоких  $\varepsilon_m$  обусловлено переходом дислокаций в свободное (от атмосфер) состояние, наблюдаемое в свежеедеформированных образцах при  $T < 180$  К.

Наблюдаемая для алюминия зависимость АЗВТ от величины предварительной квазистатической деформации качественно подобна зависимости, полученной для свинца [13]. Подавление АЗВТ с ростом величины предварительной деформации объяснялось увеличением плотности дислокаций, уменьшающим их подвижность [13]. Рост АЗВТ при больших деформациях, сопровождающийся уменьшением предела упругости кристаллов, связывался с переходом к более неоднородной дислокационной структуре вследствие образования дислокационных ячеек [13]. Минимум АЗВТ наблюдался для свинца [13] при более низких значениях деформации, что хорошо согласуется с его более низкой гомологической температурой по сравнению с алюминием.

Влияние ударно-волнового нагружения на АЗВТ качественно подобно влиянию квазистатической деформации. Ясно видна тенденция к подавлению АЗВТ с ростом величины импульса напряжения. Однако имеются также некоторые качественные отличия. Первая стадия АЗВТ более крутая и смещена к более высоким значениям  $\varepsilon_m$  в образцах, подвергнутых ударно-волновому нагружению (см. рис. 3). Наклон второй стадии АЗВТ одинаков для образцов, деформированных ударно и квазистатически. Следовательно, отличие АЗВТ на первой стадии можно объяснить формированием более плотных вакансионных атмосфер Коттрелла в образцах, подвергнутых ударно-волновому нагружению.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-01-01207а).

## Список литературы

- [1] Shock Waves and High-Strain Rate Phenomena in Metals / Ed. M.A. Meyers and L.A. Murr. Plenum Press, N.Y. & London (1981).
- [2] R.I. Skinner, W.H. Robinson, G.H. McVerry. An Introduction to Seismic Isolation. Wiley, Chichester (1993).
- [3] W.P. Mason. J. Acoust. Soc. Am. **28**, 6, 1207 (1956).

- [4] T.S. Hutchison, D.H. Rogers. J. Appl. Phys. **33**, 3, 792 (1962).
- [5] D. Gelli. Phys. Stat. Sol. **12**, 2, 829 (1965).
- [6] P. Peguin, J. Perez, P. Gobin. Trans. Met. Soc. AIME. **239**, 4, 438 (1967).
- [7] W.H. Robinson, A. Edgar. IEEE Trans. Sonics Ultrasonics **SU-21**, 2, 98 (1974).
- [8] С.Б. Кустов, Б.К. Кардашев, В.И. Иванов, С.Н. Голяндин, Ю.А. Буренков, С.П. Никаноров, В.М. Чернов, Х. Люфт, Г. Магтауш, Е. Хегенбарт, Ю. Шрайбер. Препринт ФЭИ-2141. Обнинск (1990). 22 с.
- [9] Н.А. Златин, С.М. Мочалов, Г.С. Пугачев, А.М. Брагов. ЖТФ **45**, 3, 681 (1975).
- [10] G. Fantozzi, C. Esnouf, W. Benoit, I.G. Ritchie. Progr. Mater. Sci. **27**, 3-4, 311 (1982).
- [11] W. Benoit, G. Gremaud, B. Quenet. Mat. Sci. Eng. **A164**, 42 (1993).
- [12] G. Gremaud. J. de Phys. **48**, Suppl. N 12, C8-15 (1987).
- [13] S. Kustov, S. Golyandin, K. Sapozhnikov, W.H. Robinson. Mat. Sci. Eng. **A237**, 2, 191 (1997).