

УДК 539.67 : 539.374

ВЛИЯНИЕ УПРУГОГО И ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА АМПЛИТУДНО-ЗАВИСИМОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В МОНОКРИСТАЛЛАХ ФТОРИСТОГО НАТРИЯ

А. Б. Лебедев, С. Б. Кустов, Б. К. Кардашев

Исследовалось влияние квазистатического деформирования на дислокационное внутреннее трение в монокристаллах фтористого натрия. Внутреннее трение измерялось методом составного вибратора на частоте около 140 кГц в автоматизированной с помощью микро-ЭВМ установке. Показано, что на начальных стадиях пластической деформации амплитудно-зависимый декремент δ_h монотонно возрастает по мере деформирования, оставаясь при этом степенной функцией амплитуды колебаний ϵ_0 с одним и тем же показателем. Изменение статической нагрузки в упругой области не влияет на $\delta_h(\epsilon_0)$ в пластически деформированном кристалле. Обсуждение результатов приводит к следующим выводам: природа локальных центров, тормозящих дислокации, не меняется на начальных стадиях пластической деформации; амплитудно-зависимое внутреннее трение нечувствительно к изменению дальнедействующих полей внутренних напряжений при постоянной плотности дислокаций в кристалле.

Амплитудно-зависимое внутреннее трение измерялось непосредственно при квазистатическом деформировании кристаллов лишь в небольшом числе работ [1-12]. В [1, 2, 8] исследовалось влияние упругого нагружения, а в [2] также и пластического деформирования в режиме ползучести на поглощение ультразвуковых колебаний. Экспериментальные данные по измерению внутреннего трения в процессе активного пластического деформирования имеются в основном на низких (около 1 Гц [4, 5] и 2.5 кГц [3, 6, 7]) частотах. Согласно [3], при скоростях пластической деформации $\dot{a} \approx 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ на частотах, меньших 10 кГц, основной вклад в поглощение энергии колебаний вносит механизм динамических потерь. Логарифмический декремент колебаний δ_d , определяемый этим механизмом, для умеренных амплитуд колебательной деформации $\epsilon_0 < 10^{-4}$ пропорционален отношению $\dot{a}/(\omega \epsilon_0)$, здесь ω — частота колебаний. Падение декремента с ростом амплитуды действительно наблюдалось [3-7], но амплитудные спектры внутреннего трения, измеренные в широком диапазоне амплитуд $10^{-7} - 10^{-4}$, имели сложный вид [6, 7] из-за того, что на падающую амплитудную зависимость динамического декремента накладывалось возрастающее внутреннее трение, обусловленное механизмом [13] гистерезисного движения дислокаций в силовых полях локальных центров закрепления.

Представляет интерес провести измерение амплитудных зависимостей внутреннего трения при активном деформировании в условиях, когда динамическими потерями можно пренебречь. Для этого необходимо повышать частоту измерений, так как $\delta_d \sim \omega^{-1}$ [2, 3], и при обычных скоростях деформирования порядка 10^{-4} с^{-1} уже на частоте 50 кГц вклад динамических потерь в общий декремент составляет менее 1 % [2].

Настоящая работа посвящена исследованию внутреннего трения на частоте около 140 кГц в процессе деформации монокристаллов NaF. Используется автоматизированная установка, позволяющая существенно увеличить по сравнению с традиционными способами скорости получения и объемы экспериментальной информации при измерениях амплитудных

зависимостей внутреннего трения [14]. Первые результаты с помощью этой установки были получены на кристаллах NaCl [10] и Al [11]. В данной работе получены новые сведения о влиянии упругого нагружения, акустического разрушения и пластического деформирования на поглощение ультразвука в широком диапазоне амплитуд колебаний.

1. Методика эксперимента

Внутреннее трение измерялось резонансным методом составного пьезоэлектрического вибратора в модификации Маркса [15]. Статическое деформирование осуществлялось трехточечным изгибом, причем точки приложения нагрузки соответствовали узлам смещения в стоячей ультразвуковой волне. Более подробное описание методики см. в [11]. Данная методика, по нашему мнению, имеет преимущество по сравнению с термоакустическим методом, использованным в [8, 9, 12] также для измерений поглощения ультразвука при деформировании, однако не позволяющим подробно исследовать амплитудно-независимое внутреннее трение и переход в амплитудно-зависимую область.

В настоящей работе амплитудные зависимости измерялись при увеличении и уменьшении амплитуды колебательной деформации в интервале от 10^{-7} до одинаковой во всех измерениях максимально достигаемой $2 \cdot 10^{-5}$. Трехточечный изгиб образцов со скоростью перемещения опор деформирующего устройства 0.1 мм/ч осуществлялся в испытательной машине «Инстрон 1341». За время измерения одной амплитудной зависи-

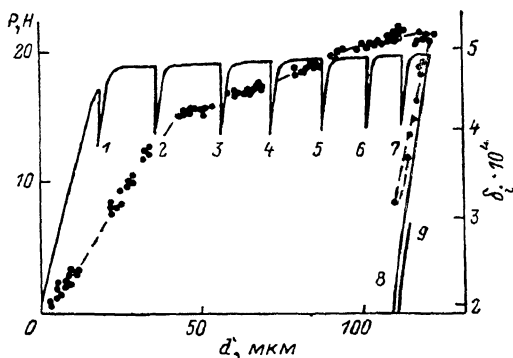


Рис. 1. Зависимость нагрузки P от стрелы прогиба d при деформировании образца NaF со скоростью перемещения опор 0.1 мм/ч .

Экспериментальными точками показана зависимость $\delta_i(d)$ при $\epsilon_0 = 5 \cdot 10^{-7}$. 1—7 — позиции, в которых измерялись зависимости $\delta_i(\epsilon_0)$ при деформировании; 8 — в разгруженном состоянии; 9 — вновь нагруженном в упругой области.

мости при деформировании стрела прогиба менялась не более чем на 0.6 мкм , т. е. с такой абсолютной погрешностью измеренные зависимости относятся к фиксированному значению прогиба. В промежутках между измерениями амплитудных зависимостей фиксировалось амплитудно-независимое поглощение ультразвука. При этом ЭВМ использовалась в качестве регулирующего элемента. Программа эксперимента предписывала по мере деформирования поддерживать постоянной амплитуду $5 \cdot 10^{-7}$ и регистрировать зависимость $\delta_i(d)$, здесь δ_i — амплитудно-независимый декремент колебаний, d — стрела прогиба.

Материалом для исследований служили монокристаллы фтористого натрия заводского изготовления, выращенные методом Кироулоуса из химически чистого (99.99%), специально нелегированного сырья. Подробные данные по примесному составу этих кристаллов приведены в [16]. Образцы выкалывались по плоскостям спайности в виде стержней, ориентированных вдоль направления [100]. Размер образцов $5.6 \times 5.6 \times 58 \text{ мм}$.

Все эксперименты проводились на воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре.

2. Результаты экспериментов

Диаграмма деформирования одного из образцов изображена на рис. 1 сплошной линией. В недеформированных образцах амплитудно-зависимое внутреннее трение в исследованном диапазоне амплитуд не проявлялось (рис. 2, кривая 1). По мере деформирования как амплитудно-независимое,

так и амплитудно-зависимое поглощение монотонно увеличивалось. Изменение амплитудно-независимого декремента показано на рис. 1 точками. В позициях 1—9 были измерены амплитудные зависимости декремента и дефекта модуля упругости, а в позициях 1—7 одновременно с ними регистрировались также зависимости внешней нагрузки, обеспечивавшей пластический изгиб образца с заданной скоростью. Результат одного из одновременных измерений нагрузки, декремента и дефекта модуля Юнга показан на рис. 2. Видно, что уменьшение деформирующей нагрузки (или

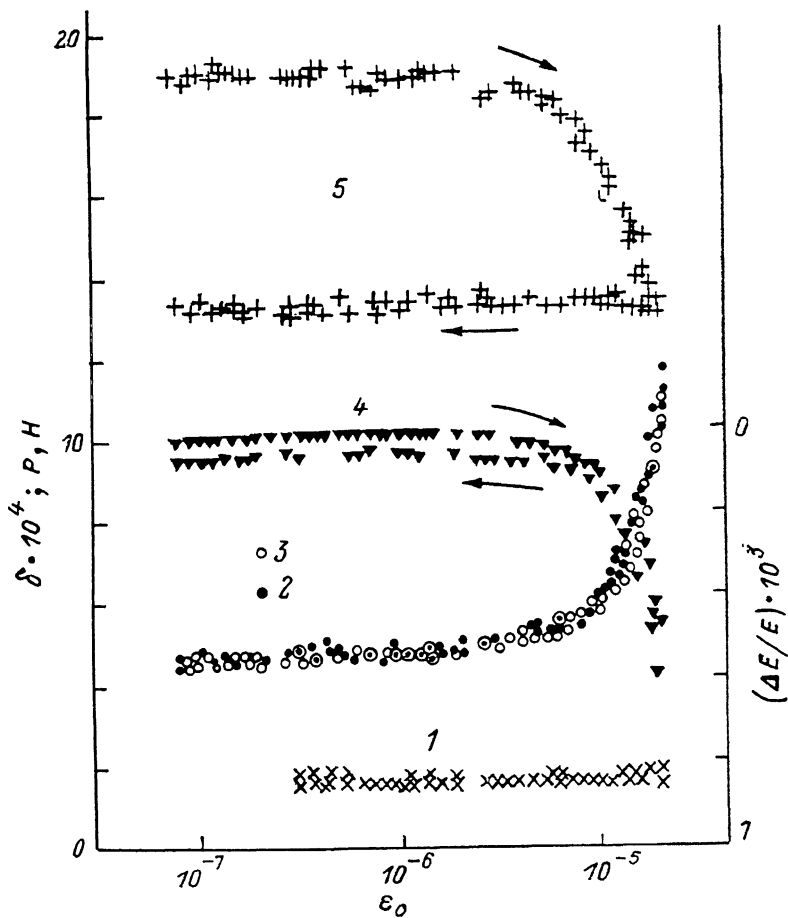


Рис. 2. Зависимости логарифмического декремента δ (1—3), дефекта модуля Юнга $\Delta E/E$ (4), деформирующей нагрузки P (5) от амплитуды колебательной деформации ϵ_0 . 1 — измерение на недеформированном образце; 2, 4, 5 регистрировались одновременно в поз. 5 (см. рис. 1); 3 — повторное измерение в поз. 5.

ультразвуковая релаксация напряжений) по мере роста амплитуды начинает проявляться одновременно с возникновением амплитудных зависимостей декремента и дефекта модуля. Зависимости декремента и дефекта модуля, измеренные при увеличении и уменьшении амплитуды, практически совпадают, а деформирующая нагрузка падает при увеличении амплитуды и остается почти неизменной при ее уменьшении. Такое поведение наблюдалось во время всех измерений, обозначенных цифрами 1—7 на рис. 1. В позиции 5 амплитудные зависимости измерялись два раза подряд. Деформирующая машина была остановлена, когда во время первого измерения была достигнута максимальная амплитуда колебательной деформации $\epsilon_0 = 2 \cdot 10^{-5}$. По окончании второго измерения деформирование было продолжено. Амплитудные зависимости декремента для обоих измерений практически совпали (кривые 2, 3 на рис. 2). Деформирующая нагрузка при повторном измерении оставалась амплитудно-

независимой на уровне, соответствующем тому, до которого произошло ее уменьшение во время первого измерения.

Из рис. 2 видно, что амплитудные зависимости декремента и дефекта модуля Юнга качественно подобны друг другу. Отношение амплитудно-зависимых декремента и дефекта модуля менялось случайным образом от измерения к измерению (1—9 на рис. 1) в пределах от 1.1 до 2, а среднее по всем измерениям равнялось 1.8. Большой разброс, возможно, связан с ошибкой в определении амплитудно-зависимого дефекта модуля, которая возникает из-за небольших отклонений частоты настройки составного вибратора от резонанса. Поскольку эти отклонения в меньшей степени влияют на амплитудно-зависимый декремент, то ошибка в определении отношения декремента к дефекту модуля может быть значительной [17]. После ультразвукового возбуждения в амплитудно-зависимой области при малых амплитудах регистрируется остаточный дефект модуля (различие между прямым и обратным ходом кривой 4 на рис. 2). По-видимому, это связано с небольшим разогревом образца под действием ультразвука. Согласно температурной зависимости модуля Юнга фтористого натрия [16], чтобы вызвать наблюдаемую экспериментально величину остаточного дефекта модуля 10^{-4} , достаточно нагреть образец менее чем на 0.1 К.

Рис. 3, 4 показывают эволюцию амплитудно-зависимого внутреннего трения в процессе деформирования и разгрузки. Представлена лишь амплитудно-зависимая часть декремента $\delta_h = \delta - \delta_i$, здесь δ — общий декремент, δ_i — амплитудно-независимый фон. Кривые соответствуют измерениям при различных значениях стрелы прогиба. Рис. 4 демонстрирует отсутствие влияния разгрузки и повторного нагружения на $\delta_h(\epsilon_0)$.

Основные экспериментальные закономерности настоящей работы: 1) по мере пластического деформирования происходит монотонный рост как амплитудно-независимого, так и амплитудно-зависимого внутреннего трения, при этом δ_h удовлетворительно аппроксимируется степенной функцией амплитуды с неизменным показателем, равным 2; 2) акустическое разупрочнение, а также разгрузка и нагружение в упругой области не влияют на сформированную предшествующей пластической деформацией амплитудную зависимость внутреннего трения; 3) разупрочняющее воздействие и амплитудно-зависимое поглощение ультразвука начинают проявляться при одних и тех же амплитудах колебаний.

3. Обсуждение

Отсутствие амплитудной зависимости внутреннего трения в недеформированных образцах позволяло считать, что ее возникновение в результате квазистатического деформирования обусловлено только теми дисло-

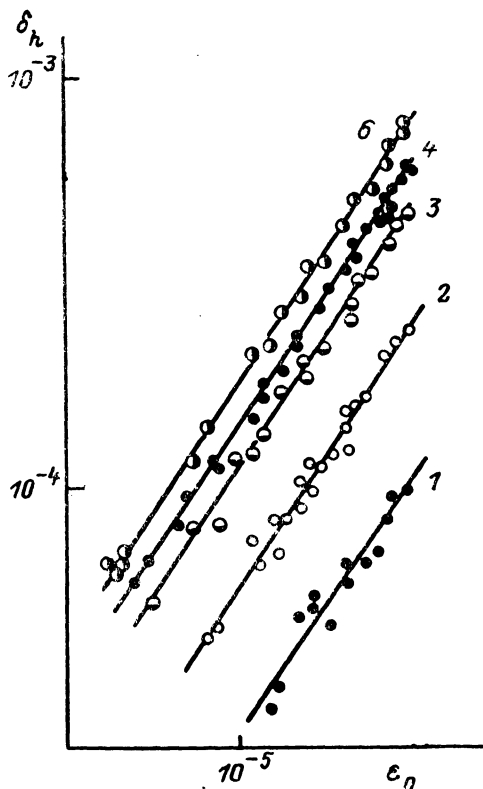


Рис. 3. Амплитудно-зависимое внутреннее трение для различных (поз. 1—6 на рис. 1) значений прогиба.

Сплошные линии соответствуют квадратичным зависимостям.

кациями, которые появились в результате данного деформирования. В этих условиях монотонный рост внутреннего трения по мере деформирования обусловлен увеличением плотности дислокаций, поскольку, согласно практически всем существующим теориям [16, 18], как амплитудно-зависимый, так и амплитудно-независимый декременты колебаний пропорциональны плотности дислокаций. Если бы в недеформированном образце существовала амплитудная зависимость внутреннего трения, то влияние пластического деформирования на эту зависимость могло бы быть достаточно сложным [19, 20]. Для его учета необходимо знать распределение исходных (дающих вклад в исходную амплитудную зависимость) и вновь появившихся дислокаций по плоскостям скольжения, а также принимать во внимание различие в факторах ориентации. В частности, пластическая деформация может приводить к уменьшению амплитудной зависимости внутреннего трения, если появляющиеся дислокации

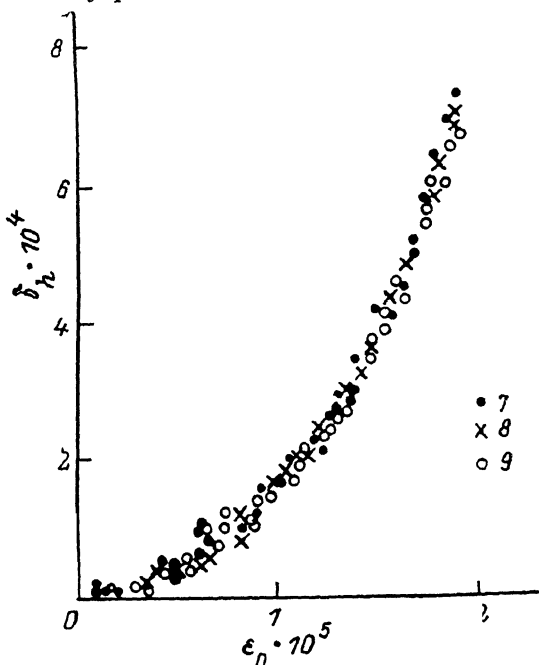


Рис. 4. Амплитудно-зависимое внутреннее трение, измеренное в поз. 7—9 (рис. 1).

тормозят движение уже имеющихся [12, 19, 21]. В настоящей работе исследовались лишь начальные стадии пластической деформации, величина которой для наружного волокна не превышала 0.2 %; поэтому взаимное влияние дислокаций, по-видимому, мало и не оказывало существенного влияния на эволюцию амплитудной зависимости. Тем не менее факт неизменности квадратичного вида этой зависимости при деформировании не поддается однозначной трактовке.

Квадратичные зависимости $\delta_h \sim \epsilon_0^2$ уже наблюдались на предварительно деформированных образцах фтористого натрия, причем показатель степени не менялся в интервале температур 4.2—300 К [22]. Степенные зависимости с показателем 2 регистрировались также на других материалах: меди [23], алюминии [24], ионных кристаллах [10, 16].

Существующие теории дислокационного амплитудно-зависимого внутреннего трения можно, согласно [25, 26], разделить на две группы: теории «отрыва» и теории «трения». К первой группе относятся такие, в которых рассеяние энергии связано с гистерезисным движением дислокационных отрезков по механизму отрыв—закрепление в каждый полупериод колебаний от одних и тех же локальных стопоров [13, 27, 28]. В других теориях потери, возникающие при движении дислокаций, приписываются

существованию силы трения, которая может быть обусловлена торможением как на локальных барьерах, так и на дальнедействующих полях внутренних напряжений [25, 26, 29, 30]. Теории «отрыва» получили к настоящему времени большее распространение, поскольку они непосредственно связаны с микромеханизмом взаимодействия дислокация—стопор, а экспериментальные данные нередко находятся в формальном согласии с этими теориями [16, 20, 22].

С точки зрения теорий «отрыва» степенная зависимость $\delta_h \sim \varepsilon_0^n$ появляется из-за степенного вида статистического распределения стопоров, закрепляющих дислокации, по силам [27] или дислокационных отрезков по длинам [28]. Тогда неизменность показателя n при деформировании указывает на неизменность того или иного распределения. Сделать выбор в пользу одной из двух этих теорий не представляется пока возможным, в частности, потому, что они не рассматривают физические причины, приводящие именно к степенному виду распределения.

С точки зрения теории «трения» [26], степенная зависимость $\delta_h \sim \varepsilon_0^n$ есть следствие степенной зависимости $v \sim \sigma^m$ скорости дислокаций v от напряжения σ , причем $m = n + 1$. Поскольку для ионных кристаллов, как правило [16], n лежит в пределах от 1 до 3, то m соответственно должно быть от 2 до 4. Однако это не согласуется с данными по измерению скоростей индивидуальных дислокаций [31], на основе которых получено эмпирическое соотношение $v \sim \sigma^m$, но с показателем m , существенно большим; для LiF, например, $m \geq 20$. Для того чтобы объяснить степенную зависимость $\delta_h(\varepsilon_0)$ в рамках [26], необходимо предположить, что в акустических экспериментах, как и в экспериментах по подвижности индивидуальных дислокаций, выполняется соотношение $v \sim \sigma^m$, но разница в характере движения дислокаций приводит к разнице в показателе m . Физическая природа такого предположения остается неясной.

Совокупность имеющихся экспериментальных данных говорит о том, что показатель n амплитудной зависимости декремента изменяется при изменении количества и состояния примеси в кристалле [16]. Поэтому неизменность n при деформировании можно трактовать как указание на то, что природа тормозящих дислокаций стопоров не меняется на начальных стадиях пластического деформирования, а значит, она определяется исходной, существовавшей до деформирования дефектной структурой кристалла.

Неизменность $\delta_h(\varepsilon_0)$ при нагружении в упругой области (рис. 4) позволяет сделать вывод о нечувствительности амплитудно-зависимого внутреннего трения к изменению дальнедействующих полей внутренних напряжений, если средняя плотность дислокаций в кристалле остается постоянной. Об этом же свидетельствует поведение $\delta_h(\varepsilon_0)$ после акустического разупрочнения (кривые 2, 3 на рис. 2).

В отличие от настоящей работы ранее изучалось [1, 2, 8] влияние статического нагружения на уже имеющуюся амплитудную зависимость внутреннего трения, которая появлялась в образце неконтролируемым образом. Лишь при измерениях на алюминии [1] для появления зависимости $\delta_h(\varepsilon_0)$ образец подвергался небольшой предварительной пластической деформации. Было показано, что статическая нагрузка приводит к смещению кривой $\delta_h(\varepsilon_0)$ в сторону меньших амплитуд. Данные рис. 4 настоящей работы противоречат результатам [1] на алюминии, но согласуются с результатами [2] на тантале. Нагружение тантала в упругой области увеличивало как исходную амплитудную зависимость, так и фон, но после пластического деформирования разгрузка уменьшала фон (как и на NaF; рис. 1), а на $\delta_h(\varepsilon_0)$ влияния почти не оказывала. Результаты на меди [8] трактовать трудно, так как не ясно, в какой мере рост внутреннего трения в амплитудно-зависимой области обусловлен изменениями фона, данные для которого не приведены.

Необходимо учесть, что в алюминии при комнатной температуре процессы старения идут достаточно интенсивно [11, 32], а во фтористом натрии даже за несколько суток δ_h уменьшается всего на 30 % [22]. Таким образом,

можно сделать следующий вывод: изменение нагрузки в упругой области влияет на зависимость $\delta_b(\varepsilon_0)$, обусловленную состаренными дислокациями, и не влияет, если дислокации «свежие».

Тот факт, что амплитудно-зависимое поглощение и разупрочняющее воздействие ультразвука начинают проявляться при одних и тех же амплитудах колебаний (рис. 2), полностью согласуется с результатами, полученными на хлористом натрии и алюминии [10, 11]. Обсуждение этого результата с точки зрения теорий «отрыва» приведено в [10, 16, 33], где сделан вывод о том, что барьеры, взаимодействие дислокаций с которыми вызывает амплитудную зависимость внутреннего трения, эффективно тормозят дислокации и при макроскопическом пластическом деформировании.

Л и т е р а т у р а

- [1] Baker G. S. // J. Appl. Phys. 1957. V. 28. N 6. P. 734—737.
- [2] Baker G. S., Carpenter S. H. // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. N 4. P. 1586—1591.
- [3] Kaiser G., Pechhold W. // Acta Met. 1969. V. 17. N 4. P. 527—537.
- [4] Постников В. С., Косилов А. Т., Коротаев Е. А. // ФММ. 1970. Т. 29. № 3. С. 655—657.
- [5] Мешков С. И., Косилов А. Т., Елькин Ю. М., Коротаев Е. А. // Механизмы внутреннего трения в полупроводниковых и металлических материалах. М., 1972. С. 75—79.
- [6] Laun H. M., Friedrich R. // Z. Metallkunde. 1973. Bd 64. H 2. S. 129—136.
- [7] Friedrich R., Pechhold W. // Z. Metallkunde. 1973. Bd. 64. H 3. S. 182—189.
- [8] Казанцев В. Ф., Сергеева К. Я. // ДАН СССР. 1979. Т. 248. № 4. С. 847—850.
- [9] Кулемин А. В. // Акуст. журн. 1981. Т. 26. № 5. С. 735—740.
- [10] Лебедев А. Б., Кустов С. Б., Кардашев Б. К. // ФТТ. 1982. Т. 24. № 10. С. 3169—3174; 1983. Т. 25. № 3. С. 890—892.
- [11] Лебедев А. Б., Кустов С. Б., Кардашев Б. К. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 12. С. 3563—3569.
- [12] Ohgaku T., Takeuchi N. // Phys. St. Sol. (a). 1988. V. 105. N 1. P. 153—159.
- [13] Granato A. V., Lücker K. // J. Appl. Phys. 1956. V. 27. N 6. P. 583—593; 1981. V. 52. N 12. P. 7136—7142.
- [14] Лебедев А. Б., Баходдин С. И., Иванов В. И., Кардашев Б. К. // Внутреннее трение в металлах и неорганических материалах. М., 1982. С. 35—39.
- [15] Marx J. // Rev. Sci. Instrum. 1951. V. 22. N 7. P. 503—509.
- [16] Никаноров С. П., Кардашев Б. К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М., 1985. 254 с.
- [17] Лебедев А. Б. // Автореф. канд. дис. Л., 1985. 19 с.
- [18] Постников В. С. Внутреннее трение в металлах. М., 1974. 352 с.
- [19] Варыпаев Э. С., Паний В. Е. // ФММ. 1969. Т. 27. № 3. С. 562—564.
- [20] Паль-Валь П. П., Кауфманн Х.-И., Старцев В. И. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 3. С. 852—857.
- [21] Read T. A. // Trans. Am. Soc. AIME. 1941. V. 143. P. 30—44.
- [22] Воинова О. А., Кардашев Б. К., Никаноров С. П. // ФТТ. 1980. Т. 22. № 4. С. 1058—1065.
- [23] Nowick A. S. // Phys. Rev. 1950. V. 80. N 2. P. 249—257.
- [24] Харитонов А. В. // Акуст. журн. 1963. Т. 9. № 1. С. 80—87.
- [25] Asano S. // J. Phys. Soc. Jap. 1970. V. 29. N 4. P. 952—963.
- [26] Ishii K. // J. Phys. Soc. Jap. 1983. V. 52. N 1. P. 141—148.
- [27] Харитонов А. В. // Акуст. журн. 1965. Т. 11, № 2. С. 226—232.
- [28] Indenbom V. L., Chernov V. M. // Phys. St. Sol. (a). 1972. V. 14. N 1. P. 347—354.
- [29] Челноков В. А., Степанов В. А., Кузьмин Н. Л. // ФТТ. 1970. Т. 12. № 3. С. 841—847.
- [30] Kressel H., Brown N. // Dislocation Dynamics. N. Y., 1968. P. 337—356.
- [31] Альшиц В. И., Инденбом В. Л. // УФН. 1975. Т. 115. № 1. С. 1—39.
- [32] Chambers R. H., Smoluchowski R. // Phys. Rev. 1960. V. 117. N 3. P. 725—731.
- [33] Kardashev B. K., Lebedev A. B., Nikanorov S. P. // Cryst. Res. Technol. 1984. V. 19. N 8. P. 1039—1048.