

УДК 534.28 : 539.374

ВОЗВРАТ ЗАТУХАНИЯ И СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ХЛОРИСТОГО НАТРИЯ

А. М. Петченко, В. И. Мозговой, А. Ф. Сиренко, А. А. Урусовская

Исследованы закономерности изменения глубины возврата затухания ультразвука и изменение его скорости при релаксации напряжений в монокристаллах хлористого натрия, ориентированных в направлении $\langle 100 \rangle$. Обнаружено, что на разных стадиях деформации глубина возврата затухания неодинакова. Установлено, что во время нулевой релаксации напряжений (внешние и внутренние напряжения уравновешены) наблюдается возврат затухания ультразвука. Из релаксационных спектров для ультразвука были определены временные зависимости плотности дислокаций и средней эффективной длины дислокационного сегмента.

Метод релаксации деформирующего напряжения и изучение возврата затухания ультразвука широко применяются при исследовании механических свойств материалов как способ получения информации о дислокационных процессах, протекающих в кристалле при активном деформировании [1, 2].

Релаксация упругих внутренних напряжений в твердом теле зависит от подвижности дислокаций. В свою очередь подвижность дислокаций в реальных кристаллах в области малых и средних скоростей движения в значительной мере определяется взаимодействием дислокаций с различными локальными дефектами кристаллической решетки (стопорами). Физическая природа стопоров может быть различной. Ими могут быть прежде всего выделения примесных атомов, скопления вакансий, ступеньки поперечного скольжения на дислокациях, расположенные в других системах скольжения дислокации [3, 4] и т. д.

Исследования зависимости глубины релаксации напряжений $\Delta\tau$ от скорости деформирования монокристаллов хлористого натрия были выполнены нами ранее в [5]. Было обнаружено существование критической скорости деформации, при которой отсутствует релаксация напряжений. При этом предполагалось, что выравнивание среднего уровня внутренних напряжений с внешними происходит за счет перестройки дислокационной структуры еще в процессе деформации. С целью проверки указанного предположения в настоящей работе предпринята попытка изучения кинетики изменения параметров дислокационной структуры в процессе нагружения и последующей релаксации напряжений. В связи с этим измерялись коэффициент затухания α и скорость продольных волн V , которые, как известно, являются весьма чувствительными параметрами к перестройке дислокационной структуры. Выражения, учитывающие связь акустических характеристик α и V с плотностью дислокаций Λ и длиной дислокационного сегмента L , имеют вид [2]

$$\Lambda = \frac{8.68 \cdot 10^{-6} \pi^2 f^2 P}{\Omega G b^2} \left[\frac{(\Delta V/V_0)^2}{\alpha} \right], \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{2f} \left(\frac{10^6 C}{8.68 B} \frac{\alpha}{(\Delta V/V_0)} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где G — модуль сдвига действующей системы скольжения, Ω — ориентационный фактор, B — константа демпфирования, b — вектор Бюргера, f — частота ультразвука, $C=2Gb^2/\pi(1-\nu)$, ν — коэффициент Пуассона, $\Delta V=V_0-V$ — разность скоростей в недеформированном V_0 и в том же образце после деформации V .

Для исследований использовались монокристаллы хлористого натрия с суммарным содержанием примесей $3 \cdot 10^{-4}$ вес.%. Образцы размером $15 \times 15 \times 30$ мм предварительно отжигались при 600°C в течение 6 ч с последующим охлаждением до комнатной температуры со скоростью 10 град/ч. Плотность дислокаций после отжига составляла $(1 \div 3.5) \times 10^4 \text{ см}^{-2}$. Деформировались образцы сжатием в условиях активного нагружения вдоль направления $\langle 100 \rangle$ при комнатной температуре со скоростью $\dot{\epsilon}=5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Направление прозвучивания образцов всегда

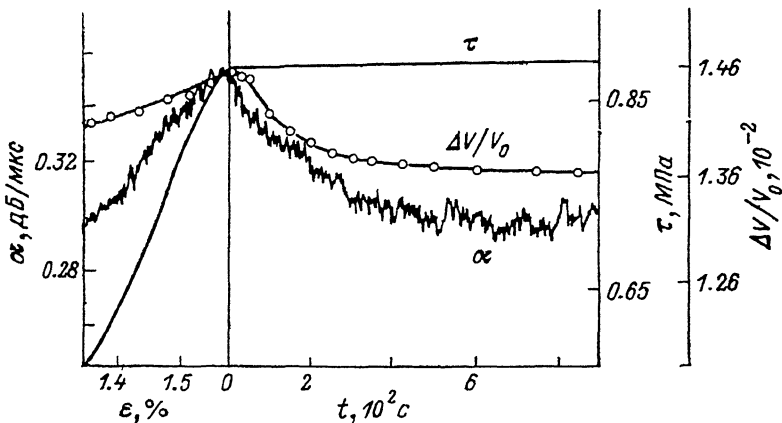


Рис. 1. Возврат затухания и скорости ультразвука при нулевой релаксации напряжений после предварительной деформации 1.64 %.

совпадало с направлением их сжатия. Измерения затухания α и скорости V продольных волн проводились на частоте 7.5 МГц импульсным эхо-методом на установке, описанной в работе [6]. Установка позволяет проводить измерения затухания ультразвука и его скорости в автоматическом режиме в процессе нагружения и при возврате, а также параллельно вести автоматическую запись деформационной кривой $\tau(\epsilon)$ и релаксации напряжений $\tau(t)$. Наблюдая за изменениями параметров Λ и L в процессе релаксации напряжений, можно получить важные сведения о механизмах этого процесса.

На рис. 1 приведена одна из диаграмм возврата затухания и скорости ультразвука совместно с диаграммой $\tau(t)$. Релаксации напряжения, затухания и скорости ультразвука записывались с того момента, когда в образце была достигнута общая деформация, составляющая 1.64 %. Заметим, что величина остаточной деформации при этом не определялась. Из рис. 1 нетрудно увидеть, что, несмотря на отсутствие релаксации напряжений, наблюдаются возврат затухания ультразвука и изменение скорости во времени.

Используя соотношения (1) и (2) и экспериментальные кривые $\Delta\alpha(t)$ и $\Delta V/V_0(t)$, мы рассчитали временные зависимости $\Lambda(t)$ и $L(t)$ (рис. 2). Значения величин, входящих в формулы (1) и (2), следующие: $\Omega=0.5$, $G_{\langle 110 \rangle}=1.814 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2$, $B=3.47 \cdot 10^{-4} \text{ Пз}$, $\nu=0.32$, $f=7.5 \text{ МГц}$, $b=3.98 \times 10^{-8} \text{ см}$ [7]. Из рис. 2 видно, что плотность дислокаций Λ во всем исследованном временном интервале остается постоянной, а средняя эффективная длина дислокационного сегмента L непрерывно убывает со временем, выходя на насыщение. Любопытно отметить, что вид кривой $L(t)$ напоминает ход кривой возврата $\Delta\alpha(t)$, где $\Delta\alpha=\alpha_0-\alpha_{15}$, α_0 — значение затухания в момент остановки деформационной машины, α_{15} — после 15-минутной релаксации. По-видимому, указанное сходство не является

случайным, поскольку главным параметром, определяющим изменение $\Delta\alpha$, является величина L в силу соотношения $\alpha \sim \Delta L^4$ [2].

При исследовании релаксационных процессов было замечено, что глубина возврата затухания $\Delta\alpha$ на разных стадиях деформации неодинакова. В связи с этим представлялось важным проведение исследований по выявлению $\Delta\alpha$ на образцах с различной степенью деформации. Резуль-

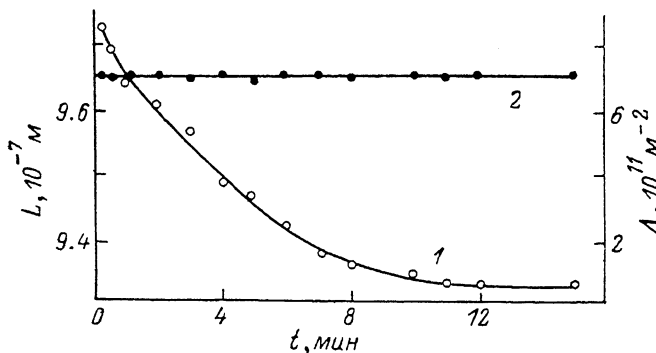


Рис. 2. Временные зависимости средней эффективной длины дислокационного сегмента (1) и плотности дислокаций (2).

таты таких опытов приведены на рис. 3, из которого видно, что зависимость $\Delta\alpha(\epsilon)$ немонотонна. Максимальное значение величины $\Delta\alpha$ приходится на интервал деформаций 1.4—1.7 %. При больших деформациях глубина возврата ультразвука снижается, достигая минимума при деформации 2.2 %, соответствующей началу протекания процессов релаксации напряжений.

Используя набор релаксационных кривых $\alpha(t)$ и $\Delta V/V_0(t)$ для различных деформаций (вид которых аналогичен данным, приведенным на рис. 1), по формулам (1) и (2) определили зависимости $\Delta L/L_0$ и Δ от де-

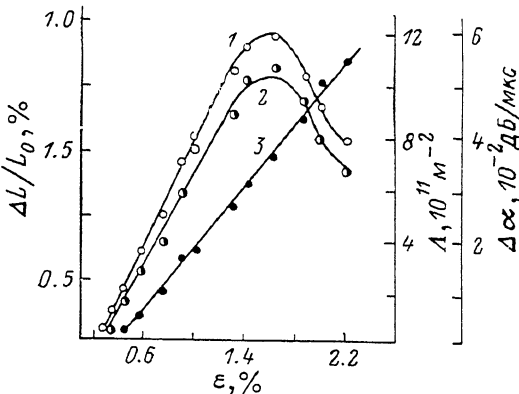


Рис. 3. Зависимости изменения относительной длины дислокационной петли (1), глубины возврата затухания (2) и плотности дислокаций (3) от деформации.

формации (рис. 3). Здесь $\Delta L = L_0 - L_{15}$, L_0 — средняя эффективная длина дислокационного сегмента во время остановки деформационной машины и L_{15} — после 15-минутной релаксации. Можно отметить, что с увеличением степени деформации плотность дислокаций в кристалле нарастает пропорционально ϵ . Величина $\Delta L/L_0$ при этом сначала увеличивается, а затем, достигнув своего максимального значения, начинает уменьшаться. Наблюдается также корреляция между графиками функций $\Delta L/L_0(\epsilon)$ и $\Delta\alpha(\epsilon)$, как и в случае $\Delta\alpha(t)$ и $L(t)$, при определенной деформации. Проводя избирательное травление поверхностей скола образцов после снятия нагрузки, обнаружили, что с увеличением степени деформации дислокационная структура равномерно уплотнялась. Скольжение в образце шло преимущественно в одной плоскости и лишь при $\epsilon \sim 1\%$ начинало активно идти и по другим плоскостям. Полосы скольжения просматривались лишь после того, как в образце достигалась плотность дислокаций $\Lambda \sim 10^7 \text{ см}^{-2}$. В этом состоянии в кристалле возникают новые дислокации, принадлежащие другим плоскостям скольжения. В ре-

зультате их взаимодействия с дислокациями первичной плоскости длина колеблющегося сегмента должна уменьшаться [8]. Поведение функций $\Delta\alpha(\epsilon)$ и $L(\epsilon)$ и данные микроструктурных исследований, по-видимому, свидетельствуют о правомерности представлений, развиваемых в модели дислокационного взаимодействия [8], и, вероятно, их можно объяснить в рамках этой модели.

Для понимания результатов временной зависимости $\Delta\lambda(t)$ и $L(t)$ представляется уместным обратиться к работам [9, 10]. При химическом травлении образцов во время релаксации напряжений в [9] было установлено, что процесс релаксации происходит за счет перераспределения подвижных дислокаций, накопившихся в кристалле к началу релаксации, а их общее число при этом остается неизменным. Авторами [9, 10] сделан вывод о том, что определяющим фактором в процессе релаксации является распределение потенциальных барьеров по высоте и объему кристалла. Можно предположить, что, хотя возврат затухания и скорости ультразвука наблюдался в условиях отсутствия релаксации напряжения, природа механизмов, контролирующих указанные процессы, одинакова. Об этом достаточно убедительно свидетельствует ход кривых $\Delta\lambda(t)$ и $L(t)$, согласующихся с результатами [9, 10].

На основе данных ультразвуковых исследований можно сделать вывод о том, что в кристаллах хлористого натрия, содержащих легкоподвижные дислокации, уже при создании небольших напряжений, не способных проявиться в макроскопических опытах по релаксации напряжений, активно протекают процессы перестройки дислокационной структуры. Следовательно, при глубоком анализе деформационных процессов недостаточно иметь данные макроопытов. Их необходимо дополнить сведениями о микропроцессах, протекающих в дислокационной структуре кристалла, которые можно получить, в частности, из ультразвуковых измерений.

Список литературы

- [1] Дощенко В. И., Ландау А. И., Пустовалов В. В. Современные проблемы низкотемпературной пластичности материалов. Киев.: Наукова думка, 1987. 162 с.
- [2] Трузали Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.
- [3] Парийский В. Б., Ландау А. И., Боржковская В. М. // ФТТ. 1963. Т. 5. № 9. С. 2570—2575.
- [4] Ландау А. И., Боржковская В. М. // Кристаллография. 1965. Т. 10. № 5. С. 693—700.
- [5] Урусовская А. А., Мозговой В. И., Петченко А. М. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 13. С. 1176—1178.
- [6] Петченко А. М., Строилова Д. Л., Мозговой В. И. // Сб. «Синтез и исследование оптических материалов». Харьков, ВНИИ монокристаллов, 1987. № 19. С. 133—139.
- [7] Srivastava K. K., Merchant H. D. // J. Phys. Chem. Sol. 1973. V. 34. N 12. P. 2069—2073.
- [8] Nicata A., Truell R., Granato A., Chick B., Lücke K. // J. Appl. Phys. 1956. V. 27. N 4. P. 396—404.
- [9] Ракова Н. К., Предводителев А. А. // ФТТ. 1965. Т. 7. № 4. С. 1081—1085.
- [10] Ракова Н. К., Предводителев А. А. // Сб. «Релаксационные явления в твердых телах». М.: Металлургия, 1968. С. 283—288.

Харьковский институт инженеров
коммунального строительства
Харьков

Поступило в Редакцию
14 сентября 1988 г.
В окончательной редакции
8 января 1989 г.