

## АМПЛИТУДНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В ИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

*В. Я. Платков и В. И. Старцев*

Изучается амплитудно-зависимое и независимое внутреннее трение и дефект модуля Юнга монокристаллов KBr, KCl и RbJ. Полученные зависимости находятся в качественном согласии с теорией Гранато—Люкке.

В амплитудно-зависимой области наблюдаются гистерезис и релаксация модуля Юнга. Исследуется влияние предварительной пластической деформации и температуры. Дается качественное объяснение наблюдаемых результатов.

Выяснение механизма пластической деформации кристаллов требует знания свойств индивидуальных дислокаций, характера их взаимодействия друг с другом, с кристаллической решеткой и другими дефектами кристаллов. Исследование внутреннего трения в кристаллах является эффективным методом для изучения многих свойств дислокаций. В настоящей работе приводятся результаты исследования внутреннего трения, обусловленного наличием дислокаций в некоторых ионных кристаллах.

### 1. Объекты исследования и методика эксперимента

Исследования проводились на монокристаллах KBr, KCl, RbJ и частично NaCl.

Внутреннее трение и модуль Юнга измерялись резонансным методом двойного составного осциллятора,  $f^2$ . Источником ультразвуковых колебаний служил пьезокварц среза „X“, возбуждаемый на собственной частоте продольных колебаний 77.7 и 90.5 кгц. К торцу кварца приклеивался (клей БФ-2, полимеризация в течение 4 час. при  $f = 100^\circ \text{C}$ ) выколотый по плоскостям спайности образец, сечение которого равно сечению кварца (3 X 3 мм).

Длина образца подбиралась такой, чтобы расхождение собственных частот образца и кварца было не более 500 гц. Вследствие разных значений модуля Юнга длины образцов были различными и составляли при частоте 77.7 кгц у KBr — 23, KCl ~ 30, RbJ ~ 17.5 и NaCl — 29 мм. Отжиг проводился в течение 20 час. при  $f = 680^\circ \text{C}$  для образцов KBr и  $\# = 720^\circ \text{C}$  для образцов KCl. Образцы NaCl и RbJ не отжигались.

Предварительная пластическая деформация осуществлялась на релаксомере Регеля и Дубова [2] или четырехточечным изгибом так, чтобы не нарушалось место склейки.

Так как модуль Юнга очень чувствителен к колебаниям температуры, измерения проводились в стабильных температурных условиях (колебания температуры не более  $\pm 0.1^\circ$ ). Измерения при  $T = 77$  и  $4.2^\circ \text{K}$  проводились в криостате, в котором можно медленно охлаждать образцы и тем самым предотвратить увеличение плотности дислокаций вследствие теплового удара.

Декремент затухания измерялся с точностью  $5 \cdot 10^{-2}$ , а относительные значения модуля Юнга — с точностью  $1 \cdot 10^{-5}$ . Высокая точ-

ность измерения относительных значений модуля Юнга была достиг-

нута в результате использования электронно-счетного частотомера типа 43-4.

При измерении релаксации модуля Юнга возбуждение колебаний в образце проводилось всегда строго на резонансной частоте.

### 2. Результаты эксперимента

#### а. Зависимость внутреннего трения и модуля Юнга от амплитуды деформации

Измерения, проведенные на монокристаллах KBr, KCl и RbJ, показали, что зависимость внутреннего трения и модуля Юнга от амплитуды деформации у всех трех кристаллов носит аналогичный характер

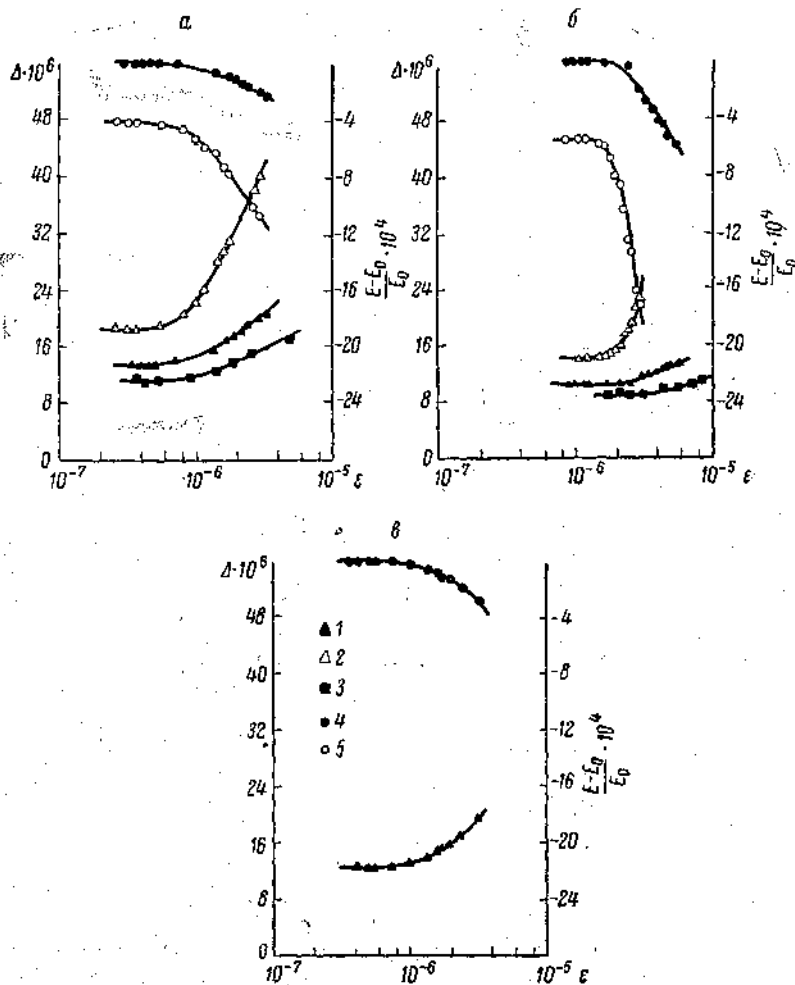


Рис. 1, Амплитудная зависимость внутреннего трения и модуля Юнга в KBr (а), KCl (б) и RbJ (в).

текущее значение модуля Юнга, — модуль Юнга недеформированного монокристалла в амплитудно-независимой области.

U2/3 декремент до деформации, после деформации и после отжига соответственно; 4\*5 значения до деформации и после деформаций соответственно.

(рис. 1). Предварительная пластическая деформация вызывает увеличение декремента затухания в амплитудно-независимой области и смещает критическую амплитуду в сторону меньших значений. В противополож-

ность этому отжиг уменьшает декремент в амплитудно-независимой области и увеличивает критическую амплитуду. Изменения модуля Юнга соответствуют изменениям декремента. Следует отметить, что критическая амплитуда, т. е. амплитуда, начиная с которой внутреннее трение зависит от амплитуды, у кристаллов KCl больше, чем у кристаллов KBr и RbJ. В последеформационный период наблюдался возврат декремента затухания и модуля Юнга. Возврат можно было наблюдать в течение длительного времени ( $\sim 20$  час.), но наиболее интенсивно

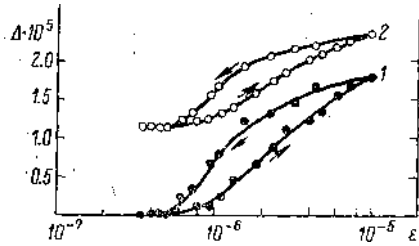


Рис. 2. Гистерезис внутреннего трения и модуля Юнга монокристалла KBr. 1 — декремент, 2 — модуль Юнга.

Площадь гистерезисной кривой зависит не только от величины предельной амплитуды, но также и от величины промежутка времени между получением прямой и обратной кривой.

#### б. Релаксация модуля Юнга.

Если в образце длительно возбуждать колебания с амплитудой меньше критической, то в течение сколь угодно большого промежутка времени модуль Юнга остается неизменным. Возбуждение в образце колебаний с амплитудой, превышающей критическую, вызывает уменьшение модуля Юнга, причем такое изменение модуля носит релаксационный характер. Изменение модуля Юнга наиболее интенсивно в первый момент возбуждения колебаний в образце. В дальнейшем модуль Юнга асимптотически приближается к определенному, равновесному для данной амплитуды значению, по достижении которого возбуждение колебаний с той же амплитудой не меняет модуль Юнга. Прекращение возбуждения либо переход к возбуждению с амплитудой, меньшей критической, приводят к возврату модуля Юнга до своего исходного значения (рис. 3).

Последующее возбуждение колебаний в образце с амплитудой, превышающей амплитуду предыдущих колебаний, приводит к увеличению глубины релаксации. Под глубиной релаксации подразумевается величина

он протекает во время первого часа.

Полученные зависимости внутреннего трения и модуля Юнга для кристаллов KBr, KCl и RbJ подобны зависимостям, полученным ранее другими авторами для кристаллов LiF и NaCl [3-5].

В амплитудно-зависимой области декремент и модуль Юнга от времени, что, в частности, приводит к появлению гистерезиса декремента

затухания и модуля Юнга, выражающегося в несоответствии кривых

где  $jE^{\wedge}$  — равновесное значение модуля Юнга при данной амплитуде деформации;  $E_0$  — значение модуля Юнга, полученное при амплитудах, меньших критической.

На рис. 3, б показано изменение глубины релаксации модуля Юнга при возбуждении колебаний с разной амплитудой деформации. Нужно

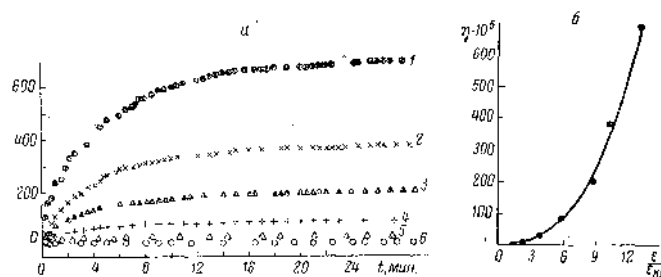


Рис. 3. Изменение модуля Юнга монокристалла КВг при возбуждении. а — релаксация модуля Юнга! 7 — при возбуждении с амплитудой больше  $\epsilon_{кр}$ . в 13.2 раза, 2 — в 10 раз, 3 — в 8.8 раза, 4 ■ — в 5.9 раза, 5 — в 3.85 раза, б —  $E^{\wedge}$  при возбуждении с разной амплитудой.

отметить, что величина глубины релаксации хорошо воспроизводится, если повторные измерения проводятся при тех же амплитудах.

Возбуждение колебаний до и после предварительной пластической деформации показало, что деформация увеличивает глубину релаксации модуля Юнга. Последеформационный отдых приводит к уменьшению глубины релаксации (рис. 4).

Охлаждение образца до температуры  $T = 77$  и  $4.2^{\circ} K$  также приводит к уменьшению глубины релаксации (рис. 5).

Аналогичные релаксационные явления наблюдались также и для декремента затухания.

Вышеприведенные зависимости релаксации модуля Юнга являются типичными для всех исследованных нами кристаллов; — КВг, КС1, RbJ и NaCl.

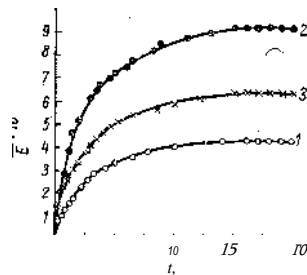


Рис. 4. Изменение глубины релаксации модуля в результате предварительной пластической деформации и последеформационного отдыха монокристалла КВг.

7, 2, 5 — релаксация модуля до деформации, после деформации и после последеформационного отдыха.

### 3. Обсуждение результатов

Среди теорий, описывающих амплитудно-независимое и зависимое внутреннее трение и дефект модуля, в наилучшем согласии с экспериментом находится теория Гранато и Люкке [1], которой в настоящее

время и пользуются при описании экспериментальных результатов. Полученные в данной работе зависимости внутреннего трения и модуля Юнга от амплитуды для монокристаллов КВг, КС1 и RbJ не противоречат этой теории. Согласно теории Гранато-Люкке, в амплитуднонезависимой области поглощение и дефект модуля пропорциональны плотности дислокаций. В наших экспериментах предварительная пластическая деформация вызывает рост декремента затухания и дефекта

модуля. Кроме того, рис. 6 показывает линейную связь между дефектом модуля и амплитудно-зависимым декрементом, что также согласуется с данной теорией. В амплитудно-зависимой области теория предсказывает линейное соотношение между  $\ln(D_n \cdot e^{\Lambda^2})$  и  $v^{-1}$ . Экспериментальные результаты, представленные в таких координатах, показаны на рис. 7.

Гистерезис дефекта модуля и декремента затухания, а также релаксация модуля Юнга не рассматривался в теории Гранато—Люкке,

однако можно сделать попытку качественно объяснить эти явления исходя из дислокационной модели, положенной в основу этой теории.

Гистерезис декремента затухания и дефекта модуля всех кристаллов наблюдался только в области амплитудной зависимости. В свою очередь амплитудная зависимость объясняется теорией Гранато—Люкке как результат отрыва и последующего закрепления дислокаций на локальных цен-

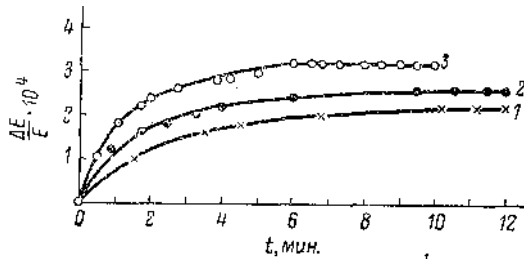


Рис. 5. Влияние температуры на глубину релаксации модуля Юнга.

Г, ° К: 7 — 4,2, 2 — 77, 3 — 273.

трах закрепления, иледуя [“], предположим, что гистерезис возникает вследствие увеличения длины отдельных сегментов в процессе взаимодействия дислокаций с локальными центрами закрепления. Увеличение длины некоторых сегментов, приводящее к изменению распределения петель по длинам, может возникать в связи со следующими обстоятельствами:

- из-за смещения центра закрепления вдоль линии дислокации;
- если центр закрепления представляет собой не отдельный точечный дефект, а коагулянт, то в процессе многократного взаимодействия дислокации с таким центром закрепления последний может разрушаться, образуя ряд несвязанных между собой точечных дефектов, которые дислокация преодолевает легче, чем коагулянт.

Как смещение, так и разрушение локального центра закрепления, вероятно, требуют некоторого времени, что обуславливает появление гистерезиса декремента затухания и дефекта модуля и временной зависимости. Во время измерения гистерезиса декремента и дефекта модуля наблюдалось, что при переходе от большей амплитуды к меньшей после некоторого промежутка времени декремент затухания и дефект модуля возвращались к величинам, присущим данной меньшей амплитуде. Такой возврат может быть связан либо с возрождением локальных центров из „осколков“<sup>\*1</sup> разрушенных, либо с возвращением центров закрепления на свое прежнее место.

Уменьшение (релаксация), модуля Юнга в процессе возбуждения колебаний также может быть объяснено увеличением длины отдельных дислокационных сегментов. В первый момент времени разрушаются или смещаются слабые (для данной величины амплитуды циклических колебаний) центры закрепления. Для разрушения или смещения более

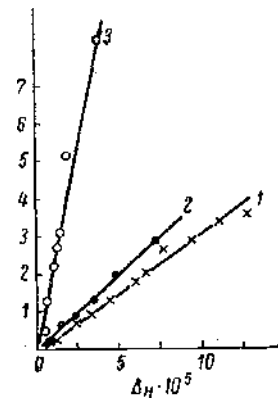


Рис. 6. Зависимость дефекта модуля Юнга от амплитудно-зависимого внутреннего трения в KVg (7), RbJ (2) и KCl (3).

„мощных" необходимо длительное воздействие движущейся дислокации. Но даже при длительном возбуждении определенной амплитудой не все локальные центры закрепления будут разрушены или смещены. Увеличение амплитуды приводит к разрушению новых центров закрепления, что в свою очередь приводит к увеличению глубины релаксации. Возврат модуля Юнга и декремента затухания после возбуждения длится 15-20 мин., в то время как после предварительной пластической деформации возврат наблюдался в течение ~ 20 час. Такое различие времен возврата, возможно, связано с тем, что для закрепления свежих дислокаций (т. е. создания новых центров) точечным дефектам приходится проходить гораздо большие расстояния, чем при восстановлении центра закрепления, разрушенного при возбуждении.

Изменения модуля Юнга в процессе возбуждения можно попытаться аппроксимировать зависимостью вида

$$E_t - E = E_{ml} (1 - e^{-t/\tau})$$

где  $E_t$  — значение модуля при прозвучивании амплитудой, меньшей критической амплитуды;  $E$  — текущее значение модуля;  $E_{ml}$  — равновесное значение модуля;  $t$  — время прозвучивания;  $\tau$  — время релаксации.

Для проверки такой, аппроксимации были построены графики в полугарифмических координатах. Типичный график приведен на рис. 8. Наклон прямой на рис. 8 дает величину времени релаксации данного процесса, которая для разных образцов колеблется от 2 до 6 мин.



Рис. 8. Зависимость величины  $E_t - E$  от времени  $t$  при возбуждении.

Наблюдавшееся увеличение глубины релаксации модуля Юнга после пластической деформации и возврата может быть объяснено следующим образом. В процессе пластической деформации возрастает плотность дислокаций. На свежих дислокациях возникают центры закрепления, „мощность" которых со временем растет в результате укрупнения коагулянта. При возбуждении колебаний с амплитудой, большей критической, число возможных мест отрыва от центров закрепления возрастает. Это приводит к увеличению дефекта модуля, т. е. к увеличению глубины релаксации. Со временем число возможных мест отрыва уменьшается вследствие увеличения мощности центров закрепления свежих дислокаций. Это приводит к возврату дефекта модуля и глубины релаксации.

Известно, что тепловые флуктуации делают дислокацию более подвижной и помогают ей преодолевать локальные центры закрепления.

В связи с этим понижение температуры приводит к уменьшению глубины релаксации, так как уменьшается вероятность отрыва дислокаций от центров закрепления.

Приведенные объяснения наблюдаемых явлений основаны на использовании модели Гранато—Люкке. В основу этой модели положена

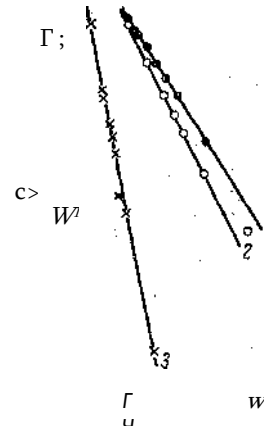


Рис. 7. График Гранато—Люкке амплитудно-зависимого внутреннего трения в KBr (1), RbJ (2) и KCl (3).

весьма идеализированная схема и поэтому результаты рассмотрения ее, вероятно, нужно считать только первым приближением при описании физической природы явления. Для построения полной теории внутреннего трения, связанного дислокациями, необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

## Литература

- [1] Е. Г. Швидковский и А. А. Дургарян. Научн. докл. высш. шк., сер. физ.-мат., 5, 211, 1958.
- 2] В. Р. Регель и Г. А. Дубов. ПТЭ, 6, 102, 1958.
- 3] C. L. Bauer а. R. B. Gordon. J. Appl. Phys., 37, 945, 1960.
- 4] G. S. Baker. J. Appl. Phys., 33, 1730, 1962.
- 5] А. А. Блистанов и М. П. Шакольская. ФТТ, 6, 728, 1964.
- 6] Р. Чамберс и Р. Смолуховский. Сб. „Ультразвуковые методы исследования дислокаций“, стр. 167. ИЛ, М., 1963.
- каций“, стр. 27. ИЛ, М., 1963.

Физико-технический институт  
низких температур АН УССР  
Харьков

Поступило в Редакцию  
1 октября 1965 г.

## АМПЛИТУДНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В ИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

*В. Я. Платков и В. И. Старцев*

Изучается амплитудно-зависимое и независимое внутреннее трение и дефект модуля Юнга монокристаллов KBr, KCl и RbJ. Полученные зависимости находятся в качественном согласии с теорией Гранато—Люкке.

В амплитудно-зависимой области наблюдаются гистерезис и релаксация модуля Юнга. Исследуется влияние предварительной пластической деформации и температуры. Дается качественное объяснение наблюдаемых результатов.

Выяснение механизма пластической деформации кристаллов требует знания свойств индивидуальных дислокаций, характера их взаимодействия друг с другом, с кристаллической решеткой и другими дефектами кристаллов. Исследование внутреннего трения в кристаллах является эффективным методом для изучения многих свойств дислокаций. В настоящей работе приводятся результаты исследования внутреннего трения, обусловленного наличием дислокаций в некоторых ионных кристаллах.

### 1. Объекты исследования и методика эксперимента

Исследования проводились на монокристаллах KBr, KG1, RbJ и частично NaCl.

Внутреннее трение и модуль Юнга измерялись резонансным методом двойного составного осциллятора [1]. Источником ультразвуковых колебаний служил пьезокварц среза „X“, возбуждаемый на собственной частоте продольных колебаний 77.7 и 90.5 кгц. К торцу кварца приклеивался (клей БФ-2, полимеризация в течение 4 час. при  $t = 100^\circ \text{C}$ ) выколотый по плоскостям спайности образец, сечение которого равно сечению кварца (3 x 3 мм).

Длина образца подбиралась такой, чтобы расхождение собственных частот образца и кварца было не более 500 гц. Вследствие разных значений модуля Юнга длины образцов были различными и составляли при частоте 77.7 кгц у KBr — 23, KCl ~ 30, RbJ ~ 17.5 и NaCl ~ 29 мм. Отжиг проводился в течение 20 час. при  $t = 680^\circ \text{C}$  для образцов KBr и  $t = 720^\circ \text{C}$  для образцов KCl. Образцы NaCl и RbJ не отжигались.

Предварительная пластическая деформация осуществлялась на релаксомере Регеля и Дубова [2] или четырехточечным изгибом так, чтобы не нарушалось место склейки.

Так как модуль Юнга очень чувствителен к колебаниям температуры, измерения проводились в стабильных температурных условиях (колебания температуры не более  $\pm 0.1^\circ$ ). Измерения при  $T = 77$  и  $4.2^\circ \text{K}$  проводились в криостате, в котором можно медленно охлаждать образцы и тем самым предотвратить увеличение плотности дислокаций вследствие теплового удара.

Декремент затухания измерялся с точностью  $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ , а относительные значения модуля Юнга — с точностью  $1 \cdot 10^{-5}$ . Высокая точ-