

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

---

В.Я.Платков

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОГО ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ  
В МОНОКРИСТАЛЛАХ ХЛОРИСТОГО И БРОМИСТОГО КАЛИЯ

(01.046 - физика твердого тела)

а в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Диссертация написана на русском языке

Харьков-1971

Работа выполнена в Физико-техническом институте  
низких температур АН УССР

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,  
профессор В.И.Старцев.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Ю.А.Осипьян  
кандидат физико-математических наук,  
доцент Н.А.Тяпунина.

Ведущее предприятие - Московский Институт стали и сплавов.

Автореферат разослан " 29 " декабрь 1971 г.

Защита диссертации состоится " " февраль 1972 г.  
на заседании Ученого Совета Физико-технического института  
низких температур АН УССР, г.Харьков, 86, пр. Ленина, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета  
канд. физ-мат. наук

/В.А.Павлик/

Экспериментальные и теоретические исследования последнего десятилетия показали, что дефекты решетки оказывают существенное влияние практически на все физические свойства кристаллических твердых тел. Среди дефектов решетки особая роль принадлежит дислокациям. Это связано, в частности, с тем, что дислокации определяют такие важные свойства кристаллов как их пластичность и прочность. Вследствии того, что пластическая деформация есть результат движения и размножения дислокаций, существенной проблемой является изучение динамического поведения дислокаций, которое в свою очередь контролируется их взаимодействием с другими дефектами решетки и с ее различными элементарными возбуждениями.

При изучении динамического поведения дислокаций особо эффективным является метод внутреннего трения. Это связано, прежде всего, с тем, что вклад во внутреннее трение дают только движущиеся дислокации. Вместе с тем, этот метод отличается крайне высокой структурной чувствительностью. Исследование амплитуднозависимого внутреннего трения в ультразвуковом диапазоне частот позволяет изучить взаимодействие движущихся дислокаций с локальными дефектами кристаллической решетки, а результаты исследования амплитуднонезависимого внутреннего трения дают информацию о силах сопротивления движению дислокаций в весьма совершенной решетке.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию дислокационного внутреннего трения монокристаллов хлористого и бромистого калия с целью получения сведений о параметрах, определяющих процесс термоактивированного открепления дислокаций от локаль-

ных дефектов решетки, о скоростных и других динамических характеристиках дислокаций, о процессе перераспределения центров закрепления вдоль линии дислокации.

Работа состоит из пяти глав. Первая глава представляет собой обзор литературных данных. Во второй главе описаны применявшийся метод измерения внутреннего трения и методика приготовления образцов, а в последующих трех главах излагаются и обсуждаются результаты экспериментального исследования.

## И. О Б З О Р

В литературном обзоре рассмотрены модели и обсуждены теоретические представления о дислокационном внутреннем трении, развитые на основе некоторых из этих моделей. Теория Гранато и Люкке [1], основанная на струнной модели закрепленной дислокации, рассматривает дислокационные потери двух типов: динамические, ответственные за амплитуднонезависимое внутреннее трение, и гистерезисные, приводящие к появлению амплитудной зависимости декремента. Гистерезисные потери являются следствием процесса отрыва дислокации от центров закрепления. Отмечается, что теория Гранато и Люкке и ее модификации не учитывают термически активированный характер процесса преодоления центров закрепления и, следовательно, не могут претендовать на описание амплитуднонезависимого внутреннего трения при температурах отличных от  $0^{\circ}\text{K}$ . Рассмотрены работы, в которых развита теория термоактивированного дислокационного гистерезиса.

При построении теории дислокационных потерь динамического типа формально вводится коэффициент демпфирования, характеризующий диссипативные силы. Кратко изложены теоретические рассуждения,

в которых выясняется физическая природа диссипативных процессов, приводящих к торможению дислокаций. Среди известных причин основная роль принадлежит взаимодействию дислокаций с фононами, а среди фононных механизмов особо эффективным является механизм комбинационного рассеяния фононов на осциллирующем упругом поде дислокации [2].

В связи с тем, что движение дислокации в одних случаях описывается в терминах струны, а в других - в терминах перегибов, рассмотрены работы, в которых проведено сопоставление этих описаний. Такое сопоставление показывает, что описание в терминах перегибов предсказывает те же зависимости дислокационных динамических потерь и дефекта модуля упругости от основных параметров, что следуют и из струнного описания, а механизмы диссипации энергии движущимися перегибами имеют ту же физическую природу, что и в случае движения прямолинейной дислокации и дают близкие значения коэффициентов демпфирования.

Рассмотрены имеющиеся экспериментальные данные по дислокационному амплитуднонезависимому и амплитуднозависимому внутреннему трению, и дефекту модуля упругости. Обсуждается, насколько эти данные согласуются с основными выводами, имеющихся теорий. Большинство экспериментальных результатов исследования амплитуднонезависимого внутреннего трения в килогерцевой и мегагерцевой области частот хорошо согласуется с выводами той части теории Гранато и Люкке, в которой рассмотрены потери динамического типа, что касается амплитуднозависимого внутреннего трения, то отмечается почти полное отсутствие данных о температурной зависимости в области  $T < T_{\text{комн}}$ . Рассмотрены немногочисленные экспериментальные дан-

ные о необратимом характере амплитуднозависимого внутреннего трения (гистерезисные эффекты).

Приведенное в обзоре литературы рассмотрение состояния вопроса свидетельствует о том, что к настоящему времени имеются весьма малочисленные данные о термоактивированном дислокационном амплитуднозависимом внутреннем трении, об изменениях внутреннего трения, приводящих к появлению гистерезисных зависимостей декремента от амплитуды. Следовало ожидать, что исследование этих закономерностей даст новую существенную информацию о динамическом поведении дислокации.

## II. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Так как в данной работе ставилась задача изучить дислокационное внутреннее трение, то была выбрана область сравнительно высоких частот  $\sim 10^5$  гц, т.к. на таких частотах вклад точечных дефектов и границ блоков пренебрежимо мал. Использовался резонансный метод двойного составного осциллятора. Была собрана установка, состоящая из составного резонатора, вакуумной камеры и измерительной схемы, в которую входил генератор синусоидальных колебаний, селективный микровольтметр и электронносчетный частотомер. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовался пьезокварц среза  $XYS / - 18^{\circ}30'$ . Измерения при низких температурах проводились в гелиевом криостате. Кратко описан анализ работы пьезоэлектрических элементов, рассмотрены условия, при которых составной осциллятор работает с наименьшими внешними потерями. Рассмотрены методические особенности проведения измерений, форма и размер образцов, которые приготавливались из монокристаллов, выращенных на воздухе путем вытягивания на монокристалльной затравке.

### Ш. ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОЗАВИСИМОГО ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ХЛОРИСТОГО И БРОМИСТОГО КАЛИЯ.

Получение количественной информации о параметрах дислокационной структуры и характеристиках динамического поведения дислокаций по результатам исследования амплитуднозависимого внутреннего трения возможно, если имеется законченная теория, в основу которой положена модель, правильно отражающая поведение дислокации. Поэтому был выполнен ряд измерений с целью установить, какая из предложенных к настоящему времени моделей лучше описывает дислокационное внутреннее трение в изучаемых кристаллах. Проводились измерения внутреннего трения и модуля Юнга в зависимости от амплитуды деформации в недеформированных и отожженных образцах. Декремент затухания и модуль Юнга становятся амплитуднозависимыми при значениях амплитуд выше критической. Дефект модуля Юнга и амплитуднозависимая часть декремента линейно связаны между собой. Влияние примесных атомов на амплитуднозависимое внутреннее трение исследовалось на монокристаллах хлористого калия, выращенных с различным количеством примесных ионов  $Ba^{2+}$  (монокристалл  $KCl$ , выращенный без введения примесных ионов обозначен - кристалл I; выращенный с  $< 0,002$  весовых % ионов  $Ba^{2+}$  - кристалл II; с  $0,003\%$  - кристалл III; с  $0,006\%$  - кристалл IV). Внутреннее трение монокристалла  $KCl$ , выращенного без введения примеси (кристалл I), начинает проявлять сильную амплитудную зависимость при очень низких значениях амплитуды деформации ( $\epsilon < 1 \cdot 10^{-6}$ ). По мере увеличения содержания примесных ионов  $Ba^{2+}$  (кристалл II и III) кривая зависимости внутреннего трения от амплитуды резко смещается в сторону больших значений  $\epsilon$ , а в кристалле IV амплитудная зависимость отсутствует вплоть до амплитуд, при которых происходит круп-

кое разрушение образцов. Пластическая деформация образцов, приготовленных из кристаллов I, II, III приводит к смещению зависимости декремента  $\Delta$  от  $\mathcal{E}$  в сторону меньших значений амплитуд, а в кристалле IV после пластической деформации появляется слабая амплитудная зависимость внутреннего трения. В последеформационный период во всех кристаллах происходит частичный возврат внутреннего трения, что проявляется в обратном смещении кривой  $\Delta(\mathcal{E})$  в сторону меньших  $\mathcal{E}$ . Процесс возврата заканчивается по истечении  $\sim 20$  часов. Повышение температуры приводит к дальнейшему возврату амплитуднозависимого внутреннего трения. Описанные результаты могут трактоваться в рамках "струнной" модели, как вызванное тем или иным воздействием изменение закрепленности дислокации, и свидетельствуют о том, что "струнная" модель хорошо описывает дислокационные потери, по крайней мере, в изучаемых кристаллах.

С целью получения сведений о термоактивационных параметрах процесса преодоления дислокацией центров закрепления проводилось исследование влияния температуры (интервал  $150 \pm 350^\circ\text{K}$ ) на амплитуднозависимое внутреннее трение монокристаллов  $KCl$ , существенно отличающихся степенью закрепленности дислокаций. Амплитуднозависимое и амплитуднонезависимое внутреннее трение обусловлено действием разных механизмов. Поэтому, вычитанием из полных значений декремента величины амплитуднонезависимого внутреннего трения, получали амплитуднозависимую часть декремента  $\Delta_n$ , являющуюся следствием процесса отрыва дислокации от центров закрепления.

В монокристалле  $KCl$ , выращенном без введения примеси (кристалл I), была измерена амплитудная зависимость внутреннего трения при температурах  $200^\circ$ ,  $250^\circ$ ,  $295^\circ$ ,  $348^\circ\text{K}$ . Увеличение температуры сопровождается смещением зависимости  $\Delta(\mathcal{E})$  в сторону больших значений амплитуд и ростом амплитуднонезависимой части внутреннего трения.



Определена энергия активации  $\Delta H$  и активационный объем амплитудно-зависимого внутреннего трения  $\chi$ . Величина  $\Delta H$  линейно уменьшается от 0,1 эв до 0,07 эв при увеличении амплитуды от  $1,5 \cdot 10^{-6}$  до  $2,4 \cdot 10^{-6}$ ,  $\chi = 2,2 \cdot 10^{-19} \text{ см}^3$ . Согласно сложившимся представлениям полученные значения  $\Delta H$  и  $\chi$  представляют собой термоактивационные параметры процесса преодоления дислокацией центров закрепления. Отождествление столь низких значений энергии активации амплитуднозависимого внутреннего трения и энергии активации процесса открепления дислокации предполагает крайне большое число ( $\sim 10^3 + 10^4$ ) термоактивированных откреплений от центра в течение одного полупериода приложенного напряжения, а в таком случае невозможно понять само существование гистерезисных потерь. Процесс преодоления дислокацией центров закрепления определяет подвижность дислокаций и в условиях измерения методом непосредственного наблюдения их перемещения. Однако приведенные выше значения  $\Delta H$  существенно ниже, чем величина  $\Delta H = 0,44$  эв, полученная [3] из измерений подвижности. Но в диссертации приводятся аргументы, которые свидетельствуют о том, что отождествление энергии активации амплитуднозависимого внутреннего трения и энергии активации процесса преодоления дислокацией центра закрепления является неправомерным.

Влияние температуры на амплитуднозависимое внутреннее трение исследовалось также и в кристаллах  $KCl$  с различным содержанием примесных ионов  $Ba^{2+}$ , (кристаллы II, III, IV). Несмотря на отличие амплитудных зависимостей декремента этих кристаллов понижение температуры приводило к аналогичному смещению этих зависимостей в сторону больших значений амплитуд. Полученные данные сопоставляются с теорией термоактивированного дислокационного гистерезиса, развитой Инденбомом и Черновым [4]. Наблюдается хорошее согласие с предсказаниями теории. В частности, проведенное сопоставление позволило

получить численное значение энергии связи дислокации с центром закрепления  $U_0 = 0,63$  эв и величину эффективной частоты попыток  $\nu_{\text{эфф}} = 7,6 \cdot 10^{10}$  гц, а также проследить изменение энергии активации процесса преодоления дислокацией центров закрепления в условиях дислокационного гистерезиса от амплитуды внешнего напряжения. Полученные значения  $\nu_{\text{эфф}}$ ,  $U_0$  и энергии активации процесса отрыва дислокации от центров закрепления, равной при комнатной температуре  $\approx 0,35$  эв, предполагают частоту открепления дислокации практически совпадающую по величине с частотой внешнего приложенного напряжения, т.е. одно открепление дислокации в течение полупериода внешнего напряжения. Именно при такой частоте термоактивированных откреплений механизм гистерезисных дислокационных потерь эффективен. По амплитудной зависимости дислокационного внутреннего трения восстановлена функция распределения дислокационных сегментов по длинам  $N(L)$ . Такая функция получена для кристаллов  $KCl$  с различным количеством примесных ионов  $Ba^{2+}$ . Важным обстоятельством является то, что функция распределения является степенной, а не экспоненциальной, как это предполагает распределение Келера. Полученные функции распределения правильно отражают изменение закреплённости дислокации вследствие изменения содержания примесей в кристалле.

Из рассмотрения взаимодействия дислокации с одиночным примесным атомом следуют (по крайней мере в приближении упругого взаимодействия) низкие значения энергии связи ( $0,1 + 0,25$  эв). Полученное значение  $U_0 = 0,63$  эв. показывает, что в данном случае центрами закрепления являются не одиночные атомы примеси, а комплексы (диполи, тримеры и т.д.), состоящие из примесного катиона, который, взаимодействуя с вакансией положительного иона, образует примесь - вакансионный диполь, или из групп диполей.

Диполь создает сильное тетрагональное искажение решетки, и, следовательно, является эффективным центром закрепления дислокации.

#### IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И МОДУЛЯ ЮНГА.

Измерения внутреннего трения и модуля Юнга монокристаллов *KCl* и *KBr* показали, что в амплитуднозависимой области как декремент затухания, так и модуль Юнга зависят от времени возбуждения в образце ультразвуковых колебаний. Это, в частности, приводило к появлению гистерезиса модуля Юнга и декремента затухания, выражавшегося в несоответствии зависимости декремента и модуля Юнга от амплитуды деформации, полученных при увеличении и уменьшении амплитуды. Площадь гистерезисной кривой зависит от величины предельной амплитуды, достигнутой в данном измерении, от скорости проведения измерений и от величины промежутка времени между получением "прямой" и "обратной" кривой. Зависимость дефекта модуля Юнга и декремента затухания от времени носит аналогичный характер. Было установлено, что возбуждение в образце колебаний с амплитудой, превышающей критическую, вызывает уменьшение модуля Юнга, причем изменение наиболее интенсивно в первый момент возбуждения колебаний в образце, а в дальнейшем модуль Юнга асимптотически приближается к определенному, равновесному для данной амплитуды значению. Прекращение возбуждения, либо переход к возбуждению с амплитудой, меньшей критической, приводят к возврату модуля Юнга к своему исходному значению. Характер кривой изменения модуля в процессе возбуждения колебаний с  $\epsilon > \epsilon_{кр}$  и в процессе возврата при  $\epsilon < \epsilon_{кр}$  аналогичны, а параметры, которые характеризуют эти кривые, такие как время, в течение которого до-

стигается равновесное значение, время релаксации и полное изменение модуля совпадают в пределах погрешности эксперимента. Исследовалось влияние величины амплитуды деформации на временные зависимости: увеличение  $\mathcal{E}$  сопровождается ростом величины полного изменения модуля, но время, необходимое для достижения равновесного значения, не зависит от  $\mathcal{E}$ . Возбуждение ультразвуковых колебаний с одной и той же амплитудой до и после предварительной пластической деформации показало, что пластическая деформация приводит к резкому увеличению величины полного изменения модуля. В последеформационный период происходит уменьшение этой величины, но даже по прошествии  $\sim 50$  часов, когда полностью прошел процесс возврата, величина полного изменения модуля в деформированном кристалле оставалась существенно больше, чем в недеформированном. Важно отметить, что результаты по влиянию пластической деформации на временные зависимости, свидетельствуют о том, что наблюдаемый эффект имеет дислокационную природу, а так как он имеет место в амплитудозависимой области, то это показывает, что механизм этого эффекта связан с взаимодействием дислокаций с центрами закрепления. Для выяснения влияния термических флуктуаций на процесс, определяющий временную зависимость внутреннего трения и дефекта модуля Юнга, при фиксированной амплитуде колебаний проводились измерения временных зависимостей модуля Юнга при температурах  $273^{\circ}$ ,  $77^{\circ}$  и  $4,2^{\circ}\text{K}$ . Понижение температуры сопровождается уменьшением величины полного изменения модуля и увеличением времени, необходимого для достижения равновесного значения модуля. Критическая амплитуда, выше которой наблюдается временная зависимость, при понижении температуры от  $373^{\circ}$  до  $85^{\circ}\text{K}$  увеличивается в  $\approx 2$  раза.

Изменение во времени внутреннего трения и дефекта модуля.

является следствием процесса перераспределения подвижных центров закрепления вдоль линии дислокации. Первоначальное распределение устанавливается вследствие стремления к увеличению энтропии кристалла, имеющего дислокации, которые закреплены центрами, причем конфигурационная энтропия приводит к чисто случайному (экспоненциальному) распределению, а колебательная энтропия искажает это распределение, выделяя длинные петли с их низшими гармониками за счет сокращения более коротких петель. Приложение внешнего напряжения вызывает изменение функции распределения центров закрепления дислокации вследствие их диффузионного перераспределения вдоль ядра дислокации. Теоретическое рассмотрение [5-8] перераспределения центров закрепления дислокации находится в хорошем согласии с полученными экспериментальными результатами. Кинетическое уравнение [7] отражает знак изменения модуля и декремента при возбуждении ультразвуковых колебаний и после их окончания. Из [7] следует, что такие характеристики кинетики изменения дефекта модуля, как время установления равновесного значения и время релаксации, не зависят от величины амплитуды колебаний, а времена установления равновесных значений и времена релаксации при возбуждении ультразвуковых колебаний и после их прекращения равны между собой, что наблюдалось в описанных выше экспериментах. Из [7] следует, что имеется линейная связь между значениями полного изменения модуля и отвечающими этим величинам значениями квадрата амплитуды. Результаты по влиянию амплитуды колебаний на временную зависимость модуля Юнга описываются такой зависимостью. Обработка результатов в рамках этой теории позволила оценить нижний предел значения среднего расстояния между центрами закрепления дислокации:  $\bar{l} \gg 2 \cdot 10^{-6}$  и получить величину коэффициента канальной диффузии подвижных центров закрепления вдоль линии дислокации:  $D^P = 2 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/сек.

У. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДИСЛОКАЦИИ МЕТОДОМ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ.

В связи с тем, что процесс пластической деформации кристаллических тел осуществляется движущимися дислокациями, проблема динамического поведения дислокаций в кристаллах имеет крайне важное значение. Среди методов изучения динамики дислокаций важную роль играет метод внутреннего трения, т.к. он дает информацию о поведении дислокаций в достаточно совершенной решетке.

Для определения скоростных характеристик дислокаций из опытов по внутреннему трению можно использовать выражение Бейкера<sup>[9]</sup>

$$\bar{V} \approx 4f \left( \frac{\Delta E}{E} \right) \left( \frac{\epsilon}{N\ell} \right)$$

где  $\frac{\Delta E}{E}$  - дефект модуля Юнга,  $N$  - плотность дислокаций,  $\ell$  - вектор Бюргерса,  $f$  - частота колебаний. Чтобы получить данные, необходимые для определения скорости дислокации в зависимости от напряжения и температуры, измерялись начальное значение модуля Юнга отожженного образца  $KBr$  и его температурная зависимость, а при фиксированных температурах 85, 273 и 373<sup>0</sup>К измерялась амплитудная зависимость модуля Юнга. После деформирования монокристаллов на величину  $\sim 2\%$  такие измерения повторялись. Дефект модуля, вызванный пластической деформацией, был равен  $1,9 \cdot 10^{-2}$  и в интервале температур 85<sup>0</sup> + 373<sup>0</sup>К не изменялся. В кристаллах, выращенных как без введения примеси, так и с примесью ионов  $Ba^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ , дефект модуля был практически один и тот же. При переходе к большим амплитудам дефект модуля увеличивался незначительно. Среднее значение декремента при 0<sup>0</sup>С было до деформации  $\Delta_i = 1,3 \cdot 10^{-4}$ , а после деформации  $\Delta_i = 4,9 \cdot 10^{-4}$ . Из этих данных была определена зависимость средней скорости движения дис-

локации от напряжения, которая представляет собой прямую с наклоном  $5,2 \cdot 10^{-1}$  дн.сек.см<sup>-2</sup>. Важно отметить, что полученная зависимость скорости дислокации от напряжения имеет принципиальные отличия от аналогичной зависимости, измеренной [10] в том же монокристалле методом непосредственного наблюдения перемещения дислокаций:

а) в опытах по внутреннему трению скорость движения дислокаций не зависит от температуры и нечувствительна к наличию примесей, тогда как скорость, измеренная по смещению фигур травления, резко зависит как от температуры, так и от наличия примесей;

б) полученные значения скорости дислокаций реализуются при напряжениях в  $10^1$ - $10^2$  раз меньших, чем при измерении по смещению фигур травления;

в) измеренная методом внутреннего трения скорость дислокаций имеет низкую чувствительность к напряжению, в то время как аналогичная зависимость, полученная методом непосредственного измерения перемещения дислокаций по фигурам травления, имеет сильную чувствительность и только в области высоких напряжений наблюдается низкая чувствительность.

Такое резкое отличие скоростных зависимостей обусловлено существенным различием физических условий, в которых осуществляется движение дислокаций в этих двух случаях. При измерении скорости методом внутреннего трения дислокация проходила средние расстояния менее  $20b$  ( $b$  - вектор Бюргерса). При смещении на такие малые расстояния и при столь низких приложенных напряжениях могут реализовываться механизмы, действие которых приводит к появлению небольших сил сопротивления. Релаксационные механизмы торможения вызывают появление демпфирующей силы  $BV$ , где  $B$  - коэффициент демпфирования. Из данных по амплитуднонезависимому декременту была получена величина коэффициента  $B = 1,7 \cdot 10^{-3}$  дн.сек.см<sup>-2</sup>. Такое значение  $B$  дает демпфирующую силу, которая в данном случае вно-

сит незначительный вклад в сумму сил сопротивления движению дислокаций. Анализ показал, что в условиях внутреннего трения среди сил сопротивления доминирующую роль играет сила, обусловленная натяжением вдоль линии дислокации. Полученная величина  $V$  хорошо согласуется со значением коэффициента демпфирования, обусловленным действием механизма комбинационного рассеяния фононов на осциллирующем упругом поле дислокации [2]. Этот механизм дает значение  $V$  равное  $2,4 \cdot 10^{-3}$  дн.сек.см<sup>-2</sup>.

В случае определения зависимости  $V$  от  $\tau$  путем непосредственного измерения перемещения дислокации последняя находится в совсем иных условиях, чем в опытах внутреннего трения. Дислокация перемещается на большие расстояния — несколько микрон и преодолевает на пути движения различные энергетические барьеры, связанные с локальными искажениями кристаллической решетки, которые в опытах по внутреннему трению из-за малости перемещений дислокации не преодолеваются. Наличие иных сил сопротивления движению приводит к иной зависимости  $V$  от  $\tau$ , а также к различному влиянию примесей и температуры на эту зависимость.

Сопоставление полученной скоростной зависимости дислокаций с аналогичной зависимостью, относящейся к случаю перемещения дислокации на большие расстояния, как это имеет место при измерении методом непосредственного наблюдения перемещения дислокации, дало возможность оценить отношение времени задержки дислокаций у барьеров к времени движения между барьерами, которое изменяется от  $10^7$  при напряжении  $\tau = 85 \text{ г/мм}^2$  до  $10^0$  при  $\tau = 120 \text{ г/мм}^2$ .

## ВЫВОДЫ

I. Создана установка для измерения внутреннего трения и модуля Юнга резонансным методом двойного составного осциллятора в



области частот  $\sim 10^5$  гц.

2. Проведены измерения амплитудной зависимости внутреннего трения и дефекта модуля Юнга в монокристаллах  $KCl$  и  $KBr$  до деформации и после последеформационного отдыха. Наблюдалась линейная связь между амплитуднонезависимым внутренним трением и дефектом модуля Юнга. Исследован процесс возврата амплитуднонезависимого трения после пластической деформации. Проведены измерения амплитуднозависимого внутреннего трения в монокристаллах  $KCl$  с различным содержанием примесных ионов  $Ba^{2+}$ . Результаты свидетельствуют о том, что "струнная" модель хорошо описывает дислокационное внутреннее трение.

3. Исследовано влияние температуры на амплитуднозависимое внутреннее трение монокристаллов хлористого калия с различным содержанием примесных ионов  $Ba^{2+}$ .

4. Определена энергия активации и активационный объем амплитуднозависимого внутреннего трения монокристаллов  $KCl$ . Энергия активации линейно изменялась от 0,1 эв до 0,077 эв при увеличении амплитуды. Активационный объем оказался равным  $2,2 \cdot 10^{-19} \text{ см}^3$ .

5. Оценена энергия взаимодействия дислокации с центром закрепления в кристаллах  $KCl$ , оказавшаяся равной 0,63 эв. Такое высокое значение энергии взаимодействия позволяет сделать вывод о том, что центрами закрепления дислокации являются примесь-вакансионные диполи.

6. Получена зависимость энергии активации процесса преодоления дислокацией центра закрепления от амплитуды внешнего напряжения для кристаллов с разным средним расстоянием между центрами закрепления.

7. Определена функция распределения дислокационных сегментов по длинам, которая является степенной с показателем степени 6,5.

Изменение функции распределения отражает изменение закрепленности дислокаций по мере увеличения содержания примесных ионов  $Ba^{2+}$  в кристаллах. Данная функция распределения предполагает степенную зависимость декремента затухания от амплитуды деформаций с показателем  $n = 2,2$ .

8. В амплитуднозависимой области наблюдался гистерезис внутреннего трения и дефекта модуля Юнга монокристаллов  $KCl$  и  $KBr$ . Исследована временная зависимость дислокационного внутреннего трения и дефекта модуля Юнга в зависимости от амплитуды ультразвуковых колебаний, температуры, пластической деформации.

9. Измерено время релаксации процесса перераспределения подвижных центров закрепления вдоль линии дислокации в кристаллах  $KBr$ , которое оказалось равным  $3 \pm 5$  мин.

10. Оценен коэффициент канальной диффузии подвижного центра закрепления вдоль ядра дислокации, который оказался равным  $D^p = 2 \cdot 10^{-10} \frac{cm^2}{сек}$ .

11. Получена зависимость скорости дислокаций от амплитуды напряжения в монокристаллах  $KBr$  в условиях колебательного движения дислокаций между центрами закрепления в области температур  $T = 77 \pm 400^\circ K$ .

12. Анализ сил сопротивления движению дислокаций в условиях колебательного движения показал, что доминирующую роль играет сила натяжения вдоль линии дислокации.

13. Сопоставление полученной скоростной зависимости дислокаций с аналогичной зависимостью, относящейся к случаю перемещения дислокаций на большие расстояния, дает оценку отношения времени задержки дислокаций у барьеров к времени движения, которое изменяется от  $10^7$  при напряжении  $\tau = 85 \text{ г/мм}^2$  до  $10^0$  при напряжении  $\tau = 120 \text{ г/мм}^2$ .

14. Определен коэффициент демпфирования дислокаций в кристаллах  $KBr$ , оказавшийся равным  $B = 1,7 \cdot 10^{-3}$  дн.сек.см<sup>-2</sup>. Такое значение коэффициента демпфирования согласуется с механизмом комбинационного рассеяния фононов осциллирующим упругим полем движущейся дислокации.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A. V. Granato, K. Lücke, *J. Appl. Phys.*, 27, 583, 1956.
2. В.И. Альшиц, ФТТ, II, 2405, 1969.
3. С.В. Лубенец, В.И. Старцев, ФТТ, 10, 22, 1968.
4. В.М. Чернов, В.Л. Инденгом, ФТТ, 10, 3331, 1968; препринт Физико-энергетического института, ФЭИ-215, Обнинск, 1970.
5. K. Yamafuji, Ch. L. Bauer, *J. Appl. Phys.*, 36, 3288, 1965.
6. Т.Д. Шермергор, М.Б. Белов, ФТТ, 10, 2612, 1968.
7. А.И. Ландау, УФЖ, 15, 1701, 1970.
8. В.И. Белявский, Б.М. Даринский, В.С. Постников, Внутреннее трение в металлических материалах, стр. 32, "Наука", М, 1970.
9. J. S. Baker, *J. Appl. Phys.*, 33, 1730, 1962.
10. В.Б. Парийский, А.И. Третьяк, ФТТ, 9, 2457, 1967.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы

в следующих статьях:

1. В.Я. Платков, В.И. Старцев, ФТТ, 8, 1994, 1966.
2. В.Я. Платков, *Acta Cryst.*, 21, A180, 1966.
3. В.Я. Платков, В.П. Ефименко, В.И. Старцев, ФТТ, 9, 2799, 1967.
4. В.Я. Платков, В.И. Старцев, сб. "Релаксационные явления в твердых телах", из-во, "Металлургия", 1968, стр. 499.
5. В.Я. Платков, ФТТ, II, 435, 1969.

6. В.Я.Платков, Н.Н.Леднева, В.И.Старцев, ФТТ, II, 3658, 1969.
7. В.Я.Платков, Н.Н.Леднева, В.И.Старцев, "Физика конденсированного состояния", Харьков, в. 5, 213, 1969.

Отдельные разделы диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и совещаниях:

1. IV Всесоюзная научная конференция по релаксационным явлениям в твердых телах, Воронеж, октябрь, 1965.
2. УП Международный кристаллографический конгресс, Москва, июнь, 1966.
3. Всесоюзное совещание по внутреннему трению в неметаллических неорганических материалах, Ереван, ноябрь, 1966.
4. Всесоюзное совещание по динамическому поведению и взаимодействию дислокаций, Харьков, сентябрь, 1967.
5. Всесоюзное совещание по механизмам внутреннего трения, Батуми, октябрь, 1968.
6. V Всесоюзная конференция по релаксационным явлениям в твердых телах, Москва, июнь, 1969.
7. Республиканское совещание по ультразвуку твердого тела, Киев, сентябрь, 1969.

Ответственный за выпуск канд. физ.-мат. наук Комник С.Н.

БЦ 20328, подписано к печати 21/ХП-1971г., физ.п.л. I,0, усл.п.л. I,17, заказ № 377, тираж 160.

Ротап rint ФТИНТ АН УССР, Харьков 86, пр. Ленина, 47.