

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-2005-152

На правах рукописи

УДК 548.4; 539.2; 539.3; 536.2; 536.63

ЧУРОЧКИН
Дмитрий Викторович

**ДИНАМИКА ЛИНЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ
И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
УПРУГИХ СРЕД**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2005

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

В.А. Осипов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

В.М. Чернов (ВНИИНМ, г. Москва)

доктор физико-математических наук

Л.М. Зубов (НИИМ и ПМ, г. Ростов-на-Дону)

Ведущая организация:

Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2005 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “_____” _____ 2005 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



С.И. ФЕДОТОВ

Актуальность темы. В теории дислокаций широкое распространение, благодаря своей физической наглядности и математической простоте, получила струнная модель Гранато-Люке. В основе модели лежит аналогия между колебанием пинингованного сегмента дислокационной линии и вынужденным колебанием струны, испытывающей затухание. Базовыми характеристиками модели являются линейное натяжение, эффективная масса и постоянная демпфирования, которые для дислокаций были рассчитаны в серии работ Лауба, Эшелби, Ниномии и Ишиоки. В рамках модели колеблющейся струны были успешно рассмотрены вопросы дислокационного внутреннего трения, вклада дислокаций в теплоемкость и рассеяние фононов. Учет взаимодействия между дислокациями, рассматриваемыми как струна, позволил Низелю и Гранато на основе дипольных представлений о ансамбле дислокаций описать поведение низкотемпературной теплопроводности пластически деформированного кристалла LiF, находящегося в сверхпроводящем состоянии. В серии недавних экспериментов, исследовались низкотемпературное внутреннее трение, теплопроводность, теплоемкость и теплота выхода пластически деформированных кристаллических образцов алюминия, тантала и ниобия высокой чистоты, находящихся в сверхпроводящем состоянии. Полученные данные сравнивались с результатами экспериментальных измерений того же набора характеристик в аморфном кремнии SiO₂. Было установлено, что пластическая деформация оказывает ярко выраженное влияние на поведение теплопроводности и внутреннего трения. А именно, внутреннее трение демонстрирует атермальное и частотно-независимое поведение, а его величина возрастает на два порядка по сравнению с отожженными образцами, и становится сравнимым по порядку величины с внутренним трением в аморфном кремнии. Кроме того, теплопроводность также принимает значения, попадающие в диапазон, характерный для аморфного кремния. В то же время, никаких аномалий ни по теплоте выхода, ни по теплоемкости, характерных для аморфного состояния, в случае деформированных металлов

не наблюдалось. Такое поведение указывает на то, что рассеяние фононов на дислокациях определяет низкотемпературные характеристики пластически деформированных металлов, находящихся в сверхпроводящем состоянии. Одной из целей работы было нахождение механизма релаксации, который позволил бы объяснить наблюдаемые эффекты, поскольку, как отмечено в диссертации, известных доминирующих в области низких температур релаксационных процессов оказалось недостаточно для описания наблюдаемых эффектов.

Как хорошо известно, наряду с дислокациями, ответственными за нарушения трансляционной симметрии кристалла, существуют линейные дефекты, дисклинации, вызывающие нарушения ротационной симметрии кристалла. В работах Даса и Коссеки исследовалось движение дисклинаций и дисклинационных петель и были найдены выражения для силы, действующей на линию дисклинации и её ось, а также условие консервативности движения дисклинаций. Однако до настоящего времени не было построено модели, позволяющей количественно оценить влияние динамики дисклинаций на физические характеристики упругих сред. Следует отметить, что в последнее время широко исследуется влияние дисклинаций и дисклинационных петель на физические характеристики топологически неупорядоченных систем (стекло), демонстрирующих аномалии по целому спектру свойств: теплопроводности, теплоемкости, внутреннему трению, теплоте выхода, относительному изменению скорости звука. Кроме того, структурные свойства металлических стекол могут быть смоделированы на основе дисклинационных представлений. Для описания целого ряда физико-механических характеристик оказалось вполне достаточным представлений о статических дисклинациях, обладающих дальнедействующими полями напряжений. Как правило, статическая дисклинация в таком случае моделируется дислокационной стенкой. Однако, данное приближение требует уточнения при рассмотрении динамических характеристик, прежде всего связанных с процессами рассеяния, поскольку квазидвумерный объект (стенка) и линейный объект (дисклинация) участвуют в рассеянии по разному. Таким образом, представляется актуальным построение модели, которая учитывала бы специфику дина-

мики дисклинаций. В диссертации построена струнная модель, описывающая движение дисклинаций кручения и оценен вклад дисклинаций в теплоёмкость и внутреннее трение.

Целью работы является исследование тепловых и акустических свойств упругих сред, обусловленных динамикой линейных дефектов, в рамках модифицированных струнных моделей.

Научная новизна и практическая ценность. Показано, что в отличие от случая дислокаций, динамику дисклинаций необходимо моделировать с помощью представлений о неоднородной струне. Рассчитаны характеристики такой струны: эффективная масса, линейное натяжение, параметр демпфирования. В рамках модели неоднородной струны, вычислены вклады в теплоемкость и внутреннее трение, обусловленные динамикой дисклинаций. Построенная в диссертации струнная модель для дисклинаций может быть использована при расчете релаксационных свойств материалов, структура которых предполагает наличие в них линейных дефектов ротационного типа. Модель допускает возможность дальнейшей модификации, для учета взаимной экранировки дефектов, шумов напряжений, а также наличия внешнего потенциального рельефа.

Показано, что учет взаимодействия между дислокациями и шумов напряжений произвольной природы, в рамках подхода Чернова-Камаевой, позволяет описать недавние эксперименты по тепловым и акустическим свойствам пластически деформированных металлов в сверхпроводящем состоянии. Принятие во внимание отмеченных факторов актуально для экспериментов по внутреннему трению, поскольку даже незначительное по амплитуде по отношению к основному периодическому сигналу шумовое воздействие при высокой степени пластической деформации, когда дислокации формируют сильноэкранированные системы, приводит к изменению значений низкочастотного внутреннего трения при низких температурах на несколько порядков. Наиболее просто учесть этот эффект в случае дипольного взаимодействия дислокаций.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической фи-

зики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, а также представлялись и докладывались на: 6-ой научной конференции молодых ученых и специалистов (Дубна, 2002); Международной школе по топологии в физике конденсированного состояния TOPCON02 (2002, Дрезден, Германия); Международной конференции "Extended defects in semiconductors"(2002, Болонья, Италия); Международной конференции "Structural Relaxation in Solids" (2003, Винница, Украина); III Всероссийской конференции по теории упругости с международным участием (2003, Ростов-на-Дону - Азов, Россия); XXX Международной зимней школе физиков-теоретиков "Коуровка-2004"(2004, Екатеринбург-Челябинск, Россия); Международной конференции "Unifying Concepts in Glassy Physics III"(2004, Бангалор, Индия); XXI Международном Конгрессе по Теоретической и Прикладной Механике (2004, Варшава, Польша).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем 95 страниц, включая 23 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 64 наименований.

Содержание работы

Во введении обсуждается актуальность проводимых исследований. Дано краткое содержание диссертации.

В первой главе подробно рассматриваются механизмы диссипации, связанные с линейными дефектами. Можно выделить условно две группы таких механизмов. Во первых, это диссипация, вызванная взаимодействием линейных дефектов с источниками потенциальных барьеров различной природы, сюда можно отнести как взаимодействие с точечными дефектами, так и специфическое влияние решетки, отражающее ее дискретность, а именно, существование барьеров Пайерлса . Ко второй группе механизмов можно отнести диссипацию, вызванную взаимодействием дислокации с различными элементарными возбуждениями в кристалле: фононами, электронами проводимости, и т.д.

Особое внимание уделяется механизмам, определяющим поведение диссипации в области низких температур, ниже температуры сверхпроводящего перехода. Отмечается, что в сверхпроводящей области, при достаточно низких температурах, диссипация, обусловленная динамикой линейного дефекта в упругом поле падающей волны (флаттер-эффект), и диссипация, обусловленная движением линейного дефекта или части его (кинка) в барьере Пайерлса, являются доминирующими. Дополнительно обсуждается недавно исследованный Черновым и Камаевой вопрос о шумовом воздействии на дислокацию. Как было показано авторами модели, шум напряжений ведет к возникновению дополнительного канала диссипации, дающего существенный постоянный в области низких частот вклад в декремент.

Во второй главе вводится понятие линейного дефекта в упругой среде и на основе существующей теории детально излагаются известные результаты, касающиеся вопросов консервативности движения линейных дефектов. Отмечается, что дисклинация кручения как и обычные дислокации имеет естественную плоскость скольжения и, следовательно, для нее допустимо моделирование с помощью эффективной струны. Формулируется струнная модель для квазиравновесной динамики дисклинаций кручения. Квазиравновесность означает, что движение дисклинации кручения происходит таким образом, что в каждый момент времени она находится в положении упругого равновесия со средой. Тогда можно применить известную формулу теории дислокаций для линейного натяжения

$$F = T/\rho, \quad (1)$$

где T - статическое линейное натяжение, ρ - радиус кривизны, и F - компонента силы Пича-Келлера, действующая в плоскости скольжения; F имеет смысл силы реакции среды на искривление линейного дефекта. Соотношение для T перенесено без изменений на случай дисклинаций, поскольку оно получено из геометрических соображений для линии произвольной природы, находящейся под действием внешней силы F . Пусть дефекты двигаются по механизму скольже-

ния. Сила Пича-Келлера, действующая на единицу длины линейного дефекта имеет вид

$$f_r = \varepsilon_{rak} \tau_a u_i^P \sigma_{ik}, \quad (2)$$

где τ_a - единичный касательный вектор к линии дефекта, u_i^P - скачок поля смещений обусловленный, наличием линейного дефекта, σ_{ik} -тензор напряжений, ε_{rak} - полностью антисимметричный единичный тензор. Тензор напряжений определяется через квазистатические поля смещений в упругой среде, вызванные пластической деформацией, обусловленной движением дефекта. Используя метод функций Грина, поле смещений можно представить в виде

$$u_n(\vec{r}, t) = - \int c_{ijkl} G_{jn,i} \delta e_{kl}^{pl} dV', \quad (3)$$

где c_{ijkl} -тензор упругих постоянных, G_{jn} -тензорная функция Грина, δe_{kl}^{pl} -вариация пластической части тензора деформации. По повторяющимся индексам подразумевается суммирование, и $G_{jn,i} = \partial G_{jn} / \partial x_i$. В результате расчетов в конкретной геометрии (линия дисклинации по оси z, ось дисклинации по оси y) для среднего линейного натяжения дисклинации кручения было получено выражение

$$T(z) = \frac{\mu \Omega^2 z^2}{2}, \quad (4)$$

где μ - модуль сдвига, Ω - мощность дисклинации. Массу единицу длины дисклинации кручения определяем из кинетической энергии E движущейся дисклинации (подобный прием был использован Ниномией для определения эффективной массы дислокации)

$$E = \frac{\rho}{2} \int \sum_i \dot{u}_i^2 dV \quad (5)$$

В результате расчетов приходим к результату

$$m(z) = \frac{\rho \Omega^2 z^2}{2} \quad (6)$$

где $m(z)$ -масса единицы длины дисклинации, ρ - плотность.

Следует отметить, что как линейное натяжение, так и масса характеризуют вклад в свободную энергию от дисклинации кручения. Расходимость этих

параметров модели целиком обусловлена ротационным типом дефекта и специфическим характером полей напряжений вокруг него. Для дислокаций подобная зависимость от размеров среды отсутствует из-за постоянства скачка поля смещений. Как видно из полученных результатов, линейное натяжение и масса дисклинации кручения зависят от z . Это означает, что дисклинацию кручения мы должны трактовать как *неоднородную* струну. В этом состоит существенное отличие от случая дислокаций, в котором струна была однородной. Уравнение движения неоднородной струны имеет вид

$$m(z) \frac{\partial^2 \epsilon(z, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left(T(z) \frac{\partial \epsilon(z, t)}{\partial z} \right). \quad (7)$$

Полагаем, что концы дисклинации кручения закреплены, то есть $\epsilon(-L) = \epsilon(L) = 0$. Удовлетворяющее таким граничным условиям решение имеет вид

$$\epsilon(z, t) = \frac{\epsilon_0 v}{\omega z} \sin \frac{\omega z}{v} \cos \omega t, \quad (8)$$

здесь ϵ_0 максимальная амплитуда (при $z = 0$), и спектр

$$\omega_n = v |k_n|, \quad k_n = \pi n / L, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9)$$

Получено решение, узлы которого расположены регулярно. Этот факт позволяет рассчитать вклад в тепловые характеристики решетки от дисклинаций кручения подобно тому как это было сделано в случае дислокаций. Вклад в теплоемкость дисклинаций кручения рассчитывается аналогично случаю дислокаций. А именно, задача сводится к расчету внутренней энергии одномерного кристалла

$$U = \sum_n \frac{\hbar \omega_n}{\exp(\hbar \omega_n / k_B T) - 1}, \quad (10)$$

суммирование происходит по всем нормальным колебаниям дисклинации кручения. В результате вычислений приходим к выражению

$$C_v = p \frac{\pi^2}{3} \frac{\Lambda a_0^2}{Z} N k_B \frac{T}{\Theta}, \quad (11)$$

где a_0 - постоянная решетки, Λ - плотность дисклинаций, N - количество атомов в моле вещества, Z - количество атомов в элементарной ячейке, Θ - температура

Дебая и $p = v_0/v$, где v_0 - скорость звука в идеальной решетке. Полученный результат по форме совпадает с аналогичной оценкой для дислокаций. Таким образом, вклад дисклинаций кручения в теплоемкость линейен по плотности дефектов и по температуре.

Учет торможения в рамках струнной модели осуществляется добавлением еще одного слагаемого в уравнение движения. Для дислокаций это было сделано Гранато. Физически, существование трения у дисклинации характеризует наличие внутреннего трения в среде, обусловленного потерями на дисклинации. Для количественной оценки внутреннего трения вводится понятие декремента Q^{-1} , который имеет смысл относительных потерь за цикл. Смещения дисклинации с учетом диссипации подчиняются общему уравнению движения неоднородной струны

$$m(z) \frac{\partial^2 \epsilon(z, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left(T(z) \frac{\partial \epsilon(z, t)}{\partial z} \right) - B \frac{\partial \epsilon(z, t)}{\partial t} + F_i, \quad (12)$$

где B - постоянная демпфирования, F_i - внешняя сила. Известно несколько механизмов, ограничивающих движение дислокаций, связанных как с ангармоническими фоновыми механизмами торможения равномерно движущихся дислокаций (фононная вязкость, термоупругая диссипация, фононное рассеяние, фононный ветер) так и с фоновыми механизмами торможения, обусловленными возбуждением собственных степеней свободы движущихся дислокаций (флаттер-эффект, радиационное трение, комбинационное рассеяние фононов). В области низких температур, одним из главных и наиболее интересных вкладов в диссипацию энергии будет вклад, обусловленный колебаниями дислокации в фононном поле (флаттер-эффект). Флаттер-эффект будет иметь место и для дисклинации кручения из-за наличия у нее поверхности скольжения по которой она может легко перемещаться в поле внешних сил. Поле напряжений налетающего фонона вызывает колебания дисклинации кручения, которые приведут к генерации и излучению упругих волн, обуславливающих рассеяние энергии падающей волны. Для расчета параметра демпфирования B дисклинации кручения, учитывающего флаттер дисклинации, применялся метод

фиктивных сил Эшелби и использовалась динамическая функция Грина изотропной упругой среды. В конкретной геометрии (линия дисклинации по оси z, ось дисклинации по оси y) было получено выражение для В вида

$$B = \frac{\mu\Omega^2 z^2 c_t^2 \omega}{8} \left(\frac{1}{c_t^4} + \frac{1}{c_l^4} - \frac{2k^2}{c_l^2 \omega^2} \right), \quad (13)$$

где c_t , c_l - поперечная и продольная скорости звука; k - z-компонента волнового вектора; ω - частота фононов. Легко видеть, что В также становится зависимым от z. Расчет дисклинационного внутреннего трения с z-зависимым параметром демпфирования приводит к выражению

$$Q^{-1} = \frac{8\Omega^2 q^2 \gamma \omega \mu}{\pi \alpha} \sum_n \frac{1}{n^2 (\gamma^2 \omega^2 + (\omega^2 - k_n^2 v^2)^2)}, \quad (14)$$

где $q = \sigma_0 / \sigma_\alpha$ -ориентационный фактор;

$$\gamma = \frac{c_t^4 \omega}{4} \left(\frac{1}{c_t^4} + \frac{1}{c_l^4} - \frac{2k^2}{c_l^2 \omega^2} \right), \quad (15)$$

$$\alpha = \rho \Omega^2 / 2. \quad (16)$$

Легко видеть, что в рамках предложенной модели внутреннее трение, обусловленное дисклинациями кручения, не зависит от мощности дисклинации Ω . Кроме того Q^{-1} пропорционально четвертой степени длины дисклинации. Для дислокаций в рамках струнной модели был получен подобный результат, следовательно, существует глубокая аналогия в поведении линейных дефектов, обладающих плоскостями скольжения, в динамических процессах.

В заключение главы изложен оригинальный результат по расчету вклада во внутреннее трение LiF от ансамбля оптически колеблющихся диполей краевых дислокаций. Исследована зависимость дипольного вклада от размера плеча. Показано, что наличие диполей приводит к повышению частоты пика внутреннего трения.

В третьей главе построена теоретическая модель, являющаяся модификацией модели Чернова и Камаевой, описывающая динамику диполей дислокаций в поле случайных и периодических сил, позволяющая самосогласованно объяснить недавние эксперименты по теплопроводности и внутреннему трению в

пластически деформированных образцах Al, Ta, Nb высокой чистоты, в сверхпроводящем состоянии. Пластическая деформация приводила к увеличению на два порядка внутреннего трения по сравнению с отожженными образцами и к изменению кривой теплопроводности в области низких температур. В то же время теплоемкость и теплота выхода демонстрировали стандартное поведение. Результаты экспериментов указывают на то, что рассеяние фононов на дислокациях играет ключевую роль для объяснения наблюдавшихся эффектов.

Как хорошо известно, существует два класса принципиально различных механизмов рассеяния фононов на дислокациях: рассеяние, обусловленное статическими полями напряжений дислокации, и рассеяние, связанное с динамикой дислокаций. Первый из них связан с ангармоничностью дислокационных полей напряжений, тогда как последний обусловлен колебаниями дислокации, индуцированными проходящей акустической волной. В этом случае, падающая энергия рассеивается, так как колеблющаяся дислокация излучает собственные упругие волны (флаттер-эффект). В эксперименте чрезвычайно трудно выяснить какой из двух типов рассеяния доминирует, и особенно, получить количественное согласие между наблюдаемыми эффектами и теоретическими расчетами, выполненными на основе статической или динамической моделей. Кроме того, было установлено, что оба механизма фононного рассеяния ансамблем единичных дислокаций, не позволяют описать целый ряд наблюдавшихся эффектов в теплопроводности пластически деформированных образцов. К примеру, оценка вклада в теплопроводность по механизму резонансного взаимодействия фононов с дислокацией, соответствовала наблюдавшейся в эксперименте только при длинах дислокационного сегмента много меньших чем экспериментально полученные. Заметим, что подобного рода проблемы уже возникали в экспериментах по теплопроводности пластически деформированного LiF. Эксперименты по теплопроводности и баллистике распространения фононов в деформированном LiF при низких температурах показывают, что фононное рассеяние не может быть объяснено в рамках статического механизма и находится в качественном согласии с динамическим флаттер-механизмом рассеяния. Прин-

ципальную роль в объяснении экспериментальных данных сыграло предположение, высказанное Низелем и Гранато, заключающееся в том, что LiF содержит ансамбль оптически колеблющихся диполей краевых дислокаций. В таком случае, резонансная частота становится значительно выше. Следует отметить, что ансамбль дислокационных диполей высокой плотности, наблюдался экспериментально в LiF, также как и в целом ряде других материалов. Экспериментальные оценки на отношение плотности диполей к плотности единичных дислокаций варьируются от 1000 до 100 и меньше. В главе показывается, что концепция динамического рассеяния фононов диполями дислокаций, использованная для объяснения экспериментов в LiF, может быть применена и для объяснения экспериментов в Al, Nb, и Ta, если предположить, что по аналогии с LiF, пластически деформированные Al, Nb, и Ta также содержат ансамбли диполей дислокаций. В таком случае, увеличение резонансной частоты может быть достигнуто за счет присутствия в образце оптически колеблющихся диполей дислокаций с соответствующей акустическим экспериментам длиной дислокаций и размером плеча. Это позволяет получить количественное согласие с экспериментальными данными для всех трех образцов.

Очевидно, дислокационные диполи, испытывающие флаттер во внешнем упругом поле, будут оказывать влияние не только на транспортные свойства (теплопроводность), но и на другие структурно-чувствительные характеристики, в частности, на внутреннее трение. В работе показано, что в рамках струнной модели может быть достигнуто хорошее согласие с экспериментами по внутреннему трению в Al, Nb, и Ta если дополнительно предположить наличие случайной компоненты напряжений в ансамбле диполей дислокаций. Вопрос о влиянии случайных напряжений на дислокационный декремент рассматривался недавно Камаевой и Черновым. В частности, они установили, что действие случайной силы на дислокацию приводит к дополнительному вкладу в декремент. В экспериментах по внутреннему трению в пластически деформированных Al, Nb, и Ta, находящихся в сверхпроводящем состоянии, декремент принимает аномально большие значения и практически не зависит от амплитуды и частоты

внешнего напряжения. Это означает, что параметры шума, который, как мы предполагаем, может быть ответственен за наблюдаемый эффект, должны зависеть от параметров внешнего напряжения, поскольку это единственный способ обеспечить постоянство низкочастотного вклада в декремент при изменении параметров внешнего напряжения. Таким образом, мы предполагаем, что внешнее напряжение вносит временной масштаб в корреляции флуктуаций напряжения в ансамбле дислокаций, который, как известно, всегда имеет собственную сложную динамику. Вносимый временной масштаб определяет время дополнительной релаксации внутренних напряжений, обусловленной случайными силами. Помимо этого, мы полагаем, что дополнительное время релаксации является в общем случае функцией частоты внешнего воздействия. В качестве простейшей аппроксимации использована корреляционная функция, экспоненциально спадающая со временем (телеграфный процесс). Заметим, что введение конечного временного масштаба означает, что дислокация испытывает воздействие окрашенного шума. Полагая, что характеристики струн одинаковы для дислокаций, составляющих диполь, мы можем сразу выписать систему уравнений, описывающих демпфированное скольжение диполя дислокаций, в следующем виде

$$\begin{aligned} m \frac{\partial^2 \epsilon(z, t)}{\partial t^2} + B \frac{\partial \epsilon(z, t)}{\partial t} - T_0 \frac{\partial^2 \epsilon(z, t)}{\partial z^2} &= F^{ext+}, \\ m \frac{\partial^2 \psi(z, t)}{\partial t^2} + B \frac{\partial \psi(z, t)}{\partial t} - T_0 \frac{\partial^2 \psi(z, t)}{\partial z^2} &= F^{ext-}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $\epsilon(z, t)$ и $\psi(z, t)$ - смещения положительной и отрицательной дислокаций, m - эффективная масса, T_0 - линейное натяжение, B - параметр демпфирования и $F^{ext\pm}$ - полная внешняя сила, которая действует на положительную и отрицательную дислокации, соответственно, в их плоскостях скольжения. Полная внешняя сила, действующая в плоскости скольжения на дислокацию в диполе, состоит из трех слагаемых

$$F^{ext\pm} = f^{\pm} + F^{\pm} + b^{\pm} \eta(t). \quad (18)$$

Здесь f^{\pm} - сила взаимодействия между дислокациями в диполе, F^{\pm} - силы обу-

словленные внешним полем напряжений (σ_{ik}), и $\eta(t)$ описывает стационарную случайную компоненту напряжений. После выполнения всех расчетов приходим к следующему выражению для декремента

$$\Delta_t = \frac{4\pi J\eta_0^2}{(4\alpha^2 m + 2\alpha B + D)} [1 - \tanh(Y_t)/Y_t] \frac{\alpha}{\omega} + \sum_{p=0}^{\infty} \frac{8JB\sigma_0^2\omega}{\pi E_p(2p+1)^2}, \quad (19)$$

где

$$Y_t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{(4\alpha^2 m + 2\alpha B + D)}{T_0(\pi/L)^2}}; \quad J = \frac{b^2 \Lambda}{2 \langle W \rangle};$$

α, η_0^2 - параметры шума; Λ - плотность диполей дислокаций; $\langle W \rangle$ - средняя полная энергия колебаний единицы объема.

На Рис. 1 изображена зависимость декремента от нормированной частоты для параметров поликристаллического алюминия. Как видно из рисунка, при низких частотах (вплоть до 10^8 Гц для алюминия) полный декремент практически постоянен. Постоянство декремента в области низких частот целиком определяется вкладом от случайной составляющей полных напряжений. В то же время, вблизи резонансной частоты декремент имеет ярко выраженный пик, обусловленный вкладом от периодической составляющей полных напряжений. А именно, периодическая составляющая полного декремента для алюминия оказывается в 10^4 раз больше чем, случайная составляющая вблизи резонансной частоты. Следует отметить, что подобное поведение характерно также и для Ta и Nb. Таким образом, наблюдаемое в экспериментах атермальное и независимое от частоты поведение внутреннего трения находит свое объяснение в рамках предложенной модели. Причем атермальность достигается доминированием членов с D, учитывающих взаимодействие, как над температурнозависимыми членами, учитывающими влияние диссипации B, так и над слагаемыми с линейным натяжением и массой. Заметим, что доминирование дальнедействующих взаимодействий уже использовалось при рассмотрении внутреннего трения, обусловленного взаимодействием дислокаций с точечными дефектами. В свою очередь, основной вклад в теплопроводность дает область спектра вблизи резонансной частоты где доминирует периодическая составляющая декремента. Следовательно, влияние шума, моделируемого как телеграфный процесс, на

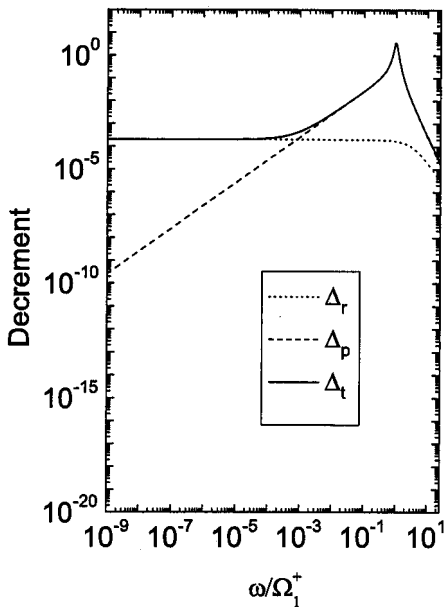


Рис. 1: Теоретические кривые для внутреннего трения 10% деформированного 5N поликристалла алюминия, $\Omega_1^+ = 10^{11}$ Hz. Сплошная линия-полный декремент, пунктир-периодическая составляющая декремента, точки-случайная составляющая декремента

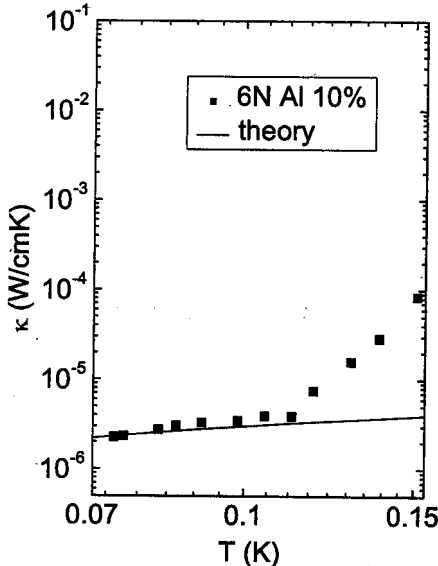


Рис. 2: Теплопроводность для алюминия. Квадраты-экспериментальная кривая. Сплошной линией изображена теоретическая кривая для плотности дислокаций $\Lambda_{Al} = 6 \times 10^{12} \text{ m}^{-2}$.

Резонансная частота для алюминия $\Omega_1^+ = 10^{11}$ Hz.

теплопроводность будет пренебрежимо мало. Типичная кривая для поведения теплопроводности в случае пластически деформированного алюминия приведена на Рис.2. Из рисунка видно хорошее совпадение теоретической и экспериментальной кривой в интересующей нас области температур ниже 0.15 К, в которой влияние электронов пренебрежимо мало. При повышении температуры начинают доминировать недефектные вклады в теплопроводность, связанные в первую очередь с процессами рассеяния на электронной подсистеме металла, которые обуславливают рост экспериментальной кривой теплопроводности с ростом температуры.

В заключении кратко сформулированы полученные в диссертации результаты, которые выносятся на защиту.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Построена струнная модель для описания динамики дисклинаций кручения. Для дисклинации кручения вычислены масса, линейное натяжение и параметр демпфирования, отнесенные к единице длины.

2. В рамках струнной модели рассчитаны вклады в теплоемкость и внутреннее трение, обусловленные динамикой дисклинации кручения.

3. Сформулирована модель диполя дислокаций, находящегося в поле случайных сил.

4. В рамках дипольной модели дислокаций описаны эксперименты по теплопроводности и внутреннему трению пластически деформированных образцов Al, Ta и Nb в сверхпроводящем состоянии.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. D.V. Churochkin, S. Sahling and V.A. Osipov, "Low-temperature internal friction and thermal conductivity in plastically deformed metals due to dislocation dipoles and random stresses", Phys. Rev. B **71** (2005) 014116.

2. V.A. Osipov, D.V. Churochkin, "Contribution of mobile twist disclinations to the specific heat of crystals", Phys. Lett. A **282** (2001) 92-96.

3. D.V. Churochkin, V.A. Osipov, "On the disclination-induced internal friction",

Phys. Lett. A **289** (2001) 273-277.

4. D.V. Churochkin and V.A. Osipov, "The influence of twist disclinations on the specific heat and internal friction of disordered semiconductors", J. Phys.: Condens. Matter **14** (2002) 12917-12922.
5. D.V. Churochkin, V.A. Osipov, "The low-temperature acoustical and thermal properties of materials due to the dynamics of linear topological defects", Mechanics of the 21st Century, Proceedings of the 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics with CD-ROM, ISBN 1-4020-3456-3 (HB), ISBN 1-4020-3559-4 (e-book), Eds. W. Gutkowski, T.A. Kowalewski, Springer Verlag 2005.
6. Д.В. Чурочкин, В.А. Осипов, "Вклад во внутреннее трение LiF от дислокационных диполей", Труды III Всерос. конф. по теории упругости с междунар. участием, 2003, Ростов-на-Дону, с. 425.
7. D.V. Churochkin, V.A. Osipov, "Internal friction due to dislocation dipole and single twist disclination", Materials of international scientific-practical conference "Structural Relaxation in Solids", 2003, Vinnitsa, Ukraine, p.84.

Получено 6 октября 2005 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 06.10.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ № 55047.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru
www.jinr.ru/publish/