

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА**

---

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

На правах рукописи

**Экономов Андрей Николаевич**

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ  
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ НА ИХ АКУСТИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА**

Специальность **01.04.06** – акустика

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2002

Работа выполнена на кафедре акустики физического факультета  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор **Коробов А.И.**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор **Митрофанов В.П.**

кандидат физико-математических наук,  
зам.директора Государственного техноло-  
гического института сверхтвердых  
материалов (г. Троицк) **Прохоров В.М.**

**Ведущая организация:** Институт общей и неорганической химии  
им. Н.С.Курнакова РАН, Москва

Защита состоится «    » \_\_\_\_\_ 2002г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
Специализированного Совета Д 501.001.67 по специальности 01.04.06 –  
акустика (по физико-математическим наукам) в Московском  
государственном университете по адресу:

**119899, Москва, Воробьевы горы, МГУ, Физический факультет**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического  
факультета МГУ.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь  
Специализированного Совета,  
кандидат физико-математических  
наук, доцент

А.Ф.Королёв

## **Общая характеристика работы.**

В диссертации приведены основные результаты исследований, проведенных автором в 1996-2002 годах на кафедре акустики физического факультета МГУ. Выполненная работа связана с комплексным изучением влияния изменения микроструктуры поликристаллических металлов на их акустические свойства, что является основой для разработки современных методик нелинейной акустики в томографии, дефектоскопии твердых тел и диагностике их разрушения. Изучение зависимости поглощения акустических волн (АВ) от температуры использовалось для получения сведений о начальном этапе механизма дислокационных изменений в достаточно совершенных твердых телах таких, как поликристаллический титан, что позволило обнаружить, идентифицировать и сделать теоретический анализ пиков Бордони. А исследование в процессе деформации особенностей поведения модулей упругости, скорости АВ, нелинейных акустических параметров (статического, квазистатического и динамического) позволило проконтролировать видоизменения микроструктуры многоуровневого дефектного материала образцов поликристаллической меди, имеющих различную предысторию изготовления.

**Актуальность исследований.** Одна из актуальных задач современной физики твердого тела состоит в изучении взаимосвязи внутренней структуры материала с его различными макроскопическими свойствами. Решение этой проблемы потребовало проведения экспериментов по целенаправленной модификации дефектной структуры твердых тел с помощью разного рода внешних воздействий: температуры, пластических деформаций, термических обработок, облучения и т.п. Среди всевозможных способов исследования неоднородных сред наиболее перспективными являются акустические методы в силу их высокой чувствительности к любым изменениям микроструктуры.

Акустические эксперименты с материалами, имеющими дефекты структуры типа дислокаций, микротрещин, кристаллических зерен и т.п. обусловили интенсивное развитие нелинейной акустики и вызвали разработку методов акустодиагностики, решающих проблемы прогнозирования разупрочнения и предсказания разрушения материалов. Особая ценность этих методов связана с возможностью осуществления неразрушающего контроля рабочих конструкций непосредственно в

процессах их эксплуатации. Таким образом, решение задач современной научной проблемы приобрело и важное прикладное техническое значение.

Несмотря на быстрорастущее число работ, посвященных изучению влияния изменений микроструктуры неоднородных сред на различные физические свойства, в этой области имеется еще много нерешенных проблем, а данных акустических исследований явно недостаточно. Отсутствие соответствующих апробированных методик и промышленной аппаратуры, а также малое количество экспериментальных сведений о нелинейных свойствах конструкционных материалов приводит к тому, что в настоящее время способы нелинейной акустики в томографии и дефектоскопии твердых тел практически не используются.

В этой связи параллельное экспериментальное изучение упругих и акустических свойств твердых тел, подвергаемых пластическим деформациям, представляет несомненный научный и практический интерес и может обеспечить контроль за эволюцией их внутренней структуры, а, значит, и успешное внедрение методов нелинейной акустодиагностики.

Поэтому актуальность темы диссертации определяется необходимостью продолжать, используя различные способы, исследования акустических свойств материалов для получения более полной и многосторонней информации об изучаемом объекте, что позволит систематизировать экспериментальные результаты по главным диагностическим признакам разупрочнения вещества. Кроме того, исключительно важна, перспективна и остается пока нерешенной задача прогнозирования прочности материала на начальных этапах деформирования, то есть задолго до его порога разрушения.

**Цель работы:** изучить влияние изменения микроструктуры поликристаллических металлов на поведение их упругих и акустических свойств с помощью различных акустических методов.

**Задачи исследования:**

- Создать автоматизированную экспериментальную установку для исследования (в интервале температур 77-300К) упругих и акустических свойств твердых тел в зависимости от статических деформаций и разработать программное обеспечение к ней;
- Разработать и реализовать статический, квазистатический и динамический методы исследования нелинейных акустических свойств металлических проволок;

- Экспериментально различными способами исследовать и проанализировать влияние термической обработки и статических деформаций на упругие и акустические свойства образцов поликристаллических металлов;
- Апробировать теоретическое модельное представление упругой гистерезисной нелинейности исследуемых материалов;
- Разработать низкотемпературную часть установки и методику для изучения температурной зависимости коэффициента поглощения АВ в поликристаллическом титане и провести её теоретический анализ.

#### **Научная новизна:**

1. Создан автоматизированный ультразвуковой диагностический комплекс для исследований упругих и акустических свойств твердых тел и подготовлен пакет программ для его управления и обработки экспериментальной информации.
2. Разработан метод, позволяющий идентифицировать этапы преобразований микроструктуры материала с различными стадиями его пластической деформации. Установлена связь упругих и акустических характеристик образцов с особенностями их внутренней структуры.
3. Предложена методика и программное обеспечение расчета изменений упругих модулей и нелинейных акустических параметров в зависимости от величины их деформации.
4. Впервые проведены комплексные исследования статическим, квазистатическим и динамическим методами в процессах упругого и пластического деформирования нелинейных акустических свойств образцов поликристаллической меди с различной исходной микроструктурой. Произведен анализ поведения нелинейных параметров, определенных этими методами, на однотипные деформационные преобразования внутренней структуры образцов. Установлено, что величина изменения на начальных стадиях деформации любого нелинейного параметра исследованного материала коррелирует с его порогом прочности.
5. Впервые для поликристаллического металла продемонстрирована правомерность использования теоретической модели гистеронов Прейсаха-Майергойца, для чего разработано соответствующее программное обеспечение. Произведена теоретическая оценка плотности гистеронов в медных образцах с различной степенью дефектности их структуры.

6. Разработана методика и создана низкотемпературная часть установки для исследования влияния дефектной структуры поликристаллического титана на поглощение АВ. Обнаружены пики Бордони в области низких температур и проведен численный расчет параметров, описывающих дислокационный механизм поглощения АВ в титане.

**Практическая значимость работы** определяется результатами, которые могут быть применены в решении задач материаловедения и в инженерной практике, использующей методы акустодиагностики:

- для текущего контроля напряженно-деформированного состояния материала – по изменениям величины статического нелинейного параметра, посредством отбора проб образцов и испытания их в процессах упругой деформации;
- для экспресс-анализа возрастания степени дефектности структуры необратимо деформируемого твердого тела – по изменению величин статического или динамического нелинейных параметров, фиксируемых в процессах его разгрузки и последующей нагрузки;
- для диагностики микроструктурных изменений материала – в соответствии с поведением квазистатического нелинейного параметра;
- для прогноза прочности различных элементов рабочей конструкции – путем периодического сравнения изменения величин любого нелинейного параметра.

Данная работа выполнена при поддержке стипендии «Acoustical society of America» 1999г., гранта РФФИ №99-02-18360 и гранта Президента поддержки ведущих научных школ №00-15-96530.

**На защиту выносятся следующие результаты и положения:**

1. Реализация ряда акустических методов изучения твердых тел с помощью разработанных автоматизированных экспериментальных установок.
2. Результаты и обсуждение одновременного исследования статическим и квазистатическим методами упругих и акустических свойств образцов поликристаллической меди с различной исходной микроструктурой в процессе их деформирования.
3. Методы расчета с помощью ЭВМ и обсуждение зависимостей от деформации статического и динамического модулей Юнга второго порядка.

4. Анализ особенностей поведения статического, квазистатического и динамического нелинейных параметров трех серий медных образцов в соответствии с изменениями их микроструктуры в процессах упругого и пластического деформирования.
5. Обсуждение упругого гистерезиса медных образцов с различной дефектной структурой. Исследование поведения в процессах разгрузки-нагрузки их статического и динамического модулей Юнга, а также статического, квазистатического и динамического нелинейных параметров.
6. Апробация теоретической модели гистеронов Прейсаха-Майергойца для поликристаллической меди и проверка правомерности её применения.
7. Экспериментальное исследование и теоретический анализ поглощения АВ в поликристаллическом титане в области низких температур.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры акустики МГУ; на VI-ой сессии Российского акустического общества - РАО (Москва, 1997г.); на V-ой Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-98» (Москва, 1998 г.); на VIII-ой сессии РАО (Нижний Новгород 1998г.); на X-ой сессии РАО, (Москва, 2000 г.); на VII-ой Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2000» (Москва, 2000г.); на XI-ой сессии РАО (Москва, 2001г.), на Международной конференции ISNA-16 (Москва, 2002 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 14 научных работах [1-14].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объём работы 146 страниц текста, в том числе 48 рисунков, 6 таблиц и список цитируемой литературы из 155 наименований.

### **Содержание работы.**

**Во введении** обосновывается актуальность и выбор направления исследований, формулируются цель и задачи диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту, и дается краткая аннотация содержания работы по главам.

**Первая глава** носит обзорный характер и посвящена анализу результатов современного состояния научных исследований дефектной структуры неоднородных сред акустическими методами и перспективам их развития.

Излагаются основные методы исследования акустической нелинейности и приводятся результаты экспериментов, демонстрирующих их возможности. Особое внимание уделено работам, устанавливающим влияние несовершенства внутренней структуры твердых тел на их нелинейные акустические свойства. Произведен подбор экспериментальных разработок, свидетельствующих о возможности диагностики внутренней структуры материала, подвергнутого деформациям, а также работ, связанных с исследованиями прочностных свойств твердых тел с помощью методов нелинейной акустики. Описаны некоторые физические модели, иллюстрирующие разные механизмы структурной акустической нелинейности твердых тел, содержащих различного рода дефекты. Систематизирована в виде таблицы иерархическая последовательность эволюции различных структурных уровней неоднородного материала в соответствии со стадиями его пластической деформации, и на примерах экспериментальных исследований продемонстрированы возможности контроля изменения микросостояния твердых тел различными, в том числе и акустическими, методами.

Показана актуальность, необходимость и перспективность дальнейшего развития, разработки и внедрения методов акустодиагностики, осуществление которых возможно при условии установления закономерностей взаимосвязи преобразований конкретных типов микродефектов материала с их нелинейными акустическими свойствами.

**Во второй главе** приведены методики и описаны экспериментальные установки, используемые для исследования акустических свойств тонких металлических проволок различными способами.

Дается обоснование выбора образцов в виде тонких проволок. Анализируются особенности распространения АВ в тонких стержнях (проводах) и на основе теоретических и экспериментальных данных формулируется правомерность некоторых допущений, используемых в дальнейших исследованиях. Описывается экспериментальная автоматизированная установка для исследования упругих и акустических свойств металлических проволок статическим и квазистатическим методами.



Описан динамический метод, основанный на взаимодействии высокочастотной и низкочастотной АВ, распространяющихся в нелинейной среде, и заключающийся в измерении амплитуд основной и комбинационной частот в спектре исследуемого сигнала. Получено выражение для определения динамического нелинейного параметра. Описывается экспериментальная установка для исследований нелинейных акустических свойств тонких металлических проволок динамическим способом при наложении на образец медленной статической деформации.

**В третьей главе** представлены результаты и обсуждения экспериментальных исследований упругих и акустических свойств медных проволок статическим и квазистатическим методами.

Описаны три серии медных проволок, используемых для исследования: обычная техническая проволока, образцы после закалки и образцы после отжига обычной проволоки. Приводятся результаты их металлографического и рентгеноструктурного анализов, по которым установлены характерные особенности микроструктур их исходного состояния: обычные образцы имеют столбчатую мелкозернистую структуру (размер зерен ~5-10мкм) с текстурой типа <100> и сильно напряженное состояние приграничных зон; у отожженных и закаленных образцов крупнозернистая структура (с немного отличающимся размером зерен: (35-150)мкм и (50-100)мкм соответственно), хаотичная ориентация кристаллитов и существенно различное состояние межзеренных границ: равновесные, слабо напряженные - у отожженных и упруго-напряженные - у закаленных.

С помощью испытания на разрыв выявлено, что предел прочности обычной проволоки в 1,5-2 раза выше, чем отожженной, а у закаленной - промежуточный результат. Металлографический и рентгеноструктурный анализы проволок после их разрыва показали, что в материале обычной проволоки размер зерен практически не меняется, а структура отожженного образца становится мелкозернистой (размер зерен ~3-40мкм). Кроме того, в обоих материалах обнаружено наличие текстуры типа <111>. Установлено, что однотипный процесс деформации отличающихся исходным состоянием образцов приводит к примерно одинаковому конечному состоянию и сопровождается различными этапами микроскопических изменений структуры.

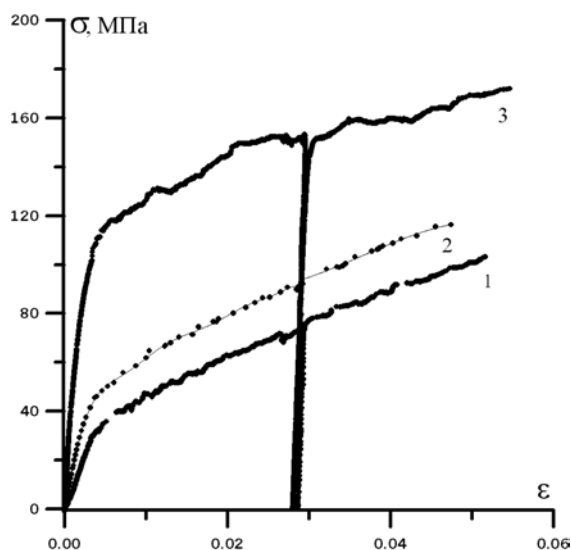
По зависимостям «напряжение-деформация» (рис. 1) установлены значения напряжений  $\sigma_{\text{упр}}$  перехода к пластическим деформациям, которые

соответствуют уравнению Холла-Петча и пределам прочности образцов – табл. I. Отличие величин  $\sigma_{упр.}$  связано с различным размером кристаллических зерен и неодинаковым состоянием межзеренных границ материалов трех серий медных проволок.

**Таблица I**

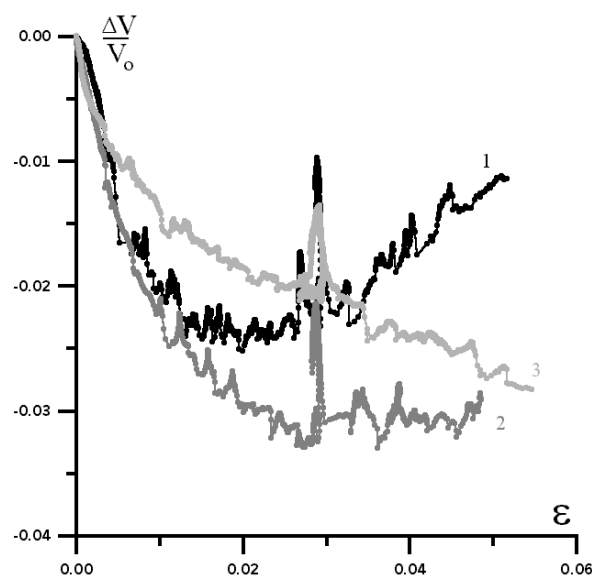
тип образца	$\sigma_{упр.}$ , МПа	$V_0$ , м/с	$E_{st}(0)$ , ГПа	$E_{дн}(0)$ , ГПа
отожженный	30	3700	13	125
закаленный	50	3800	17	129
обычный	110	3600	60	116

Процесс пластической деформации из-за смены её микроскопических механизмов состоит из нескольких стадий, но на кривой зависимости  $\sigma(\epsilon)$  они практически не просматриваются. Одновременное с  $\sigma(\epsilon)$  измерение относительной скорости продольных АВ при статическом растяжении образцов (рис.2) позволило выявить определенные стадии пластической деформации.



**рис.1** Зависимость напряжения от деформации образцов.

1- отожженная проволока, 2 - закаленная проволока, 3 – обычная проволока



**рис.2** Зависимость относительного изменения скорости акустических волн от деформации образцов.

Для мелкозернистого материала наблюдается практически экспоненциальное уменьшение  $\Delta V/V_0$ , поскольку при растяжении в нем постепенно происходят лишь внутриверенная деформация, зернограничное

проскальзывание, разворот кристаллитов и рост микротрещин без качественных изменений микроструктуры.

Для термически обработанных образцов по виду зависимостей  $\frac{\Delta V}{V}(\varepsilon)$  установлены области деформаций, при которых происходят качественно особые видоизменения их микроструктуры – табл. II.

**Таблица II**

тип образца	фрагментация зерен и образование субструктуры	торможение дислокаций и затупление микротрещин	формирование текстуры типа <111>
отожженный	$0,004 \leq \varepsilon \leq 0,012$	$0,012 \leq \varepsilon \leq 0,021$	$\varepsilon > 0,021$
закаленный	$0,004 \leq \varepsilon \leq 0,03$	$0,03 \leq \varepsilon \leq 0,048$	$\varepsilon > 0,048$

Предложен метод расчета с помощью ЭВМ статических и динамических модулей Юнга в зависимости от деформации на основании полученных опытных зависимостей «напряжение – деформация» и «относительное изменение скорости АВ – деформация» с использованием различных видов полиномиальных и «экспоненциальных» аппроксимаций. Проводится обсуждение закономерностей изменений модулей упругости, в соответствии с установленной ранее трансформацией внутренней структуры материалов. Установлено, что исходные значения статического модуля Юнга  $E_{st}(0)$  соответствуют особенностям внутренних структур жесткого, сильно нарушенного материала и более мягких термически обработанных, причем,  $E_{st}(0)_{обычная} > E_{st}(0)_{закаленная} > E_{st}(0)_{отожженная}$  – табл. I. В начальной области деформаций ( $\varepsilon \leq 0,004$ ) обнаружено отклонение от классического гукковского поведения (когда  $E_{st}(\varepsilon) = \text{const}$ ), что связано с предысторией изготовления образцов, которая привела к сильной дефектности и неоднородности вещества.

Производимая в области пластических деформаций разгрузка и последующая нагрузка образцов, позволяет определять значительное увеличение их модулей Юнга в новом, необратимо нарушенном состоянии материала.

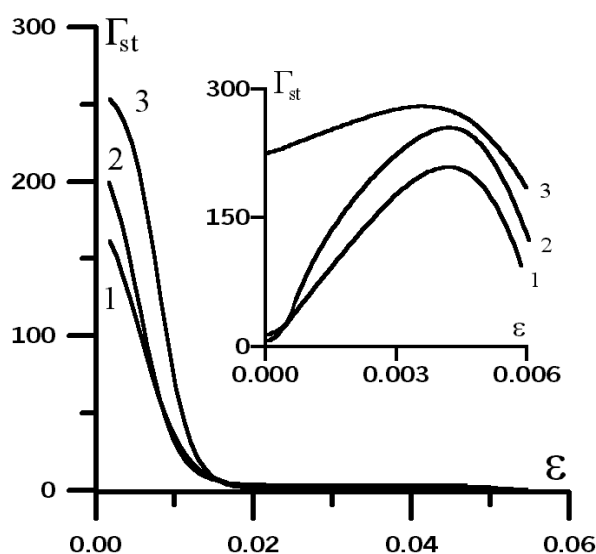
Из кривых  $\frac{\Delta V}{V_0}(\varepsilon)$  рассчитывали зависимость динамического модуля Юнга от деформации -  $E_{dn}(\varepsilon)$ . Исходные значения  $E_{dn}(0)$  для используемых материалов отличаются незначительно (~10%), так как различия измеренных начальных величин скорости  $V_0$  АВ в трех сериях образцов не

превышают 5% - табл. I. Дальнейшее поведение  $E_{dn}(\varepsilon)$  связано с изменениями скорости распространения АВ и вызывается установленными ранее микроструктурными модификациями происходящими в процессе растяжения образцов.

**Глава четвертая** посвящена изучению акустических нелинейных свойств медных образцов, их упругому гистерезисному поведению и его теоретическому модельному представлению.

По зависимостям  $E_{st}(\varepsilon)$  и  $E_{dn}(\varepsilon)$  рассчитаны соответствующие зависимости статических  $\Gamma_{st}(\varepsilon)$  и квазистатических  $\Gamma_{qst}(\varepsilon)$  нелинейных параметров всех серий медных проволок.

Установлено, что исходные значения (табл. III) статического нелинейного параметра  $\Gamma_{st}(0)$  определяются общей плотностью дефектов и зависят не только от размера кристаллических зерен, но также и от состояния межзеренных границ. При увеличении деформации обнаружено различное по величине возрастание (вставка на рис. 3) статических нелинейных параметров разных серий проволок вплоть до значений



**рис.3** Зависимость статического нелинейного параметра от деформации: 1—отожженная проволока, 2—закаленная проволока, 3—обычная проволока

напряжения перехода к пластическим деформациям, после чего наблюдается быстрый их спад практически до нуля – рис.3. При этом наименьший рост наблюдается для мелкозернистых образцов (с наибольшим уровнем нелинейности в исходном состоянии), что связано с их большей твердостью и большим сопротивлением деформированию – табл. III. Более значительные стартовые изменения  $\Gamma_{st}(\varepsilon)$  «мягких» термически обработанных проволок (с меньшей нелинейностью исходного состояния) свидетельствуют о последующих (в области пластических деформаций) качественных изменениях их

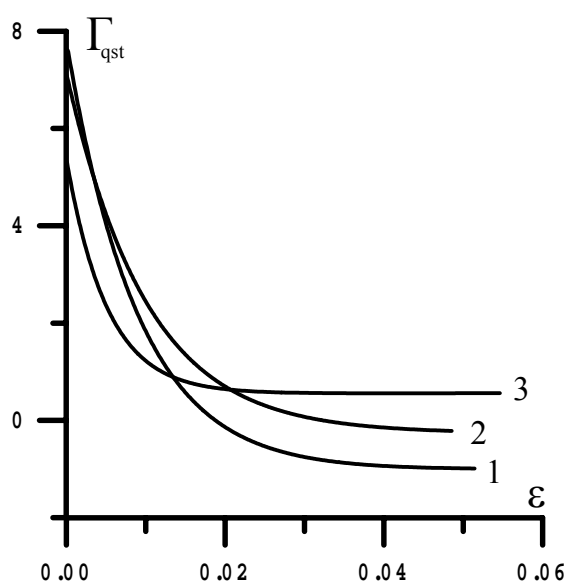
микроструктуры (формирование субструктуры), которые приводят к более раннему их разрушению.

Величины и особенности зависимости от деформации квазистатического нелинейного параметра определяются

соответствующими величинами и изменениями скорости распространения АВ в каждом из образцов, однако, его чувствительность к микроструктурным изменениям выше. Начальные значения квазистатического нелинейного параметра  $\Gamma_{qst}(0)$  всех образцов отличаются мало (табл. III) и изменяются при увеличении деформации – рис.4.

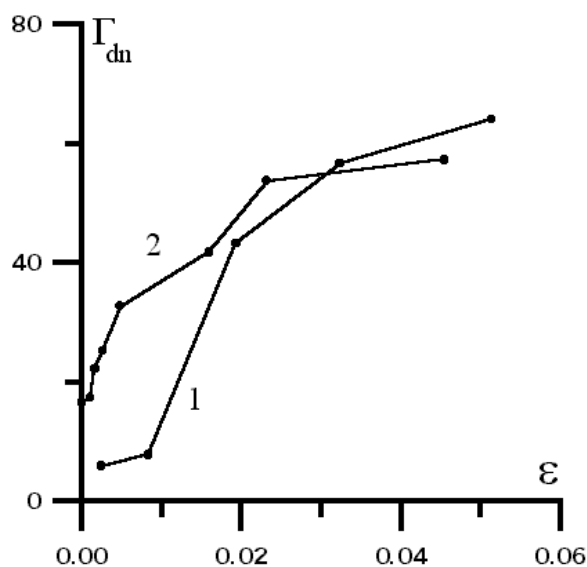
**Таблица III**

тип образца	$\Gamma_{st}(0)$	$\Gamma_{st}^{max}$	$\Gamma_{st}^{max} / \Gamma_{st}(0)$	$\Gamma_{qst}(0)$	$\Gamma_{dn}(0)$	$\Gamma_{dn}^{max} / \Gamma_{dn}(0)$
отожженный	7	220	31,4	7.0	6	9
закаленный	15	250	16,7	7.8	12	4,5
обычный	220	280	1,3	5.5	18	3



**рис.4** Зависимость квазистатического нелинейного параметра от деформации:  
 1–отожженная проволока,  
 2–закаленная проволока,  
 3–обычная проволока

Установлено, что наибольшие абсолютные изменения ( $\sim$  в 2 раза) квазистатического нелинейного параметра в начальной области деформаций присущи более мягким термически обработанным образцам, имеющим меньший предел прочности.



**рис.5** Зависимость динамического нелинейного параметра от деформации: 1 – отожженный образец, 2 – обычный образец.

материал обычной проволоки в исходном состоянии содержит микротрещины большего размера, раскрытие и рост которых приводит к увеличению  $\Gamma_{dn}$ . Установлено, что величина роста нелинейного параметра  $\Gamma_{dn}$  (табл. III) больше в том образце, микроструктура которого претерпевает большие изменения, то есть в отожженном материале, предел прочности которого наименьший.  $\Gamma_{dn}$  обоих образцов приобретают примерно равные значения после того, как в отожженном образце произошла фрагментация кристаллических зерен, образовалась субструктура и развились микротрещины, а потому резко возросла структурная нелинейность за счет увеличения нелинейности на границах зерен и микротрещин.

Обобщение результатов статических, квазистатических и динамических экспериментов позволило не только установить дифференциацию характерных откликов различных нелинейных параметров на особенности преобразований внутренней структуры образцов, но и выявить общий признак разупрочнения материала. Установлено, что для исследуемых серий медных образцов величина изменения на начальных этапах деформационного процесса (упругая и первая стадия пластической областей) любого нелинейного акустического параметра коррелирует с их порогом прочности.

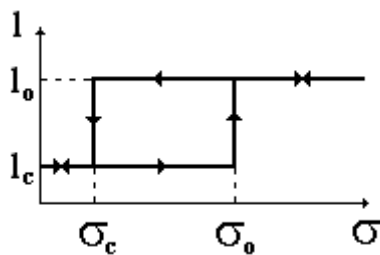
Обнаружено также, что при всех методах измерений исходные нелинейные параметры ( $\Gamma_{st}(0)$ ,  $\Gamma_{qst}(0)$ ,  $\Gamma_{dn}(0)$ ) отожженных образцов,

Анализ зависимостей динамического нелинейного параметра от деформации выявил его чувствительность к наличию и размерам микротрещин и межзеренных границ. Различное поведение  $\Gamma_{dn}(\varepsilon)$  для обычных и отожженных образцов (рис.5) в области малых растяжений (до  $\varepsilon < 0.004$ ) объясняется тем, что в термически обработанном материале в исходном состоянии микротрещин или нет, или большинство из них являются столь малыми, что они не раскрываются и не растут и при начальных напряжениях не вносят вклада в величину  $\Gamma_{dn}$ . Тогда как

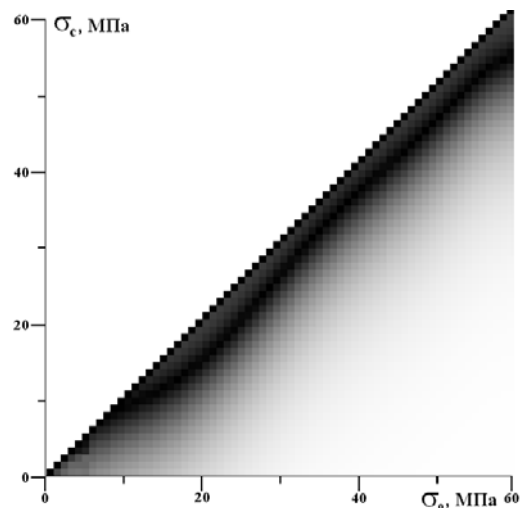
имеющих равновесное состояние всех структурных уровней материала, примерно совпадают по величине и близки к значению нелинейного акустического параметра монокристалла меди, рассчитанного по литературным данным для коэффициентов упругости второго и третьего порядков. Тогда как образцы с сильно дефектной структурой имеют существенное различие величин соответствующих нелинейных параметров. Это позволяет предположить, что нелинейные параметры отожженного материала, в основном, определяются физической нелинейностью, а в нелинейные параметры сильно дефектных структур значительный вклад вносит структурная нелинейность. Кроме того, это также может свидетельствовать о том, что протекание статических и динамических процессов отличается менее существенно в материалах, имеющих равновесную, более однородную внутреннюю структуру.

Приводятся экспериментальные результаты гистерезисного поведения зависимости  $\sigma(\varepsilon)$  в области пластической деформации. Показано, что ширина гистерезисной петли зависит от степени несовершенства материала – наибольший гистерезис у образцов обычной проволоки. Тестовые эксперименты, показали, что неоднозначность зависимости  $\sigma(\varepsilon)$  поликристаллической меди связана с наличием таких микроскопических элементов, как межзеренные границы, границы между фрагментами зерен и микротрещины. Рассмотрено и проанализировано поведение статического и динамического модулей Юнга, статического, квазистатического и динамического нелинейных параметров в процессах разгрузки-нагрузки.

Для теоретического анализа гистерезиса  $\sigma(\varepsilon)$  медных образцов используется модель Прейсаха-Майергойца (ПМ-модель), которая позволяет описывать упругие гистерезисные свойства микронеоднородных сред, предполагая наличие в среде гистеронов - носителей гистерезисного нелинейного поведения материала. При этом макроскопическая упругость рассматривается как результат упругого поведения статистического ансамбля гистеронов, для каждого из которых допускается два состояния – закрытое с длиной  $l_c$  и открытое с длиной  $l_o$ . Закон изменения длины гистерона от напряжения приведен на рис.6. Для деформаций растяжения  $\sigma_o > \sigma_c$  (напряжения закрытия -  $\sigma_c$  и открытия -  $\sigma_o$ ). В ПМ-модели вводят плотность  $\rho(\sigma_o, \sigma_c)$  распределения гистеронов в пространстве  $(\sigma_o, \sigma_c)$ . В этом пространстве гистерезисным частицам принадлежат точки с координатами в области под диагональю, а диагонали принадлежат безгистерезисные частицы – рис.7



**рис.6** Зависимость изменения длины функции плотности гистерона от напряжения



**рис.7** Графическая иллюстрация распределения гистеронов в ПМ-пространстве для отожженного образца

Разность удлинений при ходе вниз и вверх по разным ветвям гистерезисной кривой  $[\varepsilon \downarrow - \varepsilon \uparrow](i)$  (где  $i$ -номер шага по напряжению) выражается через функцию плотности  $\rho(\sigma_o, \sigma_c)$  распределения гистеронов по напряжениям:  $[\varepsilon \downarrow - \varepsilon \uparrow](i) = (l_o - l_c) \cdot \sum_{m=i+1}^{N-1} \sum_{n=0}^i \rho(m, n)$ . Для вычисления  $\rho(\sigma_o, \sigma_c)$  использовался метод так называемого «экспоненциального ослабления»:  $\rho(i, k) = \rho(i, i-1) \cdot e^{-\alpha(i-1-k)}$  (где  $k=0, \dots, i-1$ , а  $\alpha=0,05$  - коэффициент ослабления) и была разработана программа для ЭВМ.

Графический результат расчетов для отожженного образца представлен на рис.7. Установлено, что напряжения открытия микроскопических гистерезисных элементов исследуемого материала отличаются от напряжения закрытия не очень сильно – наибольшая плотность гистеронов вблизи диагонали пространства  $(\sigma_o, \sigma_c)$ .

Справедливость применения ПМ-модели к исследуемому материалу проверялась путем решения прямой задачи – по известной функции распределения  $\rho(\sigma_o, \sigma_c)$  рассчитывались статические модули Юнга второго порядка:  $E_{st}^{-1} \downarrow (i) = K \cdot \sum_{m=i}^{N-1} \rho(m, i)$ ;  $E_{st}^{-1} \uparrow (i) = K \cdot \sum_{n=0}^i \rho(i, n)$ . Было получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей. Поэтому оказался правомочен теоретический расчет плотности гистеронов:

$$n_{\text{гист}} = \frac{1}{v_{\text{обр}}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^i \rho_{ij}(\sigma_o, \sigma_c) \cdot \Delta\sigma \cdot \Delta\sigma, \quad \text{где } v_{\text{обр}} - \text{объем образца.}$$



Показано, что по порядку величины  $n \sim 10^{15} \text{ м}^{-3}$  и что число гистеронов в мелкозернистых образцах обычной проволоки примерно в 20 раз больше, чем в равновесных отожженных образцах. Приводится расчетная кривая зависимости плотности открытых гистеронов от величины напряжения разгрузки-нагрузки и анализируется её характер.

**Пятая глава** посвящена исследованию влияния дефектной структуры титана на поглощение акустических волн в области низких температур.

Обсуждаются теоретические проблемы описания дислокационного механизма поглощения АВ в металлах. Приведена схема сконструированной низкотемпературной части установки. Описаны тестовые исследования скорости АВ в образцах титана и стали в области температур  $120\text{K} \leq T \leq 240\text{K}$ .

На основе анализа результатов экспериментов, проведенных при разных частотах АВ, а также с отожженными образцами титана, установлено, что обнаруженный при низких температурах рост коэффициента поглощения является пиком Бордони. Произведен расчет физических параметров, характеризующих дислокационный механизм поглощения АВ в титане и получена теоретическая температурная зависимость коэффициента поглощения продольной АВ частоты 8 МГц в районе пика Бордони, которая достаточно хорошо совпала с экспериментальной.

**В заключении** диссертации кратко сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Создан автоматизированный с помощью персонального компьютера ультразвуковой диагностический комплекс для исследования в непрерывном и импульсном режимах упругих и акустических свойств твердых тел (в диапазонах частот 0,01-20 МГц и температур 77-300К) в зависимости от растягивающих нагрузок (в интервале 0-200 МПа). Для управления комплексом и обработки экспериментальной информации подготовлен пакет программ.
2. Разработаны и реализованы методики экспериментального исследования нелинейных акустических свойств металлических проволок статическим, квазистатическим и динамическим методами.
3. С помощью металлографического и рентгеноструктурного исследований, а также анализа результатов статических и квазистатических измерений различных образцов поликристаллической меди установлена связь упругих и акустических характеристик с особенностями их

микроструктуры, а также выявлены области пластической деформации, в которых происходят образование субструктуры и формирование кристаллографической текстуры.

4. Впервые в процессах упругопластического деформирования проведены комплексные исследования статическим, квазистатическим и динамическим методами акустических свойств образцов медной проволоки, имеющих в результате термической обработки (отжига и закаливания) различную исходную внутреннюю структуру. Определены значения статических, динамических модулей Юнга, статических, квазистатических и динамических параметров акустической нелинейности и их зависимости от величины статической деформации. Обобщение и анализ результатов этих исследований позволили установить, что величина изменения на начальных этапах (упругая и первая стадия пластической областей) деформационного процесса любого нелинейного акустического параметра исследуемых серий медных образцов коррелирует с их порогом прочности.
5. Обнаружено совпадение величин исходных значений статического, квазистатического и динамического нелинейных параметров отоженных образцов, которые близки к значению нелинейного акустического параметра монокристалла меди, рассчитанного по литературным данным. Установлено также существенное различие соответствующих величин для мелкокристаллических образцов с сильно дефектной внутренней структурой. Это позволило предположить наличие различного вклада в общую нелинейность материала образцов физической и структурной нелинейности.
6. При однотипном деформировании обнаружено значительное различие в величинах и поведении нелинейных акустических параметров одинаковых образцов, измеренных различными методами. Это связано с тем, что статический параметр определяется общей плотностью дефектов материала (дислокационными образованиями, микротрещинами, размерами кристаллических зерен, состоянием межзеренных границ), квазистатический – чувствителен к перестройкам микроструктуры (фрагментации, образованию текстуры), а динамический – в сильной степени зависит от наличия и изменения размеров микротрещин и межзеренных границ (образования субструктуры).

7. В области пластической деформации исследовано влияние процесса разгрузки-нагрузки на упругие свойства изучаемых образцов. Установлена связь упругого гистерезиса с дефектной структурой материала. Получены и проанализированы особенности поведения статического, динамического модулей Юнга, а также статического и квазистатического нелинейных акустических параметров образцов в процессах их разгрузки-нагрузки. Впервые для интерпретации нелинейных гистерезисных свойств поликристаллических металлов применена модель Прейсаха-Майергойца, для чего разработано соответствующее программное обеспечение. Показано, что данные теоретического анализа находятся в согласии с экспериментальными результатами, что позволило рассчитать плотность гистерезисных процессов исследуемого материала.
8. Экспериментально в поликристаллическом титане исследована температурная зависимость поглощения продольных акустических волн (АВ) в интервале температур 120-200К. При температуре 180К обнаружено аномальное увеличение поглощения АВ, которое идентифицировано с пиком Бордони. Проведен теоретический анализ и численный расчет параметров, описывающих дислокационный механизм поглощения АВ.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях.**

1. Коробов А.И., Экономов А.Н. Поглощение продольных звуковых волн в поликристаллическом титане в области температур 120-220 К. Вестник Московского университета, сер. 3, физика, астрономия, 1997, т.38, № 4, с.66-67.
2. Коробов А.И., Экономов А.Н. Исследование релаксационного механизма поглощения акустических волн в поликристаллическом титане. Сб. трудов VI сессии РАО, Москва, 1997, с.343-346.
3. Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Экономов А.Н. Статический и динамический модули Юнга меди в области пластических деформаций. Сб. трудов VIII сессии РАО, Нижний Новгород, 1998, с.257-260.
4. Корниенко П.Н., Экономов А.Н. Автоматизированная установка для исследований свойств металлов при пластических деформациях. Тез. докл. V Междунар. конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-98», МГУ, 1998, с. 53-55.

5. Корниенко П.Н., Экономов А.Н. Определение модулей Юнга в стальной проволоке статическим и ультразвуковым методами. Тез. докл. V Междунар. конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-98», Москва, МГУ, 1998, с. 63-65.
6. Korobov A.I., Brazhkin Yu.A., Economov A.N. Static and dynamic Young modules of copper in the area of plastic deformation. Sixth annual international conference on composites engineering - ICCE 6, 1999, Orlando, Florida, p.89-90.
7. Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Экономов А.Н. Автоматизированная установка для измерения упругих свойств металлических проволок в области упругих и пластических деформаций. Измерит. техн., 2000, №7, с. 48-50.
8. Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Мамаев М.Б. Экономов А.Н. Теоретические и экспериментальные исследования нелинейности контакта Герца. Сб. трудов X сессии РАО, Москва, 2000, с. 199-202.
9. Экономов А.Н. Исследование нелинейного параметра медных проволок. Тез. докл. VII Междунар. конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2000», Москва, МГУ, 2000.
10. Мамаев М.Б., Экономов А.Н. Изучение упругих свойств нелинейного контакта. Тез. докл. VII Междунар. конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2000», Москва, МГУ, 2000.
11. Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Экономов А.Н., Гринь Е.Ю. Экспериментальные исследования нелинейности металлических проволок. Сборник трудов X сессии РАО, Москва, 2000, с.107-110.
12. Коробов А.И., Экономов А.Н. Влияние статического нагружения на нелинейные акустические свойства меди. Сб. трудов XI сессии РАО, Москва, 2001, с. 117-120.
13. Коробов А.И., Экономов А.Н. Особенности нелинейных акустических свойств медных проволок в области пластических деформаций при разгрузке-нагрузке. Сб. трудов XI сессии РАО, Москва, 2001, с. 113-116.
14. Коробов А.И., Экономов А.Н. Влияние термической обработки и статических деформаций на акустическую нелинейность медных проволок. Акустический журнал, 2002, т.48, №4, 519-526.