МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

УДК 534.2

Изосимова Мария Юрьевна

ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ С МИКРО- И НАНОМАСШТАБНЫМИ ДЕФЕКТАМИ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ

Специальность: 01.04.06 – акустика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2009

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

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор Коробов Александр Иванович
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Балакший Владимир Иванович
	кандидат физико-математических наук, Прохоров Вячеслав Максимович
Ведущая организация:	Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Защита состоится “22” октября 2009 года в 16:00 на заседании Диссертационного Совета Д.501.001.67 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, физическая аудитория им. Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “22” сентября 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.501.001.67
кандидат физ.-мат. наук, доцент А.Ф. Королев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Уникальные диагностические возможности упругих волн обуславливают неослабевающий интерес к разработке новых сверхчувствительных методов акустического неразрушающего контроля свойств материалов. Эти методы призваны найти принципиально новые решения задач диагностики структурных и усталостных изменений материалов и конструкций авиационной, космической и атомной промышленности, находящихся в экстремальных условиях эксплуатации.

В материалах с дефектами наряду с нелинейностью сил межмолекулярного взаимодействия (классическая нелинейность), приводящей к нелинейной связи между механическим напряжением и деформацией, проявляется структурная (неклассическая) нелинейность. Необходимо отметить, что одним из первых влияния дефектов на нелинейные акустические свойства твердых тел исследовал профессор В.А. Красильников с сотрудниками на кафедре акустики физического факультета МГУ в 1963 году.

Структурная нелинейность определяется надмолекулярной внутренней структурой твердого тела (дислокациями, границами микрокристаллических зерен, микротрещинами, локальными внутренними напряжениями и т.д.) и может на 2-4 порядка превышать классическую нелинейность. Физические механизмы структурной нелинейности до настоящего времени изучены недостаточно. Поэтому экспериментальные исследования влияния внутренней структуры материалов с микро- и наномасштабными дефектами на их линейные и упругие нелинейные свойства носит не только фундаментальный характер, но имеет и большое прикладное значение при создании новых методов для неразрушающего контроля.

Использование акустических волн позволило сделать акустический контроль качества универсальным, т.е. применимым для объектов любой формы с размерами от нескольких миллиметров до сотен метров. Применение волн Рэлея ультразвукового диапазона позволило контролировать поверхностный слой образца (выявление поверхностных и подповерхностых дефектов). В

инженерных конструкциях широко применяются пластины и оболочки. Для контроля качества таких конструкций наиболее удобными оказались волны Лэмба, в частности «медленная» нулевая антисимметричная, или изгибная, мода. Использование медленных волн Лэмба, а тем более нелинейных особенностей их распространения в неоднородном материале, позволяет значительно повысить возможности акустических методов диагностики.

Не менее важной является также задача диагностики резиноподобных материалов, обладающих аномально малыми значениями модуля сдвига (soft solids). К таким материалам относятся образования в биологических тканях. Существующие и широко распространенные методы ультразвуковой диагностики, к сожалению, не позволяют диагностировать на ранних стадиях патологические изменения в них.

Проблема акустической диагностики материалов поставлена перед проектом Европейского Совета NATEMIS (Nonlinear Acoustic Techniques for Micro-Scale Damage Diagnostics), в котором участвуют ученые из 12 стран Европы. Работы в этом направлении активно ведутся в ведущих университетах США и национальных ядерных центрах в Ливерморе и Лос-Аламосе, в Германии (Штутгартский университет). Учитывая особую важность проблемы, в 2005 г. была проведена объединенная научная сессия Отделения физических наук РАН и Объединенного физического общества Российской Федерации "Нелинейная акустическая диагностика". На сессии были представлены доклады ученых из ИПФ РАН (Нижний Новгород), Акустического института (г. Москва), ИОФ РАН (г. Москва), физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В этих докладах приведен обзорный и оригинальные материалы.

Однако, несмотря на большое количество научных публикаций по исследованию нелинейных явлений в структурно неоднородных средах, имеется ряд нерешенных проблем. В частности недостаточно исследованы нелинейные акустические явления в материалах с микро - и нанодефектами. До сих пор нет общепринятого определения количественных характеристик структурной нелинейности, таких, каким является нелинейный акустический параметр для бегущих волн. Сравнительно мало экспериментальных работ по визуализации и получению акустических изображений остаточных напряжений и дефектов в

этих перспективных для науки материалах. Поэтому тема диссертации, посвященная теоретическим и экспериментальным исследованиям влияния на линейные и нелинейные упругие свойства материалов с микро- и наномасштабными дефектами их внутренней структуры и остаточных напряжений, представляется актуальной и имеет большое прикладное значение.

Целью настоящей работы является:

Теоретические и экспериментальные исследования влияния на линейные и нелинейные упругие свойства материалов с микро - и наномасштабными дефектами их внутренней структуры и остаточными напряжениями, разработка экспериментальных методов для дистанционной визуализация и локализация остаточных напряжений и дефектов в металлических пластинах и резиноподобных материалах методами нелинейной акустики с использованием дистанционной лазерной виброметрии.

Поставленная цель достигается путем решения следующих задач:

- Разработка и создание автоматизированной экспериментальной установки для дистанционной диагностики твердотельных пластин и резиноподобных материалов с использованием лазерного сканирующего виброметра.
- Исследование особенностей распространения волн Лэмба конечной амплитуды в твердотельных пластинах с дефектами.
- Разработка и реализация метода определения пространственного распределения нелинейных акустических параметров в твердотельных пластинах с дефектами.
- Разработка дистанционного метода диагностики резиноподобных материалов с помощью воздушного ультразвука и методами лазерной виброметрии.

Научная новизна и практическая ценность

1. Теоретически и экспериментально исследованы особенности нелинейных свойств твердых тел с дефектами. Рассчитана объемная нелинейность твердого тела, содержащего модельные дефекты в зависимости от их концентрации.

2. Разработан и экспериментально реализован метод определения пространственного распределения квадратичного и кубичного нелинейных акустических параметров в тонкой пластине на основе измеренных распределений амплитуд первых трёх гармоник волны Лэмба, возбуждаемой в пластине внешним источником. Установлено, что пространственное распределение нелинейных акустических параметров коррелирует с распределением дефектов в тестируемом образце.
3. Экспериментально исследованы особенности распространения амплитудно-модулированных волн конечной амплитуды в пластинах с дефектами. Показана принципиальная возможность использования методов детектирования амплитудно-модулированного сигнала упругой нелинейностью для диагностики дефектной структуры материалов.

Защищаемые положения:

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований особенностей нелинейных акустических свойств материалов с нано - и микродефектами различного вида.
2. Результаты дистанционной диагностики и визуализации дефектной структуры материалов (металлических пластин и резиноподобных материалов) методами нелинейной акустики и лазерной виброметрии.
3. Методики расчета и представления пространственного распределения нелинейного акустического параметра в пластинах с дефектами по результатам экспериментальных измерений.

Апробация работы и публикации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 19 научных работ, в том числе 3 статьи в Акустическом журнале, 1 статья в журнале «Известия РАН. Серия физическая» и 1 статья в журнале Physics Procedia, а также в 14 статей и тезисах в трудах научных конференций.

Результаты диссертации были доложены автором на 6 российских конференциях (в том числе на 17-20 сессиях Российского акустического общества) и школах-семинарах, и на 7 международных конференциях (в том

числе ICUltrasonics (Vienna, 2007, Santiago, 2009), Acoustics'08 (Paris, 2008), 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics (Stockholm, 2008)) и научных школах (Imaging, Communication, and Disoder (Cargese, France, 2006) и Linear and Nonlinear Acoustics: Modern Trends and Applications (Les Housches, France 2008)) .

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, двух частей, основных результатов и списка цитируемой литературы. Общий объем работы 178 страниц текста, в том числе 88 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 144 наименований.

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Часть А посвящена исследованию и диагностике тонких твердотельных пластин.

В первой главе проведен краткий обзор существующих методов акустической диагностики объектов с дефектами. Рассматриваются основные механизмы акустической нелинейности и модели сред со структурной нелинейностью. Проведен обзор работ, демонстрирующих возможности акустических способов отслеживания микроструктурных изменений твердых тел. Рассматривается теория распространения волн Лэмба в твердотельных пластинах.

Также в этой главе приводятся оригинальные материалы по расчету локальной нелинейности при вершине трещины в зависимости от размера области усреднения. Показано, что максимальное значение акустического параметра нелинейности Γ принимает при вершине излучающей трещины:

$$\Gamma = \Gamma_0 \left(1 + 2\sqrt{\frac{l}{r_0}} \right)^2$$

здесь $2l$ - длина трещины, r_0 - радиус кривизны ее края. Если длина трещины 1 мм, а радиус кривизны – 1 нм (порядка нескольких межатомных расстояний), то коэффициент усиления $G \sim 10^3$. Это означает, что сравнительно слабые акустические колебания в окрестности трещины могут усилиться настолько, что нелинейные эффекты (это, прежде всего, генерация высших гармоник) станут весьма заметными**.**

Рассчитана объемная нелинейность твердого тела, содержащего сферические полости в зависимости от их концентрации. Показано, что она зависит от доли объема среды, занимаемого полостями и коэффициента Пуассона σ:

$$\Gamma = \Gamma_0 \left[1 + n\nu_0 \frac{807 - 730\sigma + 175\sigma^2}{35\left(7 - 5\sigma\right)^2} \right].$$

Здесь $\nu_0 = 4\pi r_0^3 / 3$- объем одной сферической полости, n – концентрация полостей, σ - коэффициент Пуассона среды.

Рассчитана объемная нелинейность среды, содержащей бесконечно тонкие трещины в виде круглых дисков, принимающих при раскрытии эллипсоидальную форму. Показано, что в отличие от случая с полостями, что при наличии ансамбля параллельных друг другу дискообразных трещин усиление нелинейности не зависит от коэффициента Пуассона и линейных упругих модулей среды. Рассматриваются основные проявления структурной нелинейности, делается обзор экспериментальных работ, предлагающих количественные оценки нелинейности.

Во **второй главе** описываются методики и их экспериментальная реализация для исследования линейного и нелинейного взаимодействия изгибных волн Лэмба в твердотельных пластинах с дефектами с размерами значительно меньшими, чем длина волны, а также методы диагностики дефектной структуры в них. В качестве объектов исследования рассматриваются тонкие пластины с естественными (возникающие случайным образом при изготовлении образца) и искусственно приготовленными дефектами (непроклей, трещина).

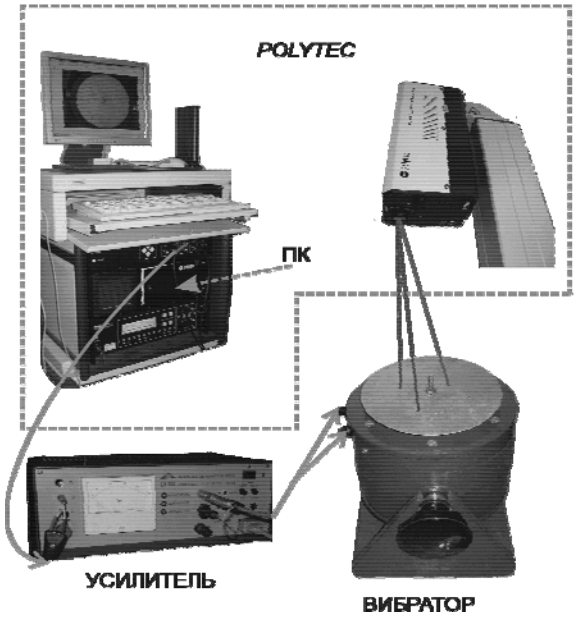


Рис. 1 Схема экспериментальной установки для исследования распространения изгибных волн Лэмба в цилиндрических пластинах.

Для исследования волн Лэмба в тонких пластинах разработана автоматизированная экспериментальная установка, основным измерительным устройством которой является лазерный сканирующий виброметр PSV-300 фирмы *Polytec* (Рис.1.).

С помощью этой установки были исследованы линейные свойства круглых тонких пластин. В частности, измерен спектр собственных колебаний пластины, который был неэквидистантным (Рис.2). Возможности виброметра позволили визуализировать форму колебаний пластины на ее собственных частотах (Рис. 3).

Приводится описание разработанной в работе методики для локализации дефектов в пластине по пространственному распределению, как амплитуд гармоник, так и нелинейных акустических параметров в ней.

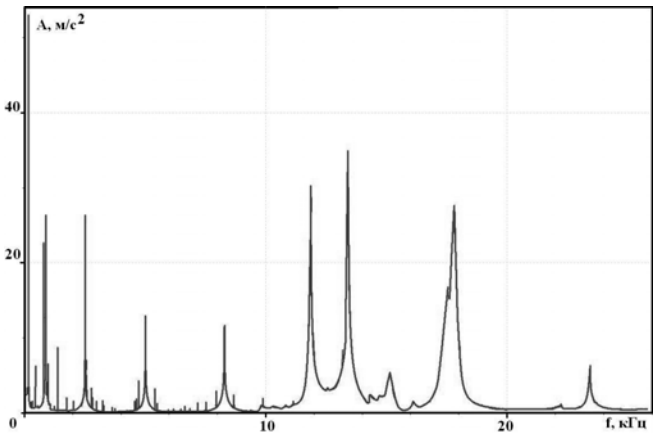


Рис. 2 Спектр собственных колебаний круглой тонкой пластины.

Обнаружены аномально высокие значения амплитуд 2-5 гармоник в одной локальной точке в пластине с естественными дефектами (до 70 раз по сравнению со средними значениями по пластине).

В этой точке были проведены измерения зависимости амплитуд высших гармоник от амплитуды основной частоты. Было обнаружено аномальное увеличение амплитуд гармоник со второй по пятую (в 10 раз – второй, в 19 раз - третьей, в 120 раз – четвертой, в 20 раз –пятой) при превышении амплитуды основной частоты величины 9.5 мкм.

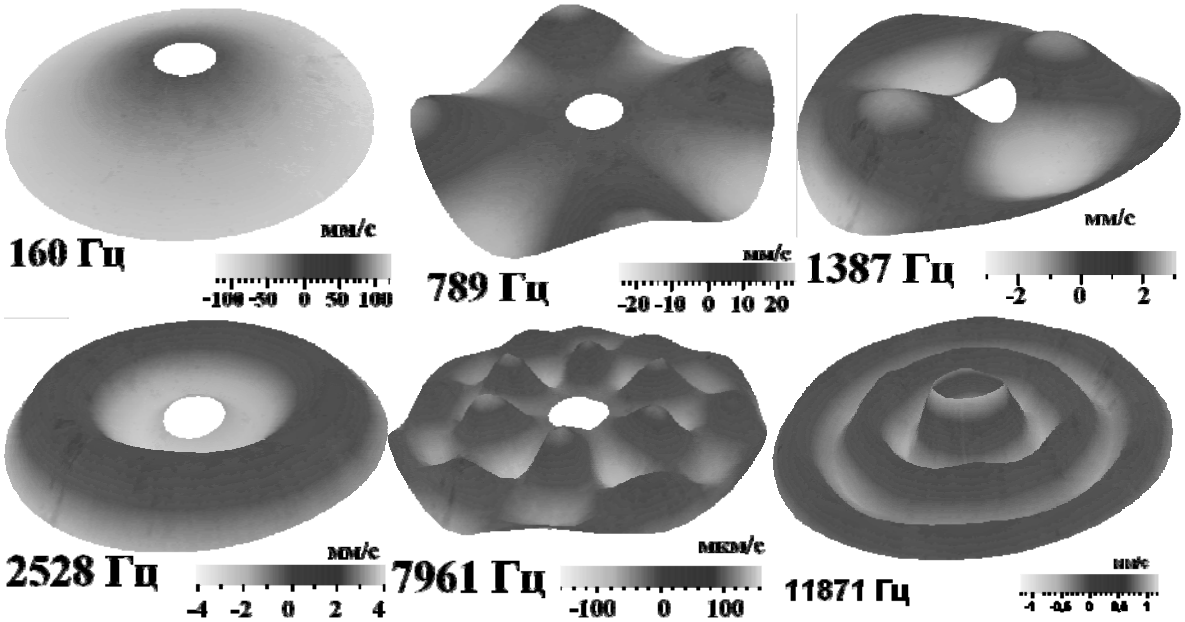


Рис. 3 Форма колебаний некоторых мод круглой тонкой пластинки.

При амплитуде основной частоты 10.2 мкм они достигают максимума, и при дальнейшем ее увеличении наблюдалось их резкое уменьшение до уровня предшествующему резкому увеличению их амплитуд. Пороговый характер увеличения генерации гармоник объясняется с привлечением билинейной модели среды.

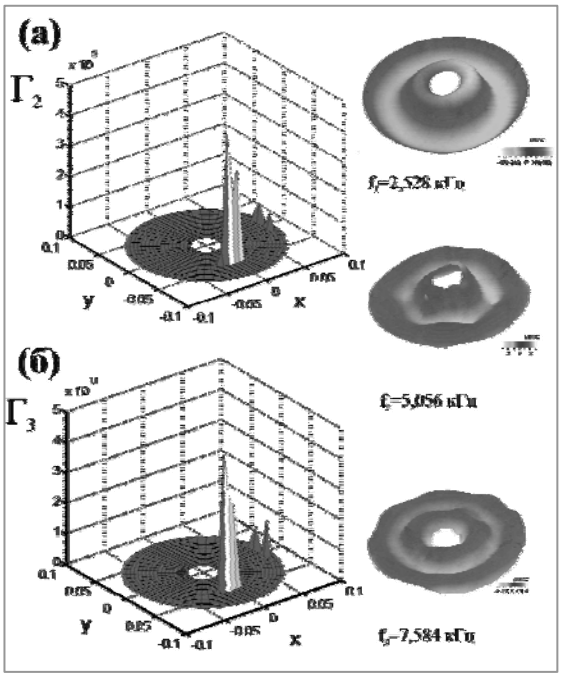


Рис. 4 Пространственное распределение квадратичного (а) и кубического (б) параметров нелинейности, рассчитанные из форм колебаний (справа) образца с естественным дефектом

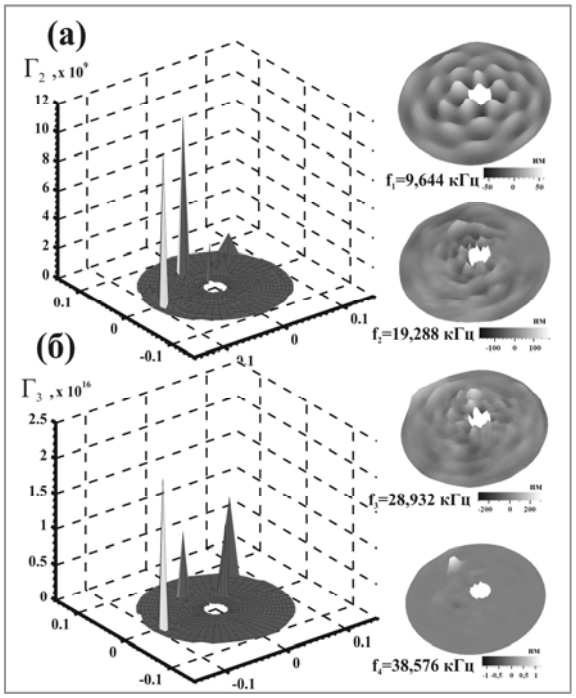


Рис. 5 Пространственное распределение квадратичного (а) и кубического (б) параметров нелинейности, рассчитанные из форм колебаний (справа) образца с искусственным дефектом типа

Источником аномальной нелинейности, на наш взгляд, являлся локальный дефект в виде поджатой микротрещины с величиной поджатия ~ 0,62 мкм.

Разработанные методика и программы для персонального компьютера позволили по экспериментально измеренному распределению амплитуд волны Лэмба и ее второй и третьей гармоник в тонкой пластине определить пространственное распределение квадратичного и кубичного нелинейных акустических параметров (Рис.4.) Обнаружено локальное аномально большое увеличение нелинейного параметра (на 3 порядка) в некоторых областях пластины (рис. 4), в том числе в области искусственно приготовленного дефекта (на 3 порядка) с заранее известными координатами (рис. 5). Эти результаты позволили утверждать, что пространственное распределение нелинейного параметра коррелирует с распределением дефектов в тестируемом образце.

Проведенные исследования особенностей распространения амплитудно-модулированных изгибных волн конечной амплитуды в твердотельной пластине с дефектами, а также взаимодействия на дефекте волн низкой и высокой частоты (вибро-модуляционный метод) показали принципиальную возможность

использования данных методов для получения более полной информации о дефектной структуре исследуемых образцов.

В заключение сформулированы основные результаты, полученные в **этой части** диссертации.

Часть Б посвящена исследованию упругих свойств резиноподобных материалов.

В **первой главе** приведен обзор существующих методов определения упругих модулей резиноподобных материалов, описываются методы их диагностики с использованием методов нелинейной акустики. **Также** рассматриваются методы возбуждения сдвиговых волн в резиноподобных материалах, и приводится обзор работ, использующих методы эластографии.

Во **второй главе** проводится описание реализованных в работе квазистатической и динамической методик для определения сдвигового модуля в резиноподобных материалах, и приводятся результаты определения упругих модулей резиноподобного материала-пластисола.

Таблица 1 Упругие модули резиноподобных сред.

Материал	E, Па	σ	μ, кПа
Пластисол	27±3	0.495±0.02	8.9±0.3

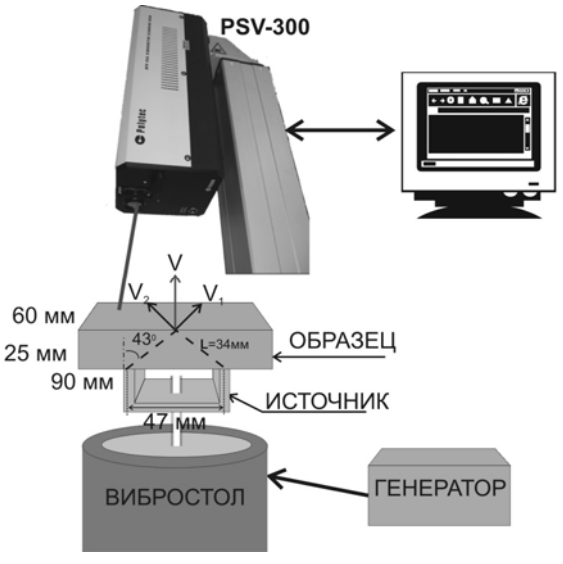


Рис. 6 Экспериментальная установка для динамического определения сдвигового модуля.

В частности, реализован метод возбуждения и регистрации сдвиговых волн двумя линейными источниками (Рис.6). Виброметр позволяет регистрировать только нормальную компоненту колебательной скорости поверхности, поэтому его использование для прямой регистрации распространяющейся сдвиговой волны затруднительно. Источники на частоте 300 Гц возбуждались синфазно с помощью вибростола. Размеры образца выбирались такими, чтобы максимумы диаграммы направленности источников для сдвиговой волны перекрывались на противоположной стороне образца. При

этом результирующий вектор колебательных скоростей сдвиговых волн $\vec{V}_1$ и $\vec{V}_2$ оказывался нормальным к поверхности образца и мог регистрироваться виброметром. Измерение времени распространения акустических импульсов от источников до поверхности, а также измерение времени распространения образовавшейся на поверхности образца ПАВ, позволяет рассчитать модуль сдвига в образце, который оказался равен $\mu = 17.6 \pm 0.8$ кПа .

Отличие в величинах сдвиговых модулей, измеренных в работе квазистатическим и динамическим методами, связано с особенностями приготовления образцов.

В **третьей главе** описаны методики для дистанционной диагностики резиноподобных материалов с включениями с использованием плоских волн и фокусированных пучков в воздухе.

Использование лазерного сканирующего виброметра позволило визуализировать колебания фантома биологической ткани с модельными дефектами в виде воздушных пузырьков, уплотнений и расслоения и определить местоположения этих дефектов.

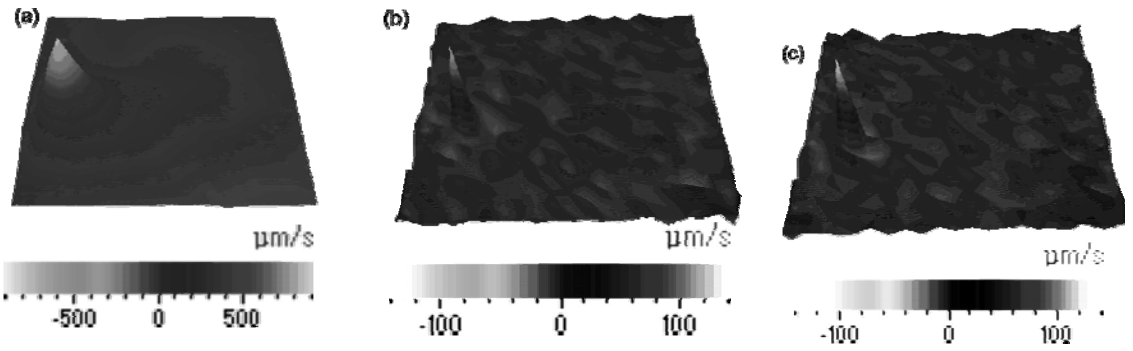
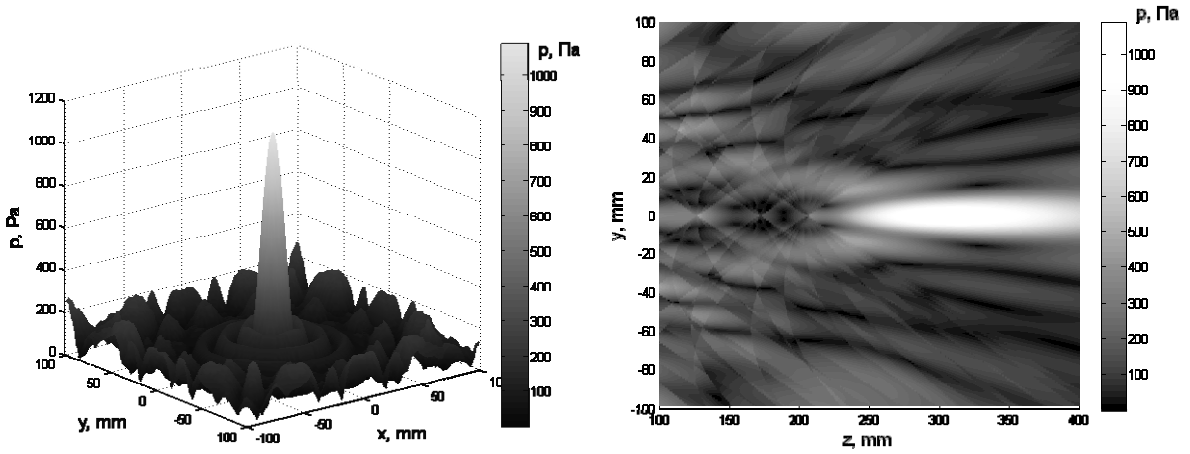


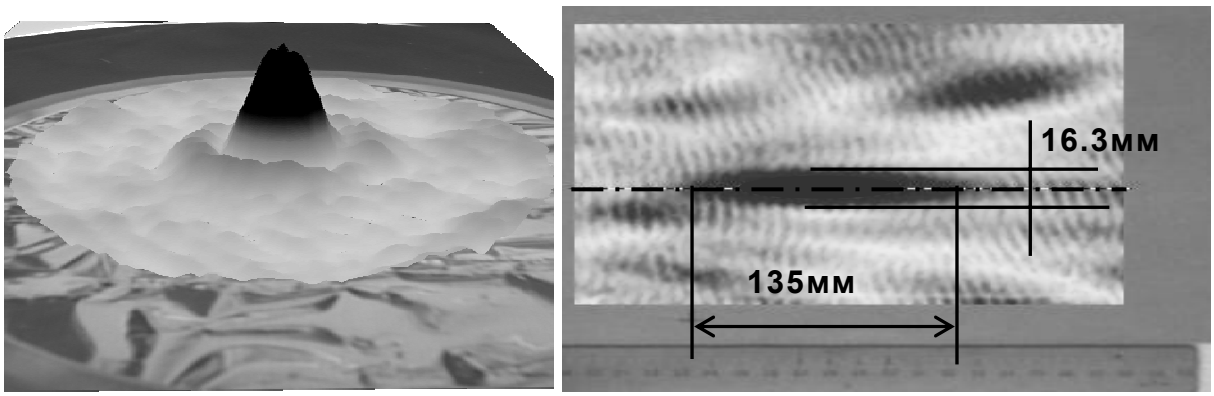
Рис. 7 Колебания образцов с расслоением на частоте 4.225 кГц (а), 2 гармонике – 8.45 кГц (б), 3 гармонике – 12.675 кГц (в).

Приводятся результаты численного моделирования и исследования разработанной и созданной в работе акустической фокусирующей антенны (рис. 8).

Разработана экспериментальная установка для обнаружения включений в резиноподобных материалах с помощью сигнала комбинационных частот фокусированных ультразвуковых частот.



(а)



(б)

Рис. 8 Пространственное распределение амплитуды звукового давления от дискретной антенны в фокальной плоскости (слева) и диаграмма направленности (справа): (а)- расчет, (б) – результаты эксперимента.

В основу работы установки положено нелинейное взаимодействие двух акустических пучков конечной амплитуды в исследуемом материале. Эффективность этого процесса определяется величиной нелинейного параметра в области взаимодействия. Если на дефект, с характерными размерами d, в структуре вещества, воздействуют две плоские волны с частотами ω_1 и ω_2 (их амплитуды давления $P(\omega_1)$и $P(\omega_2)$), то на границе дефекта, в результате нелинейного взаимодействия, возникает сигнал комбинационной частоты $P(\omega_1 \pm \omega_2)$:

$$P(\omega_1 \pm \omega_2) = \frac{\Gamma d}{4c^3 \rho}(\omega_1 \pm \omega_2)P(\omega_1)P(\omega_2),$$

где c, ρ - известные скорость звука и плотность среды. При постоянных значениях амплитуды падающих волн $P(\omega_1)$и $P(\omega_2)$ величина сигнала на комбинационных частотах $P(\omega_1 \pm \omega_2)$ определяется величиной нелинейного параметра Γ, а также частотой результирующей волны.

Установка позволила исследовать нелинейные свойства резиноподобных образцов с включениями и обнаружить созданные модельные дефекты.

Заключительная глава второй части содержит основные результаты по исследованию и диагностике резиноподобных материалов.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Разработана и создана автоматизированная экспериментальная установка для дистанционной диагностики твердотельных пластин и резиноподобных материалов с использованием лазерного виброметра.
2. Проведен теоретический анализ упругих нелинейных свойств твердых тел с модельными дефектами. Рассчитаны локальная нелинейность при вершине трещины и объемная нелинейность твердого тела, содержащего модельные дефекты в зависимости от их концентрации.
3. Экспериментально обнаружено, что усредненная по поверхности круглой тонкой металлической пластины с дефектами амплитуда второй гармоники волны Лэмба пропорциональна амплитуде основной частоты в степени 2.12±0.09, а третьей гармоники – в степени 1.6±0.1. Это указывает на то, что кроме физической нелинейности, связанной с ангармонизмом кристаллической решетки, в поликристаллическом сплаве имеется дополнительный механизм нелинейности.
4. Анализ колебаний пластинки в различных ее областях показал, что имеются как участки, в которых наблюдается характерная для физической нелинейности степенная зависимость амплитуд второй и третьей гармоник от амплитуды основной частоты, так и локальные участки с характерным для структурной нелинейностью пороговым характером этой зависимости и аномально высокими значениями амплитуд гармоник. Подобное поведение амплитуд гармоник также было обнаружено в области искусственно приготовленного дефекта.

5. Разработана методика и создана программа для персонального компьютера, позволившая по экспериментально измеренному распределению амплитуд волны Лэмба и ее второй и третьей гармоник в тонкой пластине определить пространственное распределение квадратичного и кубичного нелинейных акустических параметров. Были обнаружены аномально большие значения нелинейных акустических параметров в нескольких локальных областях (увеличение на 3 порядка по сравнению с фоном), в том числе и в области искусственно приготовленного дефекта (увеличение на 2 порядка), координаты которого были заранее известны.
6. Установлено, что пространственное распределение нелинейного параметра коррелирует с распределением дефектов в тестируемом образце. Также был сделан вывод, что пространственное распределение нелинейного акустического параметра позволяет получить большую информацию о дефектах в тестируемом материале, чем визуализация формы амплитуд акустических гармоник.
7. Экспериментально исследованы особенности распространения амплитудно-модулированных волн конечной амплитуды в пластинах с дефектами. Показана принципиальная возможность использования методов детектирования амплитудно-модулированного сигнала на упругой нелинейности для диагностики дефектной структуры материалов. Установлено, что исследование нелинейного отклика на комбинационных частотах позволяет получить дополнительную информацию о дефекте.
8. Реализован дистанционный метод диагностики резиноподобных материалов с помощью воздушного ультразвука и лазерной виброметрии.

Список опубликованных работ

1. А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова. Нелинейные волны Лэмба в металлической пластинке с дефектами. Акуст. Журнал. 2006. Т. 52. № 5. С.683-692.
2. А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова, Е.В. Прохорова. Исследование колебаний биологических тканей и их фантомов с модельными дефектами. Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71. №1. С.150-152.

3. А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова, О.В. Руденко. Пространственное распределение нелинейного акустического параметра в тонкой поликристаллической пластинке из сплава с дефектами. Акуст. Журнал. 2009. Т. 55. № 2. С. 153-159.
4. О.В. Руденко, А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова. Нелинейность твердых тел с микро- и наномасштабными дефектами и особенности ее макроскопических проявлений. Акуст. Журнал. 2009. принята в печать.
5. Alexander I. Korobov, Maria Y. Izosimova, Sergey A. Toschov. Development of Ultrasound Focusing Discrete Array for Air-coupled Ultrasound Generation. Physics Procedia. 2009 (in print)
6. А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова. Взаимодействие волн Лэмба конечной амплитуды в твердотельных пластинках. Сборник трудов XVII сессии РАО. Москва. 2005. Т.1. С. 154-157.
7. А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова. Пространственное распределение нелинейного параметра в образце сплава алюминия с дефектами. Сборник трудов XVIII сессии РАО. Таганрог. 2006. Т. 1. С. 37-40.
8. А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова, Е.В. Прохорова. Использование лазерного сканирующего виброметра для диагностики биологических тканей и их фантомов. Сборник трудов XVIII сессии РАО. Таганрог. 2006. Т. 1. С. 37-40.
9. М.Ю. Изосимова. Исследования колебаний тонкой пластины с помощью лазерного виброметра. Демидовские чтения на Урале. Тезисы докладов. 2006. С. 81-82.
10. М.Ю. Изосимова. Нелинейные колебания металлической пластины с дефектами. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2006», секция «Физика». Сборник тезисов. Том 2. Физический факультет МГУ. 2006. С. 4-5.
11. A.I. Korobov, M.Y. Izossimova, E.V. Prokhorova. Flaws spotting and elastic modulus definition in phantoms of biological tissues by methods of laser Doppler vibrometry. ICUltrasonics 2007 proceedings. Vienna. (doi:10.3728/ICUltrasonics. 2007. Vienna.1610_korobov)

12. A.I. Korobov, M.Y. Izossimova. Defects spotting in metal plates by methods of nonlinear acoustics. ICUltrasonics 2007 proceedings. Vienna. (doi:10.3728/ICUltrasonics. 2007. Vienna.1612_korobov)
13. М.Ю. Изосимова, Е.В. Прохорова. Регистрация сдвиговых волн методом лазерной доплеровской виброметрии. Материалы докладов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». М.: Издательство МГУ; СП МЫСЛЬ. 2008. [Электронный ресурс]
14. М.Ю. Изосимова, С.А. Тощов. Акустическое детектирование амплитудно-модулированного сигнала. Материалы докладов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». М.: Издательство МГУ; СП МЫСЛЬ. 2008. [Электронный ресурс]
15. Maria Izosimova, Alexandr Korobov, Ekaterina Prokhorova, and Oleg Sapozhnikov. Measurement of dynamic shear modulus in soft solids using laser vibrometry. J. Acoust. Soc. Am. 2008. V. 123. No. 5. Pt. 2. P. 3226.
16. А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова, О.А. Сапожников. Возбуждение и регистрация поверхностных волн в резиноподобном материале-пластисоле. Труды XX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2008. Т. 2. С. 90-93.
17. Alexander I. Korobov, Maria Y. Izosimova, and Kirill A. Nenarokomov. Noncontact Diagnostics of Rubber-like Materials by Methods of Nonlinear Acoustics. Proceedings of 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics. (Stockholm, Sweden 7 – 10 July 2008) PP. 533-536.
18. Alexander I. Korobov, Dmitry M. Mekhedov, and Maria Y. Izosimova. NDT of Grain Boundaries in Microcrystalline Aluminum Alloy Using Methods of Nonlinear Acoustics. Proceeding of 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics. (Stockholm, Sweden 7 – 10 July 2008) PP. 529-532.
19. А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова, С.А. Тощов. Нелинейное взаимодействие амплитудно-модулированной волны Лэмба с дефектами. Труды XIX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2008. Т. 2. С. 93-96.