

ОДЕССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Куценко Альфред Николаевич

УДК 620.179.16.

КОМПЕНСАЦИОННЫЕ АКУСТОУПРУГИЕ ТЕНЗОДАТЧИКИ
МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
(Основы теории и проектирования)

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

О д е с с а - 1993.

118 20.207

Работа выполнена на кафедре общей и теоретической
физики Одесского Политехнического Университета.

Научные консультанты:

академик Джагунов Р.Г.
академик Малахов В.П.

Официальные оппоненты:

д.т.н. Ковшов Г.Н.
д.т.н. Воронов В.Г.
д.т.н. Клисторин И.Ф.

Ведущая организация - ОКБ Силоизмерительных машин
(г.Одесса)

Защита состоится 28 октября 1993 г. в 14⁰⁰ час. на
заседании специализированного совета Д 068.19.01 при Одесском
Политехническом Университете (270044, г.Одесса, ГСП, пр. Шев-
ченко, 1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Универси-
тета.

Автореферат разослан "15" сентября 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Ю.С.Ямпольский



78-28.257

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Проблема контроля механических напряжений в элементах конструкций является актуальной для многих отраслей. Так, например, широкое распространение в авиационной, космической, автомобильной промышленности получили резьбовые соединения. Однако, вопрос автоматизации их сборки далек от совершенства, т.к. в настоящее время не существует достаточно надежных и простых средств измерения возникающих при этом усилий затяжки. Острота проблемы обусловила разработку многочисленных методов контроля возникающих в них механических напряжений. К их числу относятся механические, оптические, электрические, магнитные, рентгеновские, нейтронно-дифракционные методы. При наличии определенных достоинств каждый из них обладает и рядом существенных недостатков. Как показывает анализ состояния предмета исследования, среди наиболее перспективных выделяются методы акустической тензометрии, обладающие по сравнению с другими, рядом преимуществ: оперативностью, относительной простотой реализации, физической наглядностью, безвредностью для обслуживающего персонала и окружающей среды, гибкостью применения на различных стадиях производства, хранения, эксплуатации и ремонта изделий, сравнительной дешевизной. Акустические методы дают возможность реализации стопроцентного контроля и автоматизации процесса путем использования мобильных датчиков, осуществляющих непрерывный контакт с контролируемым объектом.

Несмотря на определенные успехи, акустическая тензометрия еще не получила широкого распространения в промышленности, что объясняется малостью наблюдаемых нелинейных эффектов, влиянием на них различных внешних факторов, особенностями напряженно-деформированного состояния объектов контроля, отсутствием метрологического обеспечения и обоснованных методик контроля. Таким образом, внедрение в инженерную практику методов акустодиагностики напряжений связано с решением ряда проблем, важнейшей из которых является повышение эффективности датчиков механических напряжений, возникающих

в упругих телах в процессе автоматизированного производства и сборки элементов конструкций.

Известные ранее датчики механических напряжений использовались в качестве основного элемента совмещенный пьезоэлектрический преобразователь, работающий в эхо-импульсном режиме. Измерение одноосных напряжений с их помощью осуществляется путем измерения значений скорости (или времени распространения) звукового импульса в исследуемом объекте в напряженном v и ненапряженном v_0 состояниях. Основным недостатком подобных датчиков является необходимость использования при вычислениях величины v_0 , определение которой вызывает принципиальные трудности, а зачастую - в работающей конструкции - и невозможно. Указанный недостаток может быть устранен с помощью компенсационного принципа измерения, основанного на существовании при использовании эффекта акустоупругости такого реперного направления, в котором скорость звука инвариантна к изменению напряжения и совпадает, следовательно, с v_0 . Для этой цели необходима разработка компенсационных акустоупругих тензодатчиков.

Поскольку компенсационный метод построения акустоупругих тензодатчиков позволяет существенно повысить эффективность метода измерений механических напряжений в элементах конструкций, исследования, направленные на их создание, являются актуальными.

Все вышеизложенное позволяет сформулировать цель работы как повышение эффективности тензометрии путем создания мобильных компенсационных акустоупругих тензодатчиков, применяемых в системах контроля механических напряжений в деталях различных конструкций.

Методы исследований базируются на теории упругости, динамике и прочности машин, теории распространения упругих волн в среде при наличии механических напряжений, тензорной методологии в теории систем, математическом моделировании и экспериментальных исследованиях акустоупругого эффекта.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

1. Компенсационный метод измерения механических напряжений с помощью акустоупругих тензодатчиков.

2. Матричная методология в теории акустической тензоэтрии.

3. Эффект существования инвариантности скорости упругих волн к изменению механических напряжений.

Практическое значение работы составляют:

1. Метод определения реперного направления, в котором скорость не зависит от величины механического напряжения.

2. Компенсационный акустоупругий тензодатчик.

3. Прецизионный метод измерения временных интервалов, методы определения одноосных механических напряжений и термоакустических коэффициентов скорости звуковых волн.

4. Методологические принципы акустической тензоэтрии.

5. Установление критериев подобия тарировочных кривых, полученных для деталей различных типоразмеров из данного материала или из различных конструкционных материалов.

6. Пакет прикладных программ для расчета акустоупругих коэффициентов среды, обработки результатов экспериментов и выработки решения, дающий возможность по заданному уровню требований к точности контроля напряжений определить допустимые значения погрешности измерения отдельных параметров на стадиях планирования эксперимента и разработки измерительных средств.

Необходимо отметить, что теоретические выводы и практические рекомендации, сформулированные в данной работе для систем контроля механических напряжений в деталях резьбовых соединений, могут быть в значительной мере распространены на системы контроля других реальных конструкций сложной формы.

Реализация результатов работы. Диссертационная работа выполнялась в соответствии с координационным планом научно-исследовательских работ Научного Совета АН СССР. Результаты исследований в рамках научно-исследовательских работ, выполняемых по плану важнейших НИР института, внедрены на предприятиях заказчика (п/я Р-6521) в устройствах автоматизированного контроля и управления измерением механических напряжений в элементах разъемных соединений энергетических установок, а также в виде алгоритмов и пакетов прикладных программ анализа и обработки результатов, оценки метрологичес-

ких характеристик, выработки решений и документирования. Кроме того, результаты исследований использовались в учебном процессе Одесского Политехнического Университета в курсах "Механика сплошных сред", "Неразрушающие методы контроля качества вещества".

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: 20 Internationale akustische Konferenz ULTRASCHALL (CSSR, Praha, 6-10 July 1981); 10 World Conference on Non-Destructive Testing (Moscow, USSR, 22 - 28 August 1982); IUTAM Symposium Nonlinear Deformation Wave (Tallinn, USSR, 22-28 August 1982); Дефектоскопия-89 (Пловдив, България, 24-26 октомври 1989); 6 Wissenschaftliche Konferenz Rationalisierung in Maschinenbau durch Schlüsseltechnologien (Zwickau, DFG, November 1989); Состояние и основные направления электротензометрии и ее применение в народном хозяйстве (г.Киев, 9-12 сентября 1980 г.); Научные проблемы неразрушающего контроля (г. Москва, НИИ Интроскопии, 14 сентября 1980 г.); 9 Всесоюзная научно-техническая конференция "Неразрушающие физические методы и средства контроля" (г.Минск, 26-28 мая 1981); Методы и средства дефектоскопии и диагностирования портового оборудования (г.Ильичевск, 11-19 июня 1984 г.); Таллинский общегородской семинар механики (г.Таллинн, Институт кибернетики АН ЭССР, 15-18 декабря 1985 г.); Методы и средства проектирования динамических систем с учетом требований корректности и грубости (г.Одесса, 3-5 сентября 1986 г.); Ультразвуковые, электромагнитные, оптические и другие неразрушающие методы контроля деталей (г. Химки, 18-20 ноября 1986); 4 Всесоюзная научно-техническая конференция "Метрологическое обеспечение машиностроительных отраслей народного хозяйства" (г. Одесса, 1987 г.); 14 Всесоюзная конференция по акустоэлектронике и физической акустике твердого тела (г. Кишинев, 13-15 июня 1989); Методы и применение голографической интерферометрии (г. Куйбышев, 28 мая - 1 июня 1990 г.); 11 Всесоюзная Акустическая конференция (г. Москва, 1991 г.); Ежегодные отчетные научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава Одесского политехнического инсти-

тута. Прибор для измерения малых интервалов времени "Зонд-2" демонстрировался на Выставке Достижений народного хозяйства СССР и был удостоен диплома третьей степени (Постановление Главного комитета Выставки N 39/н от 5.08.1983 г.).

Публикации. По материалам выполненных в процессе работы над диссертацией исследований и разработок опубликовано свыше 65 печатных работ. В их числе: 2 монографии ("Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин", - Кишинев: Штиинца (Наука), 1981; "Акустическая тензометрия" - Кишинев: Штиинца, 1991); 4 авторских свидетельства СССР на изобретения, 18 статей в журнале АН СССР "Дефектоскопия", 20 статей в Республиканском межведомственном научно-техническом сборнике "Акустика и ультразвуковая техника", 10 тезисов докладов Международных и Всесоюзных конференций. Имеется ряд публикаций на немецком (ГДР, ФРГ) и английском (Таллинн, Москва, США) языках, ряд статей из журнала "Дефектоскопия" вышли в переводах на английский язык в США.

Материалы диссертационной работы использовались при подготовке отчетов о выполнении госбюджетных и хозяйственных научно-исследовательских работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка использованной литературы из 314 наименований. Она содержит 313 страниц основного текста, иллюстрированного рисунками на 57 страницах.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методы повышения эффективности акустической тензометрии.
2. Принципы компенсационного построения акустоупругих тензодатчиков.
3. Матричная методология в теории акустической тензометрии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность направления исследований, показаны преимущества акустодиагностики в системах контроля напряженно-деформированного состояния, сформулированы основные задачи, решаемые в диссертации, определена

цель исследования, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту, а также приведены данные о публикациях и апробации основных результатов работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние акустодиагностики напряженно-деформированного состояния и сформулированы цели исследования. Из соображений практической осуществимости измерений в системах управления контролем механических напряжений, а также в связи с наличием определенной аппаратурной и методической преемственности по отношению к традиционным ультразвуковым методам неразрушающего контроля перспективным для целей акустической тензометрии представляется акустоупругий эффект. Его сущность может быть сформулирована следующим образом: скорость распространяющихся в теле упругих волн зависит от напряжений (деформаций), характера поляризации волны и взаимной ориентации волнового вектора и направления действия усилий. Существенный вклад в изучение проблемы внесли: А.Грин и Р.Ривлин (1952), Д.Хьюз и У.Келли (1953), Р.Бергман и Р.Шахбендер (1958), Р.Бенсон и В.Раэльсон (1959), Р.Тоупин и В.Бернштейн (1961), а в последние годы акад. А.Н.Гузь (Институт механики Академии Наук Украины) и его сотрудники (Ф.Г.Махорт, О.И.Гуща, В.К.Лебедев, А.А.Чернооченко). Общее число публикаций по этой проблеме превышает в настоящее время 1200, причем существует ряд исследовательских центров в СНГ, США, Японии, Германии, Франции.

Однако, несмотря на почти сорокалетний интерес к акустической тензометрии, она долго не выходила из стадии лабораторных исследований, что, помимо специфических трудностей (малость эффектов, сложность напряженно-деформированного состояния, влияние внешних факторов), можно объяснить отсутствием компенсационных методов измерений и соответствующих акустоупругих тензодатчиков сложностью математического описания процесса распространения упругих волн в среде при наличии внешних воздействий, громоздкостью и несопоставимостью соотношения, обусловленных использованием различных моделей среды и форм упругого потенциала, различной степенью приближений, отсутствием единых обозначений и терминологии. Кроме того, использование акустической тензометрии в

производственных условиях тормозилось из-за отсутствия методологии контроля, надежной портативной аппаратуры и ее метрологического обеспечения.

Назовем измерительный преобразователь, использующий для контроля механических напряжений акустоупругий эффект, акустоупругим тензодатчиком. Измерение механических напряжений с его помощью сводится при известных акустоупругих коэффициентах к измерению скорости (или времени) распространения упругих волн в исследуемом объекте в напряженном ν (τ) и ненапряженном ν_0 (τ_0) состояниях. При этом определение величин ν_0 и τ_0 вызывает принципиальные затруднения, т.к. они являются индивидуальными параметрами объекта контроля и зависят от его физико-химических характеристик, способа обработки, предьстория материала. В условиях эксплуатируемой конструкции определение ν_0 и τ_0 практически невозможно. Этот факт является одной из причин, тормозящих практическое использование акустической тензометрии, поскольку погрешность в измерении величины ν_0 порядка 1% приводит к погрешности в определении напряжения σ в несколько десятков процентов. В большинстве исследований в качестве ν_0 и τ_0 использовались некоторые начальные значения ν_n и τ_n . Для повышения точности измерения σ следует искать методы определения ν_0 и τ_0 или их исключения из измерительной процедуры. Можно предложить следующую классификацию существующих методов: дополнительной фиксированной нагрузки (В.М.Бобренко, А.С.Рудаков и др.); дополнительных внешних воздействий (Ф.Г.Махорт, О.И.Гуща, В.М.Бобренко, А.Н.Куценко и др.); дополнительных направлений прозвучивания с использованием различных типов волн (Ф.Г.Махорт, О.И.Гуща, А.Н.Куценко и др.); тарировки (А.С.Рудаков и др.). Каждая из этих методов обладает как определенными достоинствами, так и существенными недостатками.

Назовем акустоупругий эффект, возникающий при прозвучивании вдоль усилия, продольным, а перпендикулярно ему - поперечным. Эксперимент и расчет показывают, что для большинства конструкционных материалов продольные и поперечные акустоупругие коэффициенты имеют противоположные знаки. Поэтому из самых общих физических соображений становится понятным, что

должно существовать такое реперное направление, определяемое углом θ_0 , в котором продольный и поперечный акустоупругие эффекты взаимно компенсируются. В этом направлении скорость распространения инвариантна к изменению одноосного напряжения, то есть приобретает смысл v_0 .

Назовем компенсационным акустоупругим тензодатчиком измерительный преобразователь, использующий при контроле механических напряжений измерения скорости в двух направлениях - действующей силы и реперном. Его чувствительным элементом является специальным образом подготовленный исследуемый объект, в котором с помощью двух обратимых пьезоэлектрических преобразователей ударного возбуждения генерируются две независимых объемных или поверхностных волны: одна распространяется в направлении действия силы, другая - в реперном направлении θ_0 . Каждая волна многократно отражается от двух параллельных плоскостей, ортогональных направлению ее распространения. В режиме приема входные сигналы пьезопреобразователей представляют собой две последовательности упругих эхо-импульсов, несущих информацию о скоростях распространения v и v_0 . С помощью той же пары пьезопреобразователей последовательности упругих эхо-импульсов трансформируются и подаются на входы устройств измерения скорости и далее на компаратор и вычислительное устройство. В предлагаемом датчике фактически два компенсационных действия - одно физическое, связанное с формированием эталонного значения v_0 , а другое структурное - на уровне измерительной схемы, позволяющей определить величины v , v_0 , $(v - v_0)$. Для реализации предлагаемого компенсационного метода измерений необходимо:

- теоретически и экспериментально подтвердить существование реперного направления;
- найти расчетные соотношения для его определения;
- осуществить измерение скорости упругих волн в этом направлении.

Все вышесказанное позволяет наметить программу исследований, включающих в себя:

- теоретический анализ проблемы;
- экспериментальную проверку полученных результатов;

- разработку методологических принципов использования акустоупругих тензодатчиков;

- их внедрение в практику акустической тензометрии на примере автоматизированного контроля усилия затяжки резьбовых соединений энергетических установок.

Во второй главе изложены основы теории акустоупругости на базе матричной методологии. Ее суть заключается во введении матриц скоростей v_{ik} , относительного изменения скорости δv_{ik} и времени распространения δt_{ik} ультразвуковых волн, в установлении зависимостей δv_{ik} и δt_{ik} от величин, характеризующих внешние воздействия (механические напряжения σ_{in} , температура T , магнитное H_j и электрическое E_j поля), определения вида коэффициентов, связывающих искомые величины. Предлагаемое описание обладает рядом преимуществ, среди которых следует отметить стандартный метод постановки задачи, возможность получения принципиально новых результатов, относительную простоту расчетных соотношений. Полученные соотношения позволяют решать как прямую задачу акустодиагностики (определение упругих характеристик среды при известных напряжениях), так и обратную - контроль механических напряжений по результатам акустических измерений. В качестве исходных моделей используются идеально упругая первоначально изотропная безграничная среда, в которой анизотропия может быть наведена в результате любых внешних воздействий, и гармонические монохроматические волны. Основная задача заключается в нахождении нелинейных по деформации поправок к скорости и поляризации упругих волн.

Поскольку располяризация волн под действием напряжения оказывается небольшой, углы между направлениями распространения и поляризации для продольных и сдвиговых волн можно считать равными, соответственно, 0 и $\pi/4$. Если деформация описывается уравнением вида $x_i = X_i + \lambda_{ij} X_j$, то тензоры деформации E_{ij} , напряжения Коши K_{ij} , упругой жесткости C_{ijkl} определяются тремя нормальными и тремя сдвиговыми деформациями. Поэтому результирующее влияние сложного напряженного состояния на упругие волны можно учесть, суммируя поправки, обусловленные каждой из трех сдвиговых и трех нормальных де-

формации. Последний факт определяет следующую процедуру решения задачи:

- выяснение влияния одноосных напряжений и обобщение результатов на случай действия главных напряжений;
- выяснение влияния сдвиговых напряжений и обобщение результатов на случай сложного напряженного состояния;
- рассмотрение случая, когда прозвучивание осуществляется под углом к зилеровским координатным осям.

При этом необходимо найти зависимости между тензорами деформации и напряжения, получить уравнение движения и матричное характеристическое уравнение, определить зависимости скорости упругих волн от деформаций (напряжений).

Основные уравнения акустической тензометрии записываются в виде:

$$\delta v_{ik} = \beta_{ikln} \alpha_{ln}; \quad (1)$$

$$\delta \tau_{ik} = \alpha_{ikln} \alpha_{ln}; \quad (2)$$

Задача заключается в определении компонент матриц акустопругих коэффициентов скорости β_{ikln} и времени распространения ультразвука α_{ikln} и их выражении через обобщенные упругие модули - акустопругие коэффициенты скорости β_{ik} и времени α_{ik} для одноосного напряженного состояния.

Для случая одноосных напряжений, действующих в направлениях осей Ox , Oy , Oz , матрицы β_{ik} имеют вид:

$$\beta_{ik}^x = \begin{pmatrix} \beta_{33} & \beta_{31} & \beta_{31} \\ \beta_{13} & \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{13} & \beta_{12} & \beta_{11} \end{pmatrix}; \quad \beta_{ik}^y = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{13} & \beta_{12} \\ \beta_{31} & \beta_{33} & \beta_{31} \\ \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{11} \end{pmatrix}; \quad \beta_{ik}^z = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{12} & \beta_{11} & \beta_{13} \\ \beta_{31} & \beta_{31} & \beta_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Здесь индекс $i=1,2,3$ обозначает направление распространения, $k=1,2,3$ - направление поляризации, обозначения компонент матриц β_{ik}^x , β_{ik}^y приведены к обозначениям компонент матрицы β_{ik}^z . Число независимых компонент равно пяти: β_{11} , β_{33} , β_{12} , β_{13} , β_{31} . Относительное изменение скорости объемных волн в случае действия главных напряжений определяется выражением:

$$\delta v_{ik} = \beta_{ik}^x \sigma_{11} + \beta_{ik}^y \sigma_{22} + \beta_{ik}^z \sigma_{33} \quad (4)$$

Уравнение (4) можно записать более подробно для всех девяти волн, распространяющихся вдоль эйлеровских координатных осей. Они позволяют определить σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} по результатам трех акустических измерений, наиболее удобных по условиям контроля. Выражения, аналогичные (3) и (4), можно записать для матриц α_{ik}^x , α_{ik}^y , α_{ik}^z , σ_{ik} . Основное отличие заключается в том, что матрица α_{ik} будет иметь четыре независимых компонента α_{11} , α_{33} , α_{12} , $\alpha_{13} = \alpha_{31}$.

Остановимся на основных результатах, связанных с влиянием сдвиговых деформаций, описываемых уравнениями $x_1 = X_1 + \lambda X_2$, $x_2 = X_2 + \lambda X_1$, $x_3 = X_3$:

1. Вдоль оси Ox_1 могут распространяться:

- квазипродольная волна со скоростью v_{o1} и вектором поляризации \tilde{u} (u_1 ; $C_{1121} u_1 / (2\alpha_1 + \alpha_2) = u_1 \operatorname{tg} \theta$; 0);
- квазисдвиговая волна со скоростью v_{o1} и вектором поляризации \tilde{u} ($-u_2 \operatorname{tg} \theta$; u_2 ; 0);
- чисто сдвиговая волна со скоростью v_{o1} и вектором поляризации \tilde{u} (0; 0; u_3).

2. Вдоль оси Ox_2 могут распространяться три волны со скоростями v_{o1} и v_{o1} , соответственно, а именно:

- квазипродольная с вектором поляризации \tilde{u} ($u_2 \operatorname{tg} \theta$; u_2 ; 0);
- квазисдвиговая с вектором поляризации \tilde{u} (u_1 ; $-u_1 \operatorname{tg} \theta$; 0);
- чисто сдвиговая с вектором поляризации \tilde{u} (0; 0; u_3).

3. Вдоль оси Ox_3 (перпендикулярно плоскости сдвига) могут распространяться:

- чисто продольная волна со скоростью v_{o1} ;
- две чисто сдвиговые волны, поляризованные под углами $\pm 45^\circ$ к оси Ox_1 со скоростями $v_{12} = [(a_2 \pm C_{3123}) / \rho]^{1/2}$.

Расчет для таких конструкционных материалов как БОСН2А, 35ХГСА, СтЗ, ЛС 59-2, Д16 показывает, что угол поляризации θ составляет от $0,2^\circ$ до $1,1^\circ$.

Были найдены выражения акустоупругих коэффициентов β_{ijkln} и α_{ijkln} через элементы матриц акустоупругих коэффициентов одноосно напряженного состояния β_{ik}^z и α_{ik}^z . Так, в частности, показано, что

$$\beta_{1111} = \beta_{2222} = \beta_{3333} = \beta_{11}^x = \beta_{22}^y = \beta_{33}^z = \beta_{33}; \quad (5)$$

Исследованы структура и знаки акустоупругих коэффициентов, выполнен их расчет для ряда конструкционных материалов, найдены выражения для акустоупругих коэффициентов продольных и сдвиговых волн для случая гидростатического давления:

$$\beta_p^1 = \beta_{33} + 2\beta_{11}, \quad \beta_p^t = \beta_{12} + \beta_{13} + \beta_{31}, \quad \alpha_p^1 = \alpha_{33} + 2\alpha_{11}, \quad \alpha_p^t = \alpha_{12} + 2\alpha_{13}.$$

В реальных условиях контроля не всегда возможно прозвучивание объекта вдоль выбранных координатных осей. Поэтому представляет интерес вывод соотношения для относительного изменения скорости или времени распространения упругих волн при их наклонном вводе, позволяющих определить компоненты тензора напряжений (или деформаций) в исходной системе отсчета. Такая проблема была решена, получены матрицы акустоупругих коэффициентов β_{ijkl}^{θ} в случае прозвучивания под углом θ , лежащими в одной из координатных плоскостей, например, в плоскости XOY. Проанализируем акустоупругие коэффициенты, представляющие наибольший интерес:

а) $\beta_1 = \beta_{33} \cos^2 \theta + \beta_{11} \sin^2 \theta$. Поскольку коэффициенты β_{33} и β_{11} имеют разные знаки, существует угол θ_0 , при котором $\beta_1 = 0$, и акустоупругий эффект отсутствует:

$$\theta_0 = \arctg(-\beta_{33}/\beta_{11})^{1/2}. \quad (6)$$

Направление, определяемое углом θ_0 может рассматриваться как реперное, позволяющее принципиально найти u_0 , так как в этом направлении скорость постоянна и не зависит от величины напряжения. Получены соотношения, позволяющие определить реперное направление для случая плоско напряженного состояния и действия главных напряжений:

б) $2\beta_2 = (\beta_{33} - \beta_{11}) \sin 2\theta$. При $\theta = \pi/4$; $2\beta_2 = (\beta_{33} - \beta_{11})$; происходит усиление акустоупругого эффекта на продольных волнах, ибо $|\beta_{33} - \beta_{11}| > |\beta_{33}|$;

в) $\beta_3 = \beta_{13} \cos^2 \theta + \beta_{12} \sin^2 \theta$. Поскольку коэффициенты β_{13} и β_{12} всегда имеют разные знаки, существует угол, определяющий первое реперное направление $\theta_0 = \arctg(-\beta_{13}/\beta_{12})^{1/2}$ для сдвиговых волн, в котором акустоупругий эффект для сдвиговых волн отсутствует.

г) $\beta_4 = \beta_{31} \cos^2 \theta + \beta_{12} \sin^2 \theta$. Поскольку β_{31} и β_{12} всегда имеют разные знаки, существует угол $\theta_{02} = \arctg(-\beta_{31}/\beta_{12})^{1/2}$, определяющий второе реперное направление для сдвиговых волн.

Аналогичные результаты получены для матрицы α_{ikln}^0 .

Поскольку непосредственно контролируемым параметром в акустической тензометрии является время распространения упругих волн, то в практических целях удобно использовать матрицу акустоупругих коэффициентов времени распространения α_{ikln} . Результаты, полученные для объемных волн, были распространены на поверхностные волны Рэлея, и было показано, что в случае действия главных напряжений их относительное изменение скорости δv^R определяется выражением:

$$\delta v_{ik}^R = \Gamma_{ikln} \sigma_{ln}. \quad (7)$$

В этом выражении $i \neq k$, суммирование ведется по $l=n$ от 1 до 3,

$$\Gamma_{ikln} = \begin{pmatrix} \beta_{31} & \beta_{12} & \beta_{31} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{13} \\ \beta_{12} & \beta_{31} & \beta_{13} & \beta_{13} & \beta_{12} & \beta_{31} \\ \beta_{13} & \beta_{13} & \beta_{12} & \beta_{31} & \beta_{31} & \beta_{12} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Суммирование по столбцам этой матрицы дает, соответственно, δv_{13}^R , δv_{23}^R , δv_{12}^R , δv_{32}^R , δv_{31}^R , δv_{21}^R .

В случае плоских напряжений (например, $\sigma_{33} = 0$) основные уравнения упрощаются

$$\delta v_{13}^R = \beta_{31} \sigma_{11} + \beta_{12} \sigma_{22}; \quad (9)$$

$$\delta v_{23}^R = \beta_{12} \sigma_{11} + \beta_{31} \sigma_{22}.$$

Если прозвучивание осуществляется под углом θ_x с осью Ox , то

$$\delta v_{\theta_x}^R = (\beta_{12} \cos^2 \theta_x + \beta_{31} \sin^2 \theta_x) \sigma_{11} + (\beta_{31} \cos^2 \theta_x + \beta_{12} \sin^2 \theta_x) \sigma_{22} \quad (10)$$

Анализ (10) показывает, что и для поверхностных волн Рэлея возможны направления, в которых акустоупругий эффект отсутствует.

Введены понятия матриц чувствительностей α_{ikln}^v , α_{ikln}^T акустического тензометра и показано, что акустоупругие коэффициенты β_{ikln} и α_{ikln} имеют метрологический смысл приведенных чувствительностей акустического тензометра соответственно по скорости и по времени распространения:

$$\alpha_{ikln}^{*v} = |\beta_{ikln}|; \quad \alpha_{ikln}^{*r} = |\alpha_{ikln}|. \quad (11)$$

В третьей главе рассмотрены основные результаты экспериментальных исследований, причем центральное место занимает проверка применимости полученных расчетных соотношений в практике акустической тензометрии. Для их проведения были разработаны экспериментальные стенды, отвечающие следующим требованиям:

- возможность использования как в лабораторных, так и в производственных условиях;
- применение стандартной измерительной аппаратуры;
- возможность определения как акустоупругих коэффициентов одноосно напряженного состояния, так и механических напряжений с относительной погрешностью, не превышающей 10%;
- наличие устройств стабилизации температуры и контроля напряжений альтернативными ультразвуку методами;
- возможность проведения экспериментов на реальных объектах - деталях резьбовых соединений или их имитаторах.

В соответствии с этим в их состав включены: установка для измерения временных интервалов; цифровой измеритель деформации с тензорезисторами; нагружающее устройство; термостат ТМ-80М-2; комбинированный измерительный прибор ДЗ4 с датчиком температуры ИС567А; оптическая голографическая установка для исследования деформации торцевых поверхностей исследуемого объекта.

Предложен новый метод измерения времени распространения ультразвука, защищенный авторским свидетельством, - метод мультипликативного совмещения эхо-импульсов, отличающийся от известных одновременным использованием в измерениях нескольких (более двух) эхо-сигналов. Он заключается в сравнении исследуемого интервала между эхо-сигналами с плавно изменяемым периодом непрерывного синусоидального сигнала. Критерием совпадения сравниваемых величин служит поперiodное совмещение на экране осциллографа соответствующих эхо-сигналов с дальнейшей оценкой времени распространения ультразвука по усредненному значению временного интервала между $(N-1)$ одновременно совмещенными эхо-сигналами.

Основные направления экспериментальных исследований включают в себя изучение и определение:

- относительных изменений скорости ультразвука для различных типов волн (продольных, сдвиговых, поверхностных Рэлея) в зависимости от напряжения или деформации;

- акустоупругих коэффициентов скорости β_{ik} и времени распространения α_{ik} и соответствующих приведенных чувствительностей α_{ikln}^{*v} , α_{ikln}^{*r} ;

- зависимостей времени распространения звука (или изменения этой величины) от приложенного напряжения и температуры;

Исследования проводились для образцов из различных конструкционных материалов, в частности, на плоских образцах с размерами $40 \times 40 \times 100$ мм; $20 \times 40 \times 400$ мм, а также на конкретных деталях резьбовых соединений.

Поскольку максимальными по модулю являются акустоупругие коэффициенты β_{33} , β_{13} , α_{33} , $\alpha_{13} = \alpha_{31}$, основное внимание уделялось изучению распространения волн v_{33} , v_{13} , v_{31} . Исследование акустоупругости при сжатии и растяжении подтвердило линейный характер зависимости скорость-напряжение (деформация) в упругой области для материалов с различными значениями предела текучести и тем самым доказало справедливость полученных расчетных соотношений.

Изучение акустоупругих коэффициентов для ряда конструкционных материалов подтвердило правильность следующих предположений:

- коэффициенты β_{33} , β_{13} , β_{31} , α_{11} , α_{12} являются отрицательными, β_{11} , β_{12} , α_{33} , α_{13} - положительными;

- наибольшими по модулю являются коэффициенты β_{33} , β_{13} , α_{33} , $\alpha_{13} = \alpha_{31}$, наименьшими - β_{12} , α_{12} .

В табл. 1 внесены значения приведенных чувствительностей для некоторых конструкционных материалов.

Для практических целей, в частности для контроля резьбовых соединений, интерес представляют зависимости времени распространения звука в образце данных размеров от приложенного усилия $\tau_{ik} = f(P)$, от которых можно без труда перейти к зависимостям типа $\Delta \tau_{ik} = f(P)$, $\Delta \tau_{ik} = f(\sigma)$, $\delta \tau_{ik} = f(\sigma)$. Такие измерения проводились для различных объектов и сопоставля-

Материал	Приведенные чувствительности, ТПа^{-1}								
	по скорости, α_{ik}^{nv}					по времени, α_{ik}^{nt}			
	α_{33}^{nv}	α_{11}^{nv}	α_{13}^{nv}	α_{12}^{nv}	α_{31}^{nv}	α_{33}^{nt}	α_{11}^{nt}	α_{13}^{nt}	α_{12}^{nt}
Железо АRMCO	49.4	5.0	13.8	0.9	7.7	54.1	6.4	12.4	2.3
Сталь 60С2Н2А	12.8	1.3	8.4	1.5	2.4	17.6	2.6	7.2	2.7
Сталь 50ХГСМ2Ф	15.4	1.5	8.3	1.7	2.8	19.7	2.5	7.2	2.9
Сталь 35ХГСА	14.1	1.7	8.3	1.7	2.8	18.4	2.9	7.1	2.9
Сталь ЭП-56	20.7	1.6	11.6	5.1	5.2	25.6	3.0	10.1	6.5
Сталь Ст 3	12.2	1.5	8.4	1.0	2.4	16.2	2.8	7.1	2.3
Латунь ЛС59-1	32.0	5.0	20.5	9.3	7.4	41.7	8.4	17.1	12.7
Сплав Д16	69.0	11.6	36.6	6.2	19.2	82.0	16.0	32.2	10.6
Алюминий А0	61.8	8.1	37.3	5.4	17.6	76.4	13.2	32.2	20.5

лись с данными тензометрирования. Их анализ показал, что зависимости $\delta\tau_{33} = f(F)$, $\Delta\tau_{33} = f(F)$, $\delta l = f(F)$ носят линейный характер.

При контроле механических напряжений акустическими методами значительное влияние на точность измерения оказывает температура окружающей среды. Для исследования температурной зависимости объект помещался в термостатический блок. Был подтвержден линейный характер зависимостей $\tau = f(\Delta t)$, $\Delta\tau = f(\Delta t)$, $\delta\tau = f(\Delta t)$.

Экспериментально доказано существование реперного направления, в котором отсутствует акустоупругий эффект. Ему соответствует угол $\theta_0 = \arctg(-\alpha_{33}/\alpha_{11})^{1/2}$. Исследована зависимость акустоупругого коэффициента $\alpha = \alpha_{33} \cos^2\theta + \alpha_{11} \sin^2\theta$ от угла θ для сплава Д16. При изменении θ в пределах от 40° до

90° экспериментальная кривая практически совпадает с расчетной. Расчетная и экспериментальная кривые $\alpha = f(\theta)$ проходят через нулевые значения при $\theta = 55-60^\circ$.

Показано, что обнаруженная зависимость может внести погрешность в определение чувствительности акустического тензометра в связи с возможными перекосами пьезопреобразователя и неточностями в определении направлений нагружения и распространения волн. Относительная погрешность измерения акустопругого коэффициента $\varepsilon(\alpha)$ может изменяться в широких пределах, причем ее значения минимальны для углов, близких к 0 и $\pi/2$, и асимптотически стремятся к бесконечности при $\theta = 60, 13^\circ$, т.е. при $\alpha = 0$. Ряд экспериментальных результатов описан в главе 7.

В четвертой главе изложены основы методологии акустической тензометрии, которая включает в себя: физические явления, используемые при решении задачи контроля напряженно-деформированного состояния; анализ нелинейных математических моделей сплошной среды и их соответствия реальным объектам; исследование условий и особенностей распространения звуковых волн; разработку обобщенного алгоритма контроля и на его основе - методики контроля конкретных объектов; основы метрологии; технологию производственного контроля. Центральной проблемой методологии, объединяющей все остальные, является разработка обобщенного алгоритма контроля, один из возможных вариантов которого может быть реализован по следующей схеме:

1. Оценка линейных размеров и конфигурации объекта. При этом следует обратить внимание на наличие плоскопараллельных граней, замкнутых круговых поверхностей, размеры объекта в направлении предполагаемого прозвучивания.

2. Выяснение характера напряженного состояния и возможное его моделирование. Особое значение имеет определение типа напряжений (одно- и двухосное, кручение, изгиб и пр.), соотношений между нормальными и сдвиговыми напряжениями, концентраторов напряжения, главных направлений.

3. Оценка влияния внешних воздействий. На скорость распространения упругих волн оказывают влияние в первую очередь

температура объекта, электрическое и магнитное поля, рентгеновское и γ -излучение.

4. Изучение предыстории материала. Необходимо знать класс материала, его химический состав, технологию выплавки, технологические пределы. На основании этих данных можно оценить физико-механические параметры.

5. Определение условий проведения акустических измерений. Здесь следует обратить внимание на состояние поверхности материала, особенно в зоне возбуждения упругих волн, условия установки преобразователей, параллельность граней, соответствие объекта математической модели.

После выполнения описанных операций можно приступить к разработке методики контроля. Она начинается с выбора направления прозвучивания, типа ультразвуковых волн и частоты ультразвуковых колебаний. Для прозвучивания между плоскопараллельными гранями используются объемные волны. Для определения поверхностных и подповерхностных напряжений применяются волны Рэлея. При этом прозвучивание проводится по замкнутому контуру или на локальном участке поверхности. Тип волн определяется также особенностями напряженного состояния и конкретными условиями задачи контроля. Частота ультразвуковых волн определяется классом материала, его структурой, геометрическими размерами (длиной акустического пути), соотношением между геометрическими размерами и длиной волны. После этого можно перейти к выбору типа акустических измерений (измерение абсолютного значения параметра, его изменения, параметров акустической анизотропии). Принятая математическая модель объекта и тип акустических измерений дают возможность приступить к выводу или анализу расчетных соотношений, связывающих измеряемые и контролируемые параметры. Здесь первостепенное значение приобретает оценка ожидаемых погрешностей, обусловленных неточностью математических моделей объекта и процесса измерения.

Следующая операция состоит в выборе метода акустических измерений (автоциркуляций и т.п.) или в разработке принципиально нового метода, если известные методы не соответствуют рассчитанным точностным критериям. Важной задачей является

разработка средства измерения – специализированного ультразвукового прибора с заданными техническими характеристиками (точность, разрешающая способность, достоверность информации, помехоустойчивость, надежность, пределы измерения, производительность) и его метрологическая аттестация.

В связи с тем, что физико-механические свойства материалов могут меняться от партии к партии, во многих случаях требуется экспериментальное уточнение упругих модулей или тарировка при непосредственном нагружении объекта контроля или его модели. После этого можно оценить суммарные погрешности контроля (методические, инструментальные, субъективные). Заканчивается разработка методики контроля инструкцией по работе оператора (контролера).

Заключительными этапами являются измерение и обработка рекомендации и решений.

Метрология акустической тензометрии представляет собой самостоятельную проблему, включающую в себя следующие вопросы: разработку теории акустических измерений механических напряжений и деформации; разработку методов и средств измерений и определение их точности; учет влияния внешних факторов; создание эталонов и образцовых средств проверки и измерительной аппаратуры; обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений. Технология производственного контроля требует организации службы контроля, разработки нормативно-технической документации контроля конкретных объектов, обучение и аттестации обслуживающего персонала, организации периодической проверки средств контроля.

В этой главе рассмотрена также процедура контроля внутренних напряжений с использованием продольных и сдвиговых, изложены защищенные авторскими свидетельствами методы контроля одноосных напряжений, показаны возможности использования матрицы акустоупругих коэффициентов для решения некоторых задач акустической тензометрии.

В пятой главе рассмотрено влияние внешних воздействий на скорость распространения объемных волн. Его анализ в акустодиагностике напряженно-деформированного состояния представляет интерес, во-первых, как источник помех, которые

необходимо устранить, и, во-вторых, как источник дополнительной информации. Наибольший интерес представляет влияние температуры. Показано, что относительное изменение скорости ультразвуковых волн определяется выражениями:

$$\delta v_{ik} = \begin{cases} K \alpha \beta_p^l \Delta t; & i=k; \\ K \alpha \beta_p^l \Delta t; & i \neq k. \end{cases} \quad (12)$$

а термоакустический коэффициент скорости

$$\gamma_{ik}^v = \begin{cases} \alpha K \beta_p^l; & i=k; \\ \alpha K \beta_p^l; & i \neq k. \end{cases} \quad (13)$$

Из (13) следует, что температурная зависимость скорости объемных волн является следствием акустоупругого эффекта. Поскольку температурный коэффициент температурного расширения $\alpha > 0$, и коэффициент всестороннего сжатия $K > 0$, а акустоупругие коэффициенты продольных и сдвиговых волн для гидростатического давления $\beta_p^l < 0$, $\beta_p^t < 0$, то $\gamma_{ik}^v < 0$, $\gamma_i^v < 0$ - с увеличением температуры скорости объемных волн уменьшаются. Аналогичные (12) и (13) соотношения получены для относительного изменения времени распространения $\delta \tau_{ik}$ и термоакустического коэффициента времени распространения γ_{ik}^τ , причем

$$\gamma_{ik}^\tau = \begin{cases} \alpha (1/3 - K \beta_p^l) = \alpha/3 - \gamma_{ik}^v; & i=k; \\ -\gamma_i^v; & i \neq k. \end{cases} \quad (14)$$

Показано, что модули термоакустических коэффициентов имеют смысл приведенных чувствительностей тензометра к изменению температуры η_{ik}^v , η_{ik}^τ .

Предложен способ определения температурного коэффициента скорости, защищенный авторским свидетельством. Задача исследования влияния магнитного поля сводится к решению модифицированного уравнения движения с учетом силы, с которой магнитное поле действует на поперечный ток Холла, вызванный движением электрических зарядов под действием упругой

волны, и уравнения Максвелла. Показано, что относительное изменение скорости объемных волн является эффектом квадратичным по полю:

$$\delta v_{ik} = h_{ikln}^v H_l H_n, \quad (15)$$

причем компоненты матрицы магнитоупругих коэффициентов h_{ikln}^v выражаются через компоненты матрицы $h_{ik}^{v,z}$, когда поле приложено вдоль оси OZ.

$$h_{ik}^{v,z} = \frac{\mu_a}{-2} \begin{bmatrix} (\lambda+2\mu)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & (\lambda+2\mu)^{-1} & 0 \\ \mu^{-1} & \mu^{-1} & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Результаты теоретических расчетов магнитоакустических коэффициентов продольных и сдвиговых волн h_l , h_i , выполненные для золота, находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными Алерса.

Показана возможность управления значением реперного направления θ_0 с помощью магнитного поля. Можно добиться того, чтобы при наличии магнитного поля реперное направление совпало с направлением приложения нагрузки. Иначе говоря, речь идет о возможности разработки акустимагнитоупругого компенсационного тензодатчика. При этом измерение напряжения сведется к измерению скорости (времени) распространения в одном и том же направлении - направлении усилия - при наличии и отсутствии магнитного поля.

Влияние электрического поля рассмотрено для двух случаев - диэлектрических и проводящих сред. Полученные результаты нуждаются в экспериментальной проверке.

В шестой главе выполнен анализ метрологических характеристик акустических тензодатчиков. При этом основное внимание уделяется нескольким ключевым пунктам:

- анализу методической погрешности и определению необходимой точности измерения акустических и механических параметров, обеспечивающей заданный уровень погрешности контроля механических напряжений;

- рассмотрению структурной схемы акустического тензодатчика и установлению факторов, влияющих на его чувствительность;

- табулированию значений акустоупругих коэффициентов и чувствительностей конструкционных материалов;
- определению и использованию реперного направления;
- анализу специфических проблем, возникающих при тензометрировании образцов ограниченных размеров.

Акустоупругий тензодатчик можно рассматривать как измерительную установку, работающую в статическом режиме по схеме прямого преобразования и состоящую из канала передачи информации к устройствам для измерения времени распространения ультразвуковой волны. При таком подходе структура канала передачи информации зависит от формы основного расчетного соотношения акустоупругости, выполняющего роль статической характеристики преобразования. При теоретическом анализе проблем акустоупругости принципиально важно разделять изменение времени, обусловленное, с одной стороны, изменением скорости упругой волны, с другой - изменением геометрических размеров деформированного образца. В этом случае удобно считать, что канал передачи информации образован двумя последовательно включенными измерительными преобразователями, причем для первичного входным сигналом является механическое напряжение, а выходным - скорость распространения волны в напряженном материале. Вторичный же преобразователь трансформирует информацию о скорости в информацию о времени распространения ультразвука с учетом деформации образца. Измеряемой в эксперименте физической величиной является, как правило, время распространения ультразвукового сигнала. Поэтому на практике удобнее считать, что обе функции объединены в одном первичном преобразователе. Такой подход представляется оправданным, если не возникает необходимость учета дисперсии упругих волн в образце. Важнейшей особенностью акустических тензометров следует считать то, что в качестве первичного измерительного преобразователя они используют непосредственно объект контроля. Строго говоря, роль первичного преобразователя играет материал образца, и одним из важнейших следует считать вопрос об упруго-акустической чувствительности материала образца при различных поляризациях упругих волн.

С помощью ЭВМ были рассчитаны и построены графики зависимости всех компонент матриц $\alpha_{ik}^{*\tau}$ и α_{ik}^{*v} от упругих модулей и относительные погрешности чувствительностей $\epsilon(\alpha_{ik}^{*\tau})$. Установлено, что результирующая погрешность чувствительности примерно в три раза превосходит средние значения погрешности упругих модулей.

Поскольку для большинства материалов $\alpha_{ik}^{*v} < \alpha_{ik}^{*\tau}$, то при практической реализации акустического контроля напряжений следует определять время, а не скорость распространения упругой волны, что должно учитываться как при построении соответствующих теоретических моделей, так и при разработке методик контроля.

В седьмой главе рассмотрено использование акустоупругих тензодатчиков в системах управления контролем механических напряжений в деталях резьбовых соединений. На основе анализа традиционных методов делается вывод о том, что только акустические методы удовлетворяют всем требованиям стопроцентного контроля в производственных условиях, позволяют осуществить его автоматизацию и обеспечить надежную работу конструкции в целом. Разработаны методологические принципы акустической тензометрии резьбовых соединений, выработаны рекомендации по использованию конкретных методов акустических измерения, выбору частотного диапазона, соотношению геометрических параметров контролируемых изделий. Описана методика подготовки объекта к испытаниям и снятия гарировочных кривых.

Методами оптической голографии изучалась деформация торцевой поверхности головки болта. Проведенные исследования подтвердили возникновение и возможность экспериментального измерения деформации и перекося торцевой поверхности болта при его нагружении и внесения необходимых поправок в результаты ультразвукового контроля.

На основании экспериментальных исследований была разработана методика ультразвукового контроля усилий затяжки резьбовых соединений, предусматривающая: построение градуировочных зависимостей для произвольного соединения, непосредственный контроль усилия затяжки в процессе сборки изделия, обработку результатов измерения, выработку решения о

продолжении или прекращении процедуры контроля, документирование его результатов.

Для поверки и градуировки акустических тензометров типа УП-313 был разработан комплект стандартных образцов КМВР-1, аттестованный Белорусским центром метрологии и стандартизации и предназначенный для моделирования изменения времени распространения ультразвуковых волн. Применение образцов комплекта в различных сочетаниях позволяет измерять приращенные времена в 0,1; 1 и 5 мкс при исходных значениях 10; 30; 100 мкс.

Установлены критерии подобия градуировочных кривых для деталей резьбовых соединений различных типоразмеров, выполненных из разных материалов или одного и того же материала:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{22} \bar{v}_{ol} / \bar{\alpha}_{22} \bar{v}_{ol} &= idem; \quad \bar{\alpha}_{12} \bar{v}_{ol} / \bar{\alpha}_{12} \bar{v}_{ol} = idem; \\ \frac{K_2 \bar{l}_1^2 [\bar{l}_{o2} + \bar{l}_{p2} (\bar{d}_{o2} / \bar{d}_{p2})^2]}{K_1 \bar{l}_2^2 [\bar{l}_{o1} + \bar{l}_{p1} (\bar{d}_{o1} / \bar{d}_{p1})^2]} &= 1, \end{aligned} \quad (17)$$

где $\bar{l}_1, \bar{l}_{ol}, \bar{l}_{p1}, \bar{d}_{ol}, \bar{d}_{p1}$ - параметры резьбовых соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования, направленные на повышение эффективности акустической тензометрии, выявили ряд закономерностей, анализ которых позволяет утверждать, что сформулированная в работе проблема может считаться решенной, а полученные результаты могут быть использованы в производственных условиях.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

1. На основании анализа научной и патентной литературы установлено, что для повышения эффективности акустической тензометрии и использования акустических тензометров в системах управления необходимо создание методов и средств компенсационных измерений механических напряжений.

2. Установлено, что компенсационный метод измерения механических напряжений в твердых телах акустоупругими тензодатчиками осуществляется путем сравнения скоростей упругих волн в двух направлениях - реперном и действующего усилия.

3. В результате исследования акустоупругого эффекта в твердых телах установлено, что существует такое реперное направление распространения упругих волн, в котором их скорость инвариантна к изменению механического напряжения.

4. Установлено, что для определения реперного направления относительно вектора силы, создающей измеряемое механическое напряжение, необходимо при описании акустоупругого эффекта использовать матричную методологию.

5. На базе матричной методологии разработаны основы инженерной теории акустической тензометрии, позволившей не только получить ряд принципиально новых результатов, но и осуществить единый подход к проблеме, в частности, при рассмотрении влияния внешних воздействий как источников не только дополнительных погрешностей, но и вспомогательной полезной информации о состоянии объекта контроля.

6. Разработаны основы методологии акустодиагностики, базирующиеся на:

- обобщенном алгоритме и процедуре контроля;
- методе мультипликативного совмещения эхо-импульсов;
- методе определения реперного направления, позволяющем определить основные характеристики среды для невозмущенного состояния;

- методе контроля одноосных напряжений и термоакустического коэффициента, скорости распространения упругих волн.

7. Разработаны алгоритмы и пакеты прикладных программ для:

- формирования тест-сигналов и первичной обработки сигналов;
- идентификации упруго-напряженного состояния объекта и расчета его характеристик;
- оценки погрешностей и введения поправок;
- управления экспериментом в лабораторных и производственных условиях.

8. Осуществлен экспериментальный стенд и выполнены исследования, позволившие определить и уточнить зависимости, используемые в практике тензометрии для объектов различной геометрической формы и различных конструкционных материалов, рассчитать элементы матриц акустоупругих коэффициентов и приведенных чувствительностей акустоупругих тензодатчиков, изучить угловую зависимость акустоупругого эффекта, провести градуировку аппаратуры для экспрессного контроля.

9. Решен ряд проблем метрологического обеспечения контроля механических напряжений, в частности, связанных с анализом методической и аппаратурной погрешности, учетом факторов, влияющих на метрологические характеристики акустических тензометров.

10. Установлены критерии подобия тарировочных кривых при контроле объектов различных типоразмеров из различных конструкционных материалов.

11. Осуществлено внедрение разработанных методов, алгоритмов и пакетов прикладных программ для ЭВМ в системах управления процессом затяжки резьбовых соединений энергетических установок космических аппаратов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Куценко А.Н. Матрица акустоупругих коэффициентов скорости и времени распространения объемных волн при наклонном прозвучивании // Акустика и ультразвуковая техника: Госп. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1991. - Вып. 28. - С. 30-38.

2. Куценко А.Н. Матрица чувствительности акустического тензометра. / Ученые записки Одесского Политехнического Университета. Одесса: ОПИ, 1993, - С. - .

3. Ультразвуковой способ контроля механических напряжений. А.С. 1769117 (СССР), G 01 N 29/04 / Куценко А.Н., Анисимов В.А., Шереметиков А.С., Рудаков А.С., Бобренко В.М. (СССР), -485151/21; Заявлено 14.05.90. Опубликовано 15.10.92. Бюл. N 38.

4. Ультразвуковой способ измерения механических напряжений. А.С.1154529 (СССР), G 01 N 29/04 / Куценко А.Н., Бобренко В.М., Анисимов В.А., Шереметиков А.С., Бобренко С.В., Рудаков А.С., Адриан В.А. (СССР), - 4439841/25-28; Заявлено 14.06.88. Опубликовано 15.05.90. Бюл. N 18.

5. Способ измерения времени распространения ультразвука. А.С.1578634 (СССР), G 01 N 29/00 / Куценко А.Н., Анисимов В.А., Шереметиков А.С. (СССР), - 4405270/25-28; Заявлено 06.04.88. Опубликовано 15.07.90. Бюл. N 26.

6. Способ определения термоакустического коэффициента скорости ультразвуковых колебаний в изделии. А.С. 1465716 (СССР), G 01 N 29/00 / Куценко А.Н., Бобренко С.В. (СССР), - 4277482/25-28; Заявлено 06.07.87. Опубликовано 15.03.89. Бюл. N 10.

7. Куценко А.Н., Шереметиков А.С., Анисимов В.А. Контроль напряжений с помощью поверхностных волн Рэлея. - // Дефектоскопия. - 1990. - N 7. - С.95.

8. Метрологические проблемы акустодиагностики механических напряжений / А.Н.Куценко, В.А.Анисимов, А.С.Рудаков, А.С.Шереметиков // Сб. докл. Межд. конф. "Дефектоскопия - 89" (г.Пловдив, Болгария, 24-26 окт.1989 г.). - Пловдив, Болгария, 1989. - Т.2. - С.183-187.

9. Куценко А.Н., Савчук В.П. Идентификация процесса акустической эмиссии методами гомоморфного анализа // Методы и средства проектирования динамических систем с учетом требований корректности и грубости. - М. : 1986. - С.52-53.

10. Анисимов В.А., Куценко А.Н. Современное состояние исследований в области ультразвукового контроля напряженно-деформированного состояния элементов конструкций (по материалам зарубежной печати). // Дефектоскопия. - 1988. - N 8. - С.95.

11. Анисимов В.А., Куценко А.Н. Некоторые практические аспекты акустодиагностики напряженно-деформированного состояния элементов конструкций // Тр. Таллин. политехн. ин-та. - 1987. - Вып. 840. - С.90-99.

12. Анисимов В.А., Куценко А.Н. Определение квадратичных акустоупругих коэффициентов скорости объемных волн // Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1992. - Вып.27. - С.23-27.

13. Анисимов В.А., Куценко А.Н. Особенности проявления акустоупругого эффекта для поверхностных волн в случае плоско напряженного состояния материала // Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1993. - Вып. 28. - С. 27-29.

14. Анисимов В.А., Куценко А.Н., Шереметиков А.С. Метод мультипликативного совмещения эхо-импульсов для измерения времени распространения ультразвука // Тез. докл. 11 Всесоюз. конф. (г. Москва, 1991 г.). - М., 1991. - секц. Н. - С. 51-54.

15. Анисимов В.А., Куценко А.Н., Шереметиков А.С. Анализ методической погрешности при ультразвуковом контроле одноосно напряженного состояния элементов конструкций. // Дефектоскопия, - 1987. - № 6. - С. 93-94.

16. Анисимов В.А., Куценко А.Н., Шереметиков А.С. Проблемы метрологического обеспечения ультразвукового метода контроля механических напряжений // Дефектоскопия. - 1989. - № 9. - С. 77-80.

17. Анисимов В.А., Куценко А.Н., Латышев Б.В. Угловая зависимость акустоупругого эффекта в алюминиевом сплаве D16 // Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1990. - Вып. 25. - С. 44-47.

18. Связь между акустоупругими коэффициентами фазовой и групповой скоростей / В.А. Анисимов, В.М. Бобренько, А.Н. Куценко, А.С. Рудаков // Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1984. - Вып. 19. - С. 39-41.

19. Акустический контроль усилия затяжки разъемных соединений энергетических установок в процессе сборки и регламентных работ / Адриан В.А., Анисимов В.А., Бобренько В.М., Куценко А.Н. и др. // Дефектоскопия. - 1988. - № 6. - С. 95.

20. Бобренько В.М., Куценко А.Н., Малахов В.П. Акустический контроль механических напряжений. Сдана в печать в соответствии с планом изд. "Техника" (Киев).

21. Бобренько В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин. - Кишинев: Штиинца, 1981. - 148 с.

22. Бобренько В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустическая тензометрия. - Кишинев: Штиинца, 1991. - 204 с.

23. Бобрэнко В.М., Куцэнко А.Н., Рудаков А.С. Акустическая тензометрия - новое направление в неразрушающих испытаниях материалов // Дефектоскопия. - 1989. - N 4. - С.93-94.

24. Бобрэнко В.М., Куцэнко А.Н. Шереметиков А.С. Акустическая тензометрия. 1. Физические основы // Дефектоскопия. - 1980. - N 2. - С.72-87.

25. Бобрэнко В.М., Куцэнко А.Н., Шереметиков А.С. Акустическая тензометрия. 2. Методы и устройства // Дефектоскопия. - 1980. - N 12. - С.59-75.

26. Бобрэнко В.М., Куцэнко А.Н., Шереметиков А.С. Общий вид уравнения акустоупругости для главных напряжений // Дефектоскопия. - 1982. - N 6. - С.23-27.

27. Расчетные соотношения акустической тензометрии для поверхностных волн Рэлея / В.А.Анисимов, В.М.Бобрэнко, А.Н.Куцэнко, А.С.Шереметиков // Дефектоскопия. - 1983. - N 1. - С.59-64.

28. Бобрэнко В.М., Куцэнко А.Н. Матричная теория акустоупругости в приложении к задачам тензометрии // Дефектоскопия. - 1988. - N 8. - С.21-28.

29. Bobrenko V.M., Koutsenko A.N. Acoustic Elasticity Coefficients of ultrasonic Waves and their Application in Non-Destructive Testing // IUTAM Symposium: Nonlinear Deformation Waves. Abstracts. - Tallinn, 1982. - P. 38.

30. Bobrenko V.M., Koutsenko A.N. Akustische Spannungsmessung. Trend und Probleme // INT. 6 Wissenschaftliche Konferenz (Zwickau, 1989). - Zwickau, 1989. - Bd. 1. - S.12-16.

31. Бобрэнко В.М., Куцэнко А.Н. Коэффициенты линейной теории акустоупругости // Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1986. - Вып. 21. - С.44-47.

32. Бобрэнко В.М., Куцэнко А.Н. Магнито- и термоакустические коэффициенты скорости объемных ультразвуковых волн в квазиизотропной среде // Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1986. - Вып. 21. - С.36-40.

33. Бобрэнко В.М., Куцэнко А.Н., Лесников В.П. Акустоупругие коэффициенты объемных ультразвуковых волн при наклонном прозвучивании // Дефектоскопия. - 1987. - N 12. - С.3-6.

34. Бобрэнко В.М., Куцэнко А.Н., Лесников В.П. Акустоупругие коэффициенты объемных ультразвуковых волн в первоначально

изотропной среде // Акустика и ул
 межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техн

35. Бобренко В.М., Куценко А.
 поверхностных волн Рэлея. // Акустика и ультразвуковая техника:
 Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1992. - Вып. 27. - С. 14-20.
36. Бобренко В.М., Куценко А.Н., Лесников В.П. Упругие
 волны при наличии деформации сдвига // Прикл. механика. - 1990.
 - Т. 28. - № 1. - С. 77-82.
37. Бобренко В.М., Куценко А.Н., Лесников В.П. Уравнение
 для скорости упругих волн в первоначально изотропной среде при
 наличии сдвиговых напряжения // Дефектоскопия. - 1987. - № 5. - С. 85
38. Бобренко В.М., Куценко А.Н., Лесников В.П. Уравнение
 для скорости упругих волн, распространяющихся в первоначально
 изотропной среде под углом к координатным осм. 1. Нормальные
 напряжения; 2. Сдвиговые напряжения // Дефектоскопия. - 1987. - 5. -
 С. 96.
39. Бобренко В.М., Куценко А.Н. Методологические принципы
 акустической тензометрии // Акустика и ультразвуковая техника:
 Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1987. - Вып. 22. - С. 42-46.
40. Бобренко В.М., Куценко А.Н., Рудаков А.С. Методологи-
 ческие принципы акустической тензометрии разъемных соединений //
 Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. -
 К.: Техника, 1991. - Вып. 26. - С. 28-30.
41. Контроль усилия затяжки резьбовых соединений / В.М. Боб-
 ренко, А.Н. Куценко, А.С. Рудаков, А.С. Шереметиков // Дефектоско-
 пия. - 1985. - № 5. - С. 33-40.
42. Bobrenko V.M., Koutsenko A.N., Rudakov A.S. The Acous-
 toelasticity and Problems of the Acoustic Strain-Gauging in the
 Non-Destructive Testing // Proc. of the 10 World Conference on
 Non-Destructive Testing (Moscow, 22-28 Aug. 1982). - Moscow,
 1982. - Vol. 2. - P. 171-178.
43. Применение ультразвука и оптической голографии для
 исследования напряженного состояния резьбового соединения /
 В.А. Анисимов, А.Н. Куценко, Н.В. Мартыновская, В.В. Тищенко,
 А.С. Шереметиков // Акустика и ультразвуковая техника: Респ.
 межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1989. - Вып. 24. - С. 49-49.