

На правах рукописи



Загретдинов Айрат Рифкатович

**МЕТОДИКА И ПРИБОР
УДАРНО-АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ**

05.11.13. – Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

**Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук**

Казань – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»

Научный руководитель: Кондратьев Александр Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»

Официальные оппоненты: Андреев Николай Кузьмич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов»

Митряйкин Виктор Иванович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ», профессор кафедры «Основы конструирования»

Ведущая организация: НО Ассоциация "Ростехэкспертиза", Казанский филиал (г. Казань)

Защита состоится 13 декабря 2013 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.082.01 при ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, тел./факс 8(843)519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета, с авторефератом – на сайтах <http://vak.ed.gov.ru> и <http://www.kgeu.ru>

Автореферат разослан «09» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Калимуллин Рустем Ирекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из приоритетных путей развития машиностроения является широкое применение многослойных композиционных конструкций, отличающихся при малой массе высокой прочностью, жесткостью, технологичностью и хорошими теплоизоляционными свойствами. Однако традиционные методы дефектоскопии, такие как ультразвуковой, магнитный, радиационный, вихретоковый, тепловой и прочие, оказались недостаточными для обнаружения дефектов многослойных конструкций. Наиболее перспективным для этих целей является ударно-акустический метод (метод свободных колебаний), чувствительность и достоверность которого во многом зависят от правильности выбора и оценки информативных критериев наличия дефектов, а также совершенства используемой измерительной системы.

Вышесказанное обуславливает актуальность расширения методической и инструментальной базы ударно-акустического контроля.

Объектом исследования является ударно-акустический метод контроля многослойных композиционных конструкций.

Предметом исследования являются методы возбуждения и приема упругих колебаний, обработки и анализа виброакустических сигналов, а также оценки информативных критериев наличия дефектов.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка методики и прибора ударно-акустического контроля многослойных композиционных конструкций.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Определить и апробировать метод расчета информативных гармоник спектра, характеризующих различия колебаний дефектных и бездефектных участков конструкции.

2. Разработать и реализовать в виде первичного преобразователя новый способ возбуждения и приема упругих колебаний, обеспечивающий одну зону контакта с объектом контроля.

3. Выбрать метрологическое обеспечение методики ударно-акустического контроля, включающее в себя стандартные образцы с имитацией характерных для многослойных композиционных конструкций дефектов в виде несплошности и расслоения.

4. Разработать методику определения дефектов в виде несплошности и расслоения по анализу возбуждаемых ударным преобразователем виброакустических сигналов.

5. Разработать и создать алгоритмическое и программно-техническое обеспечение процессов управления измерительно-диагностическом комплексом и обработки виброакустических сигналов.

6. Разработать, изготовить и испытать на выбранных образцах с дефектами измерительно-диагностический комплекс, реализующий предложенную методику ударно-акустического контроля.

Методы исследования. При выполнении работы применялись вероятностно-статистические методы математической обработки и метод конечноэлементного анализа. Результаты теоретических исследований подтверждены и дополнены результатами экспериментальных исследований, проведенных на специально

разработанной установке с использованием аттестованных контрольно-измерительных приборов.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций подтверждается результатами экспериментальных исследований, сходимостью результатов с исследованиями, полученными другими авторами, а также совпадением результатов, полученных аналитическими и инструментальными методами.

На защиту выносятся.

1. Метод определения информативных гармоник спектра с применением средств конечноэлементного моделирования ANSYS и алгоритмов обработки результатов расчетов в LabVIEW.

2. Способ возбуждения и приема упругих колебаний и реализующий его первичный преобразователь, обеспечивающий одну зону контакта с объектом контроля.

3. Разработанный и изготовленный измерительно-диагностический комплекс ударно-акустического контроля дефектов многослойных композиционных конструкций.

4. Результаты экспериментальных испытаний, выявившие связь изменения информативных гармоник колебаний дефектных и бездефектных участков, а также критерии проверки параметров работоспособности измерительно-диагностического комплекса

5. Методика определения дефектов в виде несплошности и расслоения по анализу возбуждаемых ударным преобразователем виброакустических сигналов.

Научная новизна заключается в следующем.

1. Разработан новый способ возбуждения и приема упругих колебаний, на основе которого создан первичный преобразователь с одной зоной контакта с объектом контроля.

2. Определен метод расчета различия спектров колебаний дефектных и бездефектных участков конструкции, основанный на применении средств конечноэлементного моделирования ANSYS и алгоритмов обработки результатов расчетов в LabVIEW.

3. Разработана методика ударно-акустического контроля дефектов многослойных композиционных конструкций с применением нового способа возбуждения и приема упругих колебаний, методов конечноэлементного моделирования, статистической обработки виброакустических сигналов и их помехоустойчивого взвешивания.

4. Разработан и создан измерительно-диагностический комплекс с оригинальным пакетом прикладных программ, реализующий предложенную методику контроля дефектов многослойных композиционных конструкций.

Практическая ценность результатов работы. Разработанный способ возбуждения и приема упругих колебаний позволяет расширить номенклатурный перечень первичных преобразователей ударно-акустических дефектоскопов. Методика ударно-акустического контроля и изготовленный измерительно-диагностический комплекс могут быть использованы на любой стадии жизненного цикла многослойных композиционных конструкций.

Реализация работы. Разработанная методика и измерительно-диагностический комплекс внедрены в ЗАО «Научно-промышленная группа «Алтек», что подтверждено соответствующим актом реализации научных исследований.

Апробация работы. Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных молодежных конференциях по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (ПГТУ, г. Йошкар-Ола, 2008–2011, 2013), Международных научно-технических конференциях «Тинчуринские чтения» (КГЭУ, г. Казань, 2009–2013), Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения» (КГТУ им. А.Н. Туполева, г. Казань, 2009), Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (ИГЭУ, г. Иваново, XVI Бенардосовские чтения, 2011), Международной научно-практической конференции «Измерения: состояние, перспективы развития» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2012).

Диссертационная работа выполнялась при поддержке стипендии Гранта Президента РФ молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям российской экономики на 2012-2014 г.г. (грант СП-2138.2012.1).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в разработке алгоритма анализа виброакустических сигналов, численном моделировании и анализе результатов расчетов, разработке и изготовлении измерительно-диагностического комплекса, в создании программного обеспечения для анализа данных, проводил все измерения, первичную и статистическую обработку и анализ экспериментальных данных.

Соответствие диссертации научной специальности.

Диссертация соответствует специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и относится к следующим областям исследования:

1. Разработанная методика ударно-акустического контроля дефектов многослойных композиционных конструкций с применением нового способа возбуждения и приема упругих колебаний, методов конечноэлементного моделирования, статистической обработки виброакустических сигналов и их помехоустойчивого взвешивания соответствует п. 1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

2. Разработанный, изготовленный и испытанный на образцах с дефектами измерительно-диагностический комплекс соответствует п. 3 «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами».

3. Разработанное и созданное алгоритмическое и программно-техническое обеспечение процессов управления измерительно-диагностическим комплексом и обработки виброакустических сигналов соответствует п. 6. «Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, включающей 112 наименований. Работа изложена на 100 страницах и содержит 68 рисунков, 3 таблицы и 8 приложений.

За поддержку в работе, ценные указания и замечания автор искренне благодарит научного руководителя Кондратьева Александра Евгеньевича, профессора Ванькова Юрия Витальевича и профессора Киямова Ильгама Киямовича.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, научная и практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведена краткая характеристика работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по существующим методам неразрушающего контроля многослойных композиционных конструкций, дана оценка состояния вопроса на данный момент, сформулированы цель и задачи исследования.

Обзор существующих методов контроля многослойных композиционных конструкций позволил выделить, в качестве наиболее перспективного, ударно-акустический метод.

Работы Ю.В. Ланге, Е.Г. Устинова, С.И. Воропаева, А.С. Сидоренко, В.Ф. Мужижкого, Ю.В. Ванькова, А.А. Лихопого позволили определить следующие направления развития метода свободных колебаний:

- расширение номенклатурного перечня первичных преобразователей ударно-акустических дефектоскопов (нередко для проверки ряда объектов выбирается конкретный тип преобразователя);
- выбор информативных гармоник спектра с применением компьютерного инженерного анализа (из-за сложности теоретического анализа основным способом исследования является эксперимент);
- разработка ударно-акустических дефектоскопов на базе электронно-вычислительной техники, позволяющей расширить спектр сервисных возможностей и реализовать методы статистической обработки.

Во второй главе:

1. Произведен выбор метрологического обеспечения методики ударно-акустического контроля, включающего в себя стандартные образцы с имитацией дефектов многослойных композиционных конструкций.

2. Определен метод теоретических исследований.

3. Проведены расчеты различия спектров колебаний дефектных и бездефектных участков стандартных образцов с дефектами.

В соответствии с рекомендациями ведущего ученого в области акустических методов контроля Ю.В. Ланге в качестве метрологического обеспечения выбраны следующие стандартные образцы.

1. Пластина из оргстекла размерами 30×30×25,5 мм с имитацией дефектов типа «круглое плоскодонное отверстие» и «клиновидный паз». Размеры дефектов типа «плоскодонное отверстие» представлены в таблице 1. Дефект типа «клиновидный паз» имеет ширину 40 мм и угол наклона 4,5°.

Таблица 1. Размеры дефектов типа «плоскодонное отверстие»

| № | Диаметр, мм | Глубина залегания, мм |
|---|-------------|-----------------------|
| 1 | 39,3 | 7,1 |
| 2 | 39,7 | 7,4 |
| 3 | 40 | 15,3 |

2. Клееная двухслойная конструкция из сотовой панели и оргстекла с имитацией дефектов соединения слоев диаметрами 20 и 60 мм. Дефекты выполнены путем местного занижения сотовой панели и имеют заполненный воздухом зазор толщиной 0,3 мм. Размеры клееной конструкции составляют 15×15 мм, толщина сотовой панели – 5 мм, оргстекла – 10 мм.

Необходимость численного моделирования параметров свободных колебаний заключается в выборе информативных критериев наличия дефектов исследуемых образцов.

Для расчетов выбрана программа конечноэлементного анализа ANSYS, получившая высокую степень верификации.

Определен метод теоретических исследований, позволяющий выявить различия между колебаниями дефектных и бездефектных участков конструкции, основанный на анализе переходных динамических процессов и построении амплитудно-частотных характеристик виброперемещений специфических точек модели с привлечением инструментов обработки LabView.

На этапе анализа переходных динамических процессов к расчетной точке конструкции прикладывалась нагрузка с треугольным характером изменения, характеристика которой представлена в таблице 2.

Таблица 2. Характеристика ударного нагружения

| Максимальная сила нагружения, Н | Время возрастания силы, с | Время снятия силы, с |
|---------------------------------|---------------------------|----------------------|
| 0,1 | 0,001 | 0,001 |

После снятия силы рассчитывался отклик конструкции в точке нагружения. Результаты перемещений специфических точек модели определяются программой как переменные, зависящие от времени.

Модель пластины из оргстекла представлена на рис. 1. Для разбиения модели на элементарную сетку выбран элемент SOLID95, представляющий собой объемный шестигранник с двадцатью узлами. Крепление модели жесткое вдоль плоскости обратной стороне нагружения.

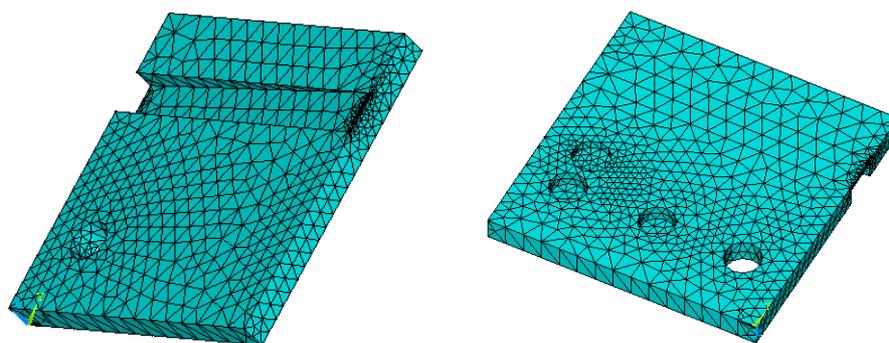
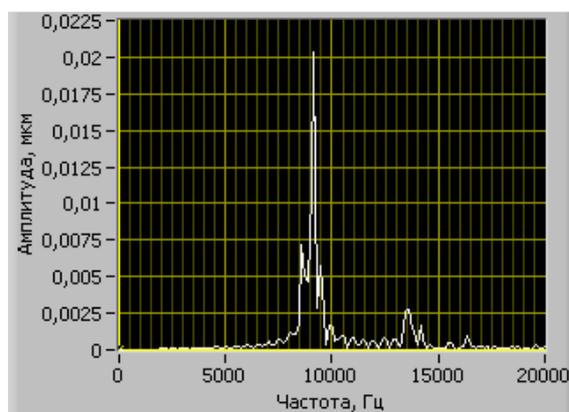


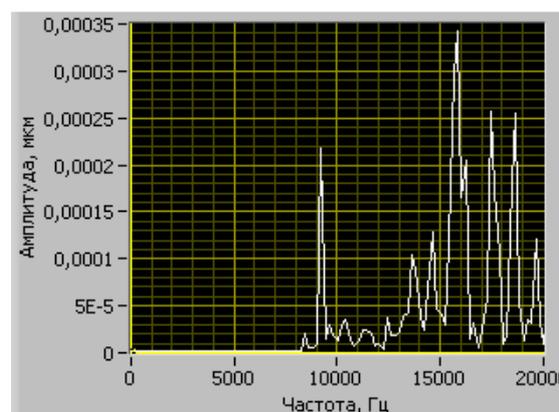
Рис. 1. Модель пластины из оргстекла в ANSYS

На рис. 2 представлены характерные спектры виброперемещений при расчете отклика модели на дефектных и бездефектных участках.

Анализ полученных результатов показал, что наличие дефектов типа «плоскодонное отверстие» определяется колебаниями в низкочастотной области спектра. Характерные частоты этих дефектов находятся в диапазоне от 8 до 12 кГц. Бездефектные участки отличаются меньшими значениями амплитуд перемещений в указанном диапазоне, а также наличием пиков в более высокочастотной области спектра. Дефекты типа «клиновидный паз» характеризуются диапазоном частот колебаний от 5 до 9 кГц.



а)



б)

Рис. 2. Результаты расчета динамического отклика специфических точек пластины из оргстекла: а) дефект типа «плоскодонное отверстие» диаметром 3,97 см и глубиной залегания 0,74 см; б) бездефектный участок

Модель клееной двухслойной конструкции (рис. 3) представляет собой сотовую панель с ограничениями перемещений по всем направлениям в местах склеивания. Для разбиения модели на элементарную сетку выбран оболочечный элемент SHELL63, имеющий форму четырехугольной тонкой пластины с четырьмя узлами по углам. На рис. 4 представлены результаты расчет клееной двухслойной конструкции.

Обработка расчетов (рис. 4) показала, что наличие рассматриваемых дефектов клееной конструкции характеризуется колебаниями в низкочастотной области спектра. Основная частота для дефекта размером 60 мм составляет 2 кГц, а для дефекта 20 мм – 10 кГц. Бездефектный участок отличается колебаниями в более высоком диапазоне частот – от 14 до 20 кГц.

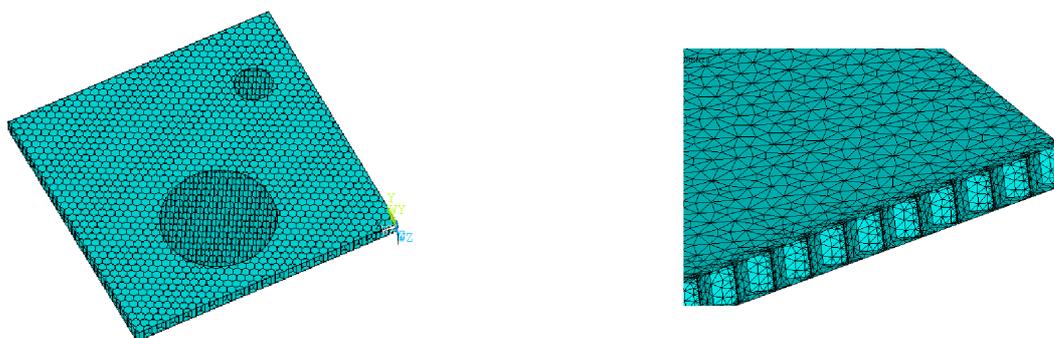


Рис. 3. Модель сотовой панели с дефектами

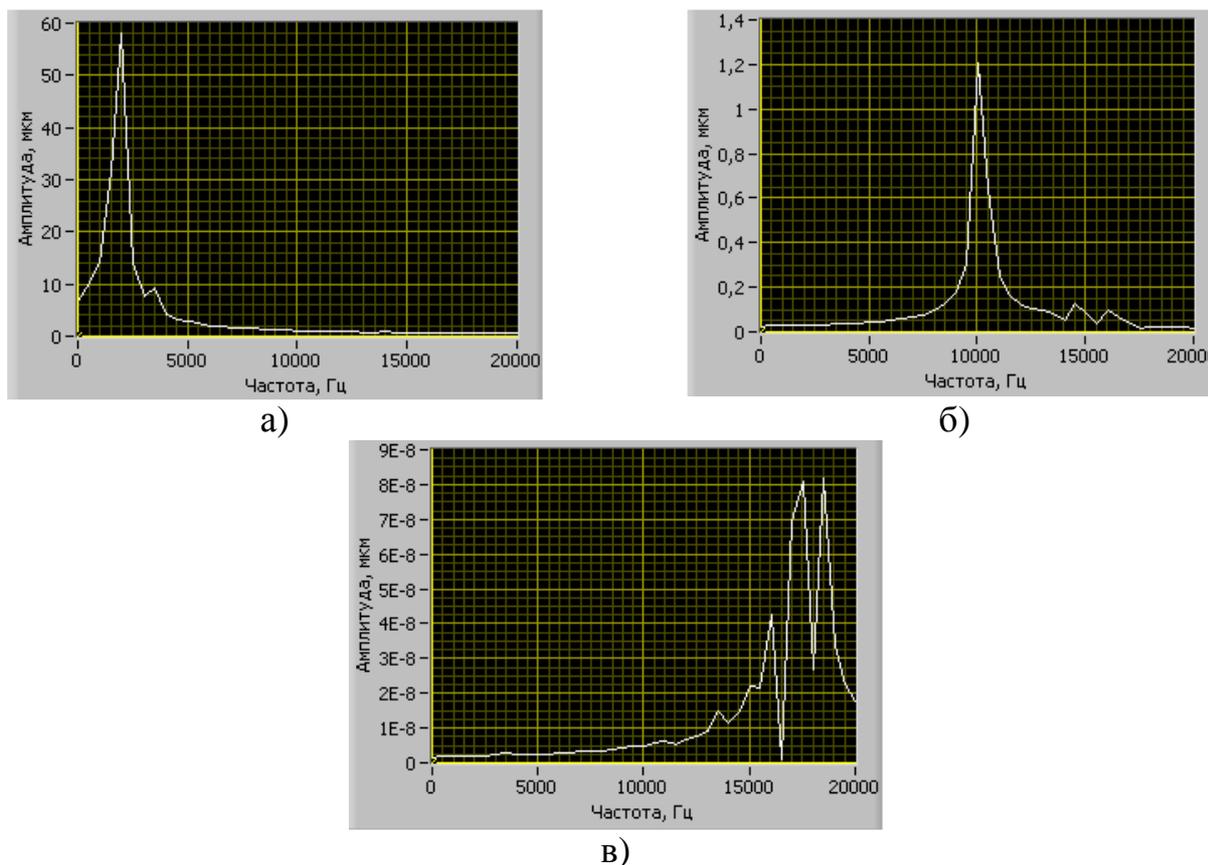


Рис. 4. Результаты расчета динамического отклика специфических точек клееной конструкции: а) дефект диаметром 60 мм; б) дефект диаметром 20 мм; в) бездефектный участок

В третьей главе описаны

1. Разработанный способ возбуждения и приема упругих колебаний.
2. Разработанный и созданный измерительно-диагностический комплекс с пакетом прикладных программ.

Чувствительность и достоверность приборов, реализующих метод свободных колебаний, во многом зависят от расстояния между ударником и приемником первичного преобразователя. В первичных преобразователях с приемников в виде пьезоэлектрического датчика это расстояние может достигать 7-10 мм, ввиду чего границы дефектных участков не могут быть определены с более высокой точностью. Поэтому одной из задач, решаемых в диссертационной работе, является разработка нового способа возбуждения и приема упругих колебаний,

направленного на создание первичного преобразователя совмещенной конструкции с одной зоной контакта с объектом контроля.

Разработанный способ реализован в первичном преобразователе и заключается в возбуждении упругих колебаний ударником со сквозным осевым отверстием, в центре которого расположен щуп пьезоэлектрического датчика, являющийся чувствительным элементом дефектоскопа.

На способ и первичный преобразователь получены патенты на изобретение №2455636 и полезную модель №89236 соответственно.

Первичный преобразователь (рис. 5) содержит корпус 1, в котором запрессован электромагнит 2 с подвижным якорем 3. Внутри полого якоря электромагнита закреплена подпружиненная возвратной пружиной 4 сквозная трубка 5 с расположенным в ней отполированным щупом 6, к основанию которого жестко крепится пьезоэлектрический датчик 7, являющийся чувствительным элементом.

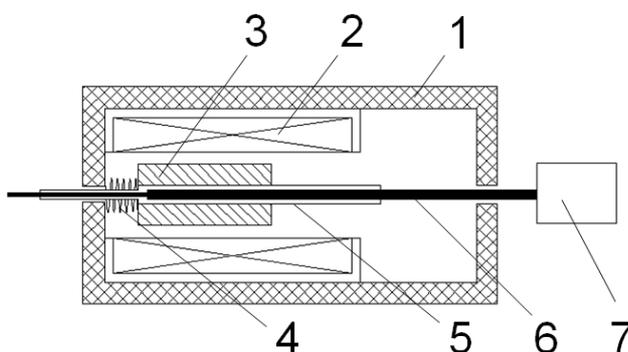


Рис. 5. Первичный преобразователь ударно-акустического дефектоскопа

Выполнение ударного элемента в виде трубки позволяет получить, при нанесении удара по контролируемому объекту, пик колебаний в ее центре, который воспринимается пьезоэлектрическим датчиком. Таким образом, пьезоэлектрический датчик находится в зоне возбуждения упругих колебаний.

С целью проведения экспериментальных исследований и отработки методики ударно-акустического контроля разработан и изготовлен измерительно-диагностический комплекс.

Структурная схема измерительно-диагностического комплекса приведена на рис. 6 и включает в себя датчик с устройством возбуждения, входящие в состав первичного преобразователя, блок управления, АЦП-ЦАП и персональный компьютер. Для приема виброакустического сигнала в системе применяется пьезоэлектрический датчик марки КД 35. Сигнал, воспринимаемый пьезодатчиком, преобразуется из аналогового сигнала в цифровой код в АЦП и анализируется в персональном компьютере. Внешний вид измерительно-диагностического комплекса представлен на рис. 7.

Для снижения влияния внешних вибраций на результаты измерения установка имеет массивное основание. Объект контроля укладывается на резиновую подушку. Перемещение первичного преобразователя вдоль заданной линии контроля осуществляется по шариковым направляющим.

Для обеспечения работы измерительно-диагностического комплекса на базе LabVIEW 8.5 разработан пакет прикладных программ (свидетельства о

государственной регистрации программ для ЭВМ №2013612668, №2011611774), выполняющий следующие основные функции:

- управление электроударником;
- преобразование и запись аналоговых амплитудно-временных сигналов;
- формирование амплитудного спектра с использованием быстрого преобразования Фурье;
- нормализация полученных амплитудных спектров;
- формирование эталонного спектра с использованием спектров бездефектных участков;
- сравнение текущих спектров с эталоном.

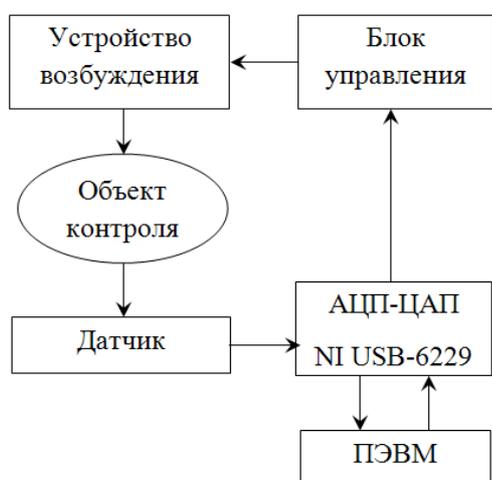


Рис. 6. Структурная схема измерительно-диагностического комплекса

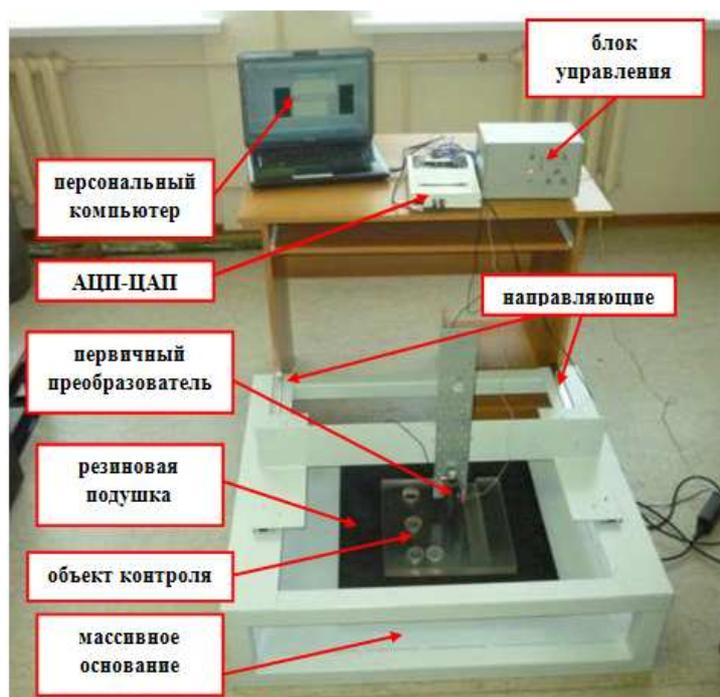


Рис. 7. Фотография измерительно-диагностического комплекса

В качестве сравниваемого параметра, характеризующего отличительные особенности текущих сигналов, используется площадь спектра, определяемая как сумма амплитуд дискретных частот в выбранном частотном диапазоне.

В программном комплексе реализован алгоритм робастного (помехоустойчивого) взвешивания, позволяющий разделять спектральные составляющие на три категории: правдоподобные данные, область сомнения, явные резко выделяющиеся значения (область удаления).

При формировании эталона и сравнении текущих сигналов для любой статистики строятся доверительные интервалы.

Доверительные интервалы объединяет подход, характерный для процедур отбраковки аномалий: программа интерпретирует совокупность вычисленных значений некоторой статистики (p_1, p_2, \dots, p_m) как множество измеренных значений некоторого абстрактного параметра и применяет к этой совокупности значений следующую процедуру:

- 1) вычислить оценку положения \bar{p} ;

- 2) вычислить оценку разброса S ;
- 3) для заданного уровня значимости α построить доверительный интервал:

$$\bar{p} \pm St\left(1 - \frac{\alpha}{2}, m - 2\right)$$

где $t(\alpha, m)$ – α -квантиль распределения Стьюдента с m степенями свободы.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям.

Исследуемые образцы укладывались на упругое основание измерительно-диагностического комплекса. В каждой контрольной точке проведено по 5 измерений для получения усредненного значения спектров. Эталонный спектр строился по сигналам, полученным с бездефектных участков образцов. Границы доверительных интервалов сформированы в соответствии с уровнем значимости 0,05. Применялась процедура нормализации амплитудных спектров, показавшая в результате экспериментальных исследований высокую достоверность определения дефектов. Выбор информативных гармоник определен в соответствии с теоретическими исследованиями.

На дефектах типа «плоскодонное отверстие» определялась чувствительность измерительно-диагностического комплекса к перемещению первичного преобразователя к границам дефектных участков.

Разметка контрольных точек вдоль дефектов типа «плоскодонное отверстие» представлена на рис. 8. Шаг перемещения первичного преобразователя составил 5 мм. Сравнение текущих сигналов с эталоном в диапазоне от 8 до 12 кГц позволило получить максимальную чувствительность к границам дефектов типа «плоскодонное отверстие». На рис. 9 представлены изменения значений площади спектра при перемещении первичного преобразователя вдоль линии №1, на рис. 10 – вдоль линии № 2.

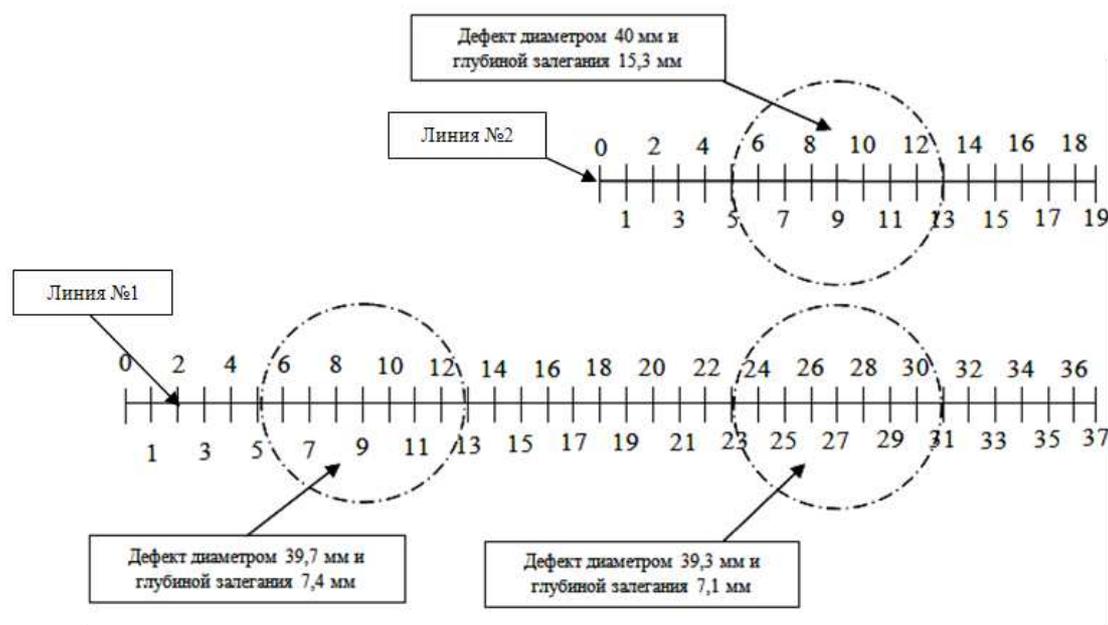


Рис. 8. Разметка контрольных точек на пластине из оргстекла

С целью определения чувствительности и достоверности измерительной системы к изменению глубины залегания дефектов проведены

экспериментальные исследования образца с клиновидным вырезом. Сканирование вдоль дефекта проведено с шагом 15 мм. Первичный преобразователь перемещался над серединой паза вдоль направляющей. Сравнение значений площади спектра проводилось в диапазоне частот от 5 до 10 кГц. Чувствительность к дефекту выявлена при глубине залегания 13 мм. Рассмотрение других частотных диапазонов до 20 кГц улучшения результатов контроля не дало.

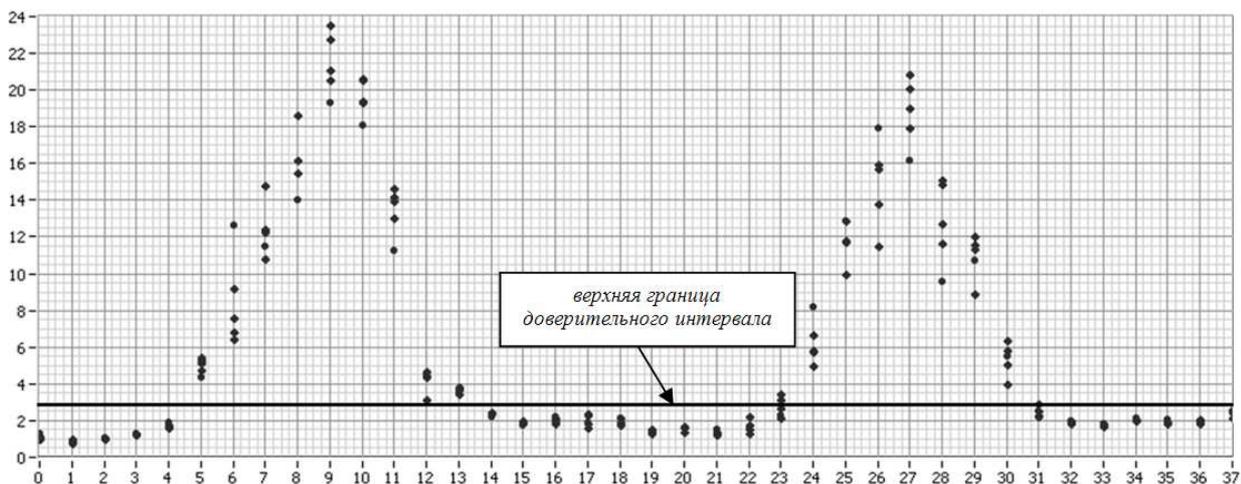


Рис. 9. Экспериментальные данные, полученные при контроле пластины из оргстекла вдоль линии №1

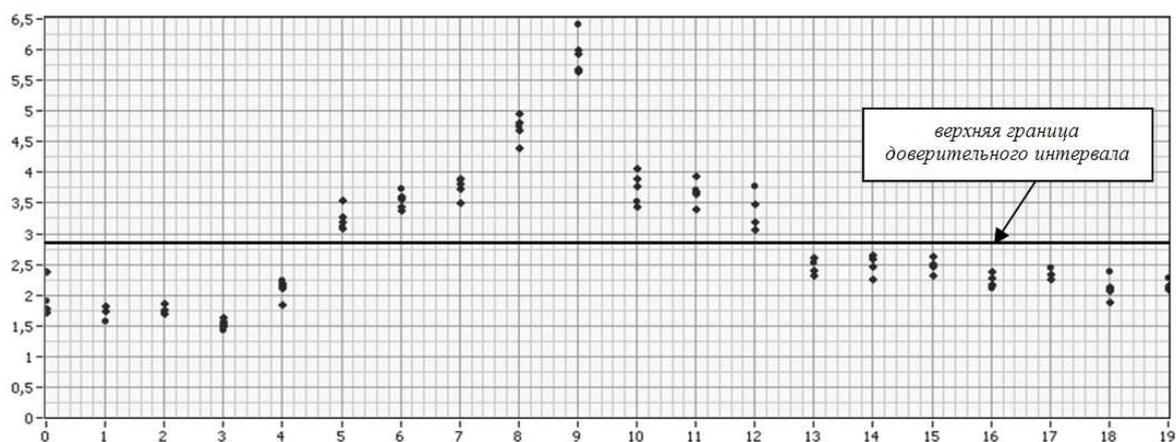


Рис. 10. Экспериментальные данные, полученные при контроле пластины из оргстекла вдоль линии №2

Контроль дефектов клееной конструкции проводился со стороны сотовой панели с шагом 5 мм в соответствии со схемой на рис. 11. Максимальная чувствительность к дефекту размером 60 мм выявлена при сравнении сигналов с эталоном в диапазоне частот от 2 до 4 кГц. Для дефекта размером 20 мм определен диапазон от 9 до 11 кГц.

На рис. 12-13 представлены результаты сравнения текущих сигналов с эталоном.

Анализ экспериментальных исследований показал устойчивое определение дефектов выбранных образцов и подтвердил возможность применения

измерительно-диагностического комплекса для контроля многослойных композиционных конструкций.

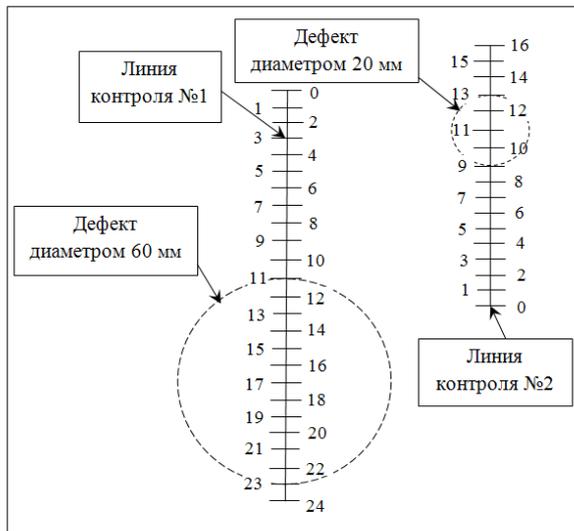


Рис. 11. Разметка контрольных точек на клееной конструкции

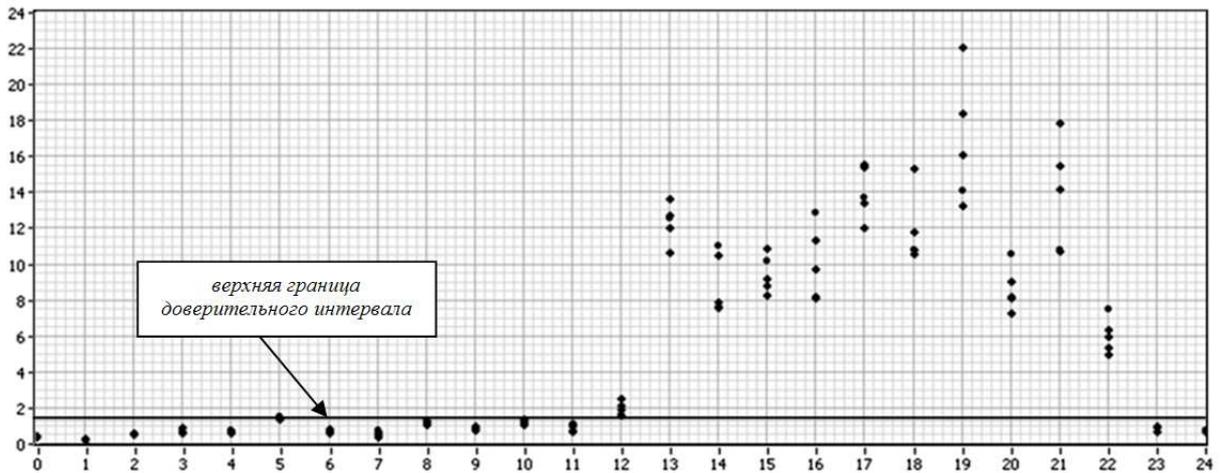


Рис. 12. Экспериментальные данные, полученные при контроле клееной конструкции вдоль линии №1

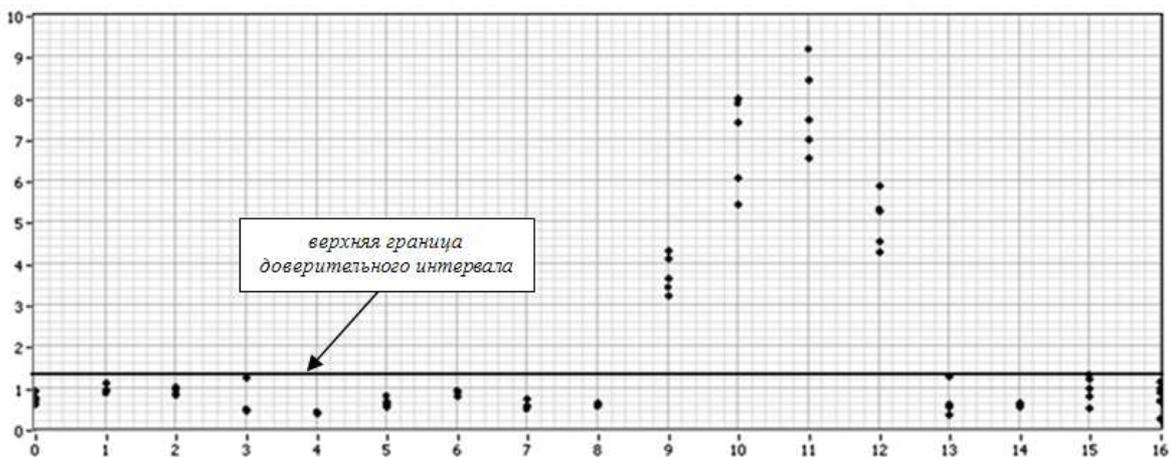


Рис. 13. Экспериментальные данные, полученные при контроле клееной конструкции вдоль линии №2

Выбранные информативные гармоники согласуются с проведенными теоретическими исследованиями. Предложенный аналитический параметр (площадь спектра) и первичный преобразователь новой конструкции показали высокую чувствительность к определению границ дефектов.

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе.

В приложении диссертации приведены патенты на изобретение и полезную модель, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, акты реализации результатов диссертации, а также полученные в ходе модального анализа частоты колебаний рассматриваемых образцов с дефектами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с задачами исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Определен и апробирован метод расчета информативных гармоник спектра, характеризующих различия колебаний дефектных и бездефектных участков конструкции.

2. Разработан и реализован в виде первичного преобразователя новый способ возбуждения и приема упругих колебаний, обеспечивающий одну зону контакта с объектом контроля.

3. Выбрано метрологическое обеспечение методики ударно-акустического контроля, включающего в себя стандартные образцы с имитацией характерных для многослойных композиционных конструкций дефектов в виде несплошности и расслоения.

4. Разработана методика определения дефектов в виде несплошности и расслоения по анализу возбуждаемых ударным преобразователем виброакустических сигналов.

5. Разработано и создано алгоритмическое и программно-техническое обеспечение процессов управления измерительно-диагностическим комплексом и обработки виброакустических сигналов.

6. Разработан, изготовлен и испытан на выбранных образцах с дефектами измерительно-диагностический комплекс, реализующий предложенную методику ударно-акустического контроля.

Поставленная цель диссертационной работы достигнута.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1. Кондратьев А.Е., Загретдинов А.Р. Применение метода свободных колебаний для диагностики технического состояния поршней дизельного двигателя автомобиля КамАЗ / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – №12(76). – С. 49-51. – ISSN 1028-6861.

2. Загретдинов А.Р., Кондратьев А.Е., Ваньков Ю.В. Разработка прибора и методики ударно-акустического контроля многослойных композиционных конструкций / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – №7-8. – С. 138-144. – ISSN 1998-9903.

3. Патент РФ № 2455636, МПК G01N29/04. Способ виброакустического контроля изделий и устройство для его реализации / Кондратьев А.Е., Ваньков Ю.В., Загретдинов А.Р. – Оpubл. 10.07.2012, Бюл. № 19.

4. Патент РФ № 89236, МПК G01N29/00. Первичный преобразователь ударно-акустического дефектоскопа / Кондратьев А.Е., Ваньков Ю.В., Загретдинов А.Р., Выровой З.В. – Опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611774. Detector / Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е., Акутин М.В., Загретдинов А.Р. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.01.2011.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612668. Программный комплекс для обеспечения работы измерительно-диагностической установки / Кондратьев А.Е., Загретдинов А.Р., Политова Т.О. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.01.2013.

7. Загретдинов А.Р. Ударно-акустический дефектоскоп для обнаружения дефектов композиционных материалов / Сборник материалов Международной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу - творчество молодых». Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. С. 81-82.

8. Загретдинов А.Р. Модернизация дефектоскопов, реализующих ударно-акустический метод / Материалы докладов Международной молодежной научной конференции «XVII Туполевские чтения». Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2009. С. 69-72.

9. Загретдинов А.Р. Акустический дефектоскоп для обнаружения дефектов многослойных композиционных материалов / Сборник материалов XXII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Казань: КВВКУ, 2010. С. 289-290.

10. Загретдинов А.Р. Способ виброакустического контроля изделий и устройство для его осуществления / Сборник материалов XXIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Казань: КВВКУ, 2011. С. 110-112.

11. Загретдинов А.Р. Ударно-акустический дефектоскоп для контроля изделий из многослойных композиционных материалов // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Измерения: состояние, перспективы развития». Челябинск: ЮУрГУ, 2012, С. 197-200.

12. Загретдинов А.Р. Способ снижения погрешности виброизмерений / Материалы докладов VII Международной научно-технической конференции «Тинчуринские чтения». Казань: КГЭУ, 2012. С.89-90.

Подписано к печати
Гарнитура «Times»
Физ. печ. л. 1,0
Тираж 100 экз.

05.11.2013 г.
Вид печати РОМ
Усл. печ. л. 0,94
Заказ № 4690

Формат 60x84/16
Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 1,0