

Чертищев Василий Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ И СРЕДСТВ
АКУСТИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСНОГО КОНТРОЛЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.11 – Методы контроля и диагностики в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
государственный научный центр Российской Федерации
(ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)

Научный руководитель: доктор технических наук
ОСПЕННИКОВА Ольга Геннадиевна
ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, первый
заместитель генерального директора

Официальные оппоненты: доктор технических наук
КАЧАНОВ Владимир Климентьевич
ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», профессор
кандидат технических наук
МОГИЛЬНЕР Леонид Юрьевич
ООО «НИИ Транснефть», главный научный
сотрудник

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО ИГиМ РАН, г. Санкт-Петербург**

Защита состоится «23» апреля 2020 г. в 14:30 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного
совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана
и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Щипаков Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В настоящее время в изделиях авиационной техники всё более широкое применение находят многослойные изделия с несплошными периодическими (сотовыми) слоями, в том числе трёх-, пяти- и семислойные сотовые конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Примером могут служить мотогондолы перспективных авиационных двигателей, состоящие почти на 50% из подобных конструкций, которые решают задачи по обеспечению прочности одновременно с шумо- и вибропоглощением. С каждым годом возрастает сложность таких конструкций, их габаритные размеры и стоимость, что приводит к тому, что в случае обнаружения в детали дефекта, экономически целесообразным становится её допуск к работе с дефектом по результатам прочностного расчёта по данным технической диагностики или ремонт вместо утилизации. Это касается не только деталей, пострадавших в условиях эксплуатации, но и деталей с заводским браком в условиях производства. Прочностной расчёт и/или выбор правильной технологии ремонта современной многослойной сотовой конструкции (МСК) из ПКМ напрямую зависит от информации о глубине (или как минимум дискретном слое) залегания дефекта и его размере. Однако большинство существующих методов неразрушающего контроля (НК) многослойных сотовых конструкций из ПКМ, включая акустические низкочастотные методы, могут дать лишь бинарную информацию о наличии или отсутствии дефекта, но не дают информации о его размере и глубине. Причиной этому являются заложенные в них физические принципы контроля и нулевые раскрытия большинства типичных дефектов.

Количественную информацию о условном размере дефекта и глубине его залегания в МСК из ПКМ можно связать с величиной механического импеданса на поверхности объекта контроля над дефектом. Для этого требуется аналитическое и экспериментальное изучение влияния дефектов разных размеров, расположенных на различных глубинах, на численную величину механического импеданса на поверхности изделия над ними. Кроме того, необходима разработка средств для численного измерения величины механического импеданса на основе существующих импедансных методов НК.

Цель работы – повышение достоверности и информативности неразрушающего контроля многослойных сотовых конструкций из ПКМ за счёт определения акустическим импедансным методом условного размера и глубины залегания обнаруженных дефектов.

Основные задачи работы состояли в следующем:

1. Разработка модели совмещенного импедансного преобразователя для измерения механического импеданса (МИ) изделия, с помощью которой возможно связать приложенную к датчику внешнюю нагрузку равную полному МИ изделия и величины комплексных напряжений на пьезоэлементах датчика.
2. Разработка расчётно-экспериментальных методик корректировки модели импедансного датчика для учёта неподдающихся прогнозированию энергетических потерь в звукопроводе и клеевых соединениях пьезоэлементов.

3. Получение модельных зависимостей величин комплексных выходных параметров на пьезоэлементах датчика от внешней нагрузки для серийных датчиков с учетом контактных гибкостей для ПКМ.

4. Верификация модельных зависимостей на дефектах, импеданс которых может быть вычислен аналитически.

5. Проведение аналитических и экспериментальных исследований по выявлению влияния размера плоскостных несплошностей и глубины их залегания на механический импеданс на поверхности многослойных сотовых конструкций из ПКМ над дефектами.

6. Разработка методики оценочного определения условных размеров и дискретных глубин залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ при ручном контроле серийными импедансными дефектоскопами.

7. Разработка методики определения условного размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса с использованием полученных модельных зависимостей при автоматизированном производственном контроле с применением специально разработанного оборудования.

Методы исследования

В работе использовалась совокупность теоретических, расчетных и экспериментальных методов исследований.

Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования и статистического анализа, с применением апробированных и корректных методов численных расчетов и интерпретации экспериментальных данных, программных комплексов PTC MathCAD и MS Excel. Для получения экспериментальных данных использовались поверенные средства измерения, дефектоскопы Olympus OmniScan MX и ДАМИ-С 09, и метрологически аттестованные контрольные образцы.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Установлено, что энергетические потери в стержневом звукопроводе можно учесть при моделировании импедансного датчика путём замены констант волнового сопротивления и волнового числа линейными функциями от частоты. Данные функции можно вычислить решением системы из четырёх уравнений реализации резонансов на частотах, измеряемых экспериментально без внешней нагрузки и/или с установкой датчика на толстостенные образцы из материалов с известной контактной гибкостью сухого точечного контакта.

2. Впервые для изделий с наружными слоями из углепластиков установлены зависимости в виде нелинейных немонотонных функций с одним или двумя экстремумами для величин отношения амплитуд напряжений на пьезоэлементах совмещенного импедансного датчика и фазового смещения между данными напряжениями от приложенной к датчику переменной внешней нагрузки в виде реактивного механического импеданса при различных величинах энергетических потерь и соответствующие амплитудно-фазовые годографы для серийного датчика ПАДИ-8-02 на частотах 2,1 и 10,48 кГц и датчика ПАДИ-7 на частоте 6,2 кГц.

3. Установлено, что дискретный слой залегания дефекта в трёх-, пяти- и семислойных сотовых конструкциях из ПКМ может быть определён по характеру отклонения величины механического импеданса над дефектом от зоны автоматической сигнализации дефектов (АСД), а условный диаметр и глубина в конкретном слое могут быть рассчитаны с использованием трёх модельных зависимостей для заземленных по периметру круглых пластин.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1. Разработанные технологии определения размера и глубины залегания дефектов в пяти- и семислойных сотовых конструкциях из ПКМ внедрены в составе методического материала ММ 1.2.165-2015 «Акустический контроль деталей из ПКМ мотогондолы двигателя» в АО «ОДК-Авиадвигатель» при контроле мотогондол авиационных двигателей семейств ПД-14 и ПД-35.

2. Разработан полномасштабный макет автоматизированного комплекса для контроля деталей и агрегатов из ПКМ.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель совмещенного импедансного преобразователя для вычисления величины механического импеданса объекта контроля.

2. Алгоритм корректировки модели импедансного преобразователя для учёта энергетических потерь в датчике.

3. Метод расчётно-экспериментального определения динамической контактной гибкости K_K и установленная для углепластика ВКУ-39 величина K_K при контакте с импедансным датчиком ПАДИ-8-02 – $39,2 \times 10^{-8}$ Н/м.

4. Зависимости между величиной механического импеданса на поверхности объекта контроля и величинами комплексных напряжений на пьезоэлементах датчика ПАДИ-8-02 на частотах 2,1 и 10,48 кГц и датчика ПАДИ-7 на частоте 6,2 кГц, а также соответствующие зависимости в виде амплитудно-фазовых годографов при различных величинах отношения реактивной и активной составляющих механического импеданса.

5. Алгоритм определения дискретной глубины дефекта по слоям в трёх-, пяти и семислойных сотовых конструкциях по набору численных критериев и методических признаков, описывающих отклонение измеряемых амплитудно-фазовых параметров на комплексной плоскости от зоны отрицательной сигнализации дефектов, при ручном контроле импедансными дефектоскопами.

6. Алгоритм определения размера и глубины залегания дефектов в трёх-, пяти и семислойных сотовых конструкциях из ПКМ с обшивками из углепластиков и стеклопластиков с использованием С-сканов по реактивной и абсолютной величине механического импеданса, измеренного с использованием модельных годографов с учётом и без учёта величин коэффициента энергетических потерь, путём предварительного определения дискретного слоя залегания дефекта с последующим расчётом его условного диаметра и уточнённой глубины в конкретном слое с использованием модельных зависимостей для колебаний одно-, двух- и трёхслойной пластины.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах, симпозиумах: III научно-техническая конференция

«Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов», Санкт-Петербург, 2018; научно-техническая конференция «Климовские чтения - 2018. Перспективные направления развития авиадвигателестроения», Санкт-Петербург, 2018; X всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат», Москва, 2018; всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания клеев, клеевых связующих и клеевых препрегов», Москва, 2018; III всероссийская научно-техническая конференция «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники», Москва, 2017; III всероссийская научно-техническая конференция «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», Москва, 2016.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из которых 7 работ опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, из них 3 статьи входят в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора

В основу работы положены теоретические и экспериментальные исследования, выполненные непосредственно автором. Анализ полученных результатов и формулировка основных выводов выполнены автором.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 116 наименований и четырёх приложений. Общий объём диссертации составляет 180 страниц, 58 рисунков, 4 таблицы и 90 формул.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ типов многослойных конструкций из ПКМ, технологий их изготовления, типов производственных и эксплуатационных дефектов и технологий ремонта данных дефектов, а также анализ возможностей существующих технологий неразрушающего контроля для определения их размера и глубины. В результате анализа установлено:

- Многослойные сотовые конструкции широко применяются в мало-, средне- и высоконагруженных деталях и узлах самолетов, таких как мотогондолы двигателей, элероны, закрылки, предкрылки и т.д.

- В процессе производства и эксплуатации в МСК из ПКМ может возникнуть широкий спектр дефектов, как в одиночных слоях (расслоения, трещины, пористость и т.д.), так и между слоями (расслоения, непроклеи и т.д.).

- Почти для всех типов дефектов (кроме микродефектов: пористость, неполная полимеризация матрицы и т.д.) возможно проведение прочностных расчётов и выполнение ремонта (при экономической целесообразности).

- Для проведения прочностных расчётов и выбора правильной технологии ремонта МСК из ПКМ необходимо знать размер и глубину залегания дефекта.

- Наибольшее распространение для обнаружения дефектов в МСК получили акустические специальные низкочастотные методы контроля: импедансный (совмещенным и раздельно-совмещенным датчиком) и ударно-акустический. Однако они не позволяют определять размер и глубину дефектов, а дают лишь бинарный результат «дефект / не дефект». Акустический импедансный метод был разработан Ю.В. Ланге в стенах «ВИАМ». Развитием метода занимались: В.В. Мурашов, В.Н. Сырбу, И.И. Теумин, Е.Г. Устинов, Н.Ф. Хантер, Г.П. Стариковский и многие другие.

- Одним из наиболее перспективных путей решения задачи определения размера и глубины дефекта в МСК является установление связи между ними и изменением величины механического импеданса на поверхности МСК, с созданием технологии численного измерения или оценки величины МИ.

- Решение задачи численного определения величины механического импеданса возможно путём моделирования импедансного датчика с созданием ряда методик коррекции модели для учета неподдающихся прогнозированию энергетических потерь. Помимо этого, требуется разработка методики измерения величины контактной гибкости сухого точечного контакта (СТК) между ПКМ и контактным наконечником импедансного датчика.

- Для установления связи условного размера и глубины дефекта с величиной импеданса в конкретном типе многослойной конструкции потребуется изучение с помощью математических моделей и экспериментов влияния дефектов различного размера, расположенных на различных глубинах в МСК, на численную величину МИ на поверхности изделия над дефектом.

Обосновано, что помимо полного решения задачи определения размера и глубины дефектов в многослойных сотовых конструкциях, важным для решения практических задач по ремонту изделий в условиях эксплуатации, является создание на основе описанных выше исследований методики оценочного определения условного диаметра и дискретной глубины дефекта в объекте контроля (ОК) при ручном контроле с использованием серийных импедансных амплитудно-фазовых дефектоскопов.

Вторая глава посвящена моделированию совмещенного импедансного преобразователя для измерения величины механического импеданса.

Механическим импедансом или полным механическим сопротивлением Z называется отношение возмущающей силы F к вызываемой ею колебательной скорости v поверхности среды в точке приложения силы. Сила является гармонической, величины Z , F и v — комплексными. Устройством, чувствительным к изменению МИ, является импедансный датчик (Рис. 1).

Отношение между комплексными величинами напряжений U_1 на генерирующем колебания пьезоэлементе излучателя и U_2 на пьезоэлементе приёмника называется комплексным коэффициентом передачи датчика P

$$P = \frac{U_2}{U_1} = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| e^{j\psi} = P \cdot e^{j\psi}, \quad (1)$$

где P — коэффициент передачи датчика; ψ — сдвиг фазы между напряжениями U_1 и U_2 ; $j = \sqrt{-1}$.

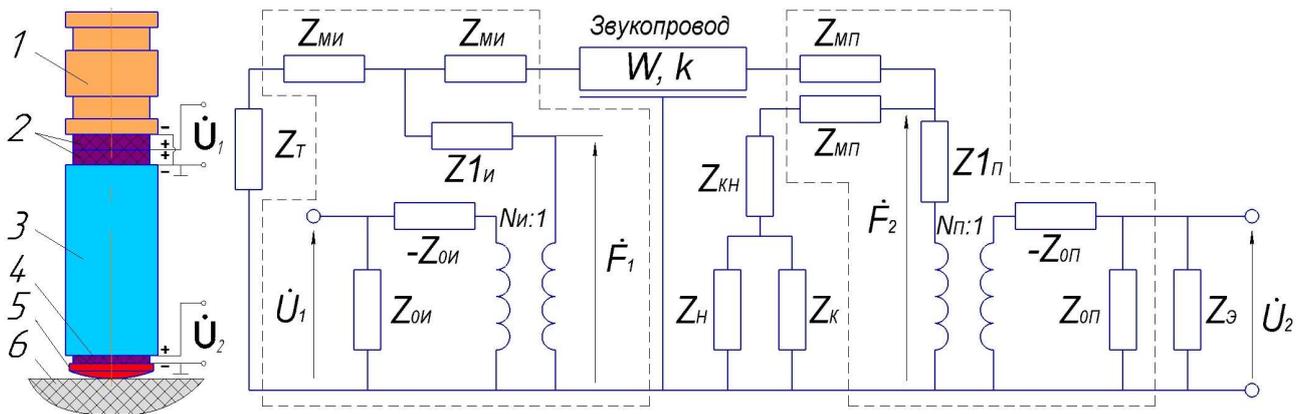


Рис. 1. Конструктивная схема (1 – тыльная масса; 2 – пьезоэлементы излучателя; 3 – звукопровод; 4 – пьезоэлемент приёмника; 5 – наконечник; 6 – объект контроля) и схема замещения совмещенного преобразователя

Моделирование совмещенного импедансного преобразователя, нагруженного механическим импедансом контролируемого изделия Z_H через шунтирующую контактную гибкость Z_K , произведено с помощью метода электромеханических аналогий по схеме замещения на Рис. 1.

Расчёт внутренних электрических импедансов Z_0 , реактивных импедансов от массы пьезоэлементов Z_M , внутренних механических импедансов пьезоэлементов $Z1$, тыльной массы Z_T и контактного наконечника Z_{KH} произведён с учётом пренебрежения потерями при работе на низких частотах и с вычислением инерционных нагрузок как сосредоточенных масс.

Независимой переменной является реактивная составляющая X_H комплексной внешней нагрузки $Z_H = R_H + jX_H$, дополнительным параметром является коэффициент энергетических потерь $\nu_H = R_H/|X_H|$, характеризующий отношение величин активной и реактивной составляющих импеданса.

Активная R и реактивная X составляющие нагрузки на датчик со стороны изделия с учётом шунтирования контактной гибкостью соответственно равны

$$R = \frac{\nu_H |X_H|}{(1 - \omega K_K X_H)^2 + (\omega K_K \nu_H X_H)^2} \quad (2)$$

$$X = \omega m + \frac{X_H (1 - \omega K_K X_H (1 + \nu_H^2))}{(1 - \omega K_K X_H)^2 + (\omega K_K \nu_H X_H)^2}, \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний; f – частота колебаний; $m = m_{KH} + m_{\Pi}/2$; m_{KH} и m_{Π} – массы контактного наконечника и пьезоэлемента приёмника соответственно; K_K – контактная гибкость СТК.

Выведены искомые зависимости для $P(X_H, \nu_H)$ и $\psi(X_H, \nu_H)$

$$P = \frac{G}{H^2 + T^2} \sqrt{(H(\delta R - \varepsilon X) + T(\delta X + \varepsilon R))^2 + (H(\delta X + \varepsilon R) - T(\delta R - \varepsilon X))^2} \quad (4)$$

$$\psi = \arctg \frac{H(\delta X + \varepsilon R) - T(\delta R - \varepsilon X)}{H(\delta R - \varepsilon X) + T(\delta X + \varepsilon R)}, \quad (5)$$

где:

$$H = W_{y3} \left(e^{bl} \left(R(\delta p - \varepsilon q) + \alpha W_{y3} \left(\frac{k}{Q} - h \right) + \frac{b}{2} (hX - aR) \right) - (\varepsilon p + \delta q)(\omega M_0 + X e^{bl}) \right) + \omega M_0 \left(k(hX - aR) - \frac{bhW_{y3}}{2} \right);$$

$$T = W_{y3} \left(e^{bl} \left(R(\varepsilon p + \delta q) + kW_{y3} \left(k + \frac{h}{Q} \right) - \frac{b}{2} (aX + hR) \right) + (\delta p - \varepsilon q)(\omega M_0 + X e^{bl}) \right) + \omega M_0 \left(\frac{abW_{y3}}{2} - k(aX + hR) \right);$$

$$G = \frac{\omega^2 n d_{И} d_{П} M_1 e^{\frac{bl}{2} W_{y3}}}{C^T + C_3}; \quad a = \text{sh} \delta l \cos \varepsilon l; \quad h = \text{ch} \delta l \sin \varepsilon l; \quad p = \text{ch} \delta l \cos \varepsilon l; \quad q = \text{sh} \delta l \sin \varepsilon l;$$

n – количество пьезопластин в излучателе; $d_{И}$ и $d_{П}$ – пьезомодули пьезопластин источника и приёмника; m_T и $m_{И}$ – массы тыльной нагрузки и одиночной пьезопластины источника соответственно; $M_0 = m_T + n \cdot m_{И}$; l и b – длина стержня и коэффициент экспоненциальной формы звукопровода; $\varphi =$

$\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \delta + j\varepsilon$; $\gamma = \beta + jk = k \left(\frac{1}{2Q} + j\right)$ – постоянная распространения;

β – постоянная затухания; $k = \frac{\omega}{c_{3B}}$ – волновое число; $c_{3B} = \sqrt{\frac{E_{3B}}{\rho_{3B}}}$ – скорость

звука; E_{3B} – модуль Юнга; ρ_{3B} – плотность материала звукопровода; $\delta = k \cdot \sqrt[4]{g^2 + \frac{1}{Q^2}} \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \arctg\left(\frac{1}{gQ}\right)\right)$, $g = \frac{b^2}{4k^2} - 1$, $\varepsilon = k \cdot \sqrt[4]{g^2 + \frac{1}{Q^2}} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \arctg\left(\frac{1}{gQ}\right)\right)$;

Q – добротность звукопровода; C^T – электрическая ёмкость свободного пьезоэлемента (приёмника); C_3 – суммарная ёмкость кабеля; $W_{y3} = S_{y3} \sqrt{E_{3B} \rho_{3B}}$ – волновое сопротивление узкого конца звукопровода (S_{y3} – его площадь).

Измерение контактной гибкости ПКМ производилось по предложенной методике путём сравнения амплитуды сигнала без нагрузки P_0 , которая пропорциональна инерционной нагрузке $j\omega(m_{KH} + m_{П}/2)$, и амплитуды сигнала на контролируемом толстостенном объекте P_{OK} , измеренных датчиком ПАДИ-8-02 на нерезонансной частоте 10 кГц. С этой целью вычислялось их отношение $P'_{OK} = P_{OK}/P_0$ и производится расчет K_K по следующей формуле

$$K_K = 1 / \left(\omega^2 \left(m_{KH} + \frac{m_{П}}{2} \right) (1 - P'_{OK}) \right) \quad (6)$$

Для углепластика ВКУ-39 с эпоксидной матрицей для датчика ПАДИ-7 получена величина $K_K - 18,2 \times 10^{-8}$ Н/м, что соответствует $\frac{E}{1-\nu^2} \approx 11,4 \times 10^9$ Па, и величина K_K для датчика ПАДИ-8-02 – $39,2 \times 10^{-8}$ Н/м соответственно.

Модуль нормальной упругости E для углепластика ВКУ-39 измеренный по величине K_K равен примерно 10 ГПа, что больше E для чистого эпоксидного связующего (3 – 4,5 ГПа) и меньше E механических испытаний углепластика (120 – 130 ГПа). Сделан вывод, что аналитический расчет K_K для ПКМ затруднителен и оптимальным путём является применение предложенной методики расчетно-экспериментального определения K_K по формуле (6).

Звукопровод датчика выполняется в виде стержня длиной l . В пренебрежении потерями входной импеданс стержня Z_B равен

$$Z_B(f) = jW \cdot \text{tg}(k \cdot l), \quad (7)$$

где W – волновое сопротивление; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

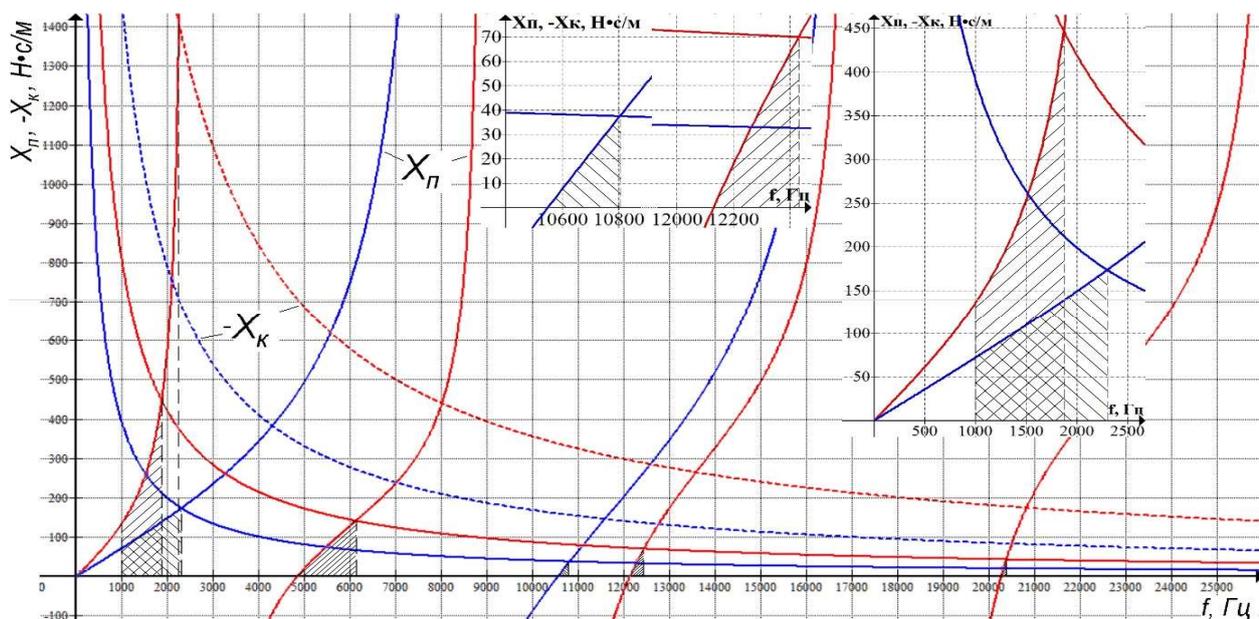


Рис. 2. Зависимости полных входных сопротивлений X_{Π} датчиков ПАДИ-7 (—) и ПАДИ-8-02 (—) от частоты и условия реализации резонансных режимов с учетом контактных гибкостей X_K

Входной импеданс стержня Z_B является частью полного входного сопротивления датчика со стороны изделия Z_{Π}

$$Z_{\Pi} = R_{\Pi} + jX_{\Pi} \cong jX_{\Pi} = Z_{\text{МИ}} + Z_B(f) + 2Z_{\text{МП}} + Z_{\text{КН}} \quad (8)$$

Очевидно, что для установления точных резонансных режимов при моделировании, требуется достоверная зависимость X_{Π} и соответственно Z_B от частоты. Для решения данной задачи константы волнового сопротивления W и волнового числа k предложено заменить линейными функциями от частоты

$$W' = W'_{y3} = \alpha_1 + \beta_1 \cdot f \quad (9)$$

$$k' = \alpha_2 + \beta_2 \cdot f \quad (10)$$

Из условия реализации резонансных режимов:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\pi f_{p1}(m_{\text{И}}/2 + m_{\Pi} + m_{\text{КН}}) + (\alpha_1 + \beta_1 \cdot f_{p1}) \cdot \text{tg}((\alpha_2 + \beta_2 \cdot f_{p1}) \cdot l) = 0 \quad (11) \\ 2\pi f_{p2}(m_{\text{И}}/2 + m_{\Pi} + m_{\text{КН}}) + (\alpha_1 + \beta_1 \cdot f_{p2}) \cdot \text{tg}((\alpha_2 + \beta_2 \cdot f_{p2}) \cdot l) = 0 \quad (12) \\ 2\pi f_1(m_{\text{И}}/2 + m_{\Pi} + m_{\text{КН}}) + (\alpha_1 + \beta_1 \cdot f_1) \cdot \text{tg}((\alpha_2 + \beta_2 \cdot f_1) \cdot l) = \frac{1}{2\pi f_1 K_K} \quad (13) \\ 2\pi f_2(m_{\text{И}}/2 + m_{\Pi} + m_{\text{КН}}) + (\alpha_1 + \beta_1 \cdot f_2) \cdot \text{tg}((\alpha_2 + \beta_2 \cdot f_2) \cdot l) = \frac{1}{2\pi f_2 K_K} \quad (14) \end{array} \right.$$

Для вычисления коэффициентов α_1 , α_2 , β_1 и β_2 штатными средствами дефектоскопа производится замер четырех резонансных частот: двух частот холостого хода f_{p1} и f_{p2} и двух частот при нагружения на толстый образец из материала с известной величиной K_K — f_1 и f_2 . Численное решение системы уравнений (11-14) позволяет найти искомые коэффициенты α_1 , α_2 , β_1 и β_2 . Для датчиков ПАДИ-7 и ПАДИ-8-02 были рассчитаны соответствующие функции $Z_B(f)$ и на Рис. 2 приведены графики X_{Π} .

По формуле (4) с учетом W' и k' был произведен расчет коэффициента передачи P датчика ПАДИ-7 как функции от частоты f при $X_{\text{Н}} = 0$ (на холостом ходу, без прижатия датчика к ОК) для нескольких величин добротности Q .

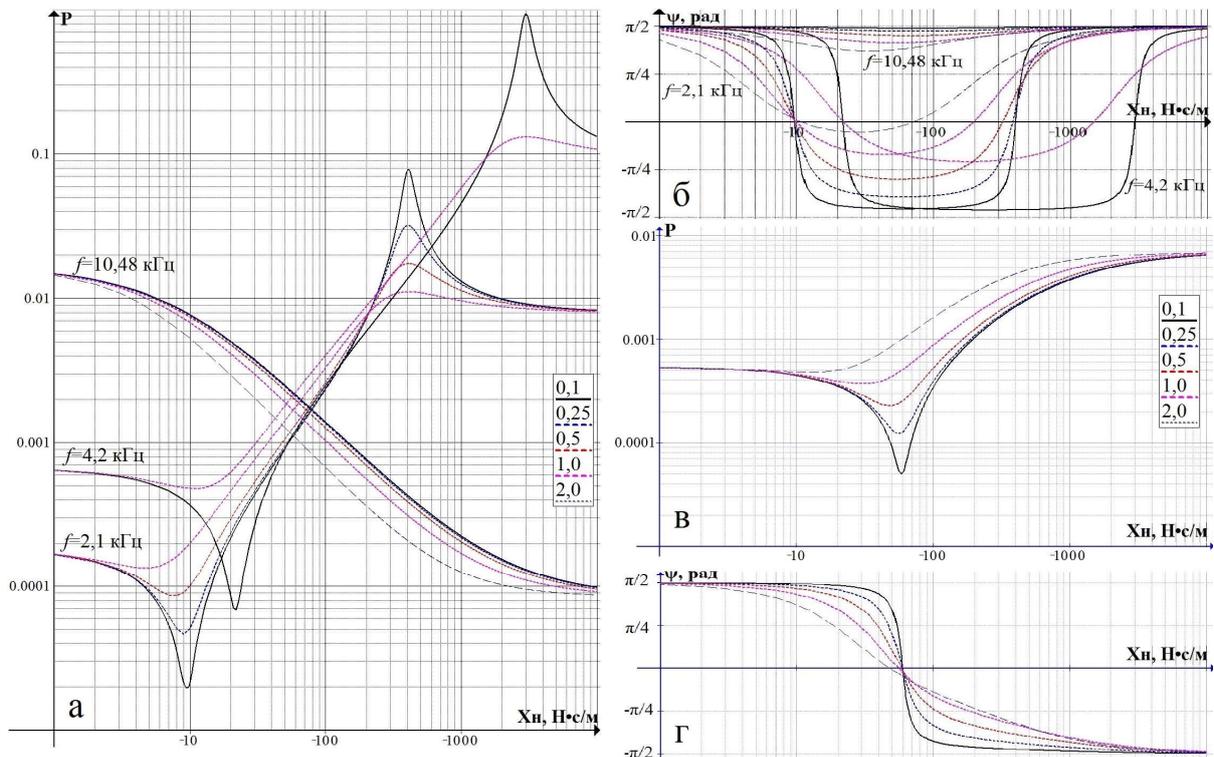


Рис. 3. Модельные зависимости $P(X_n, \nu_n)$ и $\psi(X_n, \nu_n)$ датчика ПАДИ-8-02 (а, б) на частотах 2,1 и 10,48 (для ПКМ) и 4,2 (для сплава ВТ6 – для сравнения) кГц и датчика ПАДИ-7 (в, г) на частоте 6,2 кГц для ПКМ

Путём сравнения экспериментальных замеров с серией графиков при различных Q произведён выбор величины добротности (для ПАДИ-7 – 20).

В результате модельного расчета по формулам (4) и (5) получены зависимости коэффициента передачи $P(X_n, \nu_n)$ и фазового смещения $\psi(X_n, \nu_n)$ для датчика ПАДИ-8-02 (P – Рис. 3, а, ψ – Рис. 3, б) на частотах 2,1 и 10,48 (для изделий из ПКМ) и 4,2 (для титанового сплава ВТ6 – для сравнения) кГц и датчика ПАДИ-7 (P – Рис. 3, в, ψ – Рис. 3, г) на частоте 6,2 кГц для ПКМ.

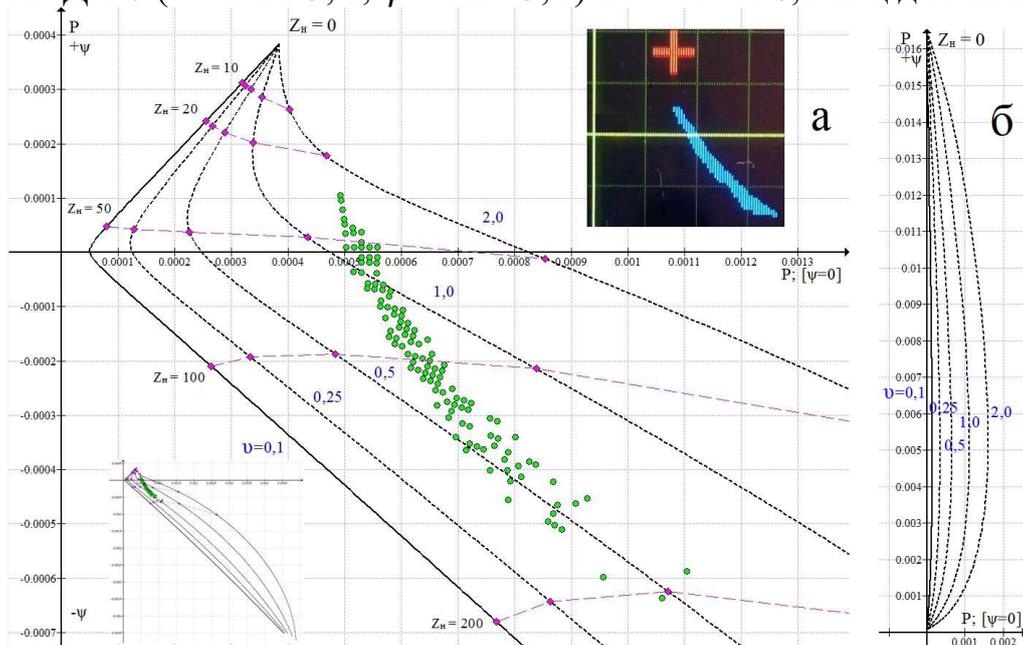


Рис. 4. Годографы, объединяющие зависимости $P(X_n, \nu_n)$ и $\psi(X_n, \nu_n)$, для ПАДИ-7 (а) на частоте 6,2 кГц и ПАДИ-8 на частоте 10,48 кГц (б) для ПКМ

Раздельный анализ графиков функций $P(X_H, \nu_H)$ и $\psi(X_H, \nu_H)$ затруднителен, поэтому данные зависимости были объединены для получения годографов коэффициента передачи на комплексной плоскости. Текущее значение коэффициента передачи в комплексном виде представляется радиус-вектором, обладающим длиной, равной P , и образующим угол ψ с осью абсцисс. Годографы для различных ν_H для датчиков ПАДИ-7 на частоте 6,2 кГц и ПАДИ-8 на частоте 10,48 кГц приведены на Рис. 4. На годограф 6,2 кГц для примера наложена группа данных, измеренных на годной семислойной МСК.

Третья глава посвящена верификации и исследованию резонансов разработанной модели импедансного преобразователя и оценке влияния фрикционных шумов на точность измерения механического импеданса.

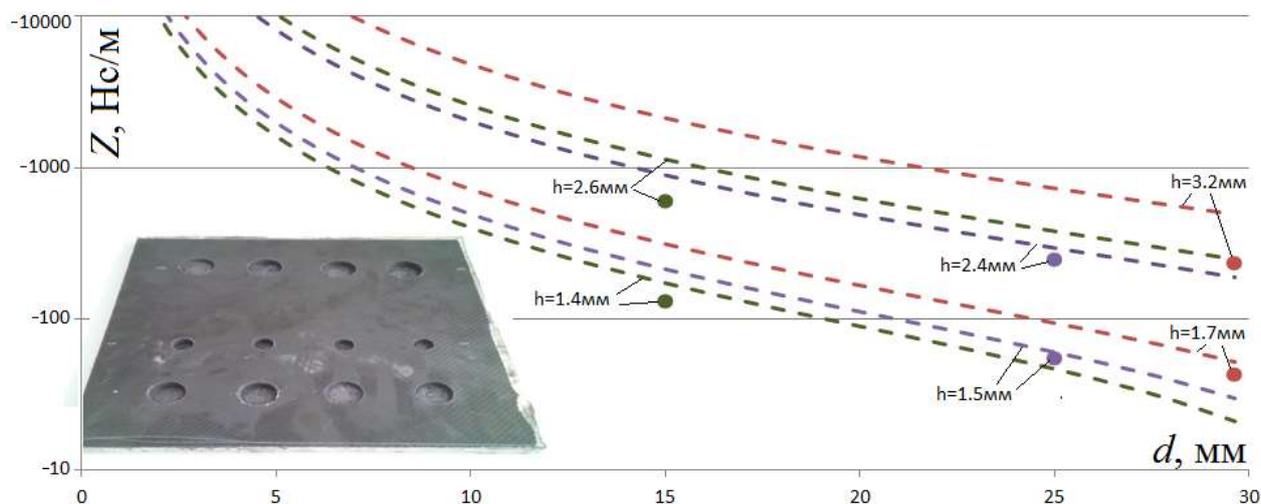


Рис. 5. Результаты измерений механических импедансов в образце из углепластика ВКУ-39 в сравнении с моделью заземлённой пластины

Функция коэффициента передачи $P(X_H, \nu_H)$ может иметь резонанс контактного наконечника и резонанс всей стержневой колебательной системы датчика. Могут присутствовать оба или только один тип резонанса, а так же может меняться порядок их следования с ростом внешней нагрузки. Для обеспечения возможности вычисления резонансов по разработанной модели датчика и расчета номинальной физической чувствительности метода контроля (как отношения ΔP к ΔX_H) были вычислены в аналитическом виде формулы для расчета резонансов как экстремумов функции $P(X_H, \nu_H)$ по формуле (4).

Для верификации модели импедансного преобразователя было выполнено сравнение экспериментальных и аналитических величин МИ для искусственных дефектов в виде плоскодонных фрезерований в толстостенном образце из углепластика ВКУ-39 (Рис. 5) разных диаметров.

МИ в центре полученных колебательных мембран вычислен с использованием модели заземленной по периметру круглой пластины диаметром d , возбуждаемой в центре нормальной сосредоточенной силой.

Результаты верификации приведены на Рис. 5. Измеренные величины МИ обладают удовлетворительной сходимостью с расчётными. Отмечено выполнение установленных ранее законов соответствия между теоретическими для модели заземленной пластины и экспериментальными величинами МИ.

Четвёртая глава посвящена аналитическому и экспериментальному исследованию влияния основных типов дефектов в МСК из ПКМ на величину механического импеданса в зависимости от их размера и глубины залегания.

Величина X_n колеблется от X_{\min} (над центрами сот слоя II) до X_{\max} (над стенками сот), а u_n соответственно от u_{\min} до u_{\max} (над центрами сот).

Анализ величин МИ над отслоением обшивки первого слоя МСК от второго слоя по мере роста дефекта был выполнен на основании модели заземлённой пластинки. Сделан вывод, что величина МИ над центром дефекта будет существенно отличаться от МИ над центром соты слоя II в годной конструкции в меньшую по модулю сторону и будет меньше X_{\min} . Так же сделан вывод о возможности корректировки по экспериментальным точкам модельной функции МИ Z' по величине модуля Юнга E'_1 первого слоя.

Особенностью дефектов в виде разрушения сотоблока слоя II или непрочности между слоями II и III является наличие фрагмента сотоблока «подвешенного» к обшивке первого слоя. Анализ изменения величин МИ над дефектами выполнен с помощью предложенной модели однослойной пластины, заземленной по периметру, утяжелённой сотоблоком. Сделан вывод, что над дефектом должна наблюдаться индикация от стенок сот (в виде разницы МИ), при одновременном снижении величин МИ от краев к центру дефекта.

Для анализа изменения величин МИ над дефектами в виде расслоения в обшивке третьего слоя или непрочности между третьим и четвёртым слоями выбрана модель трехслойной упругой пластины, заземленной по контуру, колеблющейся под действием нестационарной локальной распределенной нагрузки вогнутой параболической формы на упругом основании Винклера. Показано, что при наличии упругого основания возрастает величина реактивной составляющей импеданса. Сделан вывод, что над стенками сот должно наблюдаться малое и относительно равномерное падение реактивной составляющей импеданса и уменьшение средней величины коэффициента u_n .

Разработан полномасштабный макет автоматизированного комплекса для НК деталей и агрегатов из ПКМ акустическими методами, реализующий, в том числе, автоматизированный импедансный контроль (Рис. 6). По результатам анализа типов искусственных дефектов, изготовлены конструктивно-подобные образцы МСК деталей мотогондолы авиационного двигателя с обшивками из углепластика ВКУ-39 с искусственными дефектами (Рис. 6).

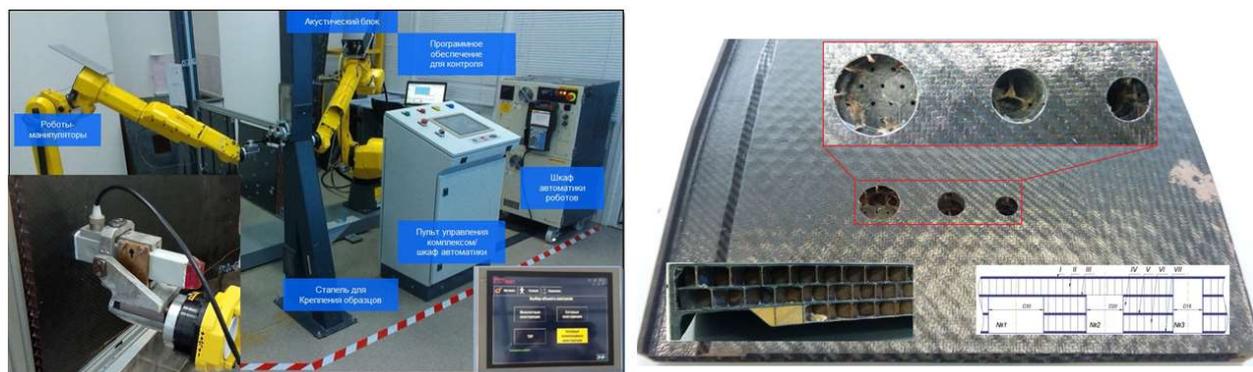


Рис. 6. Макет автоматизированного комплекса для НК деталей из ПКМ акустическими методами и КПО корпуса мотогондолы двигателя

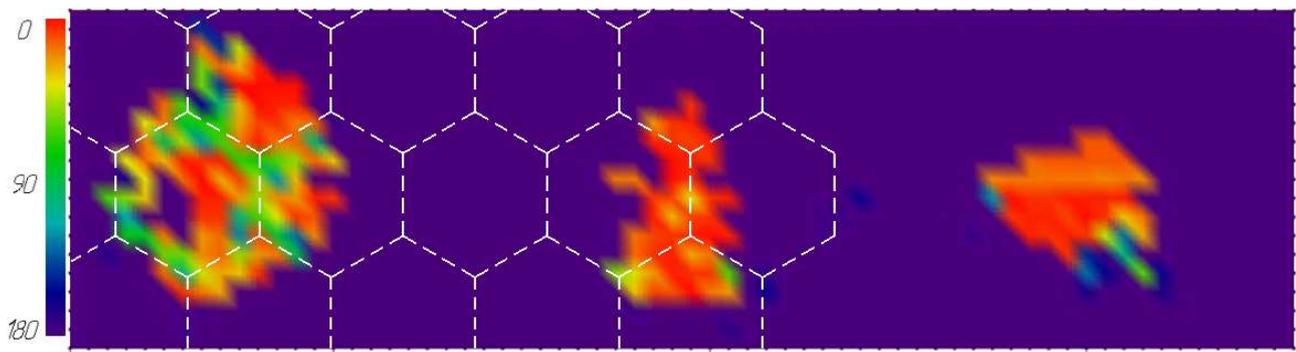


Рис. 7. С-скан по фазовому смещению точек со срабатыванием АСД от точки $Z_H = 0$ при начале координат в центре зоны настройки АСД

Проведена экспериментальная проверка возможности оценки размера и дискретной глубины залегания дефектов в МСК из ПКМ с использованием ручных серийных импедансных дефектоскопов путём проверки соответствия предсказанных по результатам аналитического исследования величин ряда амплитудно-фазовых параметров контроля по отношению к экспериментальным замерам на искусственных дефектах в ПКМ на разных глубинах. Подтверждено полное соответствие экспериментальных и аналитических данных для всех типов дефектов (Рис. 7). Выбраны критерии для различения дискретных глубин дефектов в МСК по отклонению маркера от направления на точку «отрыва датчика от поверхности» (в которой $Z_H = 0$) в точках со срабатыванием автоматической сигнализации дефектов и положению маркера относительно зоны настройки АСД для годного изделия.

Для экспериментальной проверки возможности определения размеров и глубины дефектов по численной величине импеданса на КПО было проведено сканирование с использованием созданного макета комплекса. Полученные данные были оцифрованы и для каждой точки с использованием специально созданного программного обеспечения на основании рассчитанных ранее модельных амплитудно-фазовых годографов (Рис. 4) были вычислены соответствующие величины реактивной составляющей МИ X_H и коэффициента энергетических потерь ν_H . Результаты приведены в виде С-сканов по X_H (Рис. 8, а; по модулю) и по абсолютной (полной) величине механического импеданса $Z_H = R_H + jX_H = \nu_H |X_H| + jX_H$ (Рис. 8, б; с медианной фильтрацией).

Дефект №3 надёжно идентифицируется как визуально по С-сканам X_H и Z_H , так и численно по величинам $X_H < X_{min}$ и $\nu_H > \nu_{max}$. Дефект №2 надёжно идентифицируется визуально по С-сканам X_H и Z_H по наличию индикации стенок сот и резкому уменьшению по модулю величин X_H вдоль «радиальных» стенок сот. Над дефектом №1 величины реактивной составляющей МИ X_H в соответствии с анализом незначительно уменьшились до $-(120—125)$ Н·с/м по сравнению с фоном, но над стенками сот наблюдается надёжно фиксируемое падение Z_H до $135—140$ Н·с/м по сравнению с фоном в $175—200$ Н·с/м. По С-скану по Z_H (Рис. 8, б) можно отметить равномерное изменение величин импеданса в пределах одной стенки сот не более 10-15%. Таким образом, было подтверждено соответствие экспериментальных и аналитических данных.

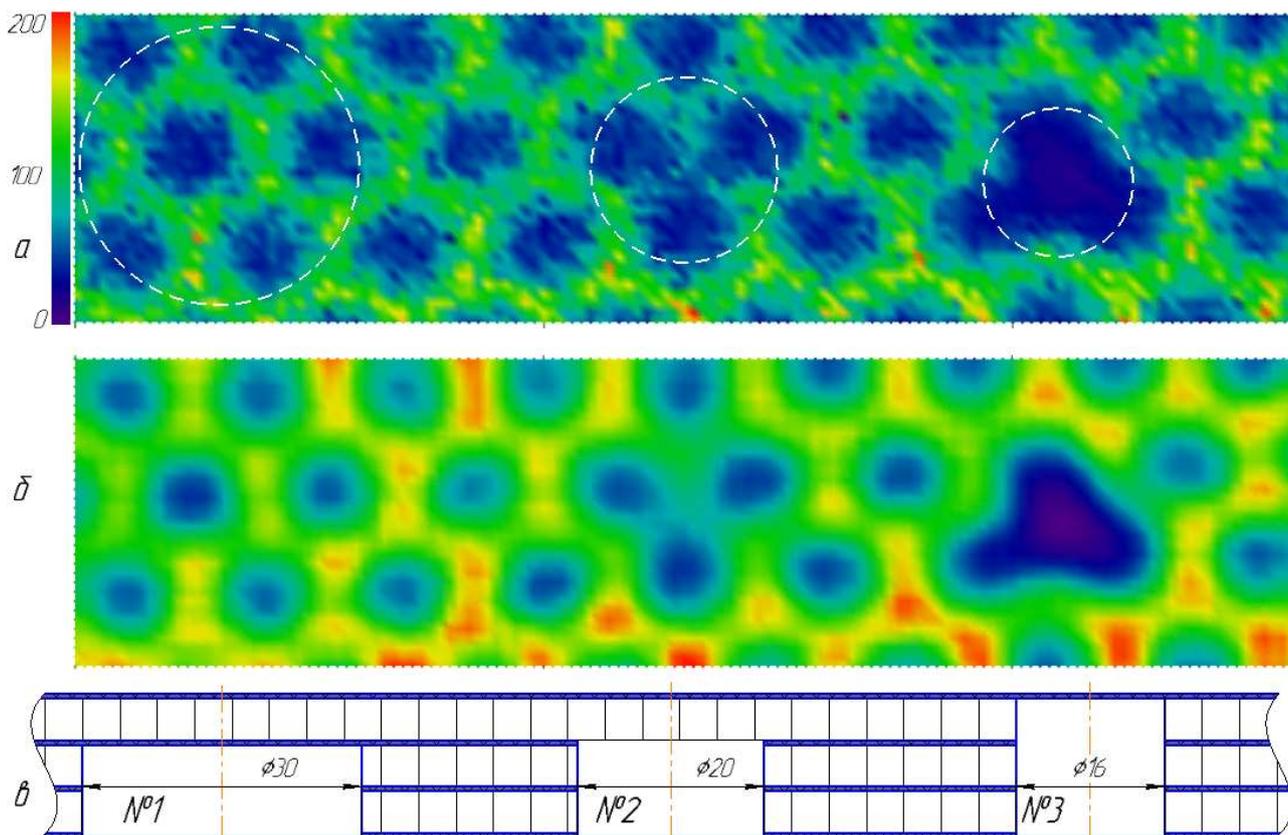


Рис. 8. С-сканы по реактивной составляющей (*a*; по модулю) и абсолютной величине механического импеданса (*б*; с медианной фильтрацией) в Н·с/м

Пятая глава посвящена разработке методик определения глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса.

На основе выполненных исследований разработана методика, которая может являться руководством по оценочному определению условного размера и дискретной глубины залегания дефектов при проведении неразрушающего контроля качества трех-, пяти и семислойных сотовых конструкций, деталей и узлов из ПКМ акустическим импедансным методом с использованием серийных дефектоскопов. Данная методика включена в состав методического материала ММ 1.2.165-2015 «Акустический контроль деталей из ПКМ мотогондолы двигателя» с изменениями №№ 1 и 2 и внедрена при серийном производстве мотогондол авиационных газотурбинных двигателей серии ПД-14 на предприятиях АО «ОДК-Авиадвигатель» и в работах ФГУП «ВИАМ».

В соответствии с методикой производится оценка ряда численных критериев и методических признаков, приведенных в Таблице 1 и на Рис. 9. Поскольку описанные критерии основаны преимущественно на оценочных визуальных признаках с высокой зависимостью результата от квалификации дефектоскописта, достоверность различения глубин составляет около 90-95%. В случае наличия неоднозначных признаков, подходящих для разных дискретных глубин, следует принимать глубину дефекта равной той, для которой выполняется наибольшее число критериев в Таблице 1, или при равенстве количества критериев – равной наибольшей глубине из возможных.

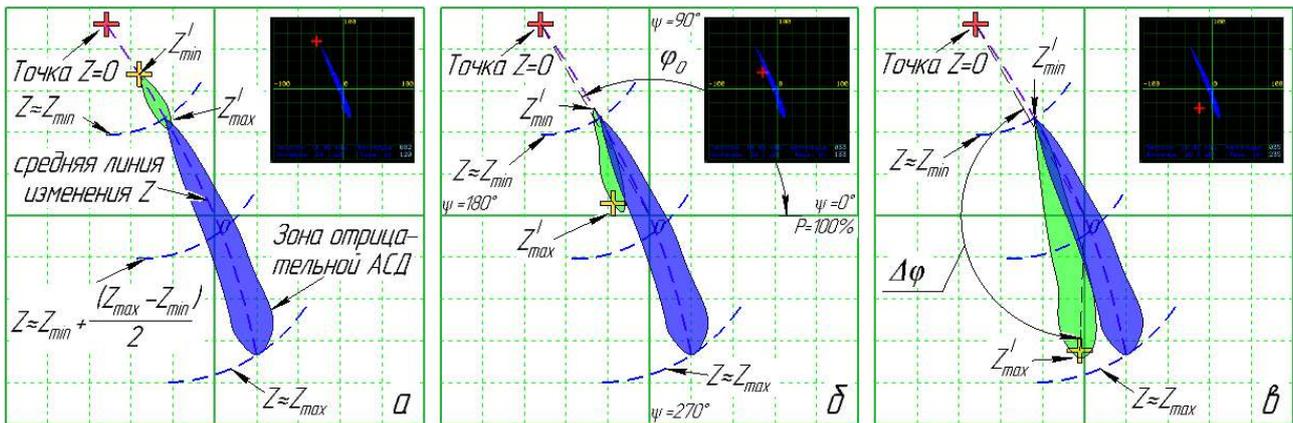


Рис. 9. Положение зоны настройки АСД для годного изделия и зон смещения маркера над дефектами в/под первым (а), вторым (б) и третьим (в) слоями МСК

Таблица 1

Критерии и признаки	Дискретная глубина дефекта		
	В слое I или между I и II	В слое II или между II и III	В слое III или между III и IV
Величина Z'_{min}	$< Z_{min}$	$\leq Z_{min}$	$\cong Z_{min}$
Величина Z'_{max}	$\cong Z_{min}$	$\approx Z_{min} + (0,1 - 0,5) \cdot (Z_{max} - Z_{min})$	$\approx Z_{min} + (0,5 - 0,9) \cdot (Z_{max} - Z_{min})$
Плавное изменение величины МИ Z при радиусном сканировании	Да	Нет	Нет
Отсутствие АСД над центрами сот слоя II	Нет	Нет	Да (при наличии)
Величина $\Delta\varphi$ для Z'_{max}	$\pm(0 - 10)^\circ$	$\pm(10 - 90)^\circ$	$\pm(90 - 180)^\circ$

Разработана методика по определению условного диаметра и глубины залегания дефектов при проведении неразрушающего контроля трёх-, пяти и семислойных сотовых конструкций, деталей и узлов из ПКМ по величине механического импеданса при автоматизированном производственном контроле с использованием разработанных модельных зависимостей для импедансометрии и оценки влияния дефектов на величину МИ.

Методику можно разделить на два основных этапа. На первом этапе с использованием моделирования импедансного преобразователя, специальных методик корректировки данной модели и измерения контактной гибкости для материала обшивки изделия на базе автоматизированной установки для акустического импедансного контроля создается импедансомер и производится построение С-сканов по поверхности конструктивно-подобных образцов и контролируемого изделия по величинам реактивной составляющей механического импеданса X_H , абсолютной величине МИ Z_H и коэффициента энергетических потерь ν_H . На втором этапе с использованием КПО с искусственными дефектами производится уточнение модельных зависимостей

для расчета диаметров и глубин дефектов по слоям, и по данным С-сканов пошагово по ряду критериев сначала производится определение дискретных глубин дефектов по слоям (или между слоями), а затем производится расчет размера и глубины дефекта в конкретном слое с использованием уточненных модельных зависимостей. Общая блок-схема методики приведена на Рис. 10.

Основные выводы и результаты:

1. Установлено, что количественную информацию о условном размере и глубине дефекта в многослойной сотовой конструкции из ПКМ можно связать с численными величинами механического импеданса на поверхности объекта контроля, картина которых в годном изделии носит периодический характер в соответствии с расположением стенок сот.

2. Разработана и экспериментально проверена математическая модель в аналитическом виде совмещенного импедансного преобразователя для численного измерения величины механического импеданса на основе существующих методов неразрушающего контроля.

3. Предложена расчётно-экспериментальная методика определения динамической контактной гибкости сухого точечного контакта для ПКМ, основанная на сравнении выходного напряжения датчика на холостом ходу и при установке датчика на толстостенный образец. Установлена величина контактной гибкости для углепластика ВКУ-39 при контакте с датчиком ПАДИ-8-02 – $39,2 \times 10^{-8}$ Н/м, а также для датчика ПАДИ-7 – $18,2 \times 10^{-8}$ Н/м.

4. Предложена методика корректировки модели импедансного преобразователя для установления точных резонансных режимов путём замены констант волнового сопротивления и волнового числа звукопровода линейными функциями от частоты, а также методика вычисления данных функций путём решения системы из 4 уравнений по результатам серии замеров на конкретном датчике. Получены графики величин полного внутреннего сопротивления датчиков ПАДИ-8-02 и ПАДИ-7 на всём диапазоне частот.

5. Впервые для ПКМ (углепластик ВКУ-39) с помощью модельного расчёта (с учётом корректировок) получены и верифицированы зависимости между механическим импедансом на поверхности изделия и величинами комплексных напряжений на пьезоэлементах для датчика ПАДИ-8-02 на частотах 2,1 и 10,48 кГц и датчика ПАДИ-7 на частоте 6,2 кГц, а также соответствующие амплитудно-фазовые годографы при различных потерях.

6. Показано, по результатам математического моделирования и экспериментальных исследований, что при расположении дефекта: в/под I слоем – величина механического импеданса над центром дефекта будет существенно отличаться от импеданса над центром соты слоя II в годной конструкции в меньшую по модулю сторону; в/под II слоем – над дефектом наблюдается индикация от стенок сот (в виде разницы механических импедансов), при одновременном снижении величин реактивного и полного импедансов от краев к центру дефекта; в/под III слоем – над стенками сот наблюдается малое и равномерное падение реактивной составляющей импеданса и уменьшение энергетических потерь.

7. Разработаны и опробованы технологии, методики и средства акустического импедансного метода неразрушающего контроля, обеспечивающие повышение достоверности и информативности НК изделий в виде многослойных сотовых конструкций из ПКМ за счёт получения количественной информации о размерах дефектов и их координатах по глубине в условиях производства и эксплуатации. В том числе:

– Методика определения дискретной глубины и условного размера дефекта по слоям в трёх-, пяти- и семислойных сотовых конструкциях при ручном контроле серийными импедансными дефектоскопами. Методика включена в ММ 1.2.165-2015 «Акустический контроль деталей из ПКМ мотогондолы двигателя» и внедрена при производстве мотогондол авиационных двигателей серии ПД-14.

– Методика определения условного размера и глубины залегания дефектов в трёх-, пяти- и семислойных сотовых конструкциях из ПКМ с использованием С-сканов по величине механического импеданса при автоматизированном производственном неразрушающем контроле.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Определение глубины залегания дефектов в многослойных конструкциях из ПКМ акустическими методами по величине механического импеданса / В.Ю. Чертищев [и др.] // Дефектоскопия. 2018. №8. С. 21–34. (0,88 п.л. / 0,44 п.л.).

2. Выявление расслоений и непроклеев в 5- и 7-слойных сотовых деталях и элементах конструкций из ПКМ акустическим методом импеданса / В.Ю. Чертищев [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №3. С. 23–26. (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).

3. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин / В.Ю. Чертищев // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 65-79. (0,94 п.л. / 0,94 п.л.).

4. Связь прочностных характеристик, пористости и данных ультразвукового контроля для образцов ПКМ полученных по автоклавной и инфузионной технологии / В.Ю. Чертищев [и др.] // Контроль. Диагностика. 2018. №11. С. 40–51. DOI: 10.14489/td.2018.11. pp.040-05. (0,69 п.л. / 0,23 п.л.).

5. Определение пористости монолитных зон деталей и агрегатов самолета, изготавливаемых из ПКМ, с применением ультразвукового эхоимпульсного метода / В.Ю. Чертищев [и др.] // Дефектоскопия. 2019. №1. С. 3–9. (0,44 п.л. / 0,22 п.л.).

6. Повышение производительности ультразвукового контроля изделий с плоскопараллельными границами цифровой фокусировкой антенных решеток методом C-SAFT / В.Ю. Чертищев [и др.] // Труды ВИАМ: эл. науч.-технич. ж. 2016. №10 (46). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. (1,19 п.л. / 0,60 п.л.).

7. Влияние морфологии пор на ультразвуковой контроль пористости в углепластике эхоимпульсным методом / В.Ю. Чертищев [и др.] // Контроль. Диагностика. 2018. №8. С. 22–29. (0,5 п.л. / 0,17 п.л.).