

На правах рукописи

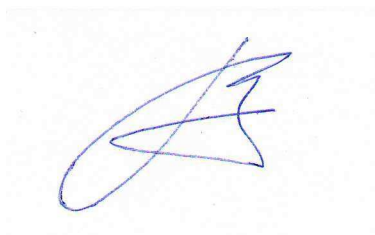
УДК 620.192.63

Бойчук Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК**

Специальность 05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2017

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

Научный руководитель: кандидат технических наук
СТЕПАНОВ Александр Вячеславович

Официальные оппоненты: доктор технических наук (05.02.11)
ВОПИЛКИН Алексей Харитонович,
НПЦ «Эхо+», генеральный директор

кандидат технических наук (05.02.11)
ГРИГОРЬЕВ Михаил Владимирович,
ФГАУ «НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ
им.Н.Э.Баумана», заместитель директора

Ведущая организация: **НИУ «МЭИ»** (г. Москва)

Защита состоится «02» марта 2017 года в 16:00 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.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных 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>

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



А.В. Коновалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В настоящее время в авиационной промышленности в монолитных конструкциях современных гражданских и военных самолетов, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов (ПКМ), широко применяются углепластики. Для обеспечения контроля качества изготавливаемых монолитных конструкций из углепластика служат неразрушающие методы контроля.

С каждым годом количество и сложность изготавливаемых из углепластиков монолитных конструкций, применяемых в современных самолетах, увеличивается. В связи с чем, существующие технологии неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика уже не обеспечивают требуемую производительность и выявляемость таких наиболее опасных производственных дефектов, как расслоения, посторонние включения и пористость, а также эксплуатационных – ударных повреждений и отслоений.

Кроме того, наиболее перспективные методы ультразвуковой дефектоскопии, использующие технику антенных решеток (АР), не обеспечены в Российской Федерации (особенно в авиации) нормативно-технической документацией по неразрушающему контролю монолитных конструкций из углепластика. Этому в свою очередь препятствует отсутствие знаний по распространению ультразвуковых волн в углепластике при различных углах их ввода в объект контроля, а также по особенностям контроля монолитных конструкций из углепластика сложной формы с использованием техники АР.

Цель работы – повышение качества неразрушающего контроля монолитных деталей и конструкций из углепластика за счет создания технологии ультразвукового контроля с использованием техники антенных решеток.

Задачи исследований:

1. Проведение анализа существующих методов контроля монолитных деталей и конструкций из углепластика.
2. Проведение исследований особенностей распространения ультразвуковых волн в монолитных конструкциях из углепластика и выбор оптимальных типов волн для надежного выявления дефектов.
3. Выбор оптимальных параметров контроля монолитных деталей и конструкций из углепластика при использовании техники ультразвуковых АР.
4. Создание акустического контакта между АР и криволинейной поверхностью монолитных интегральных конструкций из углепластика.
5. Разработка и внедрение технологий по неразрушающему контролю деталей и конструкций из углепластика с использованием техники ультразвуковых АР.
6. Разработка алгоритма и его реализация при проведении оценки вероятности обнаружения дефектов в монолитных деталях и конструкциях из

углепластика по предложенной технологии неразрушающего контроля с применением техники ультразвуковых АР.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы математического и статистического анализа с применением программы MathCad и специализированного программного обеспечения TomoView. Для получения экспериментальных данных использовались поверенные средства измерения, дефектоскопы OmniScan MX и A-1550 «InrtoVisor», а также метрологически аттестованные контрольные образцы из углепластика.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Изучены особенности распространения продольных и поперечных ультразвуковых волн в углепластике и показано, что наиболее эффективным является использование продольной волны с углом ввода не более 10° .

2. Установлено, что при контроле антенными решетками монолитных деталей и конструкций из углепластика с криволинейной поверхностью использование традиционных призм из полистирола или оргстекла приводит к ошибкам интерпретации результатов контроля. Для корректного измерения амплитуд эхо-сигналов от дефектов и донной поверхности объекта контроля в качестве контактной среды необходимо использовать аквален или комбинированную контактную среду, состоящую из воды и аквалена.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Предложенные технологии контроля внедрены на филиале ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого» при неразрушающем контроле деталей и конструкций из ПКМ, применяемых в воздушных судах.

2. Разработана методика для оценки вероятности обнаружения дефектов от их размеров в монолитных деталях и конструкциях из углепластика при ультразвуковом эхо-импульсном неразрушающем контроле с использованием антенных решеток и одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей.

3. Результаты диссертационной работы были использованы в учебном процессе при проведении стажировки специалистов авиакосмической отрасли промышленности в рамках реализации Президентской программы повышения квалификации инженерных кадров на 2012-2014 годы по теме «Современные композиционные материалы для авиационной техники, технологии их получения, методы исследований и испытаний». Также результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению на предприятиях АО «АэроКомпозит», ПАО «Корпорация «Иркут» и других авиастроительных предприятиях.

На защиту выносятся:

1. Границы применимости наклонного ввода ультразвуковых волн при контроле монолитных деталей и конструкций из углепластика ультразвуковым эхо-импульсным методом.

2. Влияние схемы укладки слоев препрега углепластика на распространение ультразвуковых колебаний при их нормальном вводе.

3. Создание акустического контакта при неразрушающем контроле интегральных монолитных конструкций из углепластика.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах, симпозиумах:

- 10-ой Европейской конференции по неразрушающему контролю «ECNDT 2010». Москва, 2010;

- 17-ой, 18-ой, 19-ой и 20-ой Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва, 2011-2014;

- 19-ой Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. Самара, 2011;

- 19-ой и 20-ой Международных конференциях «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». Гурзуф, 2011;

- научно-техническом семинаре «Исследование физико-химических свойств полимерных композиционных материалов». ВИАМ, Москва, 2011 г.;

- международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России». Москва, 2012;

- международной молодежной конференции «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья - основа инновационного развития экономики России». Геленджик, 2012;

- всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2012». Москва, 2012;

- 12-ой Международной конференции по неразрушающему контролю «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering». Портоторж, 2013.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, из которых 5 работ опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, общим объемом 1,3 п.л.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и результатов работы, литературы из 126 наименований и приложения. Общий объем составляет 202 с., 79 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ типов ответственных деталей и конструкций из ПКМ, в частности монолитных конструкций из углепластика, технологий их производства, характерных дефектов, а также анализ существующих методов их неразрушающего контроля. В результате анализа установлено:

—ПКМ широко используются в средне- и высоконагруженных агрегатах самолетов, таких как обтекатели, предкрылки, закрылки, кессон крыла, стабилизатор и крыло.

— В процессе производства и эксплуатации монолитных деталей и конструкций из ПКМ, в особенности из углепластика, возникают различного рода дефекты, которые влияют на технические и эксплуатационные характеристики готового изделия. Наиболее опасными производственными дефектами монолитных ПКМ являются: пористость, расслоения, посторонние включения. К наиболее опасным эксплуатационным дефектам относятся: ударные повреждения, отслоения, трещины.

— На сегодняшний день для НК деталей и конструкций из ПКМ в основном используются акустические методы контроля, из которых наибольшее применение нашли теневой, эхо-импульсный с использованием одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), эхо-импульсный с лазерным возбуждением ультразвуковых колебаний, импедансный, реверберационно-сквозной и эхо-импульсный с использованием ультразвуковых антенных решеток. Каждый из перечисленных методов контроля имеет как свои преимущества, так и недостатки. В частности, использование теневого, эхо-импульсного с применением одноэлементных ПЭП, эхо-импульсного с лазерным возбуждением ультразвуковых колебаний, импедансного, реверберационно-сквозного методов в ручном варианте позволяет проводить контроль как при производстве деталей и конструкций из ПКМ, так и в условиях эксплуатации готового изделия. Однако в этом случае достоверность контроля очень низкая из-за высокого влияния человеческого фактора и малой информативности результатов контроля, а производительность контроля очень низкая (не превышает $2...2,5 \text{ м}^2/\text{ч}$). Также отсутствует возможность контроля некоторых зон интегральных конструкций, в частности радиусных зон Т-образного соединения элементов жесткости с обшивкой стрингерных панелей. Применение автоматизированных систем увеличивает достоверность результатов контроля, но существенно увеличивает затраты на приобретаемое оборудование (порядка в 100 и более раз), а использование их в условиях эксплуатации и ремонта готового изделия практически невозможно. Наиболее перспективным является эхо-импульсный метод с использованием техники ультразвуковых антенных решеток. Использование данной техники позволяет увеличить надежность контроля, обеспечить доступ в труднодоступные места при контроле объектов сложной формы, легче интерпретировать результаты контроля, улучшить

энергетические характеристики (отношение «сигнал-шум»), повысить производительность контроля.

В первой главе также проведен литературный обзор по вероятностной оценке достоверности неразрушающего контроля, по результатам которого установлено, что численная оценка вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле качества продукции, как завершающий этап разработки методики, является как за рубежом, так и в России обязательным условием внедрения новых методик НК ответственных изделий и объектов. Кроме того, данные о вероятности обнаружения/пропуска дефектов различных размеров необходимы конструкторам для внедрения современных методов расчёта ресурса и периодичности технических осмотров изделий авиационной техники.

В заключение первой главы сформулирована цель и основные задачи работы.

Вторая глава посвящена теоретическому и экспериментальному обоснованию выбора способа ввода ультразвуковых волн в углепластик при использовании эхо-импульсного метода контроля.

С этой целью проведены исследования особенностей прохождения ультразвуковых волн через углепластик под разными углами относительно нормали к поверхности их ввода в контролируемый материал. Схема проведения эксперимента представлена на Рис. 1.

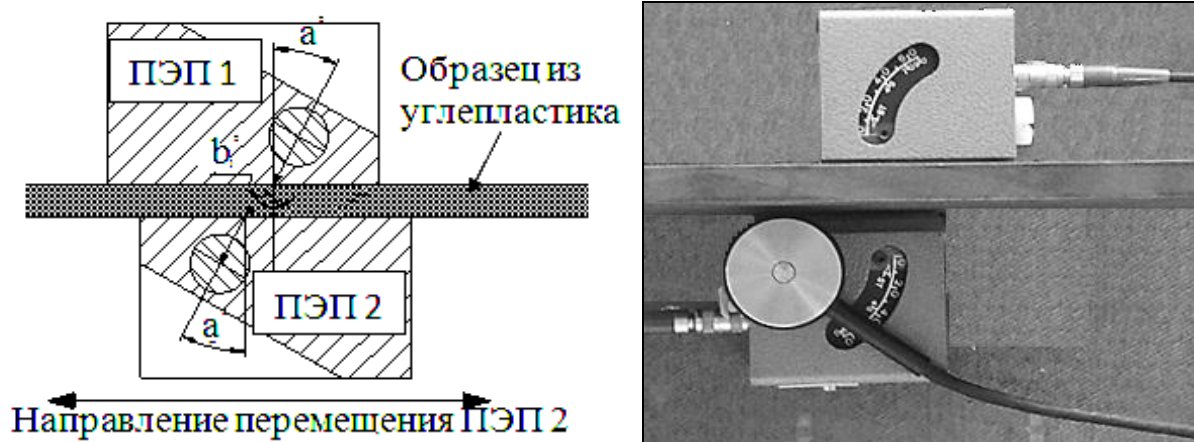
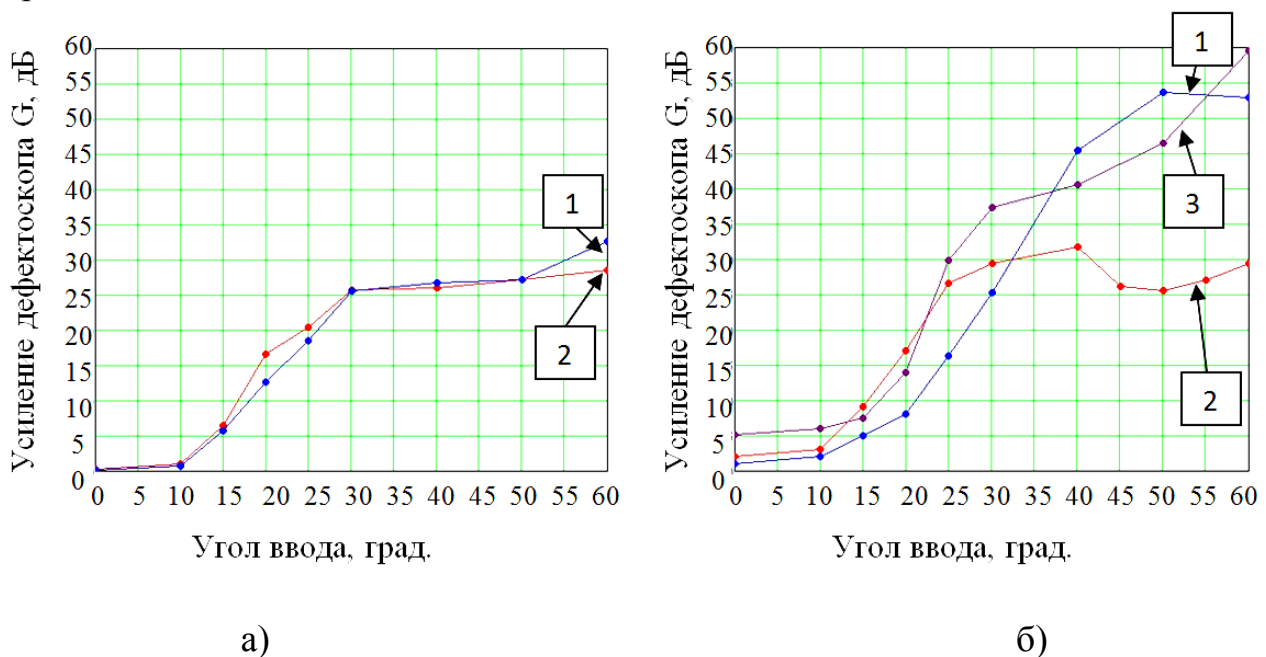


Рис. 1. Схема проведения эксперимента по определению изменения амплитуды прошедшей ультразвуковой волны через углепластик от угла ввода относительно нормали к поверхности

Исследования проводились на образцах с разными типами укладки слоев и при прозвучивании вдоль 3-х направлений расположения углеродных волокон в образцах: вдоль направления расположения волокон слоев укладки «0°»; вдоль направления расположения волокон слоев укладки «90°»; вдоль направления

расположения волокон слоев укладки «+45°». Результаты исследований представлены на Рис.2



- 1 – при прозвучивании вдоль расположения волокон слоев укладки «90°»
- 2 – при прозвучивании вдоль расположения волокон слоев укладки «0°»
- 3 – при прозвучивании вдоль расположения волокон слоев укладки «45°»

Рис. 2. Зависимость усиления дефектоскопа для прошедшей продольной волны от угла ее ввода для образцов с укладкой слоев препрега по схеме:

- а) $[0^\circ/90^\circ]$;
- б) $[+45^\circ/(+45^\circ; -45^\circ)_4/(0^\circ;0^\circ;90^\circ; 0^\circ;0^\circ)_9/(-45^\circ; +45^\circ)_4/+45^\circ]$

В результате было установлено, что при ультразвуковом эхо-импульсном методе контроля углепластика можно использовать только продольные объемные волны с углами ввода в материал объекта контроля (ОК) от 0° до 10° . При углах более 10° продольные волны использовать нельзя, т.к. на границах слоев матрица-волокно происходят эффекты переотражения и рассеивания ультразвуковых колебаний, вследствие чего становится невозможным выделить полезный сигнал на фоне шумов структуры материала. Также установлено, что прохождение колебаний через углепластик под углами более 10° сильно зависит и от схемы укладки слоев препрега. Поперечные объемные волны при контроле углепластиков использовать невозможно, поскольку их вообще невозможно идентифицировать. Также установлено, что схема укладки слоев препрега углепластика в монолитных ПКМ не оказывает существенного влияния на распространение ультразвуковых колебаний при их нормальном вводе в ОК.

Третья глава посвящена экспериментальным неразрушающим исследованиям специальных образцов из углепластика, подобных типичным деталям и конструкциям из ПКМ простой и сложной формы, содержащих искусственные дефекты, имитирующие типичные производственные и эксплуатационные дефекты ПКМ, с использованием ультразвуковых антенных решеток. Исследования проводились на плоских образцах из углепластиков ВКУ-17КЭ0,1, КМУ-11Тр, УТ-900 /RTM-4, образцах 2-х стрингерных панелей из углепластика ВКУ-17КЭ0,1, и фрагменте закрылка.

Экспериментальные исследования проводились с использованием зарубежного и отечественного дефектоскопов с антенными решетками (АР). В результате проведенных неразрушающих исследований плоских образцов выбраны оптимальные частоты ультразвуковых колебаний для обеспечения контроля конструкций из ПКМ толщиной от 2 до 24 мм и минимальных значений неконтролируемых мертвых зон (Таблица 1), а также выбраны оптимальные параметры контроля при использовании дефектоскопов с АР (Таблица 2). Отработаны приемы получения результатов контроля в виде двумерных цветных изображений внутренней структуры материала в реальном масштабе времени.

Таблица 1

Тип преобразователя, Частота	Толщина объекта контроля (ОК), мм	Величина «мертвой зоны», мм
ФАР Olympus, 5 МГц	2...10	0,3...0,5
ФАР Olympus, 3,5 МГц	10...24	0,5
АР «АКС», 4 МГц	2...24	0,5
Одноэлементный ПЭП, 5 МГц	2,5...10	0,5
Одноэлементный ПЭП, 2,5 МГц	10...17	0,5...0,7

Таблица 2

Наименование объекта контроля	Монолитные детали и конструкции из углепластика толщиной от 2 мм до 24 мм
Рабочие частоты	3,5 МГц...5 МГц - при толщине ОК 2...10 мм; 2,5 МГц...4 МГц - при толщине ОК 10...24 мм
Углы ввода	От 0° до 10°
Глубина фокуса ультразвукового пучка (для АР в режиме фазировки)	Нпризмы+2 мм (Нпризмы – толщина призмы)
Длительность зондирующего импульса	50 нс – при толщине ОК 2...10 мм; 70 нс – при толщине ОК 10...24 мм

Таблица 2 – Продолжение

Количество элементов в активной группе (для АР в режиме фазировки)	8
Границы обзора, град. (для АР в режиме синтезированной апертуры)	7-8
Чувствительность контроля	Эквивалентна выявлению плоскодонного отражателя \varnothing (5мм... 7 мм)
Максимальная производительность, м ² /ч	10 – для АР в режиме синтезированной апертуры; 22 – для АР в режиме фазировки

Проведены исследования влияния кривизны поверхности интегральных монолитных конструкций из углепластика на амплитуду прошедшего сигнала через границу раздела «антенная решетка – изделие» для различных материалов контактной среды. Исследования проводились на двух-стрингерных образцах и фрагменте закрылка из углепластика с переменным радиусом кривизны. Для создания акустического контакта между антенной решеткой и изделием с выпуклой поверхностью были разработаны специальные оправки из различных материалов контактной среды и установлены границы их применимости. При использовании первого типа оправки (Рис. 3а) с фазированной антенной решеткой шириной 96 мм (128 элементов) можно контролировать криволинейные конструкции из ПКМ с радиусом кривизны от 600 мм, при использовании второго типа оправки (Рис. 3б) – от 350 мм с обеспечением стабильного акустического контакта. Для сравнения, при использовании стандартных призм из полистирола минимальный радиус кривизны поверхности контролируемого изделия с выпуклой поверхностью при контроле фазированной решеткой с шириной 96 мм составляет не менее 1100 мм.

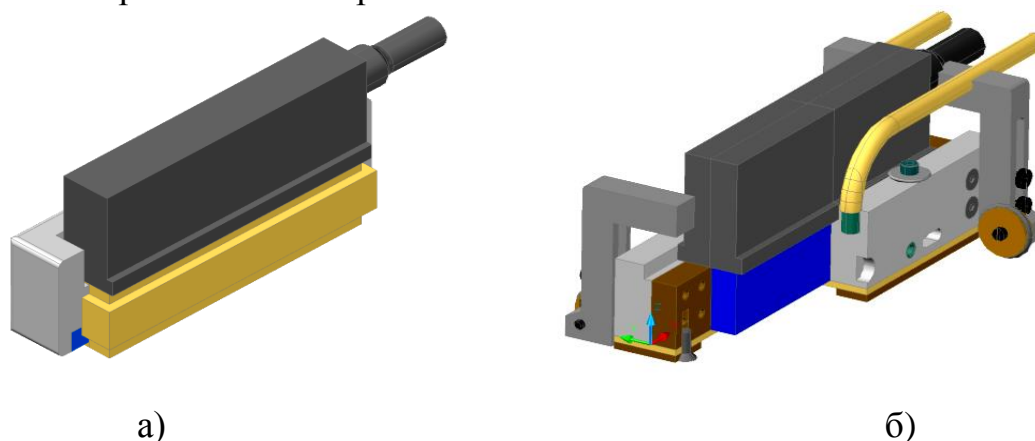


Рис. 3. Специальные оправки для создания акустического контакта между фазированной антенной решеткой и ОК с выпуклой поверхностью:

- а) оправка из оргстекла и аквалена;
 б) Оправка с водной акустической линией задержки

Для создания акустического контакта между секторной фазированной антенной решеткой и радиусной зоной Т-образного соединения стрингера с об-

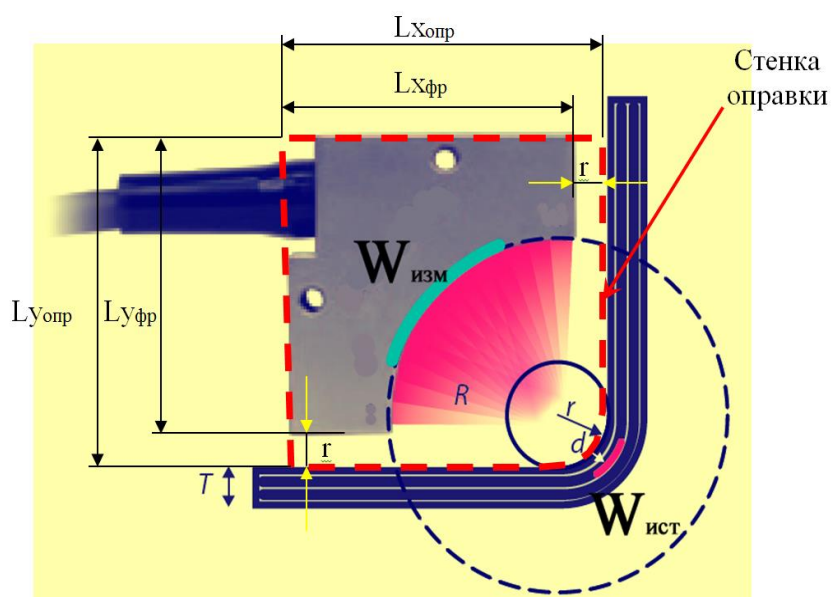


Рис. 4. Требования к оправке для секторной фазированной антенной решетки

шивкой стрингерных панелей были предложены два типа оправок с контактной средой из полистирола и аквалена, к которым разработаны специальные требования (Рис.4).

Для оценки размеров дефектов, отображающиеся на В-скане и на С-скане по оси индекса АР, которые при использовании секторных АР отображаются заведомо больше истинных значений, введено выражение, которое пе-

ресчитывает оцененные по экрану В-скана размеры дефекта в наиболее приближенные к истинным:

$$W_{ист} = \frac{W_{изм} \cdot (r + d)}{R},$$

где $W_{изм}$ – измеренное по экрану дефектоскопа значение ширины дефекта; R – радиус АР; r – внешний радиус контролируемой зоны; d – измеренная глубина залегания дефекта.

В четвертой главе представлены разработанные технологии ультразвукового неразрушающего контроля монолитных конструкций из ПКМ, в частности из углепластика, с применением антенных решеток:

1. Технологическая рекомендация (ТР) ТР 1.2.2215-2011 «Ультразвуковой контроль конструкций из углепластика с использованием фазированных решеток», которая позволяет решить задачу выявления наиболее опасных дефектов в углепластике с чувствительностью контроля, эквивалентной выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 мм, а также производительностью 30 м²/ч. С использованием данной ТР можно проводить контроль крупногабаритных элементов конструкций из углепластика: монолитных панелей (деталей с плоскопараллельными поверхностями) и панелей с выпуклой поверхностью с радиусом кривизны не менее 250 мм; элементов жесткости (стрингеров, ребер); монолитных зон трёхслойных сотовых панелей.

2.Производственные инструкции (ПИ) АПЯС412231.003.002ПИ «Неразрушающий контроль интегральных конструкций из ПКМ» и АПЯС412231.003.003ПИ «Неразрушающий контроль конструкций из ПКМ с нанесенными покрытиями различных типов», которые предназначены для НК интегральных конструкций в самолетах ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого» как при их изготовлении, так и при эксплуатации. Данные инструкции были разработаны совместно с ООО «АКС».

3.ПИ АПЯС412231.003.004ПИ «Неразрушающий контроль крупногабаритных интегральных монолитных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) акустическим методом с применением дефектоскопов с фазированными решетками типа А1550» для высокопроизводительного НК крупногабаритных деталей и конструкций из ПКМ, применяемых в ближне-среднемагистральных самолетах семейства МС-21, с использованием отечественного дефектоскопа-томографа «А1550 IntroVisor». Инструкция также разработана совместно с ООО «АКС».

Пятая глава посвящена вероятностной оценке достоверности результатов

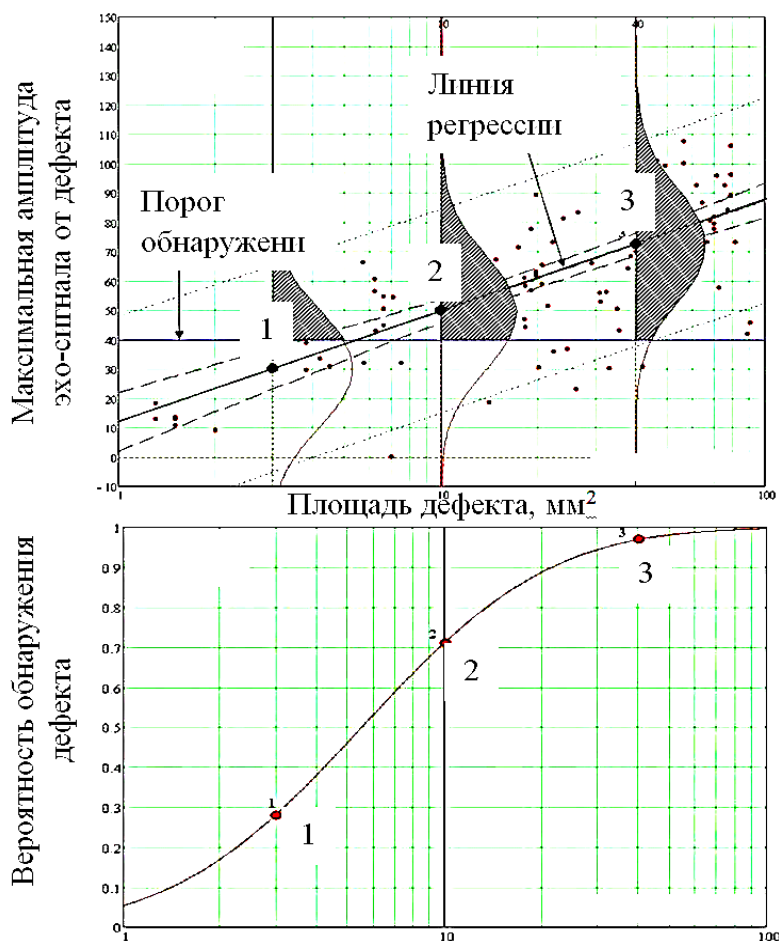


Рис. 5. Принцип транслирования данных регрессионного анализа в вероятностную зависимость

неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика с использованием предложенной технологии ультразвукового контроля с применением техники антенных решеток. Для проведения вероятностной оценки достоверности разработаны требования, созданы эскизы и изготовлены специальные образцы из углепластика ВКУ-17КЭ0,1 с искусственными дефектами разных типов и размеров, имитирующими типичные производственные и эксплуатационные дефекты ПКМ. На изготовленных образцах проведены ультразвуковые исследования с использованием предложенной технологии ТР 1.2.2215-

2011 «Ультразвуковой контроль конструкций из углепластика с использованием фазированных решеток», а также, для сравнения, с использованием существующей технологии с применением одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей. В соответствии с данными технологиями проводилась настройка оборудования и измерение значений максимальных амплитуд эхо-сигналов от искусственных дефектов в образцах.

Для обработки статистических данных, полученных в виде зависимости значений максимальных амплитуд эхо-сигналов от площадей дефектов, и построения зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров при УЗК ПКМ предложена оригинальная методика ММ 1.2.138-2012 «Определение вероятности обнаружения дефектов при ультразвуковом контроле углепластиков» и в программе MathCad реализован алгоритм математической обработки. Суть алгоритма заключается в следующем (рис. 5):

- для набора данных результатов контроля проводится линейная регрессия, по результатам которой строится линия регрессии вида $y(x) = a \cdot \ln x + b$ (x – площадь дефекта, $y(x)$ – амплитуда эхо-сигнала от дефекта, a и b – параметры линии регрессии), для которой сумма квадратов отклонений каждой из точек выборки от полученной прямой минимальна (метод наименьших квадратов). Вычисляется дисперсия линии регрессии по формуле:

$$D(y) = \frac{1}{n-k} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2,$$

где k – число коэффициентов, входящих в аналитическое выражение регрессии (для линейной регрессии $k=2$); n – число данных зависимости максимальных амплитуд эхо-сигналов от площадей дефектов.

- осуществляется транслирование линии регрессии в вероятностную зависимость путем использования порога обнаружения и нормальной функции распределения вероятностей вида:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}} dt,$$

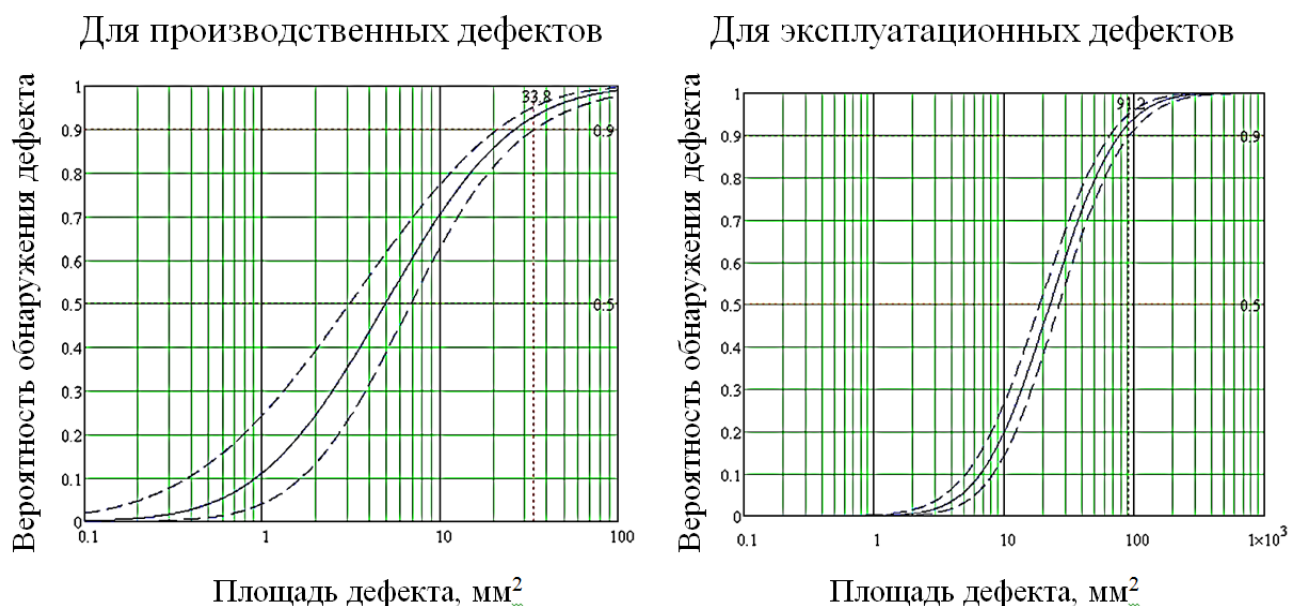
где a и σ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение (СКО) нормального распределения вероятностей. В качестве математического ожидания берется значение функции $y(x)$ в точке x_i , а в качестве СКО – корень квадратный из дисперсии линии регрессии.

- для построения границ доверительного интервала вероятности обнаружения дефектов от их размеров строятся границы доверительного интервала для регрессионной модели по формуле:

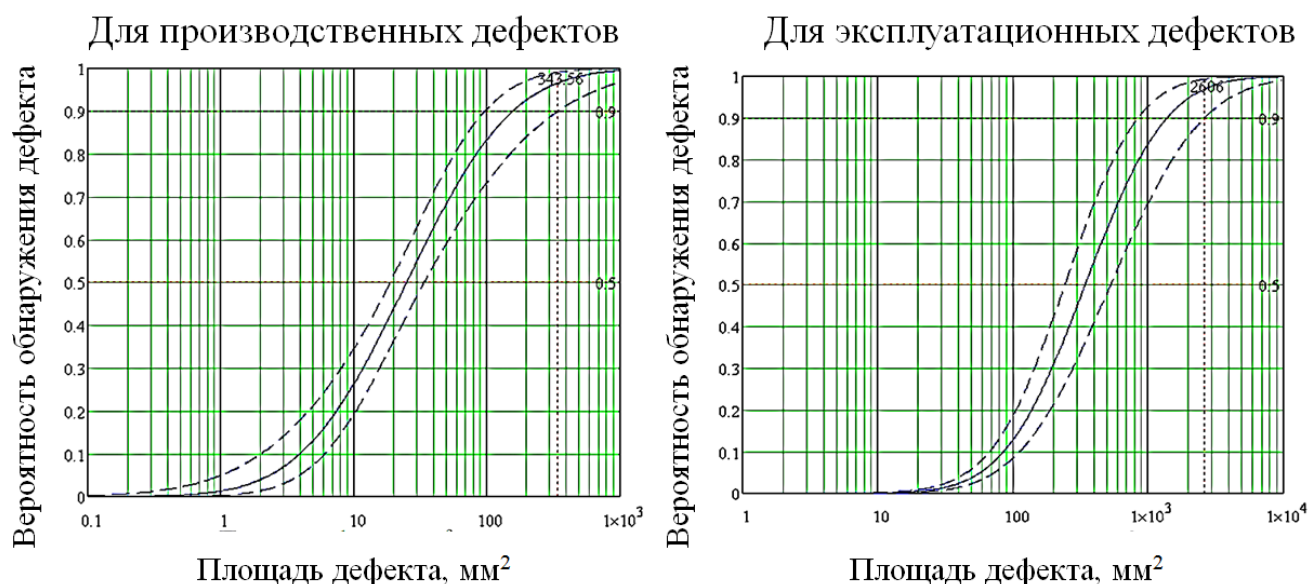
$$y_p(x) = y(x) \pm t_{p,n-2} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\ln x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \bar{x})^2}},$$

где $t_{p,n-2}$ - коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 95% и (n-2) степеней свободы; $\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n}$. После чего эти границы транслируются в вероятностную зависимость путем использования порога обнаружения и нормальной функции распределения вероятностей.

По разработанной методике обработаны полученные статистические данные, полученные при УЗК с использованием техники ультразвуковых фазированных антенных решеток и эхо-импульсного метода с использованием одноэлементных преобразователей, построены зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров с доверительными интервалами (Рис. 6) и проведен расчет величины $a_{90/95}$, представляющей значение размера дефекта, выявляющегося при неразрушающем контроле в 90% случаев с доверительной вероятностью 95% (Таблица 3).



а)



б)

Рис. 6. Зависимости вероятности обнаружения типичных производственных и эксплуатационных дефектов углепластиков от их размеров при:

- а) УЗК с использованием технологии ультразвуковых фазированных антенных решеток;
 б) эхо-импульсного метода с использованием одноэлементных преобразователей

Таблица 3

Данные при УЗК по ТР 1.2.2215-2011 «Ультразвуковой контроль конструкций из углепластика с использованием фазированных решеток»		
	$a_{90/95}$, мм ² (~Ø плоскодонного отражателя, мм)	
	УЗК образцов с производственными дефектами	УЗК образцов с эксплуатационными дефектами
Набор данных контролера 1	26,36 (5,80)	69,50 (9,41)
Набор данных контролера 2	24,95 (5,64)	61,38 (8,84)
Набор данных контролера 3	26,73 (5,83)	119,9 (12,36)
Набор данных контролера 4	21,00 (5,17)	100,33 (11,30)
Набор данных контролера 5	61,60 (8,86)	36,98 (6,86)
Набор совокупных данных контролеров 1-5	33,80 (6,56)	91,2 (10,78)

Таблица 3 - Продолжение

Данные при УЗК с использованием одноэлементных ПЭП по ТР 1.2.1942- 2009 «Ультразвуковой контроль панелей из углепластика»		
	$a_{90/95}$, мм ² (~Ø плоскодонного отражателя, мм)	
	УЗК образцов с производственными дефектами	УЗК образцов с производственными дефектами
Набор данных контролера 1	319,15 (20,16)	3221,10 (64,04)
Набор данных контролера 2	369,80 (21,70)	1778,30 (47,58)
Набор совокупных данных контролеров 1-2	343,56 (20,92)	2606,00 (57,60)

Сравнительный анализ результатов по вероятности обнаружения, представленных на Рис. 6 и в Таблице 3 показывает, что применение фазированных антенных решеток при ультразвуковом контроле монолитных конструкций из углепластика существенно увеличивает вероятность обнаружения более мелких дефектов по сравнению с применением одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей.

Общие выводы и результаты работы

1. Для контроля монолитных конструкций из ПКМ в частности из углепластика, наиболее перспективным является ультразвуковой эхо-импульсный метод с использованием ультразвуковых антенных решеток, позволяющий существенно повысить производительность контроля и выявляемость дефектов.

2. Установлено, что при контроле монолитных конструкций из углепластика можно использовать только объемные продольные волны с углом ввода в контролируемый материал от 0° до 10°. Также установлено, что схема укладки слоев препрега углепластика в монолитных ПКМ не оказывает существенного влияния на распространение продольных волн при их нормальном вводе.

3. Определены оптимальные параметры контроля монолитных конструкций из углепластика с использованием антенных решеток, обеспечивающих проведение контроля с производительностью от 7 м²/ч до 22 м²/ч, что в 3...10 раз выше чем при контроле с использованием одноэлементных преобразователей, и чувствительностью, эквивалентной выявлению контрольного отражателя диаметром от 5 мм до 7 мм, что выше, чем чувствительность при контроле с использованием одноэлементных преобразователей в 1,5...2 раза.

4. Установлено, что кривизна поверхности монолитных конструкций из углепластика сильно влияет на акустический контакт между антенной решеткой и поверхностью ОК. Для обеспечения акустического контакта между антенными решетками шириной 96 мм (128 элементов) и ОК с выпуклой поверхностью радиусом кривизны от 350 мм до 1100 мм необходимо применять специальные оправки из эластомерных материалов (аквалена) и водной акустической линии задержки. Для создания акустического контакта между секторной антенной решеткой и радиусной зоной Т-образного соединения стрингера с обшивкой стрингерных панелей (вогнутой поверхностью с радиусом кривизны от 2 мм до 10 мм) необходимо применять оправки в виде корпуса из оргстекла и аквалена или в виде призмы из полистирола.

5. Предложены технологии неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластиков с использованием техники антенных решеток. Предложенные технологии разработаны для надежного выявления производственных и эксплуатационных дефектов при проведении ручного ультразвукового контроля элементов монолитных конструкций из углепластика, применяемых в самолетах, с использованием дефектоскопов «A1550 IntroVisor» (ООО «АКС») и OmniScan (Olympus NDT). Данные технологии позволяют проводить контроль монолитных панелей (деталей с плоскопараллельными поверхностями) и панелей с выпуклой поверхностью с радиусом кривизны не менее 250 мм, элементов жесткости (стрингеров, ребер), в том числе радиусные зоны, монолитных зон трёхслойных сотовых панелей.

6. Разработан алгоритм, на основе которого разработана оригинальная методика по проведению оценки вероятности обнаружения дефектов от их размеров при ультразвуковом контроле углепластиков с использованием техники антенных решеток.

7. Проведена численная оценка вероятности обнаружения дефектов в зависимости от их размеров при контроле монолитных конструкций из углепластика с толщиной от 3 мм до 15 мм. Экспериментально показано, что применение технологии ультразвуковых фазированных антенных решеток существенно увеличивает вероятность обнаружения более мелких дефектов ПКМ по сравнению с применением эхо-импульсного метода с использованием одноэлементных преобразователей.

**Основное содержание диссертации опубликовано в работах:
Рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ**

1. Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля / А.С. Бойчук [и др.] // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 1. С. 64–69. (0,4 п.л./0,1 п.л.)

2. Неразрушающий контроль ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток/ А.С. Бойчук [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. № 2. С. 54–58. (0,3 п.л./0,25 п.л.)

3. Применение технологии ультразвуковых фазированных решеток в неразрушающем контроле деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ/ А.С. Бойчук [и др.] // Авиационные материалы и технологии». 2013. № 2. С. 41–46. (0,4 п.л./0,35 п.л.)

4. Вероятностная оценка достоверности результатов ультразвукового неразрушающего контроля конструкций из ПКМ, применяемых в авиационной промышленности/ А.С. Бойчук [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2013. № 9. С. 36-40. (0,3 п.л./0,25 п.л.)

5. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В. Неразрушающий контроль углепластиков на наличие несплошностей с использованием ультразвуковых фазированных решеток // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 3. С. 84-89. (0,4 п.л./ 0,35 п.л.)

Другие публикации

6. Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток/ А.С. Бойчук [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 10. С. 38–43. (0,4 п.л./ 0,35 п.л.)