
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации

(ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)



Технологическая платформа «Новые полимерные композиционные
материалы и технологии»

Технологическая платформа «Материалы и технологии металлургии»

**ХIII Всероссийская
конференция по испытаниям и исследованиям
свойств материалов «ТестМат» по тематике
«Цифровые технологии, моделирование и
автоматизация процессов неразрушающего
контроля в аэрокосмической отрасли. Проблемы и
перспективы внедрения»**

Материалы конференции

12 февраля 2021 г.

Электронное издание

Москва

2021

УДК 620.1

ББК 30.3 + 34.2 + 34.43

Ц75

Редакционная коллегия:

А.В. Славин, д.т.н., начальник Испытательного центра; А.Н. Луценко, к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра; Е.В. Николаев, к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра; А.С. Генералов, к.т.н., начальник лаборатории, Е.А. Шейн, к.т.н., главный специалист.

Цифровые технологии, моделирование и автоматизация процессов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли. Проблемы и перспективы внедрения : материалы XIII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (г. Москва, 12 февраля 2021 г.), [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М. : ВИАМ, 2021. – 193 с. : ил. – ISBN 978-5-905217-66-1. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб. – Загл. с экрана.

Основные тематические направления конференции:

- рентгеновская компьютерная томография;
- цифровая рентгенография: перспективы внедрения в аэрокосмической отрасли;
- моделирование процессов неразрушающего контроля и оценка вероятности обнаружения дефектов;
- автоматизация процессов НК, разработка оборудования контроля и образцов;
- средства и технологии неразрушающего контроля и технической диагностики для исследования физико-механических свойств, состава, структуры материала и прогнозирования ресурса;
- обучение, аттестация, сертификация в области НК и др.

УДК 620.1

ББК 30.3 + 34.2 + 34.43

ISBN 978-5-905217-66-1

© ФГУП «ВИАМ», 2021

Организационный комитет

(ФГУП «ВИАМ»)

Председатель:

А.В. Славин – д.т.н., начальник Испытательного центра.

Заместители председателя:

А.Н. Луценко – к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра.

Члены организационного комитета:

Д.Е. Каблов – к.т.н., заместитель начальника управления;

А.А. Каньгин – начальник управления;

Е.В. Николаев - к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра;

А.С. Генералов - к.т.н., начальник лаборатории;

Л.В. Прохорова – начальник отдела;

И.Ю. Смирнова - начальник сектора;

К.Н. Катаев – специалист по выставочной деятельности;

Е.А. Цилин – ведущий специалист;

А.В. Бабин – ведущий инженер;

Д.С. Трушин – ведущий инженер.

СОДЕРЖАНИЕ

Применение акустических методов для неразрушающей диагностики однослойных элементов в аэрокосмической промышленности..... 6

Авершьева А.В.

Применение математического моделирования физических процессов ультразвукового контроля для снижения количества необходимых настроечных образцов..... 20

Далин М.А.; Яковлева С.И.; Краснов И.С.; Генералов А.С.

Моделирование импедансного контроля многослойных сотовых конструкций из ПКМ для определения размера и глубины залегания дефектов 36

Чертищев В.Ю.; Диков И.А.; Яковлева С.И.

Экспериментальное исследование зависимости параметров ультразвуковых волн от модуля упругости ПКМ..... 68

Чулков Д.И.; Терехин А.В.; Типикин М.Е.

Применение методов НК при программном испытании сегмента форсунки ГТУ в условиях, имитирующих эксплуатационные..... 80

Монахов А.Д.; Яковлев Н.О.; Генералов А.С.; Мазалов П.Б.; Крупнина О.А.; Тарасов С.А.

Неразрушающий контроль и исследование материалов методом рентгеновской компьютерной томографии..... 87

Крупнина О.А.; Генералов А.С.; Демидов А.А.

Применение компьютерной томографии для диагностики ударных повреждений..... 104

Митряйкин В.И.; Беззаметнов О.Н.; Кротова Е.В.; Стаценко Е.О.

Оценка объемной доли пористости в образцах из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии..... 114

Демидов А.А.; Михайлова Н.А.; Крупнина О.А.

Оценка качества отливок из алюминиевых и магниевых сплавов методом цифровой радиографии взамен традиционной пленочной технологии 133

Смирнов А.В.; Косарина Е.И.; Суворов П.В.

Разработка робота-дефектоскопа сочетающего методы контроля с использованием цифровых технологий 144

Алешин Н.П.; Крысько Н.В.; Кириков А.В.

Опыт автоматизированного ультразвукового контроля монолитных и сотовых конструкций из ПКМ 157

Диков И.А.; Бойчук А.С.; Чертищев В.Ю.; Далин М.А.; Генералов А.С.

Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий аэрокосмической отрасли с использованием оптической и ультразвуковой стимуляции..... 181

Чулков А.О.; Вавилов В.П.; Шагдыров Б.И.; Бедарев А.М.

УДК 620.179.1

Применение акустических методов для неразрушающей диагностики однослойных элементов в аэрокосмической промышленности

Авершьева А.В.

anna.aversheva@rsce.ru

ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева»

Аннотация:

В докладе представлена актуальность применения волн Лэмба в неразрушающей диагностике элементов в аэрокосмической промышленности. Распространение волн в однослойной системе исследуется при помощи численных методов, приводится сравнение с аналитическим решением. Рассматриваются параметры численного моделирования, влияющие на устойчивость решения.

Ключевые слова:

волны Лэмба, дисперсионная кривая, неразрушающая диагностика, поверхностные волны, формализм Коши, численное моделирование, конечноэлементная модель

1. Введение

Неразрушающая диагностика играет существенную роль на всех этапах производства и эксплуатации самолетов и космических аппаратов. Стремительное развитие аэрокосмической промышленности, использование новых материалов, сложных по своей структуре, разработка космических аппаратов, которые предназначены для длительного, а иногда и многоразового использования, приводит к сложностям при проведении неразрушающей диагностики материалов и требует усовершенствования существующих методов.

Самолеты и космические аппараты наиболее подвержены ударным (соударение с птицами, градом, космическим мусором) и термоакустическим воздействиям, которые приводят к невидимым снаружи повреждениям, расслаиванию, разрыву волокон, структурной деградации материала. Такие повреждения обычно происходят под поверхностным слоем.

В настоящее время авиакосмическая промышленность использует различные методы неразрушающего контроля: визуальный, флуоресцентный, рентген, вихревые токи, ультразвук, магнитные методы, инфракрасную термографию. Однако этими методами затруднительно обнаружение дефектов под внешними слоями, в многослойных и толстых элементах. Рентген и томография не позволяют точно идентифицировать степень повреждения, также сложно обнаружить повреждения между слоями или между составными деталями, когда повреждения могут скрываться под неповрежденной частью детали. Когда доступ к детали ограничен или она прикреплена к другому оборудованию, то разборка компонента, который нужно проверить, требует много времени и финансовых затрат.

Между тем необходимо иметь возможность убедиться в том, что свойства внутренних слоев соответствуют заявленным требованиям и обнаружить все дефекты и неоднородности, что позволит обеспечить безопасную работу изделия.

Акустические методы, а в частности, применение волн Лэмба, позволяют избежать подобных ограничений. Волны Лэмба проникают глубоко в слой и могут использоваться на любом из этапов производства и эксплуатации аэрокосмических изделий.

Волны Лэмба позволяют обнаруживать трещины, пустоты, коррозию и расслоения между слоями и в труднодоступных местах, оценивать качество клеевого соединения компонентов, определять физико-механические свойства, как в только что изготовленных материалах, так и при/после эксплуатации. Они способны значительно сократить время осмотра, уменьшая продолжительность и частоту осмотров и обеспечивая более быстрое получение данных, поэтому они экономически выгодны и безопасны в использовании. Много вопросов применения акустических волн в авиакосмической промышленности рассмотрено в [1-4].

Впервые волны Лэмба были рассмотрены в 1917 году [5]. Однако лишь спустя 50 лет ученые исследовали эти волны [6] и указали на возможность их применения для мониторинга состояния материалов и конструкций [7].

Несмотря на большое количество исследований по распространению поверхностных волн в различных материалах, имеется ряд нерешенных проблем. В каждом случае необходимо разрабатывать специальные методики проверки, включающие в себя тонкую настройку аппаратуры под конкретные характеристики материала и изделия, необходимо иметь сведения о диапазонах частот для определения конкретного дефекта или свойства, чтобы правильно выбрать тип датчиков. Все вышперечисленное приводит к большим сложностям при проведении диагностики и обработке результатов экспериментальных исследований, снижает их объективность и достоверность.

Чтобы исследовать свойства внутренних слоев в многослойных конструкциях важно понимать как распространяются волны Лэмба в однослойном материале. В рамках такого исследования было получено

аналитическое и численное решение задачи распространения волн Лэмба в свободном одиночном слое.

Актуальной научно-технической проблемой является разработка комплексного (комбинированного) подхода к неразрушающей диагностике, включающей в себя совокупность экспериментальных исследований акустическими методами и компьютерных технологий.

Особый интерес для исследования представляет оценка возможности применения конечно-элементного моделирования для решения задач по распространению волн Лэмба.

Применение различных конечно-элементных комплексов для решения задач о распространение волн Лэмба существенно облегчит проведение экспериментальной диагностики, позволит получить точные корреляционные зависимости между различными параметрами волн и характеристиками материалов, что также существенно ускорит процесс обработки результатов. Сравнение экспериментально определенных дисперсионных соотношений с найденными численно позволит определить свойства любого слоя. Это приведет к существенному сокращению затрат, так как возможности экспериментального контроля будут определены заранее, что позволит давать оценку пригодности и эффективности выбранного метода диагностики в данной ситуации, уменьшит длину и частоту времени простоя и позволит сделать экспериментальный контроль более эффективным. Численное моделирование, разумеется, не может заменить экспериментальные исследования, но может существенно дополнить их.

Неустойчивость разностных схем приводит к сложностям при конечно-элементном моделировании распространения волн Лэмба. В связи с чем известно очень малое количество работ в данном направлении.

2. Основные уравнения теории волн и методы их решения

Рассмотрим основные уравнения, используемые при исследовании волн Лэмба.

Фазовая скорость волны Лэмба выражается формулой

$$c = \frac{\omega}{r} \quad (1)$$

где c – фазовая скорость; ω – частота волны; r – волновое число.

При отсутствии объемных сил уравнение движения для упругой однородной анизотропной среды можно представить в векторной форме

$$\operatorname{div}_x \mathbf{C} \cdot \nabla_x \mathbf{u} - \rho \ddot{\mathbf{u}} = 0 \quad (2)$$

где \mathbf{u} – поле перемещений, ρ – плотность материала среды, \mathbf{C} – положительно определенный четырехвалентный тензор упругости.

Следуя [4] решение уравнения (2) можно представить в экспоненциальной форме:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{f}(\zeta) e^{ir(\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} - ct)} \quad (3)$$

где $\mathbf{x} \equiv \{x, y, z\}$ – радиус-вектор; \mathbf{f} – неизвестная векторная функция от мнимой координаты $\zeta = ir(\mathbf{x} \cdot \mathbf{v})$, определяющая изменение амплитуды на волновом фронте, \mathbf{v} – единичный вектор нормали к срединной поверхности слоя; \mathbf{n} – единичный вектор, задающий направление распространения волны.

Существуют различные методы решения задачи по распространению волн Лэмба в слое: метод потенциалов, трехмерный [8] и шестимерный [9-13] комплексные формализмы.

3. Постановка задачи

На первом этапе была поставлена задача исследовать распространение волн Лэмба в однослойных системах

Рассматривался изотропный и ортотропный незакрепленный слой толщиной $2h$ с границами $\pm h$. (рисунок 1). К слою прикладывалась гармоническая по времени сосредоточенная нагрузка. Перемещения в направлении x соответствуют продольным волнам, распространяющимся со

скоростью c_p , а перемещения в направлении y – поперечным волнам, распространяющихся со скоростью c_s . Их взаимодействие приводит к образованию поверхностной волны. Перемещения в направлении z не учитывались.

Аналитическое решение задачи сводится к решению уравнения движения 2 с граничными условиями

$$t_v|_{x=\pm h} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{C} \cdot \nabla \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

Аналитическое решение строилось на основе шестимерного формализма Коши. Подробное решение представлено в [13].

Конечно-элементное моделирование и последующий расчет проводились в конечно-элементном комплексе Abaqus®.

При этом выбраны следующие параметры: плотность $\rho=1$, скорость продольной волны $c_p=1$, толщина слоя $h=1$ у.е., где у.е. – условные единицы (здесь и далее предполагается, что все физические величины безразмерны).

Конечно-элементная модель состояла из прямоугольных линейных элементов, результаты были получены для 5 точек (т.1, т.2,..., т.5) наблюдения расположенных с интервалом 10 у.е.

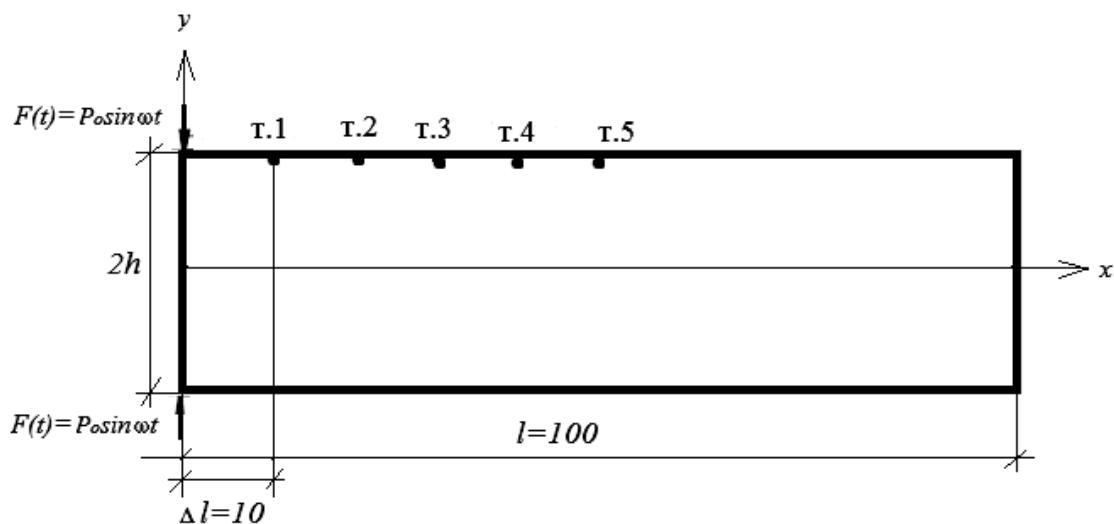


Рисунок 1 - Схематичное изображение постановки задачи

4. Сходимость конечно-сеточных аппроксимаций

В данном исследовании использовалась явная разностная схема, которая позволяет проанализировать все основные эффекты, возникающие при распространении акустических волн. В Abaqus® для этого используется модуль Abaqus/Explicit.

Неустойчивость разностных схем приводит к сложностям при реализации распространения волн Лэмба в конечно-элементных комплексах. Для получения устойчивого решения использовался приближенный метод, известный как условие устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви, иногда называемое критерием Куранта [14].

Устойчивость неявной разностной схемы не зависит от величины временного шага. Однако при использовании явных методов для сохранения устойчивости разностной схемы временной шаг должен зависеть от величины самого малого элемента в сетке.

Таким образом, шаг по времени удовлетворяет условию

$$\Delta t < \frac{\Delta x_{\min}}{c_p}, \quad (4)$$

где Δt – временной шаг, Δx_{\min} – минимальный размер элемента в сетке, c_p – скорость продольной волны.

Это значит, что явные схемы остаются устойчивыми, если временной шаг меньше, чем время за которое продольная волна проходит наименьший элемент в сетке.

Использование критерия Куранта позволяет достичь оптимального соответствия между размером элемента и шагом по времени и, одновременно, получить устойчивое решение.

Также особое внимание при задании гармонического воздействия следует уделить величине амплитуды воздействия P_0 . Для соблюдения

условия малости деформаций необходимо, чтобы величина P_0 удовлетворяла условию

$$P_0 < 1 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \Delta x, \quad (5)$$

где E – безразмерный модуль упругости.

Исследование влияния величины P_0 и размера элемента КЭ сетки Δx при гармоническом воздействии $P_0 \sin \omega t$ на точность решения проводилось для двух значений безразмерной круговой частоты: $\omega = 0,397657$ и $\omega = 1,5016813$. Коэффициент Пуассона слоя принимался равным $\nu = 0,35$. вариации размера элемента $\Delta x \in [0,005; 0,5]$.

При анализе результатов было выявлено, что оптимальным размером элемента для данной задачи принят размер $\Delta x = 0,01$. При этом следует отметить, что для расчетов при $\omega \rightarrow 0$ допустимо применять размер элемента $\Delta x = 0,05$, это не отразится на точности решения, однако позволит значительно сократить время расчета.

Зависимость времени расчета от размера элемента приведена в таблице 1.

Таблица 1 - Зависимость времени расчета от размера элемента

Размер элемента, у.е.	Время расчета, Т, ч.
0,005 (8 млн. элементов)	4,4500
0,01 (2 млн. элементов)	0,5200
0,05 (80 тыс. элементов)	0,0120
0,100 (20 тыс. элементов)	0,0100
0,250 (3200 элементов)	0,0097
0,500 (800 элементов)	0,0070

5. Результаты расчета

Результаты сравнительного анализа аналитического и конечно-элементного решений при изменении коэффициента Пуассона в интервале $[0;0,5]$ представлены на рисунке 2.

Конечно-элементная модель состоит из 8 млн прямоугольных линейных элементов.

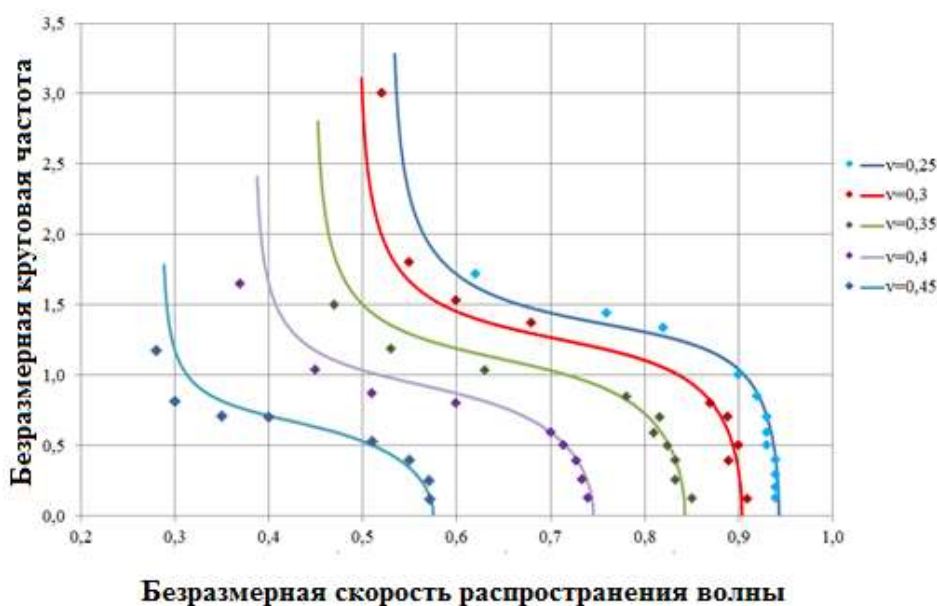


Рисунок 2 - Сравнение решений, полученных аналитическим методом (—) и в конечно-элементном комплексе Abaqus (◆)

Пики на данных кривых соответствуют скорости волны Лэмба при частоте, стремящейся к бесконечности, при этом скорость волны Лэмба близка к скорости волны Рэлея. Эту скорость называют первой предельной скоростью. Скорость волны Лэмба при частоте, стремящейся к нулю называют второй предельной скоростью.

Как видно из графиков при приближении к частотам, стремящимся к бесконечности, решения расходятся. Тем не менее, при рассмотрении частот, стремящихся к нулю, удается достичь высокой точности и для этих случаев конечно-элементное моделирование вполне применимо.

На рисунке 3 представлена дисперсионная кривая для ортотропного слоя, полученная аналитическим методом при следующих технических безразмерных характеристиках материала (таблица 2).

Таблица 2 – Технические характеристики ортотропного материала

E_1	1,0000	ν_{12}	0,1000	G_{23}	0,2543
E_2	0,7500	ν_{23}	0,2500	G_{31}	0,3302
E_3	0,5000	ν_{13}	0,1000	G_{12}	0,3985

Фундаментальные моды дисперсионных кривых для соответствующих материалов приведены на рисунке 4, где $\tilde{\omega} = \omega h / c_p$ – безразмерная круговая частота; $\tilde{c} = c / c_p$ – безразмерная скорость распространения волны; c_p – скорость продольной волны направлении наибольшего модуля упругости.

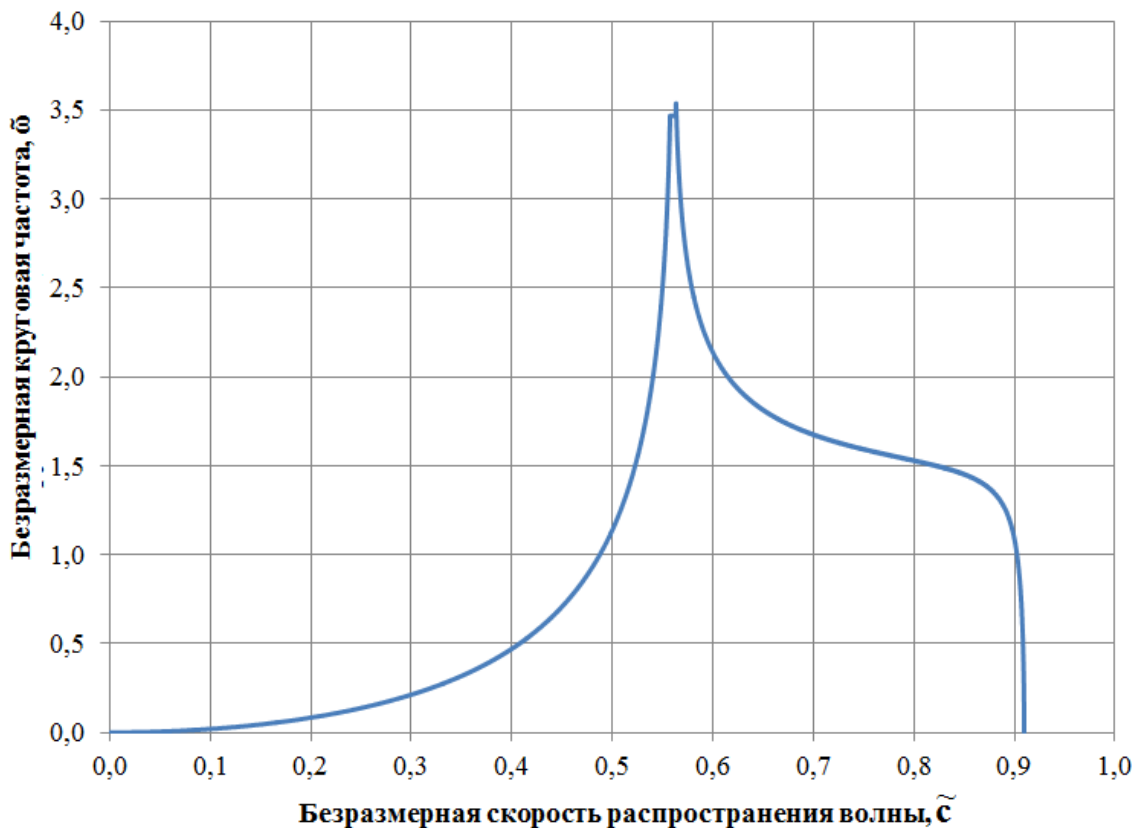


Рисунок 3 – Фундаментальные моды дисперсионных кривых волн Лэмба в ортотропном слое

Одним из перспективных направлений применения волн Лэмба для неразрушающей диагностики является использование дисперсионных кривых для определения толщины слоя в многослойных и однослойных системах. На рисунке 4-5 представлено изменение дисперсионных кривых при различной толщине слоя в однослойной системе для случая со следующими характеристиками $\rho=1$, $c_p=1$, $\nu=0,3$, $E=0,742857$, $\mu=0,285714$, $\lambda=0,428571$.

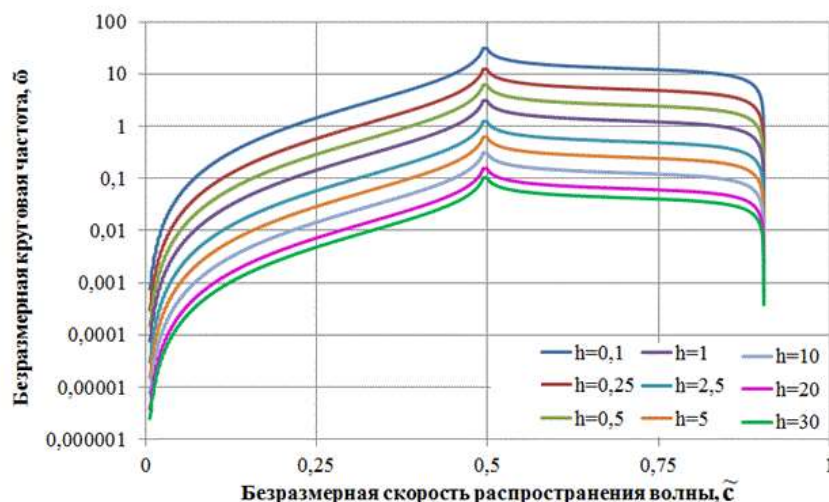


Рисунок 4 – Фундаментальные моды дисперсионных кривых для волн Лэмба в изотропном слое при $h \in [0,1;30]$

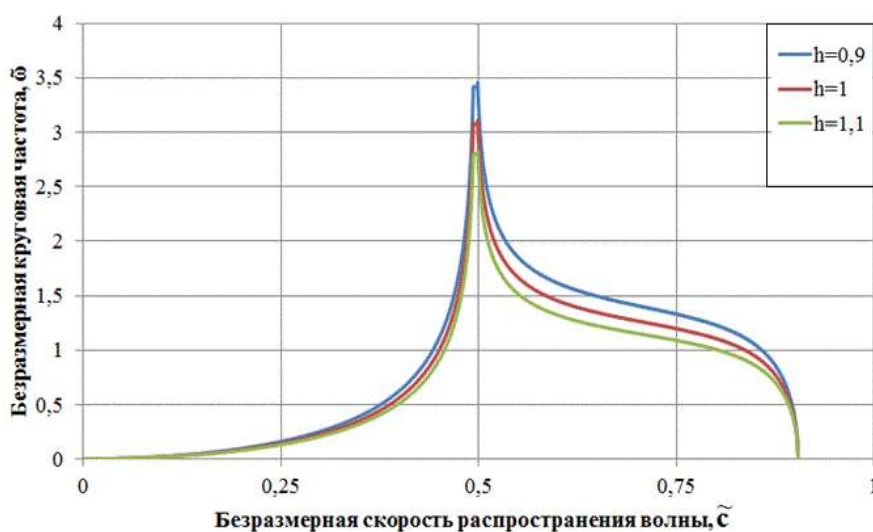


Рисунок 5 – Фундаментальные моды дисперсионных кривых для волн Лэмба в изотропном слое при $h = 1 \pm 10\%$

Как видно из этих графиков даже незначительное изменение толщины слоя приводит к видимым изменениям дисперсионных кривых.

6. Выводы

На основании задачи Лэмба впервые предложен метод генерирования поверхностных волн в программном комплексе Abaqus® и проведен сравнительный анализ скоростей распространения волн Лэмба.

При $\omega \rightarrow 0$ удалось получить устойчивое решение при размере элемента $\Delta x = 0,01$.

Установлена взаимосвязь между скоростью распространения волн Лэмба и физико-механическими (коэффициент Пуассона) и геометрическими (толщина) характеристиками слоя.

В итоге можно сделать вывод, что дисперсионные кривые являются репрезентативными для оценки свойств внутренних слоев недоступных для прямых методов.

Анализ сходимости конечно-элементного решения позволил определить проблемы при реализации расчетов методом конечных элементов, решение которых позволило свести к минимуму погрешности, вызванные:

- выбором величины воздействия;
- выбором частотного диапазона;
- оптимизацией размера временного шага с помощью размера конечных элементов.

Оценка возможностей КЭМ для решения задач о распространении поверхностных волн выявило отличную возможность для последующей адаптации КЭМ для решения задач неразрушающей диагностики при низких частотах

Построение аналитических и численных дисперсионных зависимостей для различных материалов и их последующее сравнение с полученной экспериментальной кривой позволяет точно определить физико-

механические свойства материала и обнаружить внутренние неоднородности и дефекты. Дальнейшее исследование будет посвящено изучению взаимодействия волн Лэмба с внутренними дефектами.

Список литературы

1. Andrews, J. P. Lamb wave propagation in varying thermal environments: Thesis. – USAF. –2007. –201 p.
2. Boller, C. Ways and options for aircraft structural health management/ C. Boller// Smart Materials and Structures. – 2001. – Vol. 10. – Pp.432-440.
3. Rose, J.L. Ultrasonic guided waves for the detection of anomalies in aircraft components / J.L. Rose, L. Soley // Materials Evaluation. – 2000. – Vol. 50. –Pp. 1080-1086.
4. Tucker, B.J. Ultrasonic plate waves in wood-based composite panels: PhD Thesis / B.J. Tucker.– Washington: Washington State University Department of Civil and Environmental Engineering, 2001. –127p.
5. Lamb H. On Waves in an Elastic Plate// Proceedings of the Royal Society of London . – 1917 . – Vol. 93(648) . – Pp. 114-128.
6. Ewing W.M., Jardetzky W.S., and Press F. «Elastic Waves in Layered Media», N.Y.:McGraw-Hill, 1957.-390p.
7. Викторов И.А. «Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике». М.: Наука, 1966. – 169 с.
8. Farnell G.W., Properties of elastic surface waves.// Phys. Acoust., 1970, 6, pp. 109 -166.
9. Chadwick P. and Smith G.D., Foundations of the theory of surface waves in anisotropic elastic materials.// Adv. Appl. Mech., 1977, 17, pp. 303 - 376.
10. Barnett D.M. and Lothe J., Synthesis of the sextic and the integral formalism for dislocations, Green's functions, and surface waves in anisotropic elastic solids.//*Phys. Norv.*, 1973, 7, pp. 13 -19.

11. Stroh A. N., Steady state problems in anisotropic elasticity.// Journal of Mathematical Physics, 1962, Vol. 41, pp. 77–103

12. Kuznetsov S. V. Cauchy Six-Dimensional Formalism for Lamb Waves in Multilayered Plates// Hindawi Publishing Corporation, ISRN Mechanical Engineering, Article ID 698706, 2013, 11 p.

13. Авершьева, А.В. Предельные скорости волн Лэмба: аналитические и численные исследования /А.В. Авершьева, Р.В. Гольдштейн, С.В. Кузнецов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. –2016. –№ 5. – С. 79-84. = Avershyeva, A.V. Limit velocities of lamb waves: analytic and numerical studies/ A.V. Avershyeva, R.V. Goldstein, S.V. Kuznetsov // Mechanics of Solids. – 2016. – № 5. – Т. 51. – С. 571-575

14. Кукуджанов В.Н. Численное решение неодномерных задач распространения волн напряжений в твердых телах.// Сообщ. Прикл. Матем. М.: ВЦ АН СССР, 1976, Вып.6, С. 67

УДК 620.179.16

Применение математического моделирования физических процессов ультразвукового контроля для снижения количества необходимых настроечных образцов

Далин М.А.; Яковлева С.И.; Краснов И.С.; Генералов А.С.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

Описаны способы определения корректирующих величин, выравнивающих чувствительность при ультразвуковом контроле объектов с криволинейной поверхностью после проведения настройки на образцах с плоской поверхностью. Приведено сравнение математического алгоритма, реализованного специалистами ФГУП «ВИАМ», и программного обеспечения CIVA UT. Вычислены величины корректировок с помощью программного обеспечения CIVA UT.

Ключевые слова:

математическое моделирование, ультразвуковой иммерсионный контроль, чувствительность, корректировка, поверхность ввода

Современными требованиями разработчиков к ультразвуковому иммерсионному неразрушающему контролю заготовок роторных деталей газотурбинного двигателя (ГТД) помимо повышения чувствительности является также обеспечение стопроцентной полноты контроля чистового контура детали в заготовке [1]. Поскольку эти заготовки представляют собой тела вращения сложного сечения, необходимо осуществлять ввод и прием ультразвуковых колебаний с криволинейных (цилиндрических, конических) поверхностей. Однако при иммерсионном ультразвуковом контроле плоской и криволинейной поверхностей ультразвуковой пучок претерпевает различное преломление. Например, при использовании фокусированных преобразователей выпуклая цилиндрическая поверхность вызывает «размытие» фокусного пятна, в то время как вогнутая поверхность вызывает его перефокусировку, рисунок 1.

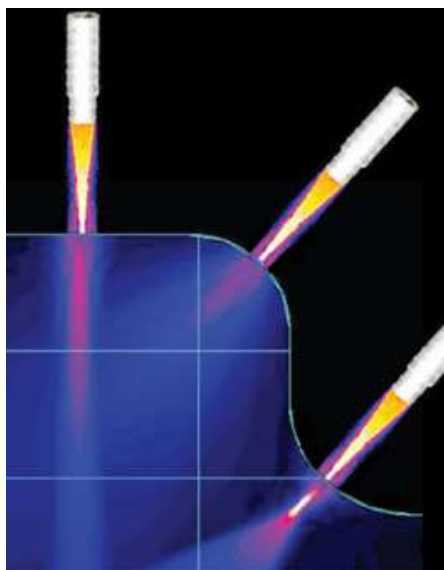


Рисунок 1 – Изменение поля фокусированного ультразвукового преобразователя при введении волн с поверхностями различной формы

Это приводит к тому, что при одной и той же настройке оборудования амплитуды эхосигналов от одинаковых отражателей при плоской поверхности и при криволинейной будут разные. Таким образом, при настройке на плоском образце и контроле, скажем, цилиндрического вала,

фактическая чувствительность будет отлична от номинальной. До настоящего времени на большинстве отечественных предприятий использовалась нормативная документация, предписывающая проводить контроль заготовок дисков только с плоских торцевых поверхностей. В случае необходимости проведения контроля с криволинейных поверхностей использовались два основных подхода к решению этой проблемы:

- настройка на плоском образце не допускалась, в нормативной документации содержалось требование, что настроечный образец должен отличаться от объекта контроля по диаметру не более чем на указанную величину [2] (ГОСТ 21120, ПНАЭ, МК256-40). Это приводило к необходимости изготовления большого количества образцов;

- настройка на плоском образце допускалась без каких-либо корректировок (контроль заготовок и валов ГТД, контроль заготовок дисков ГТД). Этот подход возможен, так как основной задачей настроечных образцов и нормативной документации является в первую очередь обеспечение повторяемости настройки и идентичности результатов выходного ультразвукового контроля у поставщика заготовок и входного ультразвукового контроля у заказчика. При этом фактическое значение чувствительности контроля может существенно отличаться от номинального, что, казалось бы, недопустимо. Однако, вероятностная природа обнаружения дефектов такова, что такая погрешность настройки меркнет по сравнению с разбросом амплитуд эхосигналов от реальных дефектов одного размера. Так, по результатам практических исследований выявляемости металлургических дефектов в заготовках и полуфабрикатах [3] (JETQC, FAA) было установлено, что дефекты с одной площадью максимального сечения могут давать эхосигналы с амплитудой, отличающейся в 10 раз [4], рисунок 2.

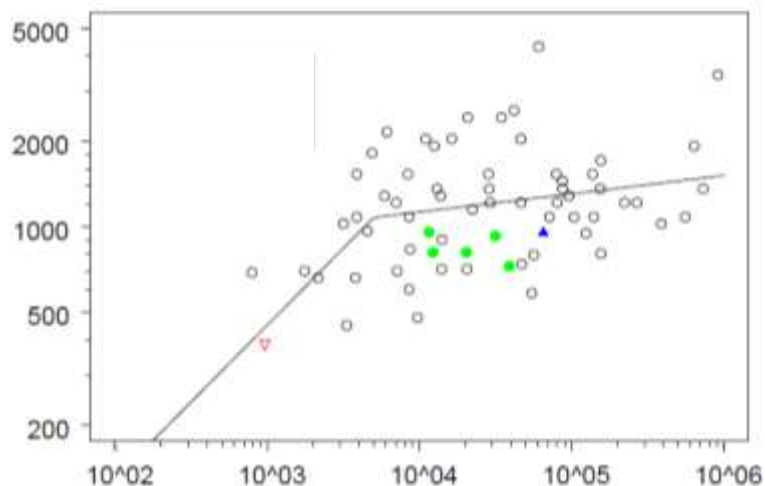


Рисунок 2 - Амплитуды эхосигналов от реальных металлургических дефектов в титановых сплавах, данные JETQS. По оси абсцисс - фактический размер дефекта (площадь в наибольшем сечении, 10^{-6} кв. дюймов), по оси ординат – эквивалентный размер дефекта

Поэтому отклонение фактической чувствительности от номинальной, вызванное криволинейностью поверхности ввода, до недавнего времени не вызывало проблем. Однако, современные методики расчета ресурса деталей ГТД включают в расчет данные о вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле в зависимости от их размера. График зависимости вероятности обнаружения дефекта от его размера распространяется только на материал, проконтролированный на заданной (в терминах диаметра плоскодонного отражателя) чувствительности. Таким образом, при использовании второго подхода при настройке дефектоскопического оборудования получить корректные зависимости невозможно, вследствие невозможности гарантирования достижения чувствительности, полученной при настройке на образцах с плоской поверхностью, при контроле объектов с криволинейными поверхностями.

Кроме того, контроль только с плоских торцевых поверхностей не обеспечивает требований о контроле стопроцентного объема чистового контура детали, рисунок 3.

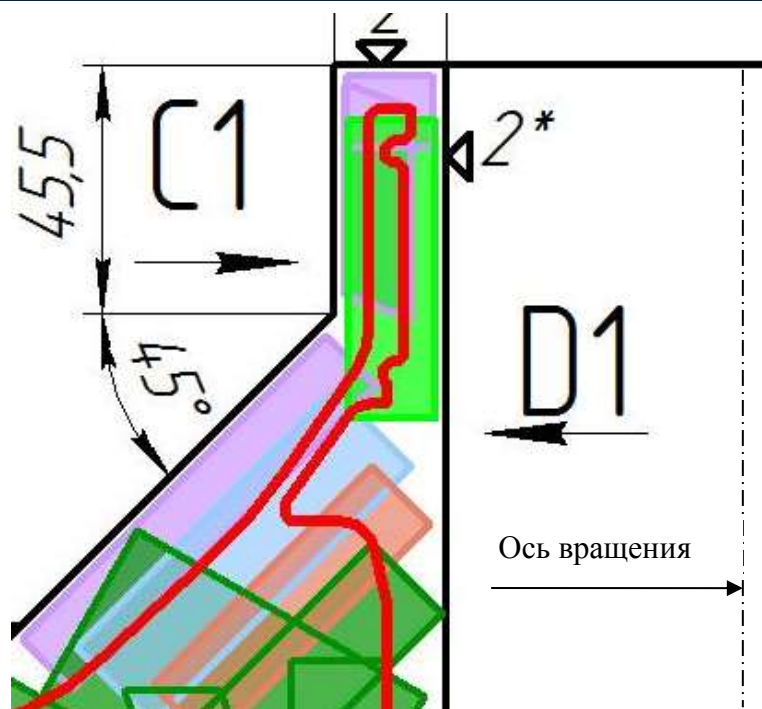


Рисунок 3 - Сечение заготовки с наложенным контуром чистой детали (красная линия) и зонами контроля

Также нельзя не отметить такую тенденцию, как проведение контроля с вводом ультразвуковых колебаний со стороны центрального отверстия заготовок дисков, которое присутствует у большинства типичных заготовок основных деталей ГТД. До широкого внедрения иммерсионного контроля это было практически невозможно, так как контактные преобразователи с керамическим протектором недопустимо использовать на вогнутых поверхностях. Специалисты ФГУП «ВИАМ» сталкивались с ситуациями, когда повышенные требования разработчика двигателя к полноте и чувствительности контроля нельзя было удовлетворить, не используя контроль со стороны центрального отверстия. Для этого используются специальные акустические зеркала или установка преобразователя на специальную оправку, рисунок 4.

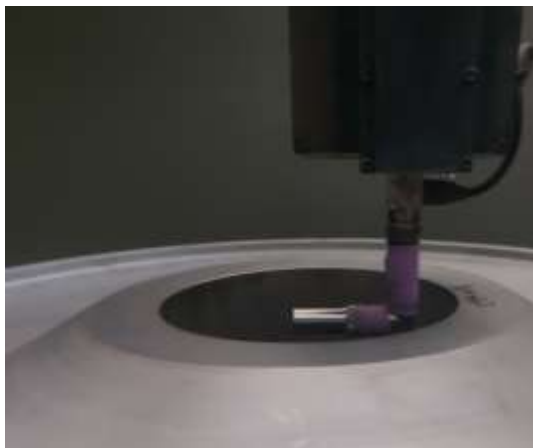


Рисунок 4 - Контроль заготовки диска фокусированным иммерсионным преобразователем с поверхности центрального отверстия

Таким образом, в настоящее время перед предприятиями специальной металлургии, а также моторостроительными заводами, стоит задача обеспечения автоматизированным иммерсионным ультразвуковым контролем деталей из титановых и жаропрочных никелевых сплавов с вводом ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей и обеспечением номинальной чувствительности, эквивалентной искусственному дефекту в виде плоскодонного сверления диаметром 0,8 или 0,4 мм. Невозможность проведения настройки дефектоскопического оборудования с применением второго подхода обоснована выше, применение первого подхода в свою очередь требует большого количества настроечных образцов, что существенно увеличивает затраты на их изготовление и метрологическое обеспечение.

Из литературных источников стало известно, что за рубежом для выхода из сложившейся ситуации внедрена практика вычисления для контролируемых материалов и используемых ультразвуковых преобразователей корректировочных величин, введение которых позволяет проводить контроль заготовок с криволинейными поверхностями при настройке дефектоскопического оборудования на плоских образцах [5].
Корректировочные коэффициенты определялись для каждого радиуса

кривизны выпуклой и вогнутой поверхности и каждой глубины залегания плоскодонного отражателя и заносились в специальные таблицы. В дальнейшем усиление в каждой точке кривой временной регулировки чувствительности, построенной при настройке на плоских образцах, увеличивается или уменьшается на соответствующую корректирующую величину. Распространенные типы современных автоматизированных иммерсионных ультразвуковых установок имеют программную поддержку таких таблиц и могут автоматически выполнять их подгрузку для заданного радиуса кривизны поверхности.

Эти значения корректировочных величин могут быть получены как при проведении большого количества натуральных экспериментов с использованием большого количества настроечных образцов, так и с помощью математического моделирования. Для иммерсионного контроля значения корректировок, как выяснилось, зависят не только от материала объекта контроля, диаметра, частоты и фокусного расстояния преобразователя, расстояния по воде от преобразователя до объекта контроля, но и от спектральных характеристик преобразователя, и даже от применяемых настроек генератора и приёмного фильтра дефектоскопа. Таким образом, количество влияющих на результат параметров очень велико и делает процесс получения корректирующих величин экспериментальным путем крайне трудоемким. В связи с этим внедрение современных цифровых технологий и проведение компьютерного моделирования различных процессов является крайне актуальной задачей.

Работы в данной области специалистами ФГУП «ВИАМ» ведутся достаточно давно. Первые попытки расчёта моделирования процессов, происходящих при ультразвуковом контроле, были реализованы с помощью программного обеспечения Mathcad. Расчёт вёлся в частотной области численным методом, рисунок 5. Реализованный алгоритм и результаты расчетов неоднократно публиковались и докладывались [6].

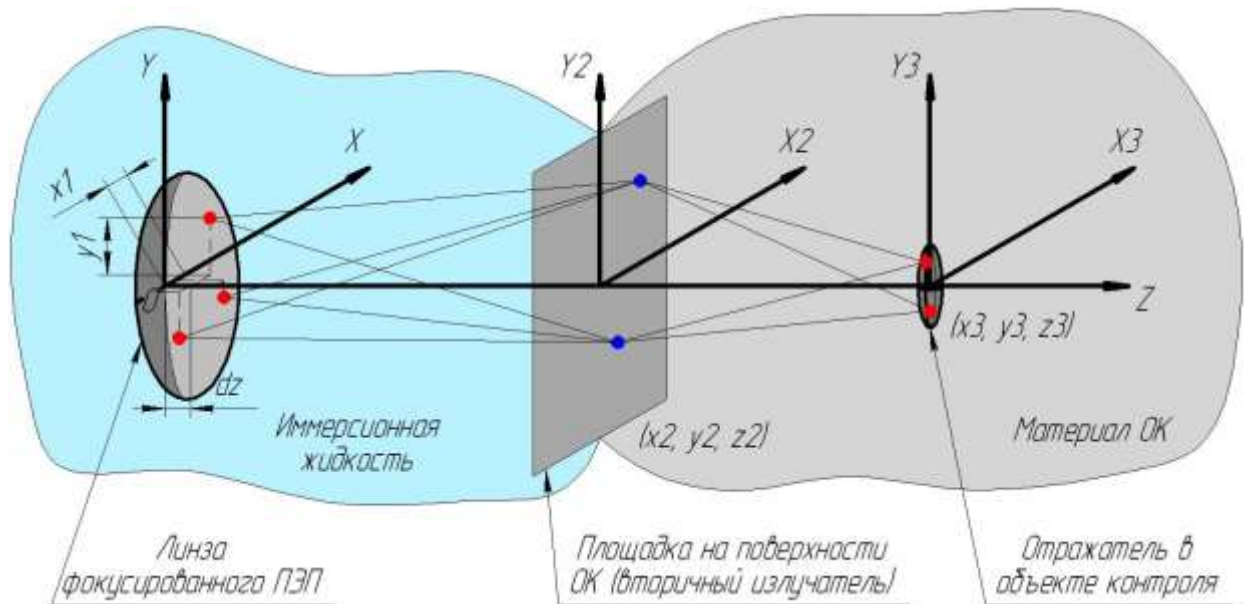


Рисунок 5 - Схематическое представление алгоритма расчета поля иммерсионного фокусирующего преобразователя

Модель проходила верификацию на натуральных образцах из алюминиевого и жаропрочного никелевого сплава, имеющих различную кривизну поверхности и искусственные отражатели в виде плоскодонных отверстий различного диаметра. Результаты отклонения при различных схемах сканирования лежали в следующих диапазонах: значения среднеквадратического отклонения от 0,25 до 0,8 дБ; погрешности - от 5,9 до 19,5 %, и были признаны удовлетворительными. Стоит отметить, что алгоритм предусматривает ряд допущений, снижающих точность расчётов, а без них расчёт является весьма затратным по времени даже на мощном персональном компьютере.

В настоящее время лаборатория «Неразрушающих методов контроля» ФГУП ВИАМ оснащена современным зарубежным программным обеспечением CIVA и новой высокопроизводительной рабочей станцией. Данное программное обеспечение моделирует процессы, происходящие при различных типах ультразвукового эхо-импульсного контроля, и позволяет выполнять большой объем расчетов для решения специализированных задач

типа получения данных для построения зависимостей вероятности обнаружения дефектов от их размера или расчета корректирующих значений, рисунки 6 и 7.

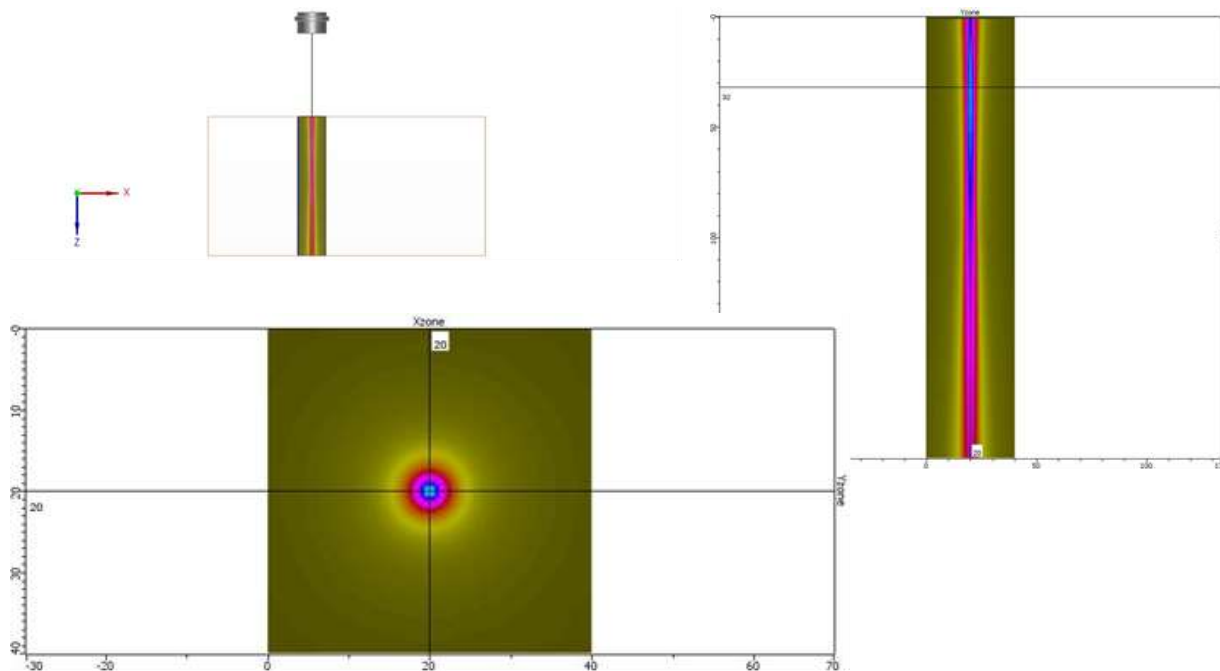


Рисунок 6 – Моделирование поля ультразвукового иммерсионного преобразователя в программном модуле CIVA UT.

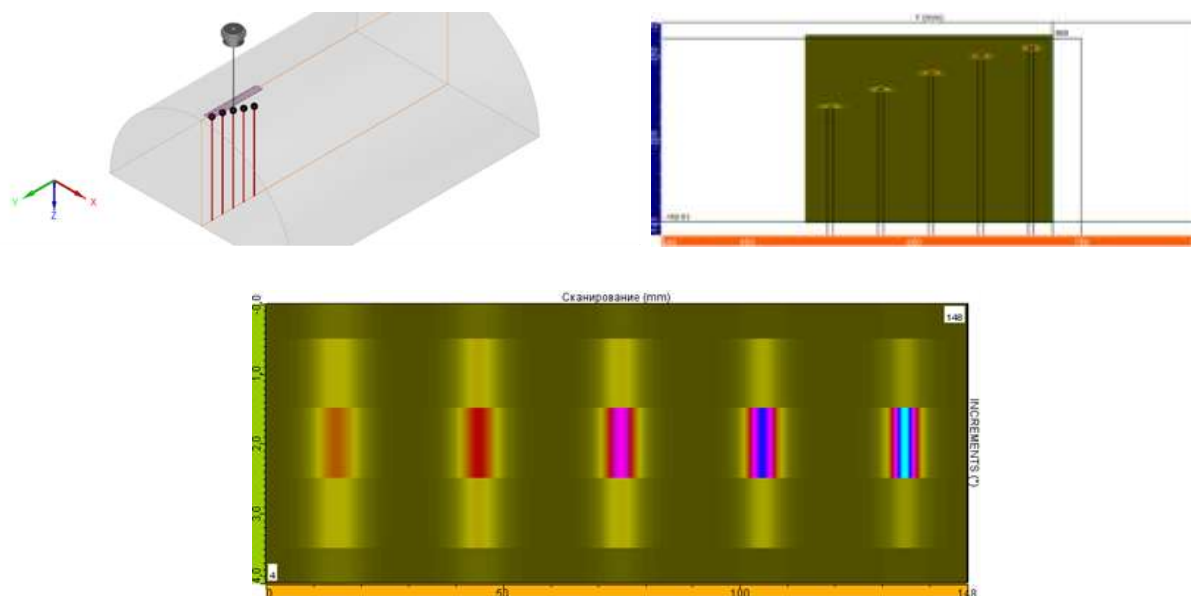


Рисунок 7 – Моделирование результатов ультразвукового иммерсионного контроля в программном модуле CIVA UT

Программное обеспечение CIVА UT прошло процедуру верификации, включающую серию следующих сравнительных экспериментов:

при вводе продольных ультразвуковых колебаний:

1) сопоставление максимальной амплитуды эхосигнала от плоскодонного контрольного отражателя фиксированного диаметра, ориентированного перпендикулярно направлению распространения ультразвуковых колебаний при их вводе через плоскую и криволинейную поверхности ввода, и залегающего на разных глубинах;

2) сопоставление максимальной амплитуды эхосигнала от плоскодонного контрольного отражателя переменного диаметра, ориентированного перпендикулярно направлению распространения ультразвуковых колебаний при их вводе через плоскую и криволинейную поверхности ввода, и залегающего на разных глубинах;

3) сопоставление максимальной амплитуды эхосигнала от плоскодонного контрольного отражателя переменного диаметра, ориентированного перпендикулярно направлению распространения продольных ультразвуковых колебаний при их вводе через плоскую и криволинейную поверхности ввода, и залегающего на фиксированной глубине;

4) сопоставление максимальных амплитуд эхосигналов от контрольных отражателей переменного диаметра, ориентированных под незначительными углами, в диапазоне от 3-х до 20 градусов, относительно направления распространения продольных ультразвуковых колебаний при их вводе через плоскую поверхность ввода, и залегающего на фиксированной глубине;

5) сопоставление максимальной амплитуды эхосигнала от отражателя с эллиптической, сферической и конической отражающей поверхностью переменной площадью, ориентированного перпендикулярно направлению распространения продольных ультразвуковых колебаний при

их вводе через плоскую поверхность, и залегающего на фиксированной глубине;

при вводе сдвиговых ультразвуковых колебаний:

б) сопоставление максимальной амплитуды эхосигнала от плоского контрольного отражателя переменного диаметра, ориентированных под характерное направление распространения ультразвуковых колебаний при вводе сдвиговых колебаний через плоскую поверхность ввода

7) сопоставление максимальной амплитуды эхосигнала от отражателя с эллиптической, сферической и конической отражающей поверхностью с переменной площадью, ориентированного перпендикулярно направлению распространения продольных ультразвуковых колебаний при их вводе через плоскую поверхность, и залегающего на фиксированной глубине.

При выполнении натурных исследований на всех используемых образцах фиксируются следующие показатели:

- общее усиление системы при амплитуде эхосигнала от КО 80 % по экрану дефектоскопа при заданных параметрах контроля;
- затухание ультразвуковых колебаний;
- скорость распространения ультразвуковых колебаний

Верификация программного обеспечения CIVA UT происходила с использованием ультразвуковой иммерсионной установки ScanMaster LS-500LP в комплекте со следующими преобразователями:

- фокусированный ПЭП Panametrics V308 с центральной частотой 5 МГц, диаметр пьезопластины 19,5 мм, путь по воде составлял 150, 70 и 50 мм для продольных волн и 50 мм для сдвиговых;

- фокусированный ПЭП Panametrics V327 с центральной частотой 10 МГц, диаметр пьезопластины 12,7 мм, путь по воде составлял 61 мм для продольных волн;

- иммерсионный ультразвуковой преобразователь Panametrics C306S с центральной частотой 2,25 МГц, диаметр пьезопластины 12,7 мм.

Параметры генератора дефектоскопического модуля USC100 установки, настраивались аналогично используемым при проведении серийного контроля, а также при создании импульсного отклика системы. В качестве информативного параметра фиксировалось общее усиление системы при достижении эхосигнала от контрольного отражателя уровня в 100 % по экрану дефектоскопа.

По результатам верификационных исследований установлены следующие значения:

– для плоскодонного отражателя:

1) разницы между амплитудами моделированного и реального эхосигнала не превысила значение 4,2 дБ для 95,4 % случаев;

2) значение систематической относительной погрешности составило 0,5 %;

– для отражателя в форме конуса:

1) разницы между амплитудами моделированного и реального эхосигнала не превысила значение 4,2 дБ для 100 % случаев;

2) значение систематической относительной погрешности составило 3 %;

– для сферического отражателя:

1) разницы между амплитудами моделированного и реального эхосигнала не превысила значение 4,2 дБ для 97,2 % случаев;

2) значение систематической относительной погрешности составило 0,03 %;

– для эллиптического отражателя:

1) разницы между амплитудами моделированного и реального эхосигнала не превысила значение 4,2 дБ для 70,3 % случаев;

2) значение систематической относительной погрешности составило 7,0 %.

Превышение установленных нами допустимых расхождений между моделью и натурным экспериментом для эллиптических отражателей произошло вследствие геометрических отклонений натуральных образцов. Не было найдено способа измерения геометрии отражателя в виде эллипсоида, вследствие чего фактическая форма дна отверстия в образцах с эллиптическими отражателями могла отличаться от идеальной модели. Это подтверждается тем, что амплитуды эхосигналов от расположенных на разных глубинах отражателей в натуральных образцах не ложатся на плавную кривую «амплитуда - глубина», что не может быть объяснено другими причинами. Предположительно, причиной искажения формы отражателей было то, что они изготавливались электроэрозионным методом, и для большинства отражателей нами был выбран «быстрый» режим электроэрозионной обработки.

С учётом этого, по результатам верификации математическая модель была признана пригодной для проведения оценки вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле.

Дополнительно верификация была проведена для продольных волн также с использованием установки ScanMaster LS-500LP в комплекте с фокусированным пьезоэлектрическим преобразователем Panametrics V308 с центральной частотой 5 МГц, диаметр пьезопластины 19,5 мм, путь по воде составлял 150 мм. Натурные и модельные эксперименты проводились на образцах с криволинейной поверхностью из жаропрочного никелевого сплава ВЖ175ИД диаметром 30 и 40 мм. Полученная разница между реальными и смоделированными данными составила менее 2 дБ. Такой результат был признан удовлетворительным, поскольку такая ошибка в настройке считается допустимой даже для титана высшего качества согласно [7, 8], рисунок 8

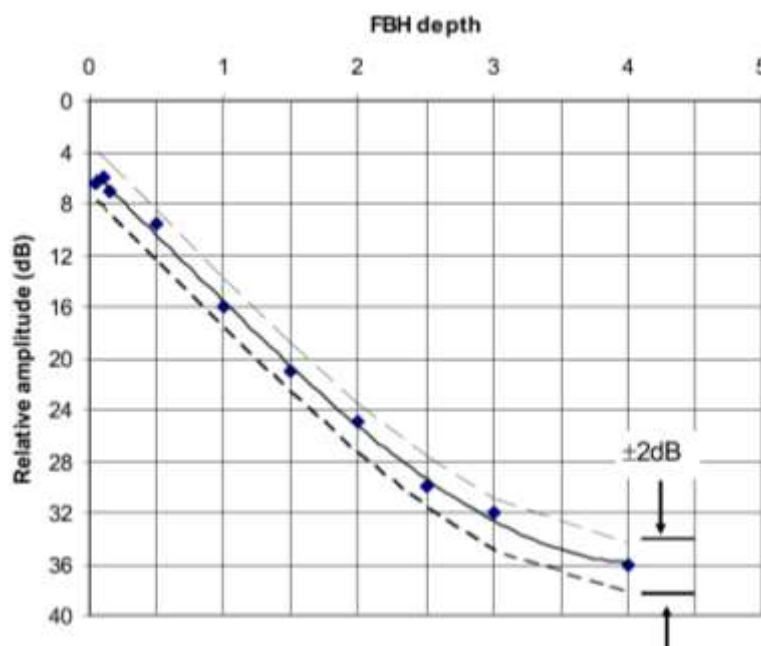


Рисунок 8 - Допустимый разброс амплитуд эхосигналов от контрольных отражателей диаметром 0,4 мм согласно SAE AMS 2636A

Следует отметить, что повторяемость изготовления контрольных отражателей в образцах таким образом, чтобы разброс эхо-сигнала от них составлял ± 2 дБ – это фактически предел для материалов типа деформируемых титановых и никелевых жаропрочных сплавов, даже для современного производства ФГУП «ВИАМ», недавно оснащённого прецизионным металлообрабатывающим оборудованием и использующего твердосплавный инструмент ведущих мировых производителей. Разброс амплитуд эхо-сигналов от одинаковых отражателей растёт с уменьшением размеров отражателей. Этот разброс связан с неравномерностью акустических свойств этих материалов, а также с упругой анизотропией их кристаллической структуры. По мнению зарубежных исследователей [9], когда размер плоскодонного отражателя становится соизмерим с размером зерна, обеспечить повторяемость амплитуд при изготовлении отражателей оказывается невозможно. Так, при попытке изготовить плоскодонный отражатель диаметром 0,2 мм в деформируемом титановом сплаве, даже при

высокой точности изготовления отражателей, добиться повторяемости амплитуд эхо-сигналов от одинаковых отражателей не удалось.

Таким образом, для наиболее актуальных сейчас плоскодонных отражателей диаметром 0,8 и 0,4 мм можно считать допустимым полученное отклонение расчётных значений корректировочных коэффициентов от экспериментальных значений.

В результате работы проведен большой объем расчетов по определению корректирующих величин, необходимых для учета при настройке дефектоскопического оборудования при проведении неразрушающего контроля основных деталей ГТД. Программное обеспечение CIVA UT обладает большими преимуществами в быстродействии вычислений, универсально, позволяет решать различные актуальные задачи, однако оно требует достаточно высокой квалификации специалистов, его использующих. Не имея опыта реализации аналогичного расчета в программной среде Mathcad, специалисты ФГУП «ВИАМ» столкнулись бы с большими сложностями при определении источников расхождения программных результатов расчетов с результатами натуральных экспериментов, несмотря на поддержку фирмы-поставщика.

На данный момент рассчитаны величины корректировок только для цилиндрических поверхностей для преобразователей, используемых на ряде моторостроительных и металлургических предприятий. По-прежнему актуальной задачей остается расчет для конических и тороидальных поверхностей. Запланирован ряд натуральных и вычислительных экспериментов, направленных на совершенствование методики расчёта и дальнейшее снижение выявленных погрешностей расчёта.

Список литературы

1. ГОСТ Р 58989-2020 Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. Общие требования. М., 2020

2. ГОСТ 21120-75 Прутки и заготовки круглого и прямоугольного сечения. Методы ультразвуковой дефектоскопии. М., 1988
3. DOT/FAA/AR-07/63, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration «Update of Default Probability of Detection Curves for the Ultrasonic Detection of Hard Alpha Inclusions in Titanium Alloy Billets»
4. Отчет DOT/FAA/AR-07/63 «Update of Default Probability of Detection Curves for the Ultrasonic Detection of Hard Alpha Inclusions in Titanium Alloy Billets», 2008
5. NDT Resource Center: сайт. – 2001 – 2014. – UPL:<https://nde-ed.org> (дата обращения 23.12.2020).
6. Д.С. Ложкова, И.С. Краснов, М.А. Далин. Иммерсионный ультразвуковой контроль заготовок с криволинейными поверхностями с настройкой аппаратуры на плоских образцах // Контроль. Диагностика. 2019. №4. С. 36 – 44. DOI: 10.14489/td.2019.04.pp.036-044
7. SAE AMS 2636 Ultrasonic immersion inspection titanium and titanium alloy forgings premium grade. 2016.
8. SAE AMS 2628 Ultrasonic immersion inspection titanium and titanium alloy billet premium grade. 2007.
9. ETC Quarterly Report, 15.10.2001

620.179.16

Моделирование импедансного контроля многослойных сотовых конструкций из ПКМ для определения размера и глубины залегания дефектов

Чертищев В.Ю.; Диков И.А.; Яковлева С.И.

chertishchevv@mail.ru

uzk@viam.ru

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

В работе приведены результаты аналитических исследований по применению математического моделирования импедансного контроля для решения задачи по определению размеров и глубин залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из полимерных композиционных материалов по величине механического импеданса. Произведен выбор критериев различения глубин по слоям сотовых конструкций и параметров оценки условных размеров дефекта в каждом слое. По результатам исследований разработана методика определения размеров и глубин дефектов путем численной оценки характера отклонения импеданса на поверхности объекта контроля от соответствующих величин для годного изделия.

Ключевые слова:

акустические методы контроля, импедансный метод, механический импеданс, полимерные композиционные материалы, сотовые конструкции, углепластик, мотогондола

Введение

Обязательным условием обеспечения качества и, следовательно, безопасности воздушных судов является применение неразрушающих методов контроля и диагностики при разработке новых авиационных материалов, производстве и эксплуатации изделий и конструкций авиационной техники [1–6]. Данная работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.3: Методы неразрушающих исследований и контроля («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2].

В настоящее время в изделиях авиационной, космической и других видов техники широкое распространение получили трехслойные сотовые конструкции (обшивка-соты-обшивка). Также, все более широкое применение находят пяти- и семислойные сотовые конструкции из ПКМ. Примером могут служить мотогондолы перспективных авиационных газотурбинных двигателей, состоящие почти на 50% из подобных конструкций, которые решают как задачи связанные с обеспечением прочности, так и задачи связанные с шумо- и вибропоглощением [7].

В настоящее время многослойные сотовые конструкции (МСК) из ПКМ в основном контролируют акустическими, радиационными и тепловыми методами НК, из которых наибольшее распространение на предприятиях авиационной промышленности из-за нулевых раскрытий большинства типичных дефектов нашли специальные низкочастотные акустические методы контроля (импедансный совмещенным и отдельно-совмещенным датчиками, ударно-акустический, резонансный и др.), позволяющие выявлять большинство опасных дефектов [8, 9]. Однако, исходя из заложенных в них физических принципов контроля, данные методы могут дать лишь бинарную информацию о наличии или отсутствии дефекта, но не дают информации о его размере и глубине [10, 11].

С каждым годом возрастает сложность конструкций, изготавливаемых из ПКМ, их габаритные размеры и соответственно 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 или ремонт вместо утилизации. Это относится не только к деталям пострадавшим в условиях эксплуатации, но и деталям с заводским браком в условиях производства. Прочностной расчет конструкции с дефектом требует наличия численной информации о размере и глубине дефекта. Выбор правильной технологии ремонта современной многослойной сотовой конструкции из ПКМ также требует наличия информации о размере и глубине (или как минимум дискретном слое) залегания дефекта. Для трёхслойных сотовых конструкций на данный момент имеется ряд частичных решений задачи определения дискретного слоя залегания дефекта и его условного размера: любой дефект считается отслоением обшивки от сотоблока с одной или другой стороны конструкции, а примерный размер отслоения очерчивается по срабатыванию сигнализации дефекта [12]. Для изделий с бóльшим количеством слоев (в первую очередь для пяти- и семислойных сотовых конструкций) данная задача на текущий момент еще не нашла удовлетворительного универсального решения, хотя имеется ряд эмпирически установленных закономерностей по характеру отклонения маркера на экране амплитудно-фазового импедансного дефектоскопа от настройки для годного изделия [13].

Для установления связи размера и глубины дефекта с величиной импеданса в конкретном типе многослойной конструкции в свою очередь требуется аналитическое изучение влияния дефектов различного размера, расположенных на различных глубинах в многослойных сотовых конструкциях, на численную величину механического импеданса (МИ) на поверхности изделия над дефектом по сравнению с периодической картиной импедансов для годного изделия. Для этого требуется развитие

существующих специальных акустических низкочастотных методов (в первую очередь импедансного) в части создания возможности измерения численной величины МИ (как полного, так и по отдельности активной и реактивной его составляющих), которую в свою очередь теоретически возможно связать с информацией о размере и глубине залегания дефекта. Соответствующие исследования ранее были проведены ФГУП «ВИАМ» с разработкой технологии измерения численной величины МИ путем моделирования совмещенного импедансного датчика учитывающего и механические и электрические колебательные процессы, происходящие в нем [7].

Другой, более общей проблемой применения импедансного метода является то, что без информации о численной величине импедансов, сам импедансный метод контроля остается «черным ящиком» не имеющим связи между входными и выходными параметрами [14]. Имеются попытки вычисления различными расчетными путями реальных величин импеданса конструкций, например, при изменении толщин обшивок [15], они остаются бесполезными, т.к. даже вычислив истинную величину импеданса, остается без ответа вопрос, как при этом изменяются величины измеряемых параметров входных электрических сигналов на импедансном дефектоскопе.

Моделирование импедансного датчика

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 (Рисунок 1).

Отношение между комплексными величинами напряжений U_1 на генерирующем колебания пьезоэлементе излучателя и U_2 на пьезоэлементе

приёмника называется комплексным коэффициентом передачи датчика \mathbf{P} [16]:

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{U}_2}{\mathbf{U}_1} = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| e^{j\psi} = P \cdot e^{j\psi}, \quad (1)$$

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

Моделирование преобразователя произведено с помощью метода электромеханических аналогий. Соответствующая схема замещения для совмещенного импедансного преобразователя, нагруженного механическим импедансом контролируемого изделия Z_H через шунтирующую контактную гибкость Z_K , приведена на Рис. 1. Пьезоэлементы представлены полными эквивалентными схемами для продольного пьезоэффекта (обведены штриховыми линиями) и каждый из них имеет одну электрическую и две механические стороны, которые связаны между собой идеальным электромеханическим трансформатором с коэффициентом $1:N$ (N_I и N_{II} – для источника и приёмника соответственно) между силами \mathbf{F} и напряжениями \mathbf{U} . Подробное описание модели и её расчета приведено в [7].

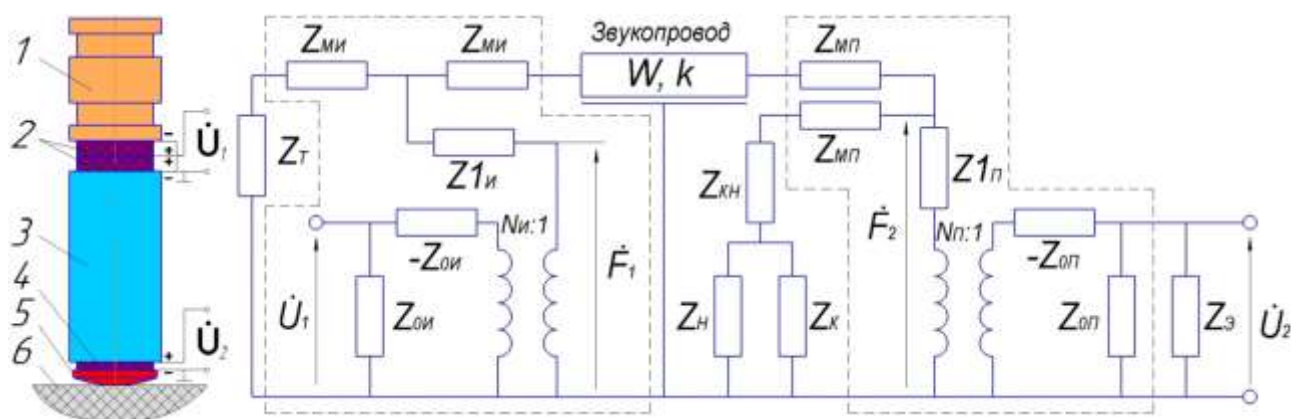


Рисунок 1 - Конструктивная схема (1 – тыльная масса; 2 – пьезоэлементы излучателя; 3 – звукопровод; 4 – пьезоэлемент приёмника; 5 – наконечник; 6 – объект контроля) и схема замещения совмещенного преобразователя

Расчёт внутренних электрических импедансов Z_0 , реактивных импедансов от массы пьезоэлементов Z_M и внутренних механических импедансов пьезоэлементов Z_1 произведён с учётом пренебрежения потерями при работе пьезоэлементов на низких частотах и с вычислением инерционных нагрузок как сосредоточенных масс, поскольку в рассматриваемых преобразователях диаметры и толщины пьезоэлементов много меньше длин упругих волн в рабочем диапазоне частот. Импедансы тыльной массы Z_T и контактного наконечника Z_{KH} так же рассчитаны как для инерционных сопротивлений от сосредоточенных масс. Наличие соединительного кабеля и входной цепи дефектоскопа учтено комплексным электрическим сопротивлением Z_3 .

Независимой переменной является реактивная составляющая X_H комплексной внешней нагрузки $Z_H = R_H + jX_H$, дополнительным параметром является коэффициент $v_H = R_H/|X_H|$, характеризующий отношение величин активной и реактивной составляющих импеданса, применением которого в дальнейших расчетах будет вводиться учёт величины энергетических потерь в контролируемом изделии. Графики коэффициента передачи $P(X_H, v_H)$ и фазового смещения $\psi(X_H, v_H)$ можно рассчитать по разработанной схеме замещения в численном виде. Однако с учетом ряда допущений для представленной модельной схемы получено аналитическое решение.

В соответствии со схемой замещения (Рисунок 1) активная R и реактивная X составляющие нагрузки на датчик со стороны изделия с учётом шунтирования контактной гибкостью соответственно равны

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

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

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.

В результате вычислений получено отношение напряжений на приёмном и излучающем пьезоэлементах в комплексном виде

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{-j\omega^2 n d_{II} d_{PI} M_1 \varphi e^{\frac{bl}{2}} (C^T + C_3)^{-1}}{\varphi \left(\frac{j\omega M_0}{Z_{Y3}} + e^{bl} \right) \text{ch}\varphi l + \left(\omega M_0 \left(\frac{jb}{2Z_{Y3}} - \frac{k}{W_{Y3}} \right) + e^{bl} \left(\frac{W_{Y3}(jk+2\beta)}{Z_{Y3}} - \frac{b}{2} \right) \right) \text{sh}\varphi l}, \quad (4)$$

где n – количество пьезопластин в излучателе; d_{II} и d_{PI} – пьезомодули пьезопластин источника и приёмника соответственно; $M_1 = m_T + n \frac{m_{II}}{2}$; m_T и m_{II} – массы тыльной нагрузки и одиночной пьезопластины источника соответственно; $M_0 = m_T + n \cdot m_{II}$; 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;

$k = \frac{\omega}{c_{ЗВ}}$ – волновое число; $c_{ЗВ} = \sqrt{\frac{E_{ЗВ}}{\rho_{ЗВ}}}$ – скорость звука; $E_{ЗВ}$ – модуль Юнга; $\rho_{ЗВ}$

– 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, входной цепи и монтажа;

$W_{Y3} = S_{Y3} \sqrt{E_{ЗВ} \rho_{ЗВ}}$ – волновое сопротивление узкого конца звукопровода (S_{Y3} – его площадь); $Z_{Y3} = \dot{F}_{Y3} / \dot{\xi}_{Y3}$ – нагрузка узкого конца стержня; \dot{F}_{Y3} и $\dot{\xi}_{Y3}$ – комплексные амплитуды силы и колебательной скорости на узком конце.

После ряда подстановок и вычислений из уравнения (4) с учётом (2) и (3) выведены искомые зависимости для коэффициента передачи $P(X_H, \nu_H)$ и фазового смещения $\psi(X_H, \nu_H)$

$$P = \frac{G}{H^2 + T^2} \sqrt{(H(\delta R - \varepsilon X) + T(\delta X + \varepsilon R))^2 + (H(\delta X + \varepsilon R) - T(\delta R - \varepsilon X))^2} \quad (5)$$

$$\psi = \arctg \frac{H(\delta X + \varepsilon R) - T(\delta R - \varepsilon X)}{H(\delta R - \varepsilon X) + T(\delta X + \varepsilon R)}, \quad (6)$$

где:

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

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

$$G = \frac{\omega^2 n d_{II} d_{PI} M_1 e^{\frac{bl}{2}} W_{y3}}{c^T + c_3}; \quad a = \operatorname{sh} \delta l \cos \varepsilon l; \quad h = \operatorname{ch} \delta l \sin \varepsilon l;$$

$$p = \operatorname{ch} \delta l \cos \varepsilon l; \quad q = \operatorname{sh} \delta l \sin \varepsilon l.$$

По формуле (5) был произведен расчет коэффициента передачи Р датчика ПАДИ-7 как функции от частоты f при $X_H = 0$ (на холостом ходу, без прижатия датчика к ОК) для нескольких величин добротности Q . Эта же зависимость была измерена экспериментально. Оказалось, что измеренные значения составляют примерно 0,6 от расчетных. Это объясняется отличием реальных пьезомодулей от расчетных и наличием не нулевых гибкостей в клеевых соединениях пьезоэлементов. После умножения ординат расчетной кривой на поправочный коэффициент $p_K = 0,6$ совпадение с экспериментом получилось удовлетворительным. Путём сравнения экспериментальных замеров с серией графиков при различных Q произведён выбор величины добротности для дальнейшего моделирования (для датчика ПАДИ-7 – 20).

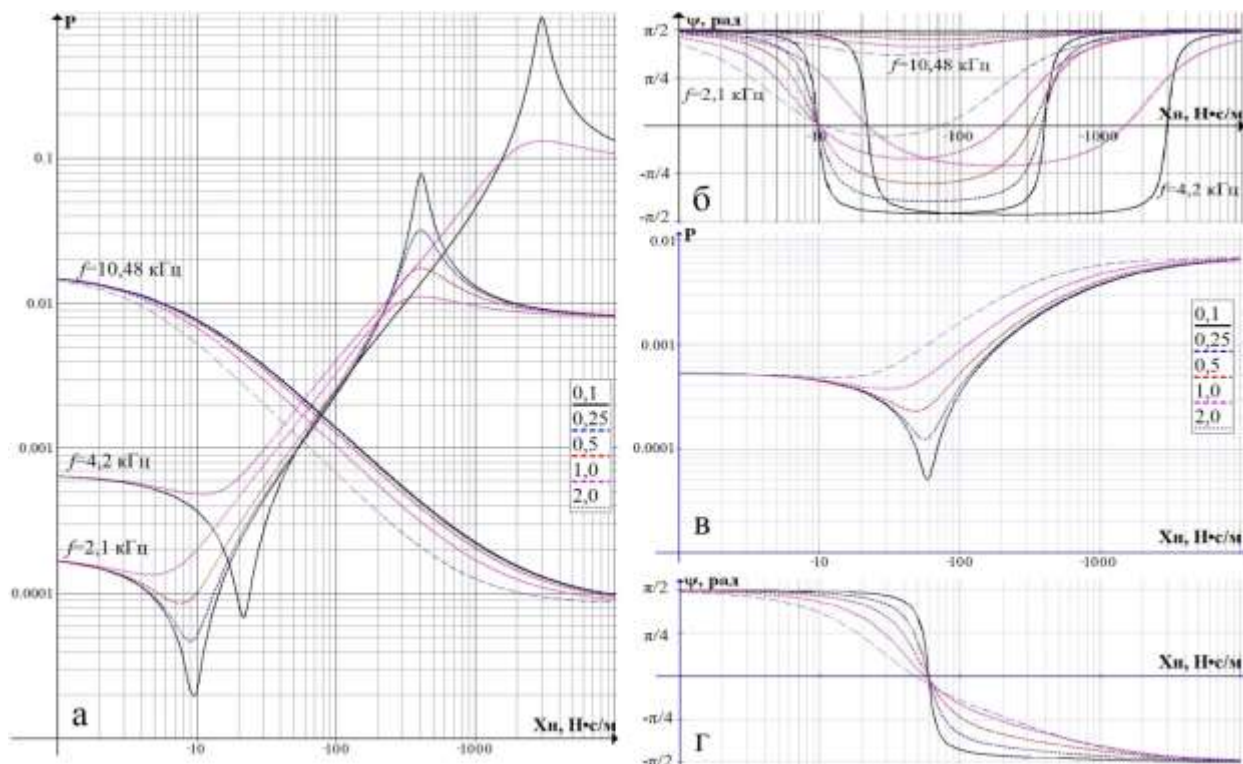


Рисунок 2 – Модельные зависимости $P(X_n, \nu_n)$ и $\psi(X_n, \nu_n)$ датчика ПАДИ-8-02 (а, б) на частотах 2,1 и 10,48 (для ПКМ) и 4,2 (для сплава ВТ6 – для сравнения) кГц и датчика ПАДИ-7 (в, г) на частоте 6,2 кГц для ПКМ

В результате модельного расчета (с предварительным внесением всех типов корректировок) получены зависимости для коэффициента передачи $P(X_n, \nu_n)$ и фазового смещения $\psi(X_n, \nu_n)$ для датчика ПАДИ-8-02 (P – Рисунок 2а, ψ – Рисунок 2б) 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 – Рисунок 2в, ψ – Рисунок 2г) на частоте 6,2 кГц для изделий из ПКМ.

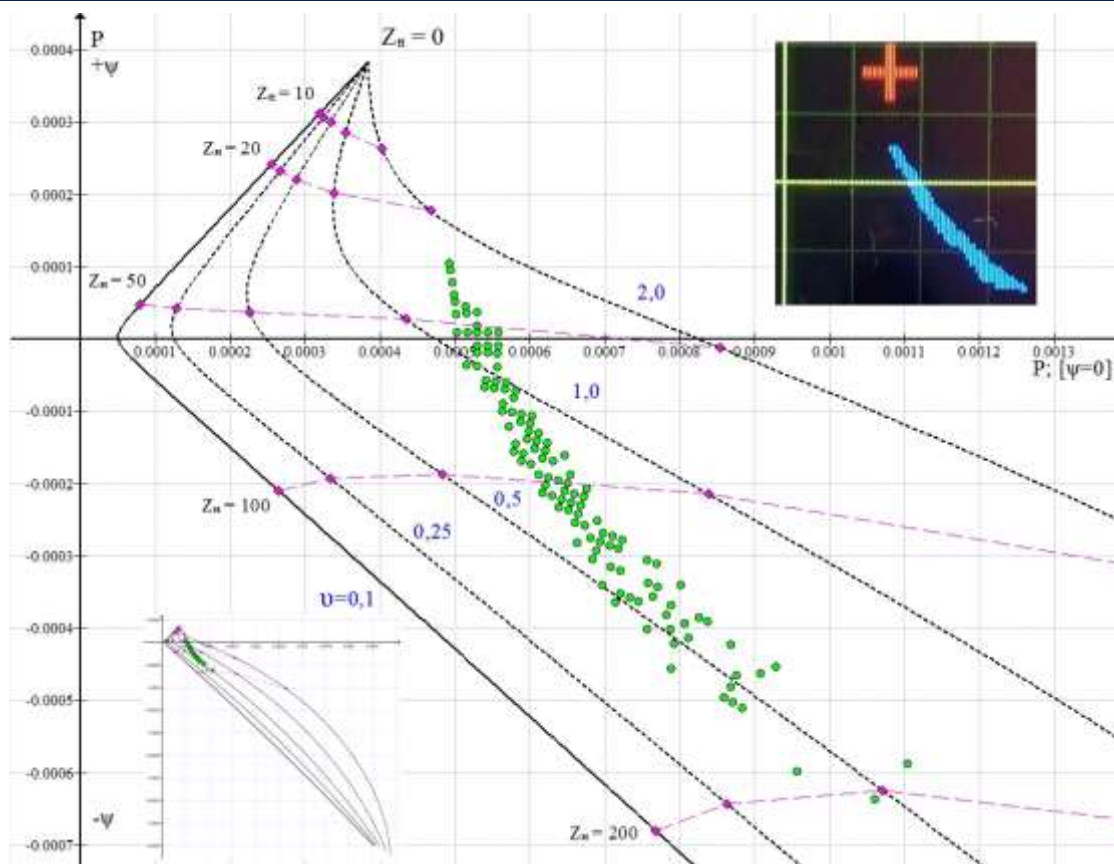


Рисунок 3 – Годографы при различных ν_H , объединяющие зависимости $P(X_H, \nu_H)$ и $\psi(X_H, \nu_H)$ для датчика ПАДИ-7 для ПКМ (ВКУ-39) на частоте 6200 Гц

Поскольку отдельный анализ графиков функций $P(X_H, \nu_H)$ и $\psi(X_H, \nu_H)$ затруднителен, целесообразнее объединять данные зависимости для получения годографов коэффициента передачи на комплексной плоскости. При этом текущее значение коэффициента передачи в комплексном виде представляется радиус-вектором, обладающим длиной, равной P , и образующим угол ψ с осью абсцисс. Соответствующие годографы для различных ν_H приведены на Рисунке 3 для датчика ПАДИ-7 на частоте 6,2 кГц. Также на годографы для примера наложена группа данных, измеренных в различных точках на годной семислойной сотовой конструкции с обшивками из углепластика.

Моделирование влияния дефектов на механический импеданс

Точный аналитический расчет механических импедансов над дефектами в трехслойных сотовых конструкциях проблематичен, а в пяти- и семислойных сотовых конструкциях и вовсе практически невозможен. Особенно при малой толщине монолитных обшивок и большом размере ячеек сот относительно толщин сотоблоков. Однако общий анализ влияния дефектов в зависимости от их размеров в различных слоях многослойной сотовой конструкции на величины реактивной и активной составляющих механического импеданса (и соответственно на величину ν_H) в сравнении с годной конструкцией для конкретизации уникальных признаков залегания дефекта в каждом из слоев, тем не менее, возможен.

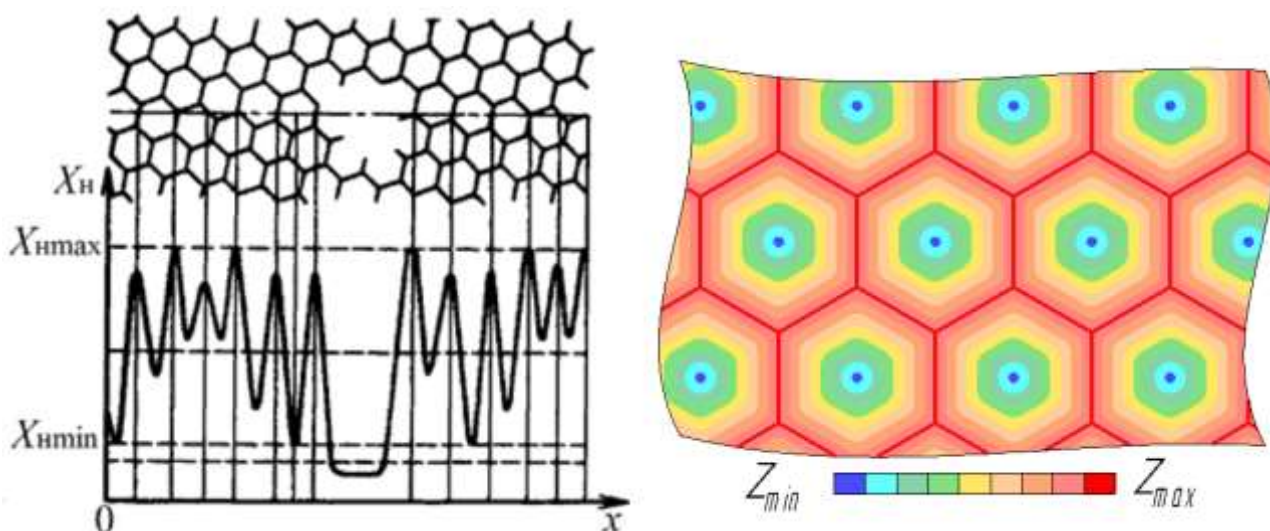


Рисунок 4 – Изменение величин механического импеданса на поверхности сотовой конструкции относительно стенок сот второго слоя

МИ на поверхности изделия над центром соты второго слоя в годном изделии имеет какие-то конкретные значения как активной R , так и реактивной X составляющих (или, соответственно, при измерениях по модельным годографам реактивной составляющей X_H и величины коэффициента ν_H). МИ на поверхности изделия над стенками сот второго слоя, в свою очередь, так же будет иметь конкретные величины X_H и ν_H . При

этом можно исходить из логичного предположения (которое в дальнейшем будет проверено экспериментально), что величина X_n над стенками выше, чем над центрами сот (Рисунок 4). Это объясняется тем, что при нагружении вдоль стенки коэффициент постели под обшивкой будет иметь максимальное значение, а под обшивкой над центрами сот минимальное (формально нулевое), а величина u_n напротив над центрами сот должна быть больше, поскольку в данных точках обшивка ближе к модели бесконечного тонкого листа, а значит должна возрасти доля активной составляющей R в МИ. Соответственно примем, что величина X_n колеблется (по модулю) от X_{min} (над центрами сот) до X_{max} (над стенками сот), а величина u_n соответственно от u_{min} (над стенками сот) до u_{max} (над центрами сот).

Механический импеданс однослойной пластины над дефектом

Рассмотрим закономерности изменения механических импедансов многослойных конструкций в зонах дефектов в наиболее простой ситуации, когда отделенный дефектом участок конструкции является одиночным тонким слоем (Рисунок 5), толщина h которого обычно постоянна (так как непрочлеи между слоями и расслоения в монолитных обшивках из слоистых пластиков параллельны поверхности изделия), причём $h \ll b$ (где b – размер отделенного слоя в плоскости обшивки). Такие участки могут рассматриваться как тонкие пластинки, определенным образом закрепленные по периметру.

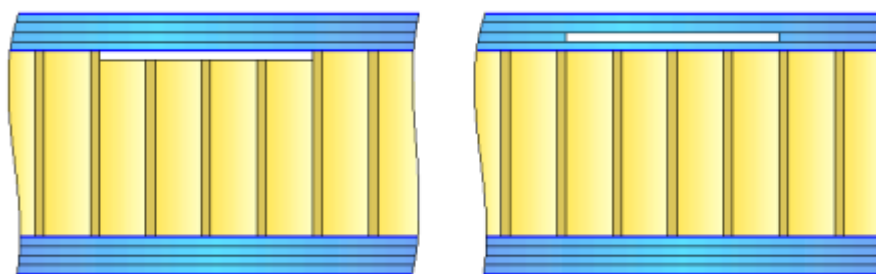


Рисунок 5 – Расслоение в первом слое (обшивке) и непрочлеи между первым и вторым слоями

Для оценки соответствия между истинными и измеряемыми с помощью разработанной модели импедансного преобразователя (с учётом всех корректировок, компенсирующих энергетические потери) величинами механического импеданса, было выполнено их сравнение на искусственных дефектах, МИ которых может быть вычислен аналитически.

В качестве искусственного дефекта было выбрано круглое плоскодонное фрезерование, которое позволяет получить в образце колебательную мембрану заданной толщины и диаметра. Механический импеданс в центре данных мембран с учетом ряда допущений может быть вычислен с использованием математической модели заземленной по периметру круглой пластины диаметром d и массой m (плотностью ρ) из материала с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν , возбуждаемой в центре нормальной сосредоточенной силой [16]. Для этой модели

$$Z = R + jX \cong jX = j \left(\omega m_{\text{Э}} - \frac{1}{\omega K_{\text{Э}}} \right), \quad (7)$$

где $m_{\text{Э}}$ и $K_{\text{Э}}$ – эквивалентные масса и гибкость соответственно, причём

$$m_{\text{Э}} = \frac{7}{216} \rho \pi h d^2; \quad K_{\text{Э}} = \frac{3(1-\nu^2)d^2}{16\pi E h^3}$$

Однако данная модель имеет ряд недостатков. В реальных изделиях граничные условия на краях отделенного дефектом слоя требующие жёсткого закрепления (полной неподвижности и отсутствия изгиба краёв пластинки) в полной мере не выполняются. Одной из причин является наличие клеевой плёнки, модуль упругости которой обычно значительно ниже модуля упругости обшивки. В результате в зонах перехода от зоны дефекта к зоне годного изделия (контур дефекта) происходит деформация клеевой плёнки, работающей как упругое сопротивление, уменьшающее жёсткость заделки. Другой, более значимой для сотовых конструкций причиной, является малый по сравнению с модулем упругости обшивки модуль упругости сотоблока $E_{\text{С}}$. При этом края отделенной дефектом пластинки фактически лежат на упругом основании и модельные граничные

условия не выполняются. Наконец, поскольку внутренний элемент конструкции (на который опирается дефект) обладает конечным импедансом, его колебательная скорость отлична от нуля. Поэтому входной импеданс отделенной дефектом зоны при уменьшении размера дефекта не возрастает неограниченно (вплоть до ∞) как того требует модель, а стремится к конечному пределу. Тем не менее, модель жёстко закрепленной пластинки является наиболее универсальной, имеющей хорошо изученные аналитические зависимости, и в определенном диапазоне исходных данных дающей удовлетворительные результаты относительно экспериментальных данных.

Рассмотрим изменение величин МИ над отслоением верхней обшивки первого слоя МСК от сотоблока второго слоя (дефект существует в трёх-, пяти- и семислойных сотовых конструкциях) на основании модели защемлённой пластинки (условия реального заземления далеки от модельных, однако для оценки общего тренда изменения МИ по мере роста размера дефекта данной модели достаточно). В годном изделии фрагмент обшивки над сотой в определенном приближении можно считать колеблющейся пластинкой диаметром d немного большим, чем размер «под гаечный ключ», т.е. примерно равным $1,8a_c$ (a_c – длина одиночной стенки полигональной соты; например при $a_c = 8$ мм можно принять d равным 14,4 мм). Проанализируем на основании модели защемлённой пластинки по формуле (7) как будет изменяться МИ по мере роста дефекта. Для наглядности построим отдельно графики инерционной $X_m = \omega t_3$ и упругой $X_k = \frac{1}{\omega K_3}$ составляющих МИ и результирующий график $Z \cong jX = j\left(\omega t_3 - \frac{1}{\omega K_3}\right)$ для обшивки из ВКУ-39 толщиной 1 мм при частоте $f = 6200$ Гц (Рисунок 6). Очевидно, что при диаметре непроклея под первым слоем конструкции (т.е. при сохранении толщины колеблющейся пластинки) больше диаметра ячейки соты второго слоя реактивная составляющая МИ

будет меньше, чем над центром соты годной конструкции (как из-за роста инерционной составляющей, так и из-за падения упругой). За минимальный размер непрочлея, который может быть достоверно выявлен, в большинстве случаев принято считать диаметр окружности описывающей три расположенных рядом ячейки сот (отсутствие трех стенок сот расположенных «звездой»). Диаметр колеблющейся пластинки минимального непрочлея как минимум вдвое больше диаметра ячейки, соответственно величина МИ над центром дефекта существенно (до нескольких раз) будет отличаться от МИ над центром соты в годной конструкции в меньшую по модулю сторону и будет меньше X_{min} .

Поскольку пластинка большего диаметра будет ближе к модели бесконечной пластины, то в, свою очередь, величина коэффициента u_n над центром дефекта будет больше, чем над центром соты в годной конструкции, т.е. больше u_{max} .

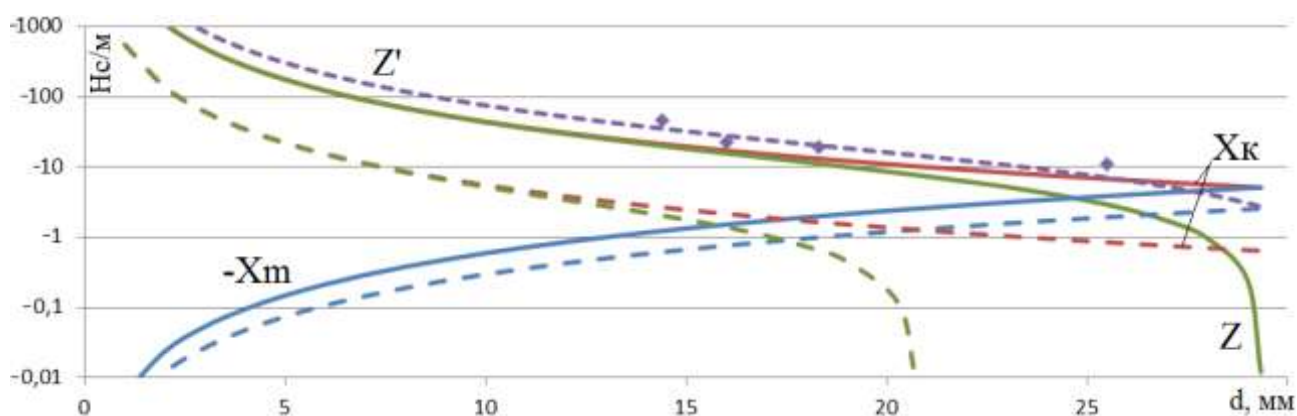


Рисунок 6 – Влияние диаметра непрочлея под первым слоем из ВКУ-39 толщиной 1 мм (сплошные линии) и расслоения в первом слое на глубине 0,5 мм (штриховые линии) на величину импеданса (по модели заземленного края)

При расслоении в обшивке первого слоя, т.е. при уменьшении толщины колеблющейся пластинки по сравнению с толщиной первого слоя, как видно из уравнения (7), величина реактивной составляющей МИ над центром

расслоения будет меньше, чем при непрочнее аналогичного диаметра. Соответственно, теоретически возможно выявление расслоений даже имеющих диаметр соизмеримый с размером ячейки сот второго слоя. Графики X_m и X_k и Z для расслоения в обшивке (ВКУ-39) на глубине 0,5 мм приведены на Рис. 6 штриховыми линиями.

Изгибную гибкость многослойной сотовой конструкции так же в определенном приближении можно представить, используя модель пластинки на упругом основании, имеющем коэффициент постели χ [14]

$$K_{и} = \frac{1}{8\sqrt{D}\sqrt{\chi}}, \quad (8)$$

где D – изгибная жесткость пластинки.

Однако в данном виде модель может быть полезна только в случае большой толщины обшивки (первого слоя) и относительно малого размера ячейки сот второго слоя, тогда суммарное влияние второго и последующих слоев на первый слой можно рассматривать как равномерное упругое основание. В реальных конструкциях надо рассматривать упругое основание, на которое опирается обшивка, как неравномерное поле упругости с максимумами величин коэффициента постели χ над стенками сот (Рис. 4). Соответственно при наличии расслоения в обшивке и непрочнее под обшивкой меняется структура поля величин χ под обшивкой. Это выражается тем, что над расслоениями и непрочнеями в первом слое пропадает строгая геометрическая индикация гексагональных стенок сот, а поле изменения МИ над дефектом приобретает равномерную концентрическую структуру с плавным падением величины МИ от краев дефекта к его центру. Отсутствие данной индикации, в свою очередь, служит как признаком наличия расслоения в первом слое и непрочнее между первым и вторым слоем, так и помогает достаточно точно очертить границы дефекта и определить условный диаметр дефекта. При примерном соответствии величины МИ над центром дефекта с предсказанием модели для такого же диаметра, делается вывод, что дефект является непрочнеем. Если МИ

значительно меньше модельного, то делается вывод, что дефект является расслоением в обшивке и рассчитывается примерная глубина расслоения, как модельной толщины колеблющейся пластинки заданного диаметра.

При наличии необходимости повышения точности вычисления глубины расслоения в первом слое, можно выполнить корректировку модельной зависимости при наличии конструктивно-подобного образца с серией плоскодонных фрезерований различного диаметра под первой обшивкой. В этом случае в центре каждого искусственного дефекта производится замер (с использованием модельных голографов) величины реактивной составляющей импеданса. На Рис. 6 приведен пример подобного замера на КПО 7-слойной сотовой конструкции с толщиной обшивки 1 мм и стеклопластиковыми сотами второго слоя с размером $a_c = 8$ мм. Для фрезерований диаметрами 14,4, 16, 18,3 и 25,5 мм величины импеданса составили соответственно -45,99, -22,78, -19,0 и -10,77 Н·с/м. Для варьирования модельной функции при наличии большого количества точек замеров рекомендуется введение двух коэффициентов коррекции перед инерционной и упругой составляющими импеданса по отдельности. Однако при малом количестве точек оптимальным решением является варьирование расчетной толщины колеблющейся пластины из условия минимизации среднеквадратического отклонения точек от модели. В примере скорректированная модельная функция Z' получена при «условной» толщине 1,2 мм. Соответственно при вычислении в дальнейшем глубины расслоения по модельной функции, для вычисления реальной толщины следует разделить полученную толщину на отношение «условной» и реальной толщин обшивок (в данном случае на $1,2\text{мм}/1,0\text{мм}=1,2$). Допустимым так же является вариант коррекции только упругой составляющей импеданса (учитывая, что ее изменение пропорционально толщине в кубе, в отличие от инерционной составляющей пропорциональной толщине в степени 1). Коррекции при этом проще всего подвергать величину модуля Юнга $E - E'_I$.

Механический импеданс двухслойной пластины над дефектом

Далее рассмотрим изменение величин МИ над дефектами в виде разрушения сотоблока второго слоя (разрушение любого рода, ведущее к отсутствию механической связи) и непрочлея между вторым и третьим слоями (такие дефекты существуют в трёх-, пяти- и семислойных сотовых конструкциях). Характерными особенностями дефектов являются наличие фрагмента сотоблока жёстко «подвешенного» к обшивке первого слоя и отсутствие механической связи между фрагментом сотоблока и более глубокими слоями конструкции (Рисунок 7).

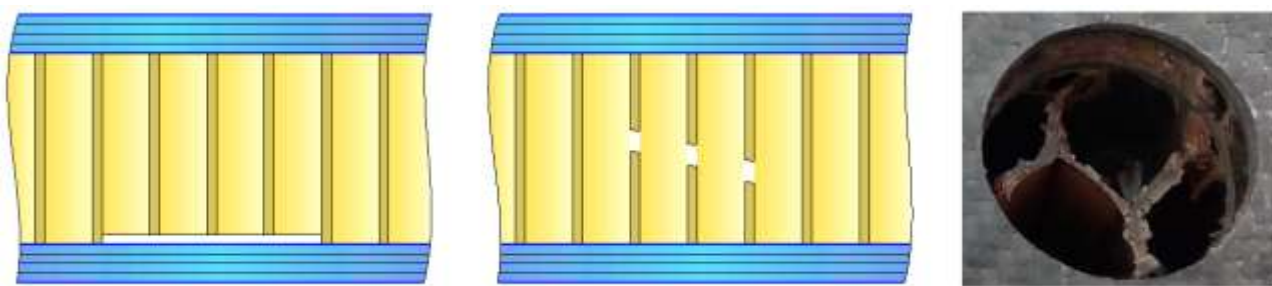


Рисунок 7 – Непрочлея между вторым и третьим слоями и разрушение сотоблока второго слоя

В общем случае импеданс многослойной конструкции зависит от большого количества параметров: упругих свойств и плотностей материалов отдельных слоев; толщин слоев; состояния соединений между слоями; размеров конструкции в направлении распространения упругих волн; коэффициентов затухания волн в слоях; наличия и геометрии несплошных периодических (сотовых) слоев. Упругие свойства и толщины слоев определяют жесткость многослойной конструкции. В частности, жесткость двухслойной конструкции можно найти из выражения для жесткости двухслойного стержня путем замены в нем зависимости для жесткости стержня цилиндрической жесткостью. В результате получим

$$D = D_1 \cdot \frac{1+2\alpha(\beta+3\beta^2+2\beta^3)+\alpha^2\beta^4}{1+\alpha\beta}, \quad (9)$$

где $\alpha = \frac{E_2(1-\nu_2^2)}{E_1(1-\nu_1^2)}$; $\beta = \frac{h_2}{h_1}$; $D_1 = \frac{Eh_1^3}{12(1-\nu_1^2)}$ (величины с индексами «1»

относятся к первому слою, с индексами «2» – ко второму).

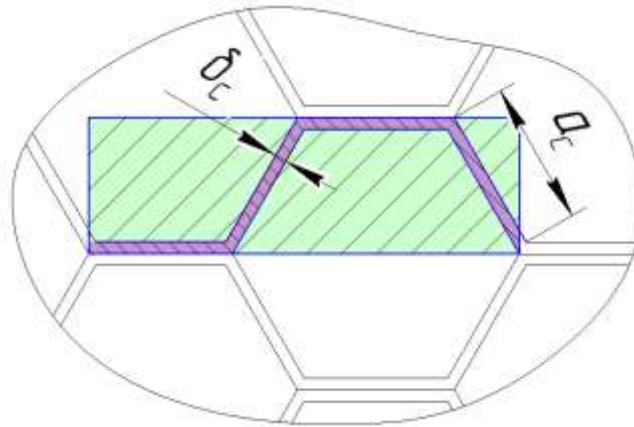


Рисунок 8 – Расчет удельного модуля Юнга E_C и удельной плотности ρ_C для полигональных сот

Для этой и дальнейших моделей для обеспечения возможности учета в них сотовых слоев, произведем расчет удельного модуля Юнга E_C и удельной плотности ρ_C для наиболее распространенных симметричных полигональных сот. Из-за выраженной анизотропии механических свойств сотоблока, в дальнейшем будем считать, что передача нормальных напряжений возможна только по направлению z (вдоль стенок сот), а касательные напряжения отсутствуют ($\nu_C = 0$), т.е. сотоблок не создает изгибных нагрузок. Выделим минимальный периодический объём сотоблока V_C (Рисунок 8), а также, исходя из предположения о соразмерности величин нормальных напряжений площадям стенок сот S_M и удельной площади сотоблока S_C , получим

$$E_C = \frac{S_M}{S_C} E_M = \frac{4 \cdot a_c \cdot \delta_c}{(a_c \cdot \sin \frac{\pi}{3}) \cdot (2a_c + 2a_c \cos \frac{\pi}{3})} E_M = \frac{8}{3\sqrt{3}} \frac{\delta_c}{a_c} E_M \approx 1,54 \frac{\delta_c}{a_c} E_M, \quad (10)$$

где E_M – модуль Юнга материала сотоблока; a_c – длина стороны ячейки сот; δ_c – толщина стенки сот.

Аналогичным образом рассчитаем удельную плотность сотоблока ρ_C как отношение массы материала сот m_M к периодическому объёму V_C

$$\rho_C = \frac{m_M}{V_C} = \frac{\rho_M V_M}{V_C} = \frac{S_M h}{S_C h} \rho_M = \frac{8}{3\sqrt{3}} \frac{\delta_c}{a_c} \rho_M \approx 1,54 \frac{\delta_c}{a_c} \rho_M, \quad (11)$$

где ρ_M – плотность материала сотоблока.

Моделирование колебаний данного дефекта является нетривиальной задачей. Однако для общей оценки создадим модель дефекта на основании формул (7), (9), (10) и (11), расширив модель колебания тонкой пластинки с защемленными краями, возбуждаемую в центре нормальной сосредоточенной силой, до аналогичной двухслойной пластинки. Механической импеданс над центром дефекта так же будет иметь только реактивные инерционную и изгибную составляющие

$$Z = R + jX \cong jX = j \left(\omega m'_{\text{э}} - \frac{1}{\omega K'_{\text{э}}} \right), \quad (12)$$

где $m'_{\text{э}}$ и $K'_{\text{э}}$ – эквивалентные масса и гибкость двухслойной пластинки соответственно.

Для однослойной пластинки $m_{\text{э}} = \frac{7}{216} \rho \pi h d^2 = \frac{7}{54} m_{\text{пл}}$, где $m_{\text{пл}}$ – масса колеблющейся пластинки. Для расчета массы двухслойной пластинки как суммы масс $m_{\text{сл1}}$ и $m_{\text{сл2}}$ первого и второго слоев примем толщины первого и второго слоев соответственно равными h_1 и h_2 . Плотности примем равными ρ_1 для первого слоя и ρ_2 для второго (однако для удобства сразу заменим ρ_2 на удельную плотность сотоблока ρ_C). Отсюда

$$m'_{\text{э}} = \frac{7}{54} m_{\text{пл}} = \frac{7}{54} (m_{\text{сл1}} + m_{\text{сл2}}) = \frac{7}{216} \pi d^2 (\rho_1 h_1 + \rho_C h_2) \quad (13)$$

Эквивалентная гибкость для однослойной пластинки при цилиндрической жёсткости листа D равна $K_{\text{э}} = \frac{3(1-\nu^2)d^2}{16\pi E h^3} = \frac{d^2}{64\pi D}$. Для двухслойной пластинки рассчитаем величину D в соответствии с формулой (9). Отсюда

$$K'_{\text{э}} = \frac{3d^2(1-\nu_1^2)(1+\alpha\beta)}{16\pi E h_1^3(1+2\alpha(\beta+3\beta^2+2\beta^3)+\alpha^2\beta^4)}, \quad (14)$$

где $\alpha = \frac{E_2(1-\nu_2^2)}{E_1(1-\nu_1^2)} \cong \frac{E_C}{E_1(1-\nu_1^2)}$ (ν_2 для сотоблока считаем равным 0; E_2 равен удельному модулю Юнга сотоблока E_C); $\beta = \frac{h_2}{h_1}$; (величины с индексами «1» относятся к первому слою, с индексами «2» – ко второму).

Из формул (13) и (14) видно, что и инерционная, и упругая составляющие МИ для двухслойной колеблющейся пластинки будут существенно отличаться от однослойной. Сравним зависимости для X_m и X_k и Z от диаметра дефекта d для непрочья под обшивкой из ВКУ-39 толщиной 1 мм и непрочья между вторым и третьим слоем, когда к аналогичной обшивке прикреплен слой сотоблока толщиной 10 мм из стеклопластика с размерами сот $a_c = 8$ мм и $\delta_c = 0,8$ мм (Рисунок 9). Величины E_c и ρ_c рассчитаем по формулам (10) и (11): $E_c \approx 1,386 \cdot 10^9$ Н/м², $\rho_c \approx 246,4$ кг/м³.

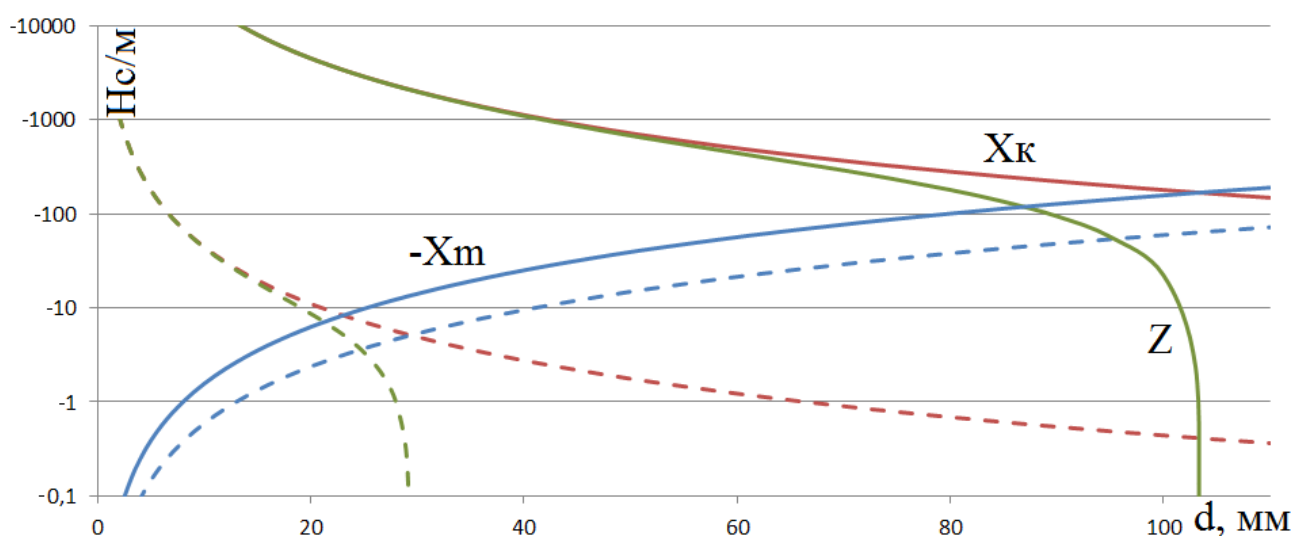


Рисунок 9 - Влияние диаметра непрочья под первым слоем из ВКУ-39 толщиной 1 мм (штриховые линии) и непрочья между вторым слоем стеклопластикового сотоблока толщиной 10 мм и третьим слоем (сплошные линии) на величину импеданса (по разработанной модели двухслойной заземленной пластинки)

Характер изменения величины МИ по мере роста размера дефекта в виде двухслойной пластинки в целом аналогичен тонкой одиночной пластинке, но величины всех реактивных составляющих существенно смещены в большую сторону, т.е. при одинаковой величине МИ диаметр дефекта в виде двухслойной пластинки будет существенно больше, а при одинаковой величине диаметра – МИ над двухслойной пластинкой будет больше. Помимо этого при малом размере двухслойной пластины над

дефектом (около $4a_c$) её МИ будет отличаться от годной конструкции значительно меньше, чем МИ однослойной пластинки над менее глубоким дефектом. В реальной конструкции картина МИ над двухслойным дефектом должна носить более сложный характер (в особенности в случае тонкой обшивки и относительно большого размера сот): несмотря на падение средней величины МИ от краев дефекта к его центру должно наблюдаться сложное поле величин МИ вдоль стенок сот «подвешенных» к колеблющейся пластинке, т.к. и инерционная составляющая МИ от прикрепленной массы сот, и изгибная составляющая от жесткости стенок сот будут проявляться сильнее над стенками сот, чем над их центрами. В результате над расслоением между вторым и третьим слоем и над разрушением сотоблока второго слоя должна наблюдаться индикация от стенок сот (в виде разницы величин МИ) при одновременном плавном снижении средних величин МИ от краев к центру дефекта. При достаточно большом размере дефекта его МИ (по модулю) будет меньше X_{min} над центром соты в годной конструкции, но при малом размере дефекта возможно отсутствие данного эффекта.

Данная индикация так же помогает примерно очертить границы дефекта, что в свою очередь позволит, зная диаметр модельного дефекта, удостовериться в том, что это непрочлей между вторым и третьим слоями при примерном соответствии величины МИ над центром дефекта с расчетными модельными величинами, либо, если МИ значительно меньше, то теоретически можно рассчитать примерную глубину разрушения сотоблока второго слоя как модельную толщину сотоблока, подвешенного к колеблющейся пластинке заданного диаметра.

Коррекция модели как для тонкой пластины обшивки первого слоя возможна, но из-за существенной разницы в величинах импедансов над центрами и стенками сот, это потребует сложных в методическом плане действий, поскольку все замеры нужно будет производить в одинаковых условиях (например, над стенками сот). Оптимальным решением при этом

является смещение датчика при замере МИ на реальном дефекте на ближайшую стенку, но следует учитывать, что замер при этом будет заведомо искажен из-за нецентрального расположения датчика. Коррекции так же желательно подвергать величину модуля Юнга материала сотоблока второго слоя – E'_{II} .

Механический импеданс трёхслойной пластины над дефектом

Далее рассмотрим изменение величин МИ над дефектами в виде расслоения в обшивке третьего слоя и непрочлея между третьим и четвёртым слоями (Рисунок 10). Данные дефекты существуют в пяти- и семислойных сотовых конструкциях, хотя с учётом двустороннего контроля изделий импедансным методом для пятислойных конструкций выявление непрочлея между третьим и четвёртым слоями не требуется, т.к. он выявляется как непрочлей между вторым и третьим слоями с противоположной стороны. Характерной особенностью данных дефектов является, то, что колеблющаяся «пластина» над дефектом является полноценной трёхслойной сотовой конструкцией и сотоблок второго слоя опирается на упругое основание третьего слоя.

В данном случае применение модели защемленной по краям однослойной пластины уже невозможно, т.к. полноценная трёхслойная сотовая конструкция из-за высокой анизотропии механических свойств слишком далека от тонкой колеблющейся пластины при реальных надёжно выявляемых диаметрах дефектов (обычно от 10 до 30 мм в зависимости от конкретной конструкции), а условия закрепления данной «пластины» недопустимо отличаются от граничных условий модельного защемления.

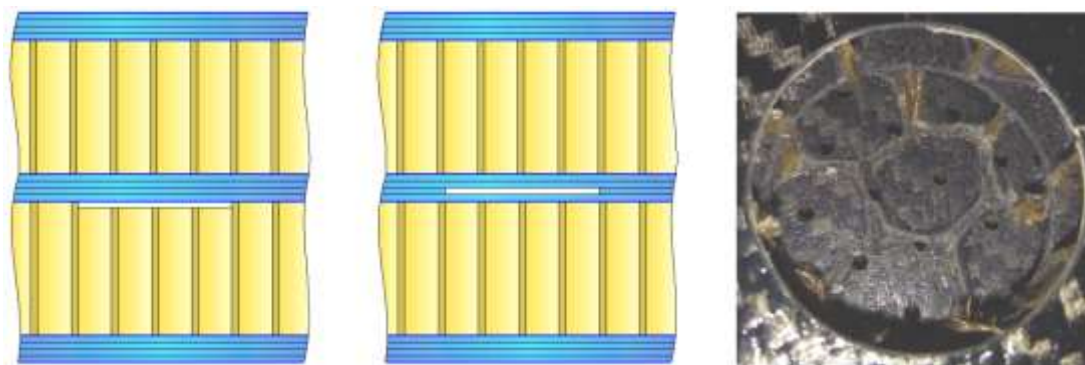


Рисунок 10 – Расслоение в третьем слое (обшивке) и непрочной связи между третьим и четвертым слоями

Моделирование колебаний трехслойных конструкций является сложной с математической точки зрения задачей, которой посвящено достаточно большое количество работ. Для оценки свойств интересующего нас дефекта воспользуемся наиболее подходящей для общего анализа моделью трехслойной упругой пластины, защемленной по контуру, колеблющейся под действием нестационарной локальной распределенной нагрузки вогнутой параболической формы (наиболее близкой к реальному нагружению) на упругом основании Винклера [17].

Рассмотрим малые осесимметричные поперечные колебания несимметричной по толщине упругой трехслойной круговой пластины на упругом основании, возбужденные внезапно приложенными нагрузками (Рисунок 11). Решение задачи приводится в цилиндрической системе координат r , φ и z . Заполнитель, т.к. он является сотоблоком, считаем легким (пренебрегаем его работой в тангенциальном направлении). Внешняя вертикальная нагрузка $q = q(r, t)$ симметрична относительно оси z и не зависит от координаты φ . Конструкция опирается на упругое основание, отвечающее на прогиб реакцией в соответствии с моделью Винклера $q_R = k_0 w$, где k_0 – коэффициент жесткости упругого основания (в данном случае идентичный коэффициенту постели χ). На контуре пластинки предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительно сдвигу слоев. В силу симметрии задачи тангенциальные

перемещения в слоях отсутствуют. Для данной модели искомыми считаются функции прогиба пластинки $w = (r, t)$, относительного сдвига в заполнителе $\psi = (r, t)$ и радиального перемещения координатной поверхности $u = (r, t)$, на основании которых будет производиться анализ изменения величины импеданса.

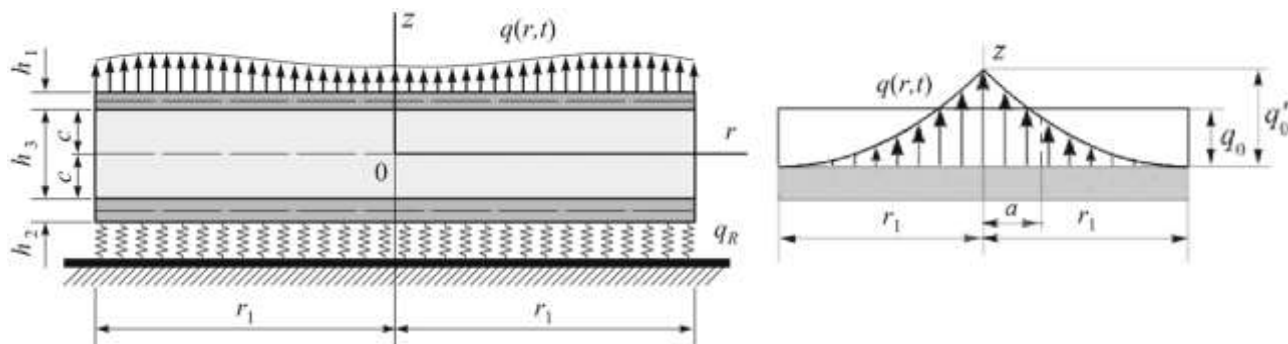


Рисунок 11 – Модель трёхслойной пластины колеблющейся под внешней вогнутой параболической нагрузкой на упругом основании Винклера

Численные результаты получены для заземленной по контуру круговой трёхслойной пластины из материалов Д16Т–фторопласт–Д16Т, опирающейся и не опирающейся на основание средней жесткости $k_0=10^8$ Па/м при $a=0,5$ [17]. Линейные размеры отнесены к радиусу пластины r_1 . Относительные толщины слоев $h_1 = h_2 = 0,01$, $c = 0,05$ (т.е. пластина является тонкой, т.к. суммарная толщина всей конструкции пластины в 28,6 раз меньше диаметра). На Рисунке 12 приведены полученные модельные зависимости для прогиба w (в отношении к радиусу r_1) центра пластины от времени t на упругом основании и без него. Очевидно, что при наличии упругого основания возрастает величина реактивной составляющей импеданса на поверхности, что видно как по уменьшению амплитуды прогиба, так и по росту частоты собственных колебаний.

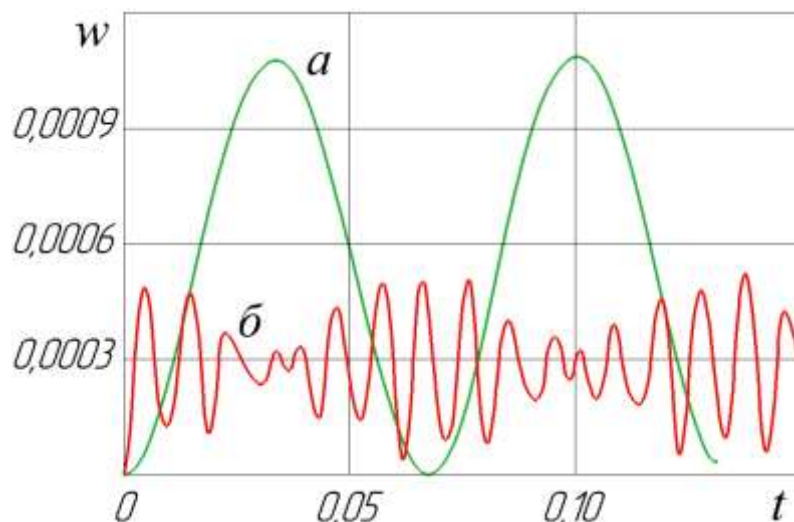


Рисунок 12 – Изменение прогибов во времени для модели трёхслойной пластины при воздействии локальной распределенной нагрузки вогнутой параболической формы при отсутствии основания (a) и на основании средней жесткости (b)

Для анализа влияния дефектов важны два вывода из модельных результатов. Во-первых, импеданс над дефектом будет ниже, чем в годном изделии, т.к. это можно рассматривать как отсутствие упругого основания под трехслойной пластиной. Во-вторых, разница в величинах реактивных составляющих механических импедансов при реалистичных соотношениях толщин слоев и выявляемых диаметров дефектов, когда относительный диаметр крайне мал, будет относительно небольшой. Однако, как было установлено ранее, в колеблющейся пластине должна быть значительно ниже величина активной составляющей импеданса, чем в условно бесконечном годном изделии. Как следствие, в сотовых конструкциях (обладающих большой разницей в величинах реактивных и активных импедансов над центрами и стенками сот второго слоя) над стенками сот в соответствии с модельным анализом для сплошных трехслойных конструкций должно наблюдаться малое, и при этом относительно равномерное по величине, падение реактивной составляющей импеданса и возрастание средней величины коэффициента ν_n , при этом, соответственно, должно происходить

существенное падение абсолютной величины МИ, а над центрами сот при тонкой обшивке первого слоя возможно столь низкое влияние на величину импеданса изменения условия нагружения трехслойной пластины на основании, что имеющиеся изменения могут не выйти за пределы настроечных браковочных допусков аппаратуры и не будут зафиксированы на фоне годного изделия (т.е. не произойдет срабатывания сигнализации дефекта).

Экспериментальная проверка возможности определения размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ с численным измерением величины механического импеданса специальным оборудованием

Для экспериментальной проверки возможности определения глубины дефектов по численной величине импеданса на КПО было проведено сканирование с шагом 1 мм с записью первичных данных по величинам коэффициента передачи и фазового смещения с помощью базового осциллографа прибора «ДАМИ-С-09». Полученные данные в дальнейшем были оцифрованы и для каждой точки на основании рассчитанного ранее амплитудно-фазового годографа (Рисунок 3), полученного путем моделирования совмещенного импедансного датчика, были вычислены соответствующие величины реактивной составляющей механического импеданса X_H и коэффициента энергетических потерь u_H .

Результаты приведены в виде С-сканов по реактивной составляющей МИ (Рисунок 13а; по модулю) и по абсолютной (полной) величине механического импеданса $Z_H = R_H + jX_H = u_H |X_H| + jX_H$ (Рисунок 13б; с медианной фильтрацией) амплитуда которого соответственно равна $Z_H = \sqrt{(u_H X_H)^2 + X_H^2}$. Приведены результаты по всей просканированной поверхности (для демонстрации различия между дефектными и бездефектными зонами) без учета срабатывания автоматической

сигнализации дефектов при выходе маркера за границы ЗФС, очерченной для годного изделия. Однако для наглядности зоны срабатывания АСД (дефекты) обведены пунктирными линиями. Шкала соответствия градации цвета и величины импеданса приведена в Н·с/м.

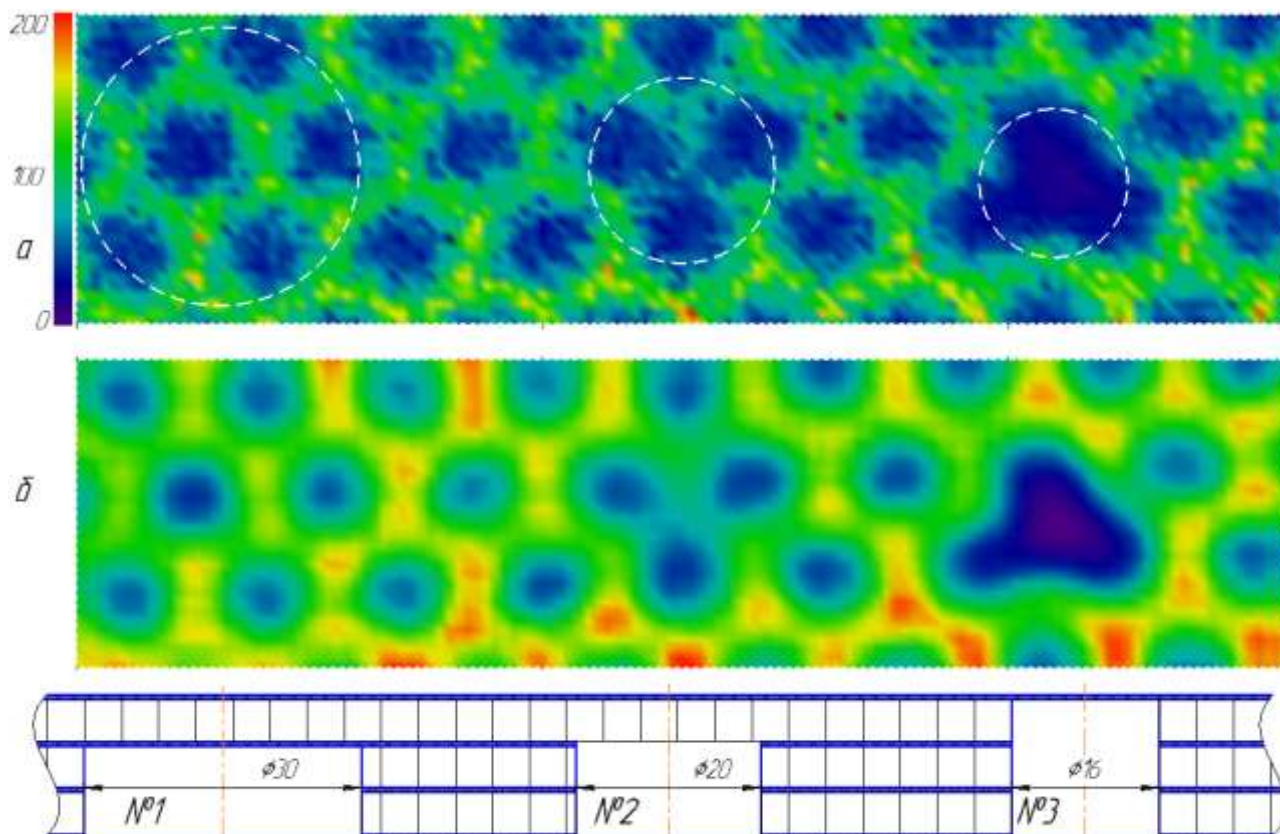


Рисунок 13 - С-сканы по реактивной составляющей (а; по модулю) и абсолютной величине механического импеданса (б; с медианной фильтрацией) в Н·с/м

Для дефекта №3, имитирующего расслоение в первом слое и/или непрочной связи между первым и вторым слоями, зафиксировано в соответствии с выполненным анализом как общее падение (здесь и далее имеется в виду снижение по модулю) величины реактивной составляющей импеданса до -18 Н·с/м в центре дефекта по сравнению с соответствующей минимальной величиной в годном изделии над центрами сот $X_{min} \cong -(30—35)$ Н·с/м, так и отсутствие характерной индикации с высокими величинами импеданса над стенками сот и соответствующая картина

равномерного кругового падения величины импеданса от краев дефекта к его центру.

Для дефекта №2, имитирующего непрочлей между вторым и третьим слоями и/или разрушение сотоблока второго слоя, зафиксирована сложная картина величин импеданса соответствующая выполненному ранее анализу. Наблюдается общее падение величин реактивной составляющей МИ, но значительно меньшее, чем при непрочлее под первым слоем. Наблюдается характерная индикация от стенок сот из-за прикрепленной массы сотоблока, а также, как и прогнозировалось, вдоль «радиальных» стенок сот (ориентированных примерно по направлению от края дефекта к его центру) наблюдается плавное падение МИ от $-(130—140)$ до примерно -80 Н·с/м (примерно на 40%) в пределах одной стенки сот с соответствующим возрастанием величины v_H от $0,62—0,65$ до $0,839$. Величины X_H и v_H над центрами сот над дефектом не вышли за пределы разброса значений для фона из-за малого размера дефекта (на границе надежной выявляемости) и достаточной отдаленности данных зон от центра дефекта. Дефект надежно идентифицируется визуально и по С-скану реактивной составляющей МИ X_H и по С-скану по абсолютной величине МИ Z_H по индикации стенок сот и изменению величин X_H вдоль «радиальных» стенок сот в сторону уменьшения от краев дефекта к его центру. При достаточно большом размере дефекта так же возможна численная идентификация по величинам $X_H < X_{min}$ и $v_H > v_{max}$ в соответствии с выявленными ранее критериями. При малом размере дефекта (когда условия $X_H < X_{min}$ и $v_H > v_{max}$ не выполняются) численная идентификация может производиться по изменению величин X_H вдоль «радиальных» стенок сот.

Для дефекта №1, имитирующего непрочлей между третьим и четвёртым слоями и/или расслоение в третьем слое, так же зафиксирована сложная картина величин импеданса соответствующая выполненному ранее анализу. Величины реактивной составляющей МИ X_H по сравнению с фоном

уменьшились, но при этом довольно незначительно до $-(120—125)$ Н·с/м, что видно по С-скану на Рисунке 13а. Однако над дефектом существенно уменьшились величины коэффициента энергетических потерь ν_H до величин 1,2—1,3 над центрами сот при фоне примерно равном 1,6—1,7 и до величин 0,48—0,50 над стенками сот при фоне 0,65—0,70, что соответственно привело к уменьшению абсолютных величин механического импеданса Z_H .

Список литературы

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1. С. 3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2001. № 1. С. 3–8.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
5. Mishurov K.S., Murashov V.V. Determination of the Composition and Density of Polymer Composite Materials in Details and Constructions by Nondestructive Methods // *Polymer Science. Series D*. 2016. V. 9. No. 2. P. 176–180.
6. Оспенникова О.Г. Итоги реализации стратегических направлений по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей за 2012–2016 гг. // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
7. Чертищев В.Ю., Бойчук А.С., Диков И.А., Яковлева С.И., Генералов А.С. Определение глубины залегания дефектов в многослойных

конструкциях из ПКМ акустическими методами по величине механического импеданса // Дефектоскопия. 2018. № 8. С. 21–34. DOI: 10.1134/50130308218080031.

8. MIL-HDBK-1823A. Department of Defense Handbook: Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment. 2009. 171 p.

9. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: Издательский дом «Спектр». 2016. 244 с.

10. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 59–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-59-67.

11. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.

12. Мурашов В.В. Исследование и совершенствование акустических низкочастотных методов контроля изделий из слоистых пластиков и многослойных клееных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2018. №4. С. 87–93. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-87-93.

13. Генералов А.С., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Яковлева С.И., Диков И.А. Выявление расслоений и непрочных мест в 5- и 7-слойных сотовых деталях и элементах конструкций из ПКМ акустическим методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №3. С. 23–26.

14. Мурашов В.В. Применение вариантов акустического импедансного метода для контроля деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 469–482. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-S-469-482.

15. Стариковский Г.П., Жовнер П.Б. Неразрушающий контроль трехслойных интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2012. №6. С. 58–62.

16. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.

17. Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В. Колебания круговых трехслойных пластин на упругом основании под действием параболических нагрузок // Труды МАИ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №78. С. 1–12. <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53490> (дата обращения 11.12.2019 г.).

УДК 678.8:620.179

Экспериментальное исследование зависимости параметров ультразвуковых волн от модуля упругости ПКМ

Чулков Д.И.; Терехин А.В. к.т.н.; Типикин М.Е.

info@technologiya.ru

*АО «ОНИИП «Технология» им. А.Г. Ромашина», Государственный научный
центр Российской Федерации*

Аннотация:

В данной статье представлены результаты экспериментального исследования взаимосвязи акустических параметров (скорости распространения и амплитуды) ультразвуковых волн с упругими характеристиками (модуль упругости при изгибе и растяжении) полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова:

полимерные композиционные материалы, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, модуль упругости

Введение

Для обеспечения высокого качества элементов ответственных конструкций, изготовленных из полимерных композиционных материалов необходимо применение современных методов и средств неразрушающего контроля. Важным направлением неразрушающего контроля качества материалов и конструкций из полимерных композиционных материалов является определение физико-механических характеристик, и в частности, модуля упругости.

Как известно, динамический модуль упругости материала связан со скоростью ультразвуковых волн функциональной зависимостью. Однако, ввиду ярко выраженной анизотропии свойств композиционных материалов, в том числе и акустических [1, 2], определение модуля упругости неразрушающим ультразвуковым методом возможно лишь по предварительно построенным регрессионным зависимостям [3].

Исходя из выше сказанного, целью данной работы является проведение экспериментального исследования взаимосвязи акустических параметров (скорости распространения и амплитуды) ультразвуковых волн с упругими характеристиками (модуль упругости) полимерных композиционных материалов на примере стеклопластиков с однонаправленным и косоугольным армированием.

Образцы и методы исследования

Для проведения экспериментальных исследований изготовлены 2 панели, армированные шестью слоями стеклоткани ТС 8/3-К-ТО. Характеристики панелей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики экспериментальных панелей

№ панели	Связующее	Выкладка стеклоткани	Кол-во слоев	Размер, мм
1	Фенол-формальдегидное	[0; +33; -33; +63; -63; 0]	6	605×335×1,5
2	Эпоксидное (ЭДТ-10)	однаправленная	6	320×260×1,9

Из панелей 1 и 2 были изготовлены образцы для определения модуля упругости при изгибе и растяжении по ГОСТ 9550-81 «Межгосударственный стандарт. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе».

Перед определением модуля упругости разрушающим методом, в каждом образце были измерены скорости и амплитуды ультразвуковых волн, распространяющихся по нормали к плоскости армирования (по толщине) и вдоль слоев стеклоткани.

Измерение параметров (C_h , A_h) ультразвуковых волн, распространяющихся по нормали к плоскости армирования (по толщине), осуществлялось с помощью двух прямых пьезоэлектрических преобразователей частотой 10 МГц. Схема измерения представлена на рисунке 1.

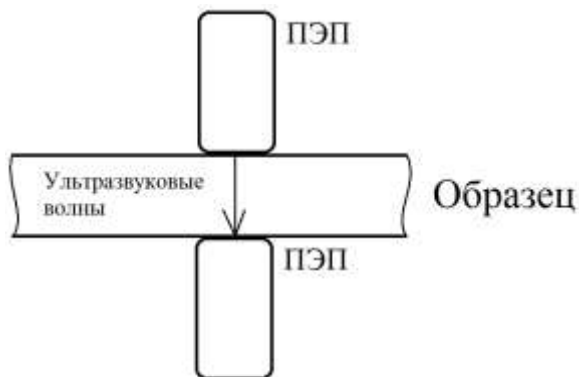


Рисунок 1 – Схема измерений параметров ультразвуковых волн, распространяющихся по нормали к плоскости армирования

Для проведения измерений параметров ($C_{узв}$, $A_{узв}$) ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль слоев стеклоткани, были разработаны и изготовлены пьезоэлектрические преобразователи резонансной частотой 1 МГц с коническими призмами, позволяющие измерять скорость ультразвуковых волн вдоль слоев стеклоткани на разной базе прозвучивания (расстояние между возбуждающим и принимающим преобразователями). В качестве генератора и приемника ультразвуковых волн в обоих случаях применялся цифровой ультразвуковой дефектоскоп. Схема измерения и внешний вид преобразователей представлены на рисунке 2.

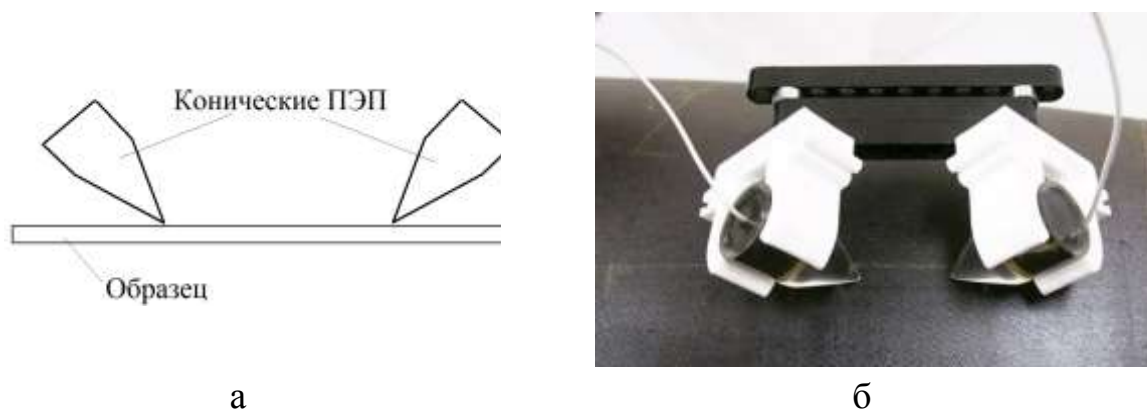


Рисунок 2 – Схема измерений (а) и внешний вид ПЭП с коническими призмами и приспособление для их фиксации (б)

Оценка степени взаимосвязи между исследуемыми параметрами осуществлялась с помощью коэффициента корреляции, вычисляемого по формуле [4]:

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}}, \quad (1)$$

где $S_x = \sum(x_i - x_{cp})^2$ и $S_y = \sum(y_i - y_{cp})^2$ – суммы квадратов регрессионных остатков, параллельных осям X и Y;

$S_{xy} = \sum[(x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})]$ – сумма квадратов регрессионных остатков, перпендикулярных прямой, S_{xy} ; x_{cp} и y_{cp} – среднее арифметическое значение по всем x_i и y_i .

Для оценки качества регрессионных моделей использовался коэффициент детерминации R^2 , вычисляемый по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\Sigma} \quad (2)$$

где \hat{y}_i – значение, получаемое по уравнению регрессии, \bar{y}_i – среднее значение.

Для оценки качества многопараметровых регрессионных моделей использовался скорректированный коэффициент детерминации, определяемый по соотношению:

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k-1}, \quad (3)$$

где n – объем выборки; k – число параметров модели.

Результаты экспериментальных работ

После проведения измерений параметров УЗВ, по схемам на рисунках 1 и 2 и определения модуля упругости при изгибе разрушающим методом был проведен корреляционный анализ полученных данных. Коэффициенты корреляции между параметрами акустических сигналов и модулем упругости при изгибе для образцов из панели 1 (выкладка [0; +33; -33; +63; -63; 0]) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции между параметрами акустических сигналов и модулем упругости для образцов из панели 1

Параметр УЗВ	Направление основы	Направление утка
C_h	0,25	0,55
A_h	0,57	0,56
$C_{УЗВ}$	0,83	0,92
$A_{УЗВ}$	0,18	0,49

Как видно из таблицы 2, между скоростью ультразвуковых волн вдоль слоев стеклоткани ($C_{УЗВ}$) и модулем упругости при изгибе наблюдаются значимые регрессионные зависимости, что говорит о возможности оценки модуля упругости по скорости ультразвуковых волн вдоль слоев

стеклоткани. Из таблицы также видно, что зависимость между скоростью ультразвуковых волн, распространяющихся по нормали к плоскости армирования, амплитудами ультразвуковых волн и модулем упругости при изгибе либо отсутствует, либо слабее зависимости между модулем упругости и скоростью ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль слоев стеклоткани. Отсутствие зависимости между амплитудой и модулем упругости может быть объяснено погрешностью определения амплитуды, связанной с качеством и стабильностью акустического контакта. Отсутствие или слабая зависимость между скоростью ультразвуковых волн, распространяющихся по нормали к плоскости армирования, и модулем упругости может быть объяснена малым путем прохождения ультразвуковых волн в материале образца, равным его толщине (около 1,5 мм) по сравнению с ультразвуковыми волнами, распространяющимися вдоль слоев стеклоткани (около 30 мм).

Исходя из полученных результатов дальнейший анализ будет проведен лишь для данных по скорости ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль слоев стеклоткани.

На рисунке 3 представлена экспериментальная зависимость модуля упругости при изгибе от скорости ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль слоев стеклоткани, для образцов из панели 1. Зеленым цветом отмечены образцы, вырезанные из панели вдоль направления нитей утка, красным – вдоль направления нитей основы.

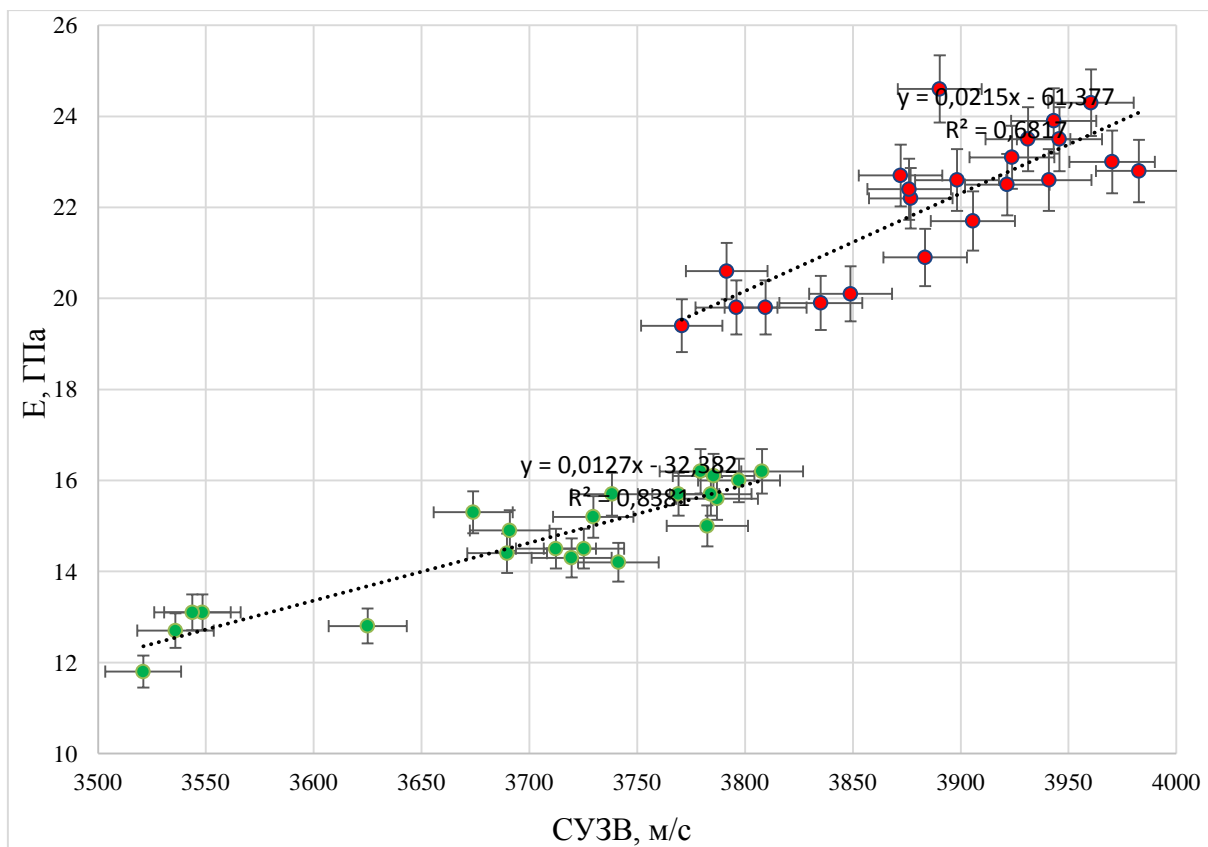


Рисунок 3 – Зависимость модуля упругости при изгибе от скорости ультразвуковых волн в образцах из панели 1 (выкладка [0;+33;-33;+63;-63;0])

Из рисунка 3 видно, что модуль упругости образцов составляет 11,8 – 16,2 ГПа для направления утка и 19,4 – 24,6 ГПа для направления основы. При этом скорость ультразвуковых волн изменяется в диапазоне 3520 – 3810 м/с, для образцов, вырезанных вдоль направления утка, и 3770 – 3980 м/с для образцов, вырезанных вдоль направления основы. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что для материала образцов из панели 1 между модулем упругости при изгибе и скоростью ультразвуковых волн наблюдаются регрессионные зависимости ($R^2 = 0,84$ для утка, $R^2 = 0,68$ для основы), что говорит о возможности оценки модуля упругости материала по изменению скорости ультразвуковых волн.

На рисунке 4 представлен график зависимости модуля упругости при изгибе от скорости УЗВ вдоль слоев стеклоткани для образцов из панели 2 (эпоксидное связующее, однонаправленная выкладка). Зеленым цветом

отмечены образцы, вырезанные вдоль направления нитей утка, красным – вдоль направления нитей основы.

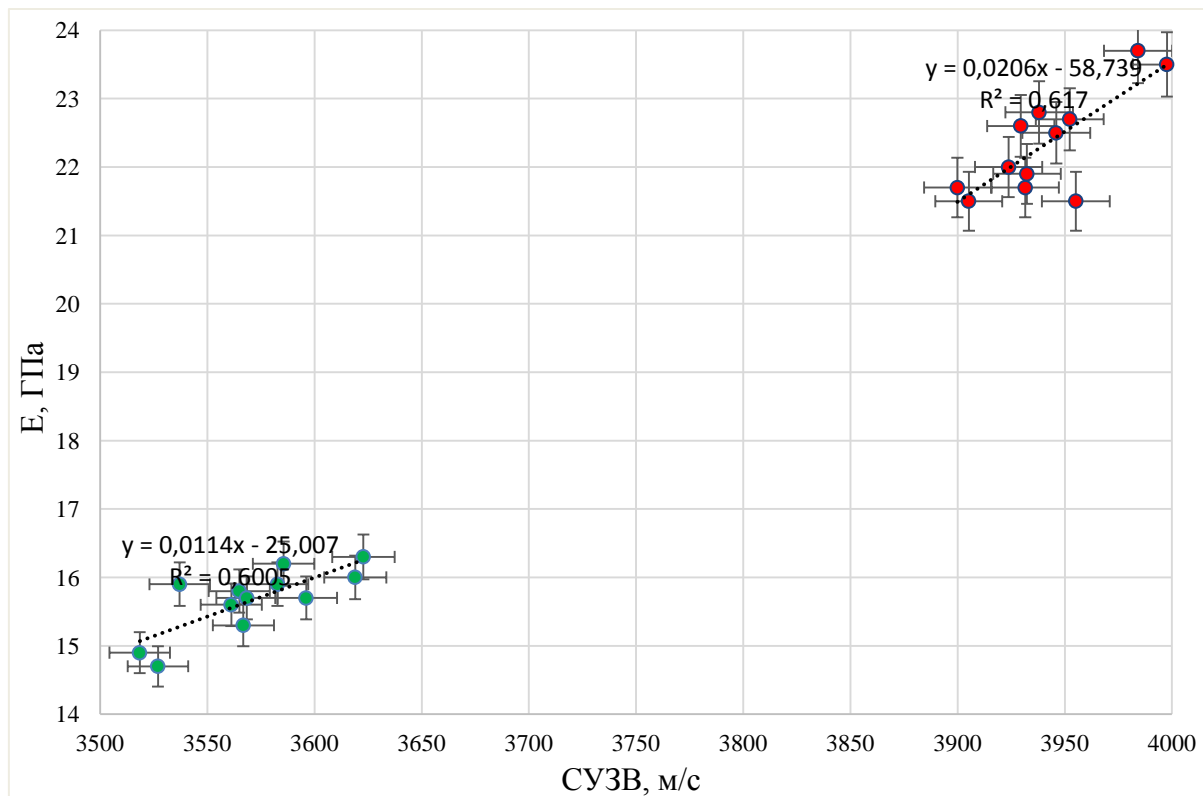


Рисунок 4 – Зависимость модуля упругости при изгибе от скорости ультразвуковых волн для образцов из панели 2 (эпоксидное связующее, однонаправленная выкладка)

Из рисунка 4 видно, что модуль упругости образцов находится в диапазоне 14,5 - 16,5 ГПа для направления утка и 21 – 24 ГПа для направления основы. При этом скорость ультразвуковых волн изменяется в диапазоне 3518 – 3623 м/с вдоль направления утка и 3900 - 4000 м/с вдоль направления основы. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что для материала панели 2 (эпоксидное связующее, однонаправленная выкладка) наблюдается регрессионная зависимость между модулем упругости при изгибе и скоростью ультразвуковых волн ($R^2 = 0,60$ для утка, $R^2 = 0,62$ для основы), что говорит о возможности оценки модуля упругости материала по скорости ультразвуковых волн.

На рисунке 5 представлена зависимость модуля упругости при растяжении от скорости ультразвуковых волн вдоль слоев стеклоткани для образцов из панели 1. Зеленым цветом отмечены образцы, вырезанные вдоль направления нитей утка, красным – вдоль направления нитей основы.

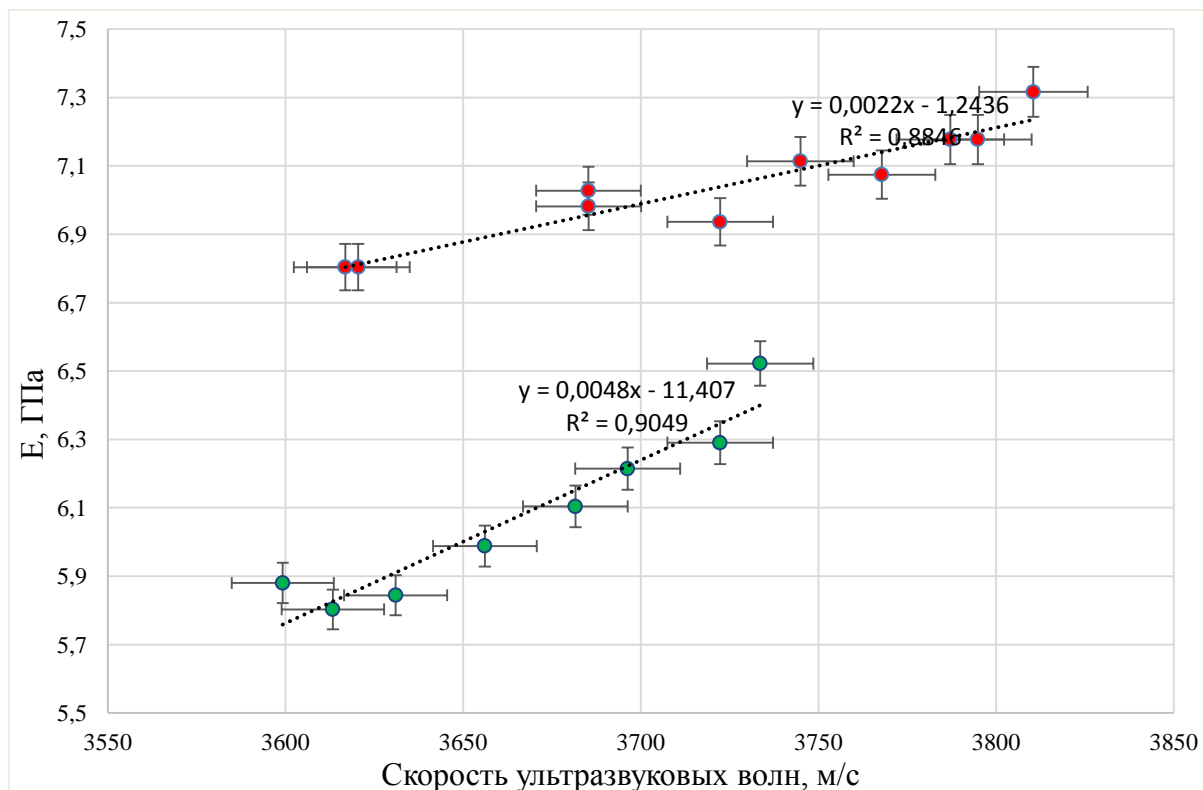


Рисунок 5 – Зависимость модуля упругости при растяжении от скорости ультразвуковых волн вдоль слоев стеклоткани для образцов из панели 1 (фенолформальдегидное связующее, выкладка [0;+33;-33;+63;-63;0])

Из рисунка 5 видно, что модуль упругости образцов находится в диапазоне 5,8-6,5 ГПа для направления утка и 6,8 – 7,3 ГПа для направления основы. При этом скорость ультразвуковых волн изменяется в диапазоне 3600 – 3730 м/с вдоль направления утка и 3620 – 3810 м/с вдоль направления основы. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что для материала панели 1 наблюдается зависимость между модулем упругости при растяжении и скоростью ультразвуковых волн ($R^2 = 0,91$ для утка, $R^2 = 0,88$ для основы), что говорит о возможности оценки модуля упругости материала по изменению скорости ультразвуковых волн.

Как видно из данных, представленных на рисунках 3-5 между модулем упругости материала и скоростью ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль слоев стеклоткани наблюдаются зависимости с корреляцией от 0,78 до 0,95 %. Однако, модуль упругости зависит и от структурных характеристик материала, например, таких как плотность, пористость или содержание связующего. Локальное изменение структурных характеристик может привести к снижению модуля упругости, при неизменной скорости ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль слоев стеклоткани, что приведет к большей ошибке при оценке модуля упругости. Так, в работе [5] для оценки физико-механических свойств композитов предлагается использовать многопараметровую зависимость вида:

$$x = A \times C_{узк} + B \times \frac{A_h}{t_h} + C \quad (4)$$

где x – искомая физико-механическая характеристика; A , B , C – коэффициенты, определяемые экспериментально для каждой конструкции или материала; $C_{узк}$ – скорость распространения ультразвуковых волн вдоль слоев стеклоткани в направлении преимущественной ориентации наполнителя; A_h и t_h – амплитуда и время распространения ультразвуковых волн поперек слоев наполнителя.

Использование в качестве дополнительных параметров модели амплитуды и времени распространения высокочастотных (10 МГц) ультразвуковых волн, прошедших материал в направлении нормали к поверхности конструкции, т.е. поперек слоев наполнителя, повышает точность модели. Достигается это за счет того, что ультразвуковые волны на частоте 10 МГц имеют длину волны 0,3-0,4 мм, что повышает их чувствительность к мелким структурным неоднородностям.

Для сравнения однопараметровой и многопараметровой регрессионных зависимостей в образцах на изгиб из панели 1 дополнительно были измерены амплитуда и время распространения ультразвуковых волн, прошедших

материал поперек слоев стеклоткани. По полученным данным была построена многопараметровая зависимость. Сравнение однопараметровой и многопараметровой регрессионных моделей представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение однопараметровой и многопараметровой зависимостей

Регрессионное уравнение	R^2_{adj}
$E_{ИЗГ} = 0,029 \times C_{УЗК} - 95,48$	0,83
$E_{ИЗГ} 0,032 \times C_{УЗК} - 0,273 \times \frac{A_h}{t_h} - 100,94$	0,86

Как видно из таблицы 3, скорректированный коэффициент детерминации для многопараметровой модели выше, что говорит о большей точности многопараметровой модели. Недостатком определения модуля упругости по соотношению 4 является необходимость дополнительных измерений акустических параметров по толщине материала (вдоль направления нормали). К тому же, погрешность определения амплитуды ультразвукового сигнала, достаточно высока, что связано с нестабильным акустическим контактом между поверхностями пьезоэлектрического преобразователя и полимерного композиционного материала.

Заключение

По результатам проведенных исследований установлено, что между модулем упругости при изгибе и при растяжении и скоростью ультразвуковых волн вдоль слоев стеклоткани наблюдаются значимые регрессионные зависимости, что говорит о возможности оценки модуля упругости полимерных композиционных материалов по изменению скорости ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль слоев стеклоткани.

Перспективным направлением для повышения точности определения физико-механических свойств полимерных композиционных материалов является использование многопараметровых регрессионных зависимостей.

Так, применение многопараметровой зависимости позволило повысить точность модели с 0,83 до 0,86.

Проведение ультразвукового неразрушающего контроля модуля упругости ПКМ на различных этапах производства и эксплуатации изделий и конструкций позволит повысить их качество и надежность.

Список литературы

1. Потапов А. И., Пеккер Ф. П. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1977 г., 192 с;

2. Чулков Д.И., Терехин А.В., Типикин М.Е., Минин С.И. Исследование физико-механических свойств ПКМ ультразвуковым методом / материалы конференции «XII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат», М.: ВИАМ ГНЦ РФ, 390 – 404, (2020);

3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с;

4. Мастицкий С.Э., Шитиков В.К. (2014) Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. – Электронная книга, адрес доступа: <http://r-analytics.blogspot.com>;

5. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами: монография / В.В. Мурашов. – М.: ООО Издательский дом «Спектр», 2016. - 244 с.

УДК 620.1

Применение методов НК при программном испытании сегмента форсунки ГТУ в условиях, имитирующих эксплуатационные

Монахов А.Д.; Яковлев Н.О.; Генералов А.С.; Мазалов П.Б.; Крупнина О.А.; Тарасов С.А.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

В докладе представлено экспериментальное исследование долговечности материала сегмента форсунки ГТУ с определением момента образования трещины при циклическом нагружении. Представлена возможность перехода от проведения испытаний с применением периодического неразрушающего контроля к непрерывному испытанию с проведением неразрушающего контроля после изменения жесткости образца.

Ключевые слова:

механические испытания, усталость, жесткое нагружение, неразрушающий контроль, жесткость

Многие конструкции и детали машин работают под действием циклически изменяющихся напряжений, более низких, чем временное сопротивление, и их ресурс полностью зависит от характеристик усталости материала, из которого они изготовлены. Усталость является одной из важнейших причин преждевременных разрушений элементов авиаконструкций, причем усталость – источник наиболее опасных и труднопредсказуемых разрушений [1].

Процесс усталости металлических материалов условно разделяют на две стадии: стадия до зарождения усталостной трещины и стадия развития до разрушения, для более корректного прогнозирования ресурса конструкций геометрическая конфигурация образцов и режим нагружения должны отражать реальные условия эксплуатации и напряженно-деформированное состояние, также требуется изучение процесса накопления повреждений, определение момента зарождения усталостной трещины [2].

На сегодняшний день в мире происходит стремительное развитие и внедрение аддитивных технологий в авиа- и двигателестроении. Аддитивные технологии обладают рядом существенных преимуществ, из которых основными являются:

- изготовление деталей сложных геометрических форм;
- коэффициент использования материала, близкий к 100%;
- повышения качества готовой продукции;
- существенное увеличение производительности;
- снижение веса и др.[3]

Объект исследования

В данной работе объектом исследования являлся сегмент форсунки газотурбинной установки (ГТУ), состоящий из 5 спиральных элементов, произведенный методом лазерного селективного спекания из жаропрочного никелевого сплава системы Ni-Cr-Mo-Nb-Al.

Целью работы было определение зависимости несущей способности сегмента форсунки ГТУ при его циклическом нагружении по жесткому режиму с определением момента образования трещин и их развития.

Для достижения цели были реализованы следующие задачи:

- проведено циклическое блочное нагружение по жесткому режиму сегмента форсунки ГТУ при температуре 300 °С;
- определен момент зарождения трещин усталости с помощью капиллярного и томографического неразрушающего контроля.

Используемое оборудование и проведение испытаний

Циклическое механическое нагружение при «жестком» цикле (управление по перемещению) проводилось блоками на универсальной сервогидравлической испытательной машине при коэффициенте асимметрии цикла $R = -1$ и частоте нагружения $R = 1$ Гц.

Исследование процесса усталостного нагружения, а также контроль процесса деформирования на протяжении всего испытания осуществлялся с помощью системы корреляции цифровых изображений (КЦИ) с диапазоном длин измерений до 400 мм и относительной погрешностью продольной деформации $\pm 0,5\%$ (для поля 200 x 155 мм).

Системы КЦИ обладают рядом преимуществ, по сравнению с методами контактной тензометрии:

- широкие диапазоны длин измерений (от 0,001 до 400 мм);
- возможность перерасчета после проведения испытаний;
- оценка особенности распределения деформации при сложном нагружении[4].

Рентгеновскую компьютерную томографию проводили с применением микрофокусной рентгеновской трубки.

Капиллярный контроль проводился с применением набора дефектоскопических материалов ЛЮМ 33 – ОВ с 1 классом чувствительности по ГОСТ 18442.

Особенности определения момента усталостной трещины в процессе испытания

Циклическое нагружение осуществлялось регулярным симметричным циклом по «жесткому» режиму, в процессе нагружения проводилась запись диаграммы нагрузка-перемещение.

По мере роста усталостной трещины для полупериода растяжения будет происходить постепенное падение максимальной нагрузки цикла P_{\max} и, как следствие жесткости (тангенс угла наклона петли гистерезиса), а также, увеличение площади петли гистерезиса. В результате соприкосновения поверхностей, для полупериода сжатия изменения нагрузки цикла и жесткости происходить не должно (Рисунок 1).

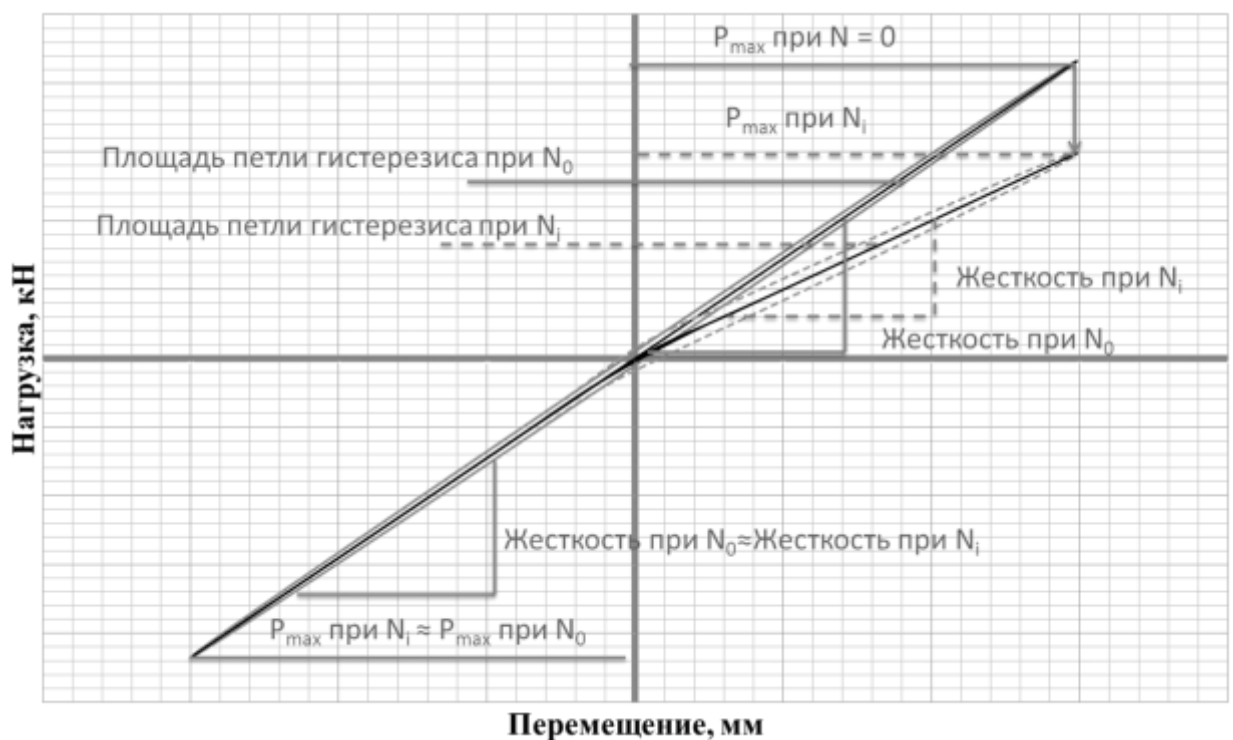


Рисунок 1 – Характер петли гистерезиса для первого и последнего циклов нагружения

Результаты исследования

При долговечности $\sim 20\ 000$ циклов нагружения было зафиксировано падение максимального усилия в цикле и жесткости сегмента форсунки в полупериоде растяжения. При достижении долговечности $\sim 25\ 000$ циклов

сегмент форсунки был снят с испытания и проведен капиллярный и топографический контроль.

На поверхности были выявлены зоны скоплений точечных свечений диаметром от 0,2 мм до 1,0 мм. Обнаружены протяженные линейные индикации (трещины) с внутренней стороны у оснований и в центральной части спиральных элементов форсунки ГТУ (Рисунок 2) в зоне максимальных напряжений при растяжении.

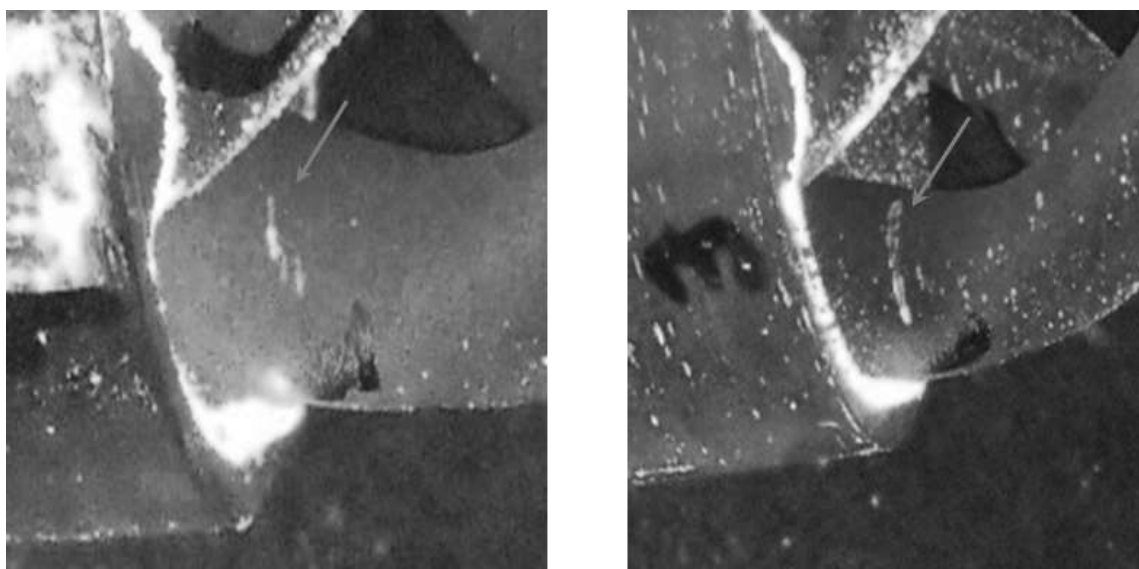


Рисунок 2 – Результаты капиллярного контроля у оснований спиральных элементов форсунки.

По результатам РКТ были обнаружены сквозные разветвленные трещины в зоне максимальных напряжений при сжатии у верхнего и нижнего оснований спиральных элементов форсунки. Величины раскрытия трещин составляла менее 96 мкм. Сечение томограмм с изображениями трещин приведено на рисунке 3.

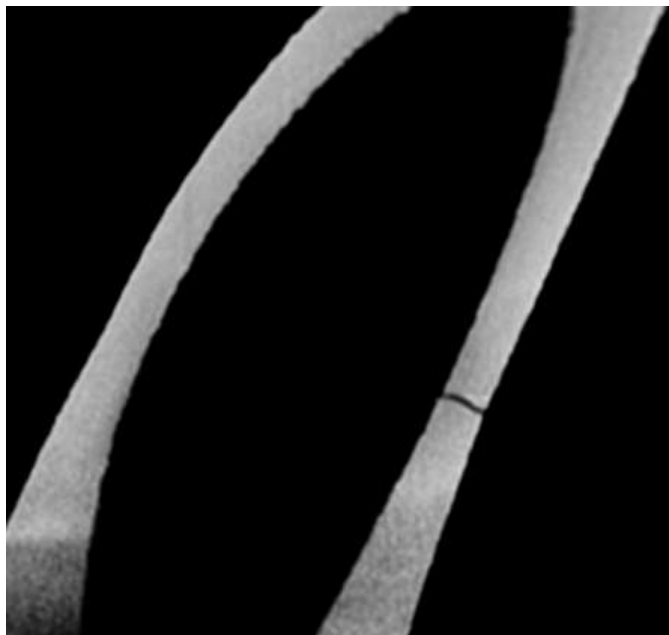


Рисунок 3 – Сечение томограммы спиральных элементов форсунки

Выводы

1. Установлено, что жёсткость сегмента форсунки ГТУ (наклон петли гистерезиса) позволяет определять момент образования трещин при жестком цикле нагружения, бесконтактные системы регистрации деформации могут использоваться для контроля состояния работы конструкции (его разрушения).

2. Использование бесконтактных систем регистрации деформации позволит перейти от блочного нагружения, необходимого для периодического неразрушающего контроля, к испытанию по непрерывной программе нагружения, с проведением неразрушающего контроля после обнаружения изменения жесткости сегмента форсунки ГТУ.

3. По результатам испытаний не выявлено влияние появления трещин на жесткость сегмента форсунки в полупероде сжатия, что вызвано смыканием берегов трещины в полупероде сжатия.

4. Показано, что капиллярный метод и рентгеновская компьютерная томография позволяют выявлять трещины в сегменте форсунки ГТУ в ненагруженном состоянии.

Список литературы

1. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник, 1987. — 347 с.
2. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость. // Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст.6 (viam-works.ru).
3. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. // СПбГУ. 2013. — 221 с.
4. Автаев В.В. Исследование трещиностойкости алюминиевых сплавов методом корреляции цифровых изображений // XI Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов "ТестМат" по тематике "Физикомеханические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания" Материалы Всероссийской конференции, посвящено 105-летию со дня рождения д.т.н., профессора Софьи Исааковны Кишкиной. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов». 2019. С. 8-26.

УДК 620 192 63

Неразрушающий контроль и исследование материалов методом рентгеновской компьютерной томографии

Крупнина О.А.; Генералов А.С.; Демидов А.А.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация

Рассмотрены основные проблемы, затрудняющие внедрение метода рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) в производственную практику, в том числе отсутствие процедуры оценки качества (информативности) результатов томографического контроля. Представлен опыт специалистов лаборатории неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ» по разработке технологии контроля методом РКТ, а также проводимые в этой области практические и теоретические исследования.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, рентгеновская компьютерная томография, информативность РКТ, чувствительность, методика контроля

При уровне существующих технологий изготовления материалов и изделий из них, применение традиционных методов исследований структуры и неразрушающего контроля далеко не всегда позволяет оценить качество и полноценно охарактеризовать дефекты в изделиях из функциональных материалов или в деталях со сложной геометрией. Использование компьютерной томографии для решения этих задач позволяет оценить структурно-морфологические характеристики материалов и изделий в трех измерениях, определять размер и расположение пустот, инородных включений, области с пониженной плотностью, проводить измерения геометрических величин и отклонений геометрических размеров от электронной модели.

Область применения РКТ в промышленности можно классифицировать на визуализацию и качественный анализ, а также метрологию и количественный анализ [1], рисунок 1. Эта классификация удобна, поскольку описывает разные методы интерпретации полученных данных. Результаты качественного РКТ более субъективны, описательны и исследовательские по своей природе, в то время как для применения РКТ в метрологических целях обязательным является оценка качества результатов измерений и их точность.




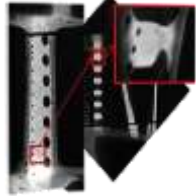
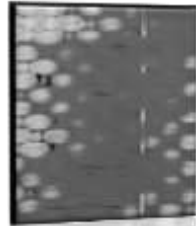

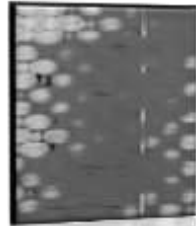
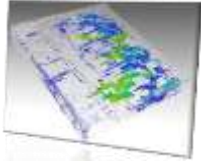
	Визуализация и качественный анализ	Количественный анализ и метрология	
	Проверка качества сборки	Сравнение с САД-моделью и обратное проектирование	
	Оценка внутренней морфологии	Геометрические измерения	
	Дефектоскопия (поиск трещин, пор и т.д.)	Определение объемной доли пор	
	Обнаружение включений частиц	Количественное определение гранулометрического состава	
	Анализ разноплотности	Количественная оценка распределения плотности	
	Оценка коррозионных повреждений и износа	Анализ толщины стенок	
	Анализ ориентации волокон	Количественная оценка распределения волокна	

Рисунок 1 – Область применения РКТ в промышленности

Когда РКТ рассматривается не только как исследовательский инструмент, но как метод неразрушающего контроля (НК), к его результатам предъявляется ряд требований, выполнения которых напрямую определяет его эффективность для решения конкретных задач.

Эффективность применения РКТ, как и любого другого метода НК, можно оценивать по нескольким факторам [2]. Наиболее важными из них являются:

- выявляемость дефектов и достоверность контроля,
- воспроизводимость и повторяемость результатов контроля
- производительность контроля
- точность определения характера и размеров дефектов и т.д.

Ввиду низкой производительности и высокой стоимости метода, его основное преимущество это информативность результатов.

Отсюда, одной из основных проблем, которая требует проведения исследований и затрудняет внедрение метода РКТ в производственную практику, является отсутствие общепринятых подходов или утвержденной процедуры оценки информативности результатов РКТ, поскольку без количественных характеристик, позволяющих оценить качество и точность результатов томографии, информативность данного метода является гипотетической.

По сути, томография – это реконструкция изображения объекта (функции) по его проекциям. Проекция под заданным углом является интегралом изображения объекта (функции) в направлении заданного угла. Затем, вычислив преобразование Фурье такой проекции, можно получить линию в двумерном пространстве Фурье изображения, что доказано теоремой о центральном сечении. Вычислив преобразование Фурье для нескольких проекций под разными углами, 2D пространство Фурье заполняется. После заполнения, применяется обратное преобразование Фурье для окончательного восстановления исходного изображения. Следовательно, используя теорему о центральном сечении и несколько проекционных изображений, можно точно восстановить изображение, иллюстрирующее внутреннюю структуру исследуемого объекта.

В случае РКТ, проекция является радиационным изображением исследуемого объекта, и представляет собой дозу или мощность дозы рентгеновского излучения, распределенную на входной плоскости детектора, в соответствии с плотностью и толщиной материала в направлении излучения. Следовательно, по результатам РКТ получают трехмерную модель объекта с точки зрения его линейного коэффициента ослабления μ .

Результатом РКТ является томограмма, которая представляет собой набор изображений сечений объекта контроля (ОК), которые потом объединяются в виде объемной модели для дальнейшего анализа. Томограмму можно определить как трехмерную функцию $f(x, y, z)$, где x, y и

z — координаты в пространстве, а значение f в любой точке, задаваемой координатами (x, y, z) , называется интенсивностью (яркостью) или уровнем серого в этой точке. Величины x, y, z и f принимают конечное число дискретных значений, а томограмма состоит из конечного числа элементов, каждый из которых расположен в конкретном месте и принимает определенное значение. Эти элементы называются вокселями. Значение серого (англ. gray value, GV) каждого вокселя является отображением линейного коэффициента ослабления, интегрированного по соответствующему единичному объему исследуемого объекта. Следовательно, РКТ является системой визуализации трехмерной модели объекта с точки зрения его линейного коэффициента ослабления. Как известно, любую систему визуализации, будь то телескоп, микроскоп или томограф можно количественно охарактеризовать по величинам пространственного и контрастного разрешения [3, 4]. Безусловно, методика и средства определения данных величин должны быть адаптированы под физические принципы формирования получаемых изображений.

За рубежом для оценки производительности системы РКТ (как меры эффективности применения рентгеновского томографа в качестве системы визуализации) используется процедура, описанная в ASTM E 1695-20 [5]. Документ содержит инструкции по определению пространственного разрешения и контрастной чувствительности томографических данных, которые вычисляют по результатам анализа томограммы специально изготовленного цилиндрического образца.

Пространственное разрешение можно охарактеризовать с помощью функции рассеяния точки или линии в области пространства или в терминах функции передачи модуляции (ФПМ) в частотной области. ФПМ (MTF, англ. Modulation Transfer Function) определяет отношение величины контраста изображения, получаемого при помощи системы визуализации, к контрасту соответствующей области оригинала (исследуемого объекта) в зависимости

от пространственной частоты [3], т.е., применительно к задачам дефектоскопии, определяет насколько снижается контраст изображения несплошности в исследуемом материале с уменьшением ее размера (т.е. с увеличением пространственной частоты).

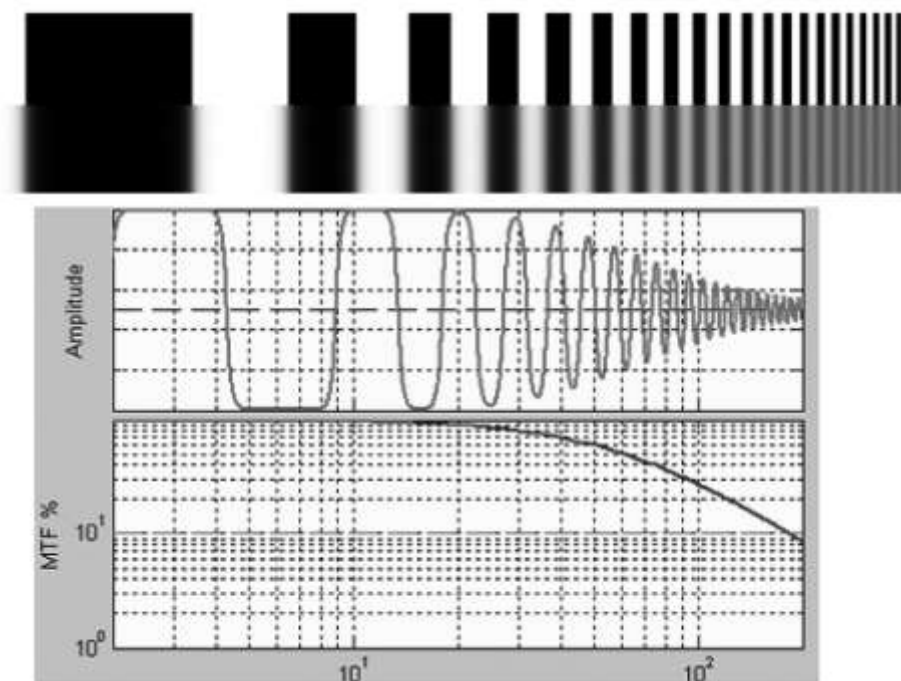


Рисунок 2 - ФПМ системы визуализации как функциональная зависимость контраста от пространственной частоты

Согласно [5] построение графика функции передачи модуляции осуществляется по результатам анализа нерезкости изображения по краям реконструированных срезов цилиндрического тест-образца.

Контрастная чувствительность характеризует влияние шума изображения на выявляемость несплошности на фоне гомогенного материала в зависимости от размера этой несплошности в вокселях (без учета нерезкости изображения). Способность различать контрастный элемент при определенном уровне шума описывается кривой, называемой функция контрастного разрешения (CDF, *англ.* Contrast Discrimination Function). Для расчета контрастной чувствительности определяется величина статистического шума на изображения в центральной части однородного

цилиндрического тест-образца, путем измерения стандартного отклонение среднего σ_m , для областей интересов различных размеров.

Измерение стандартного отклонения (стандартной ошибки среднего при малом размере области интереса и выборке соответственно) , определяет, грубо говоря, величину колебания уровня серого изображения гомогенного материала, вызванную статистическим или иным шумом и никак не связанную с наличием несплошностей (рисунок 3).

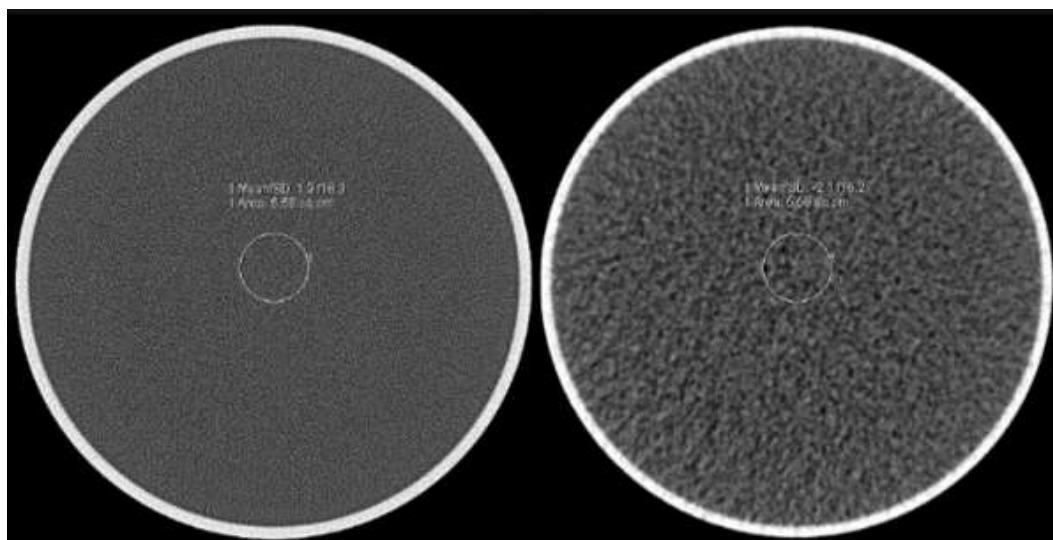


Рисунок 3 – Сечения томограмм цилиндрического образца с разной величиной шума

Влияние каждого из рассмотренных параметров качества томографических изображений на выявляемость несплошностей необходимо оценивать в совокупности, Несмотря на то, что дефект может быть пространственно разрешен, создаваемый им контраст (снижаемый нерезкостью) может быть неразличим на фоне шумов.

На основании вычисленных значений ФПМ и контрастной чувствительности строят так называемую диаграмму контрастной детализации CDD (*англ.* Contrast-Detail Diagram), учитывающую влияние и нерезкости и шума на возможность обнаружения дефекта определенного размера и морфологии. Данный график (рисунок 4) является показателем качества томографических данных и может применяться для оценки чувствительности контроля методом РКТ.

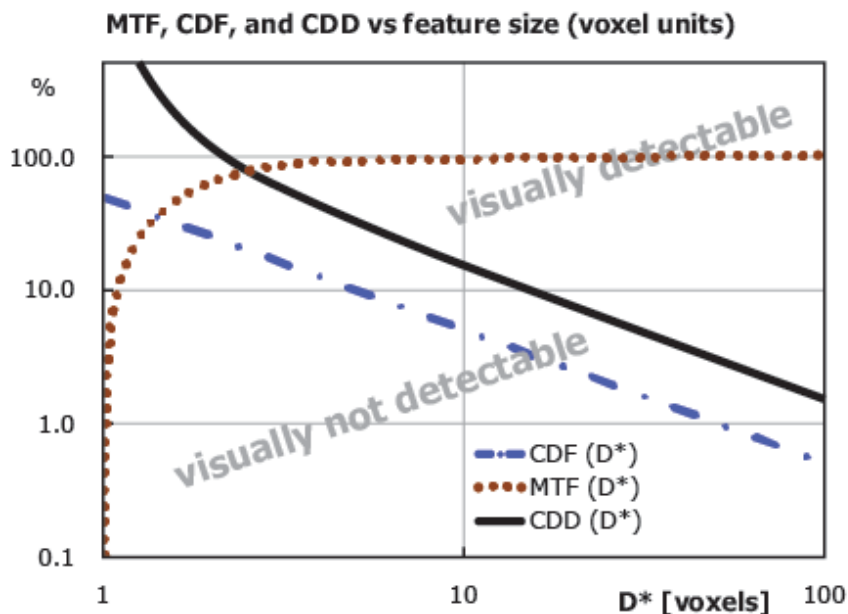


Рисунок 4 – Графики контрастной детализации, ФПМ и контрастного разрешения, построенные в осях относительный контраст – диаметр в вокселях [4]. Несплошности, размер и относительный контраст которых попадают в область, лежащую правее графика контрастной детализации CDD, могут быть обнаружены на томограмме

Необходимо отметить, что описанная в [5] методика не предназначена для прогнозирования выявляемости дефектов (чувствительности) при контроле конкретной детали. Причина в том, что количественные показатели производительности системы РКТ, определяемые по результатам обработки томографических данных цилиндрического образца, отличаются, иногда существенно, от чувствительности при контроле конкретного объекта. Основной причиной такого расхождения являются артефакты, присутствующие на томограмме объекта.

Артефактами в компьютерной томографии называют любое несоответствие между значениями коэффициента ослабления реконструированного объема и истинными коэффициентами ослабления объекта [3]. Ошибки реконструкции могут быть вызваны как недостатком данных, так и наличием различных шумов, не позволяющих при помощи существующего математического аппарата корректно решить обратную

задачу по восстановлению величины коэффициента ослабления рентгеновского излучения ОК.Arteфакты могут проявляться в виде полос (ошибка в отдельном измерении), затемнений (постепенное изменение отклика группы пикселей детектора), колец (ошибки калибровки отдельного пикселя детектора), искажений (спиральная реконструкция). Основными причинами появления артефактов являются:

- физические процессы, связанные с взаимодействием рентгеновского излучения с веществом;
- неисправность оборудования;
- не оптимальные геометрия или параметры сканирования.
- несовершенство математического аппарата, применяемого для реконструкции.

Ниже рассмотрены основные артефакты, мешающие при проведении контроля методом РКТ, причины их возникновения и способы их минимизации.

Увеличение жесткости излучения

Увеличение жесткости излучения (англ., beam hardening) это физическое явление, связанное с полихроматичностью спектра излучения, генерируемого рентгеновской трубкой. Когда рентгеновское излучение проходят сквозь плотный материал, фотоны с меньшей энергией поглощаются интенсивнее фотонов с более высокими уровнями энергии (рисунок 5). В то же время, алгоритмы реконструкции разработаны с тем предположением, что поглощение рентгеновских лучей является характеристикой материала и не зависит от уровня энергии рентгеновских фотонов. Это несоответствие между допущением и реальностью приводит к ошибкам при восстановлении коэффициента ослабления материала. Типичные проявление этого артефакта показаны на рисунке 6, где на реконструированном изображении контур объекта ярче, чем центральная часть.

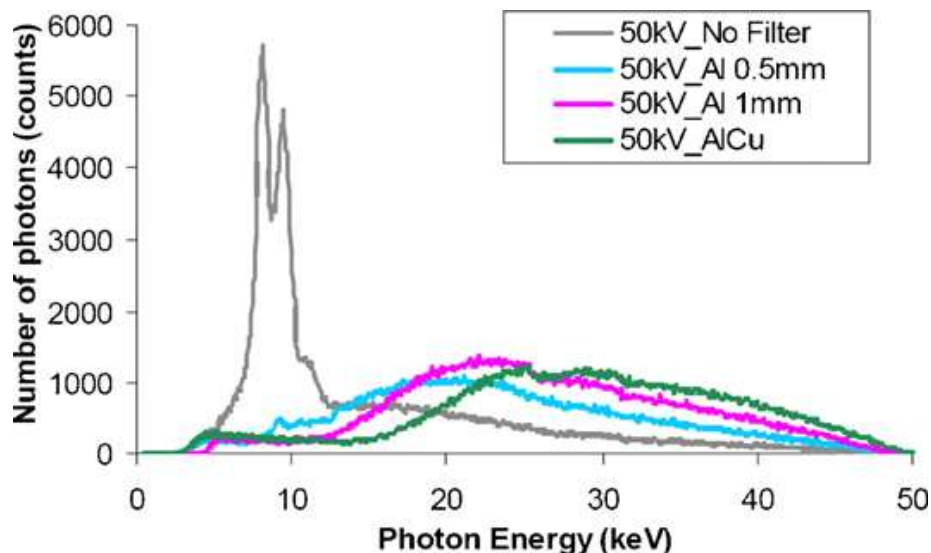
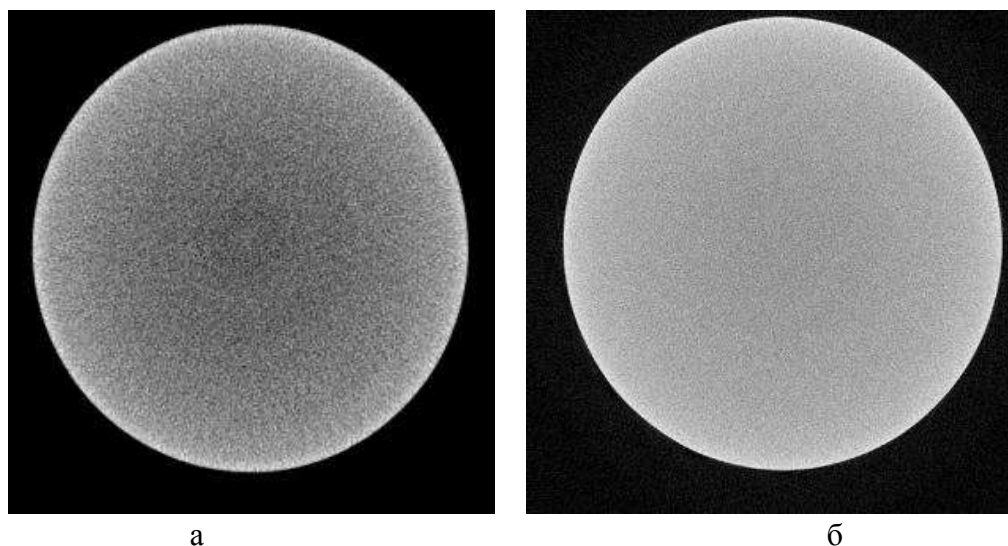


Рисунок 5 – Изменение спектра рентгеновского излучения при прохождении объектов различного материала и толщины



а – сечение образца описанного в разделе 1, полученное без фильтра;
б – тот же объект, просвеченный с применением медного фильтра толщиной 1 мм

Рисунок 6 – Проявление артефакта ужесточения пучка на томограмме

Методы, используемые для коррекции эффекта ужесточения пучка, можно разделить на три типа: методы предварительной фильтрации, методы постобработки и метод дуальных энергий. Физический фильтр может быть использован как предварительная фильтрация пучка с целью поглощения фотонов с низкой энергией. Фильтр может быть тонкой пластиной из меди или олова, которая помещается между источником рентгеновского излучения и исследуемым объектом. Этот метод фильтрации прост и эффективен для

применения на практике, но, в то же время, снижает отношение сигнала к шуму, уменьшая общее количество фотонов и, следовательно, дозу. Разработаны и методы численной коррекции эффекта ужесточения пучка. Разные производители предлагают использовать методы полиномиальной аппроксимации второго и третьего порядка в процессе реконструкции [6], а также итерационные методы [7] для минимизации данного артефакта. Метод дуальных энергий трудоемкий, дорогой и реализован лишь для специфических установок РКТ.

На томограмме артефакты ужесточения пучка могут проявляться в виде полос (рисунок 7) и некорректной яркости вокселей на границе с воздухом.

Артефакты в виде полос можно частично скорректировать на этапе реконструкции, если в программном обеспечении применяется метод линеаризации на основе физической модели [8].

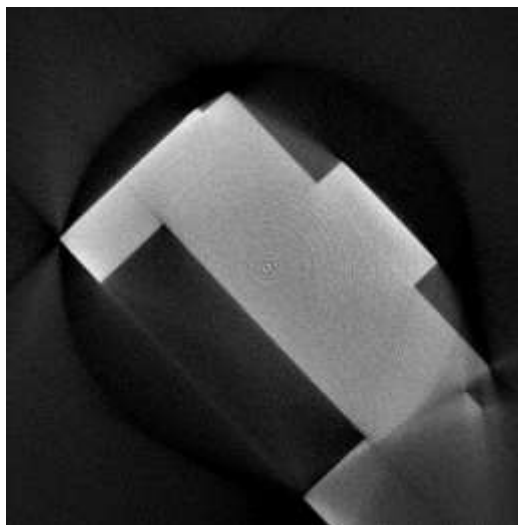


Рисунок 7 – Проявления артефакта ужесточения пучка на томограмме в виде полос

Кольцевые артефакты

Если один или несколько пикселей детектора не откалиброваны, сигнал от них содержит ошибочные показания в каждом угловом положении ОК, следовательно, на томограмме возникает круговой артефакт. Плоскопанельные детекторы, где все пиксели являются отдельными

элементами матрицы, в принципе более подвержены кольцевым артефактам чем, например, газовые детекторы.

Наличие кольцевых артефактов сильно зашумляет данные. При невозможности полноценной калибровки пикселей, минимизировать наличие кольцевых артефактов на томограмме можно как в процессе реконструкции, так и применяя фильтрацию к уже реконструированному объему.

Следует учитывать, что применение цифровых фильтров снижает пространственное разрешение томографических данных, поэтому правильная коррекция отклика пикселей матрицы в процессе сбора проекционных данных является крайне важным действием.

Артефакт подвыборки

Количество проекций, использованных для реконструкции, является одним из определяющих факторов качества данных. Слишком большой интервал между проекциями (недостаточная выборка) может привести к неправильной регистрации информации, относящейся к острым краям и мелким деталям. Это приводит к эффекту, известному как наложение (англ., aliasing). Артефакт проявляется в виде тонких полос, отходящих от края плотной структуры и параллельных ее краям.

Артефакт конической геометрии

Безусловно, схема сканирования коническим пучком с регистрацией на матричный детектор лучше всего подходит для промышленной РКТ ввиду высокой производительности. Однако при увеличении угла расхождения пучка начинают появляться характерные артефакты (рисунок 8). Избежать данный тип артефактов можно используя спиральную схему сканирования. Минимизировать проявление артефакта можно соблюдая ограничения к величине минимального фокусного расстояния или уменьшая габариты ОК в высотном направлении при помощи оснастки.

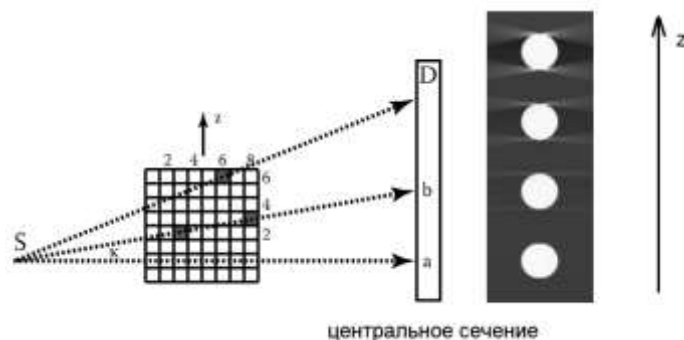


Рисунок 8 – Артефакт конической геометрии

В подавляющем большинстве случаев искажения, вносимые артефактами, можно лишь снизить или минимизировать, но определенно необходимо учитывать при оценке качества томографических данных.

Итак, информативность или качество результатов РКТ можно определить по величинам пространственного и контрастного разрешения, с учетом их снижения при возникновении ошибок измерений или артефактов. Следующей проблемой или задачей является определение способов управления параметрами качества томографических данных, с целью достижения требуемой информативности.

РКТ является сложной системой, и факторы, влияющие на точность или информативность результатов РКТ, можно разделить на 5 групп: применяемое оборудование, внешние условия среды, обработка данных, особенности исследуемого объекта и, конечно же, технология или методика проведения РКТ (рисунок 9). При прочих равных именно методика оказывает наибольшее влияние на вариативность результатов контроля. Поэтому изучение и исследование влияния параметров и геометрии сканирования, параметров реконструкции, способов обработки полученных данных, позволит разрабатывать оптимальную технологию, гарантирующую выполнение требований к качеству результатов томографического контроля.



Рисунок 9 – Факторы, влияющие на информативность результатов РКТ.
Адаптировано из [9]

С 2019 г. специалистами лаборатории «Неразрушающие методы контроля» ФГУП «ВИАМ» проводятся работы, направленные на разработку методик неразрушающего контроля методом РКТ для дефектоскопии деталей, включая изделия аддитивного производства, и исследования структуры материалов. Проведены работы по исследованию влияния конструктивных особенностей объектов контроля и параметров контроля на информативность результатов НК методом РКТ. Установлены качественные и количественные зависимости показателей качества результатов РКТ от параметров и геометрии сканирования. В таблице 1 приведены результаты серии экспериментов по исследованию образцов из жаропрочного и титанового сплавов, направленные на отработку параметров сканирования, позволяющих достичь требуемые значения по выявлению дефектов с учетом требований к производительности контроля.

Таблица 1 - Результаты серии экспериментов по исследованию образцов из жаропрочного и титанового сплавов

Эксперимент № (образец из титанового сплава, диаметром 60 мм)					Параметр	Эксперимент № (образец из жаропрочного сплава, диаметром 5,0 мм)				
1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
980	900	900	900	970	Расстояние от фокусного пятна до детектора, мм	600	583	799	600	663
727	630	600	600	644	Расстояние от фокусного пятна до оси вращения, мм	103	110	115	93	126
1,35	1,43	1,5	1,5	1,5	Коэффициент увеличения	5,83	5,4	6,95	6,45	5,26
220	223	222	223	223	Напряжение	210	170	210	185	200
310	351	350	350	450	Ток на мишени, мкА	80	180	73	90	100
62	70	70	70	92	Размер фокусного пятна, мкм	16	18	13,4	15	19
3	2	3	2	1	Усреднение по кадрам	5	3	1	3	1
149	141	133	67	133	Размер вокселя, мкм	17	18,5	14,4	15,5	19
222	250	198	124	200	Разрешающая способность на уровне 10 % контраста, мкм	35	34	27	36	35
290	270	266	182	260	Размер визуально выявляемого дефекта (полости), мкм	35	43	36	48	44
2 ч	2 ч	1 ч 40 м	4 ч	1ч 13 м	Продолжительность сканирования	4 ч	2 ч 38 м	2 ч 15 м	2 ч 14 м	2 ч 49 м

Специалистами ФГУП «ВИАМ» проведена комплексная работа по разработке методики томографического контроля отливок лопаток турбины низкого давления (ТНД) для ПД-35. Исходя из норм допустимости дефектов, были разработаны требования к качеству результатов контроля лопаток ТНД методом РКТ. Нормируемыми параметрами являлись пространственное разрешение и уровень шума томографических данных, по величинам которых вычислялась достигнутая чувствительность контроля. Разработаны рекомендации к программным и аппаратным средствам контроля, позволяющим определить достижимую чувствительность в процессе проведения контроля методом компьютерной томографии. Определение

достигнутой чувствительности контроля методом РКТ предложено проводить в два этапа: разрешающую способность определять по результатам анализа томограммы разработанного тест-образца, достигнутую чувствительность - по результатам вычисления требуемого относительного цифрового контраста непосредственно на томограмме отливки лопатки. Проведена отработка режимов сканирования и параметров реконструкции, разработаны рекомендации по управлению режимами сканирования и параметрами реконструкции при проведении РКТ по схеме сканирования в конусном пучке и при спиральном сканировании.

По результатам проведенных исследований и отработок разработано и выпущено методическое руководство по неразрушающему контролю отливок лопаток ТНД из жаропрочного интерметаллидного титанового гамма-сплава методом рентгеновской компьютерной томографии, содержащее, в том числе, требования к оборудованию, и являющееся инструкцией по проведению неразрушающего контроля методом РКТ с целью выявления в отливках металлургических дефектов, представляющих собой нарушение сплошности металла, а также измерения отклонений геометрических размеров отливок лопаток ТНД от электронной модели. Документ регламентирует технологию, аппаратуру, средства и квалификацию дефектоскопистов.

Выводы

1. Внедрению метода РКТ на предприятиях, осуществляющих разработку и производство авиационной техники, должна предшествовать стандартизация процедуры оценки информативности результатов томографического контроля, позволяющая количественно оценить эффективность метода для решения поставленных задач.

2. В условиях отсутствия национальных стандартов, разработке методик контроля методом РКТ должна предшествовать исследовательская работа, направленная на выбор и отработку оптимальных параметров

контроля, подтверждение возможности выявления критических дефектов и воспроизводимости результатов.

Список литературы

1. HERMINSO VILLARRAGA GÓMEZ. Studies of Dimensional Metrology with X-ray CAT Scan., PhD dissertation, University of North Carolina at Charlotte, 2018, 617 P.
2. РД ЭО 1.1.2.25.0487-2015 Разработка технического задания, проведение испытаний и условия применения средств и методик неразрушающего контроля на атомных станциях, АО «Концерн Росэнергоатом», 2015.
3. Buzug T. M. Computed tomography: from photon statistics to modern cone-beam CT. – Springer Science & Business Media, 2008.
4. ASTM E1441 Standard Guide for Computed Tomography (CT), 2019.
5. ASTM E 1695 Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance, 2020.
6. Herman G T / Demonstration of beam hardening correction in computed tomography of the head J. Comput. Assisted Tomogr. 1979.
7. Krumm M, Kasperl S and Franz M Beam hardening correction of multi-material objects Proc. of 10th European Conference on Non-Destructive Testing, 2010.
8. Van de Casteele E, Van Dyck D, Sijbers J and Raman E A model-based correction method for beam hardening artefacts in X-ray microtomography J. X-ray Sci. Technol., 2004.
9. H. Villarraga-Gómez, C. Lee and S. T. Smith, "Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures," Precision Engineering, vol. 51, pp. 291-307, 2018.

УДК: 678.5.067

Применение компьютерной томографии для диагностики ударных повреждений

Митряйкин В.И.¹, д.т.н.; Беззаметнов О.Н.¹; Кротова Е.В.¹; Стаценко Е.О.²

vmitryaykin@bk.ru

bezzametnovoleg@mail.ru

kati_mit@mail.ru

e.statsenko@yahoo.com

¹*Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А.Н.Туполева - КАИ*

²*Казанский (Поволжский) Федеральный Университет*

Аннотация:

В данной работе показаны возможности компьютерной томографии при изучении внутренней структуры образцов, имеющих различную природу армирующего материала, с ударными повреждениями. Разработана методика, позволяющая с достаточно высокой точностью определить площади расслоений, размеры внутренних дефектов и пористости образцов.

Ключевые слова:

Композиционные материалы, ударные повреждения, компьютерная томография, неразрушающий контроль, пористость

Введение

Появление многослойных конструкций потребовало разработки методов и средств их неразрушающего контроля. Уже первые исследования в этом направлении показали, что известные методы и средства неразрушающего контроля в большинстве случаев не могут решать новые задачи по ряду причин, связанных со спецификой подобных изделий. Основные из них – сочетание в них материалов с различными свойствами (от сталей до пенопластов), большое затухание упругих волн в полимерах, малые толщины отдельных слоев (например, обшивок, клеевых швов), гигроскопичность ряда применяемых материалов, малая удельная электрическая проводимость и неферромагнитность полимеров и т.п. Указанная специфика, существенно отличающая многослойные конструкции от других объектов неразрушающего контроля, потребовала новых подходов к проблеме.

В связи с этим существует потребность в неразрушающих методах контроля, способных однозначно фиксировать и классифицировать дефекты структуры композита. Задачи дефектоскопии при проведении неразрушающих испытаний таких изделий решаются различными методами: радиационным, ультразвуковым, акустико-эмиссионных, оптико-акустическим, инфракрасным и т.д. Каждый из этих методов обладает своими достоинствами и недостатками, кроме того, имеет соответствующие ограничения по характеристикам исследуемых конструкций.

Одним из современных методов неразрушающего контроля композиционных конструкций является компьютерная томография (КТ), которая объединяет информативные достоинства рентгеновского излучения с последними достижениями науки и вычислительной техники. Она обеспечивает послойную визуализацию исследуемой конструкции.

КТ использовалась в Eurocopter Deutschland в системе контроля качества композиционных лопастей винтов BO105, BK117 и TC135. Опыт применения показал, что по чувствительности к локальным дефектам, малым отклонениям геометрии и плотности внутри изделий со сложной внутренней структурой она превосходит возможности традиционных средств неразрушающего контроля. Отечественные ученые Вайнберг Э.И., Ведмин В.Е., Клюев В.В. и др. с помощью вычислительных томографов кругового сканирования серии ВТ в толстостенных композитах количественно проконтролировали распределение плотности, осуществили геометрический контроль структуры пространственного армирования, выявили дефекты, возникающие на разных стадиях изготовления [1]. Для исследования дефектов и структуры композиционных конструкций в настоящее время применяются различные типы промышленных рентгеновских компьютерных томографов: ВТ-600ХА (600 мм), X-5000 (900x1200 мм), ViomeIхL 240 (350x250 мм), MetrisX-TekХТН 225+320 (300x600 мм), в скобках указаны габаритные размеры контролируемых объектов, которые могут разместиться на поворотном столе. В этих томографах с неподвижным блоком источника рентгеновского излучения используется веерно-лучевое и конусно-лучевое сканирование.

В данной работе компьютерная томография применена для неразрушающего контроля пластин из ПКМ с ударными повреждениями, она позволяет с достаточно высокой точностью определить размеры повреждений, оценить характер разрушения слоев и изменение структуры, что позволит спрогнозировать снижение механических характеристик в зоне удара. Применение КТ для неразрушающего контроля авиационных конструкций приведено в работе [2].

Методика нанесения ударных повреждений

Для исследований были изготовлены два типа образцов из композиционных материалов, среди которых: стеклопластик на основе ткани

ЕЕ 380 саржевого переплетения, углепластик на основе ткани СС 201 полотняного переплетения. В качестве связующего материала использована многофункциональная система на основе эпоксидиановой смолы SICOMIN SR 8500 и отвердителя SICOMIN SZ 8525.

Ударное воздействие на образцы осуществлялось с помощью ударной машины с вертикально-падающим грузом Instron Dunatup 9250HV. Испытательная машина оснащена высокочувствительным пьезометрическим датчиком нагрузки с ударным наконечником диаметром 16 мм, который регистрирует нагрузку с точностью $\pm 1\%$, машина имеет пневматическую систему предотвращения повторного удара, необходимая энергия удара задается подъемом взвешенного груза на заданную высоту. Испытания проводились в соответствии с требованиями международных стандартов ASTM D7136 и ГОСТ 33496-2015. Обработка данных эксперимента проводилось при помощи ПО Impulse. При испытаниях записывалась зависимость контактной силы от продолжительности контакта в процессе удара. Энергии удара были выбраны с учетом рекомендаций стандартов [3, 4] и составили 10, 20, 30 Дж. По результатам испытаний проводились измерения, энергии удара, энергии инициации повреждений, поглощенной энергии, скорости удара, максимальной нагрузки при ударе. В табл. 1 приведены результаты испытаний.

Таблица 1 - Результаты испытаний на удар

Образец	Энергия удара (Дж)	Поглощенная энергия (Дж)	Скорость удара (м/с)	Макс. нагрузка (Н)	Энергия инициации повреждения (Дж)	Прогиб при макс. нагрузке (мм)
ЕЕ 380	9,621	2,307	1,886	4446,1	2,816	4,672
	19,348	6,185	2,675	6426,3	7,289	6,354
	29,058	13,006	3,278	7412,7	14,704	7,307
СС-201	10,019	5,601	1,925	3870,7	6,083	2,563
	20,201	13,197	2,733	4139,8	14,181	2,560
	30,359	20,304	3,350	3967,9	21,681	2,439

Исследование ударных повреждений методом КТ

Первоначально исследования внутренней структуры образцов проводились на системе радиографического анализа и рентгеновской компьютерной томографии NSI (США) модель X5000. Она применяется для оперативного и высокопроизводительного поиска дефектов в изделии, визуализации внутренних дефектов объекта. Данная система оснащена рентгеновской трубкой с максимальным ускоряющим напряжением 450 kV мощностью 1500 W. Съёмка проводилась при ускоряющем напряжении 213 kV и токе 3.3 mA. Разрешение при съёмке – 100 мкм.

Полученные данные позволили с высокой точностью определить размеры повреждения образца. Размеры визуально регистрируемой вмятины на поверхности значительно меньше зоны разрушения внутри образца. Там наблюдается разрушение волокон, повреждение волокон с расслоениями, расслоения без повреждения волокон. Все эти повреждения изменяют структуру материала, повышает пористость в зоне повреждения, что снижает механические характеристики. В ходе эксперимента был установлен характер изменения пустотного пространства по толщине образцов. На рисунке 1 представлена 3D реконструкция томографического исследования образца стеклопластика EE380 после удара 20 Дж.

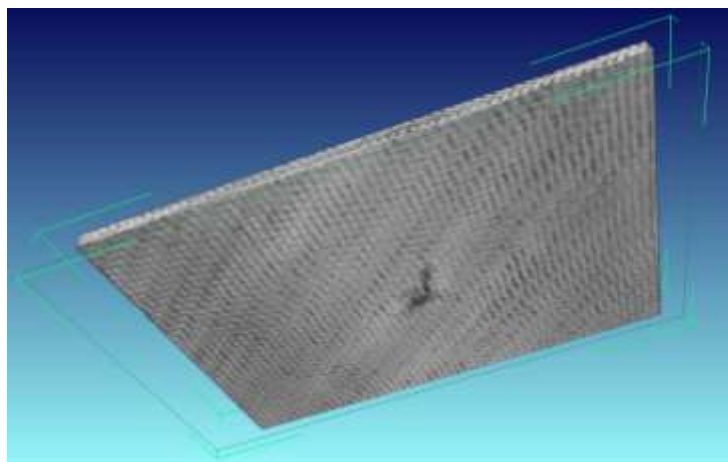


Рисунок 1 – 3D реконструкция исследуемого образца

На рисунке 2 показаны томограммы образцов стеклопластика в продольном сечении: a – расстояние от поверхности удара 2,3 мм, b – 2,8 мм, $в$ – 3,5 мм. Видно явное увеличение площади повреждения образца в зависимости от глубины сканирования.

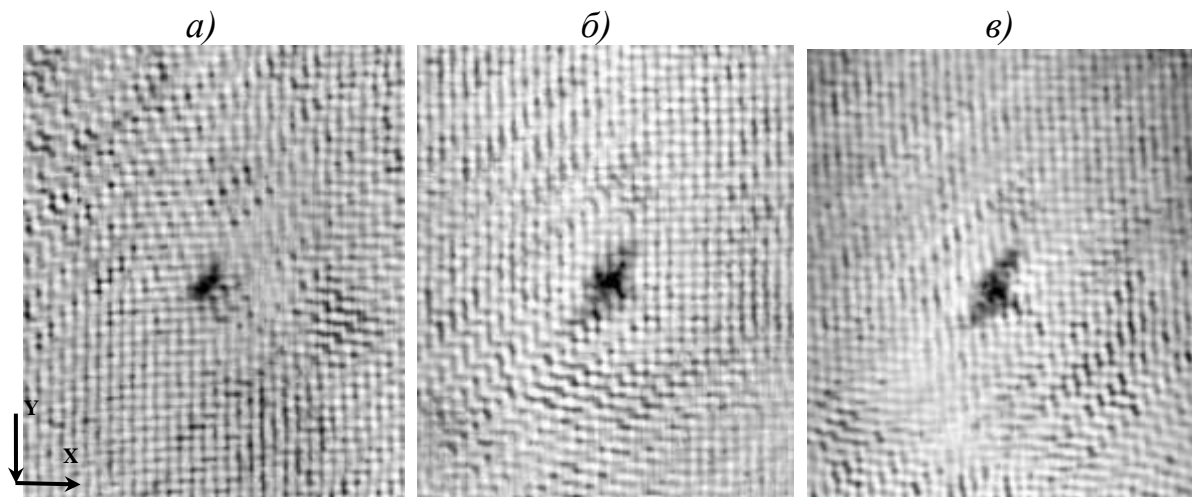


Рисунок 2 – Томограммы образцов стеклопластика в продольном сечении

На рисунок 3 изображены томограммы образцов стеклопластика в поперечном сечении: a – расстояние до внутреннего разрушения 1,9 мм, расстояние от места удара до конца образца 4,7 мм, глубина внутреннего расслоения 1,8 мм.

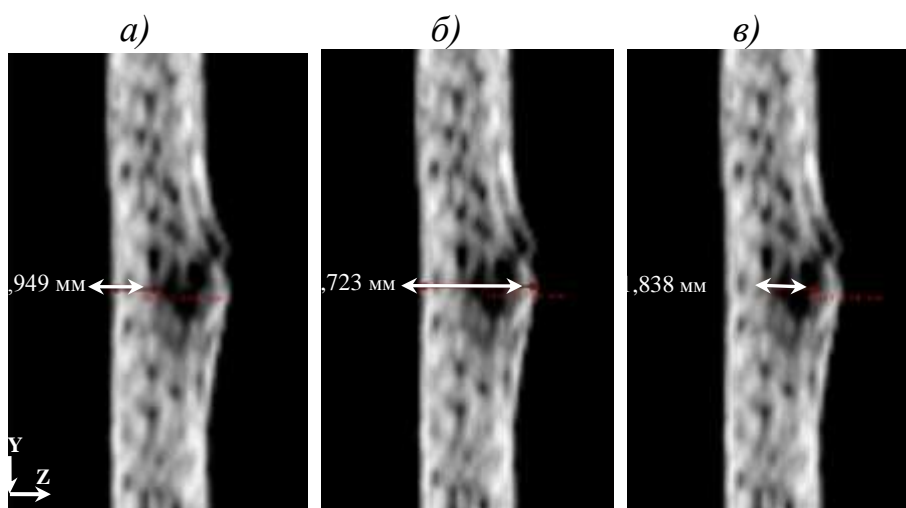


Рисунок 3 – Томограммы образца стеклопластика в поперечном сечении

Для более детального анализа пористости материала и характера повреждений в зоне удара была применена система промышленной

рентгеновской микротомографии Phoenix V|tome|X S 240, она оснащена двумя рентгеновскими трубками: микрофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240 kV/мощностью 320W и нанофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 180 kV/мощностью 15W. Для первичной обработки данных и создания объёмной (воксельной) модели образца на базе рентгеновских снимков (проекций) используется ПО datos|x reconstruction. Для визуализации и анализа данных по элементам объёмного изображения используется ПО VG Studio MAX 2.1 и Avizo Fire 7.1.

Для исследования структуры и пористости образцов была использована микрофокусная трубка. Съёмка проводилась при ускоряющем напряжении 100kV и токе 300mA. Разрешение при съёмке – 34 мкм (объём 1-го вокселя). Для исключения дефектов съёмки в расчетах использовались элементы объема с размерами более двух вокселей (> 68 мкм). На рисунках 4, 5 представлены результаты сканирования стеклопластика EE 380 и углепластика CC201 в сечениях XY *a)* и YZ *б)* соответственно. При сканировании хорошо видна схема укладки волокна, распределение пор в объеме и между слоями. В таблице 2 приведены результаты замера пористости образцов вырезанных из исследуемых материалов. Показаны минимальные и максимальные размеры пор в образце, их количество и значение пористости V_p .

Таблица 2 - Расчетные данные объёмного содержания пор

Наименование образца	Общий объём образца, мм ³	Объём порового пространства, мм ³			Соотношение объёма пор к объёму образца, %	Количество пор в образце
		Min	Max	Sum		
Стеклопластик EE380	25.948	1.42E-06	0.058	1.002	3.8628	46134
Углепластик CC201	25.948	1.42E-06	0.012	0.409	1.5766	7623

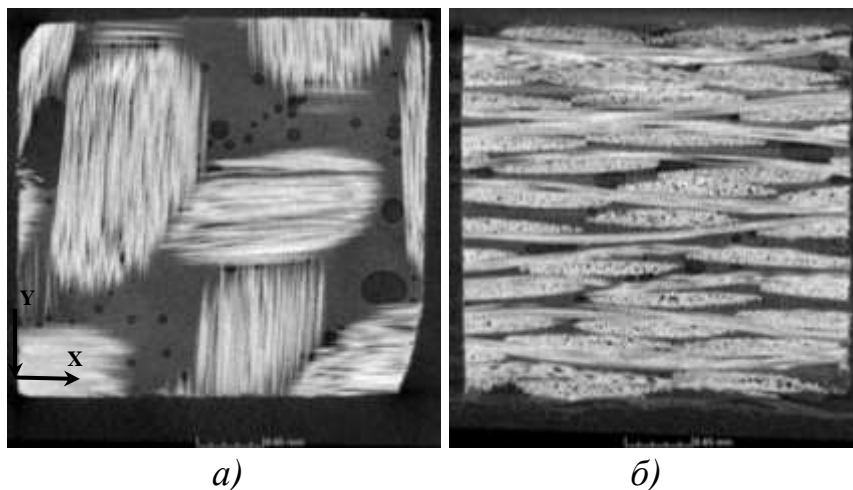


Рисунок 4 – Томограммы образца стеклопластика ЕЕ380

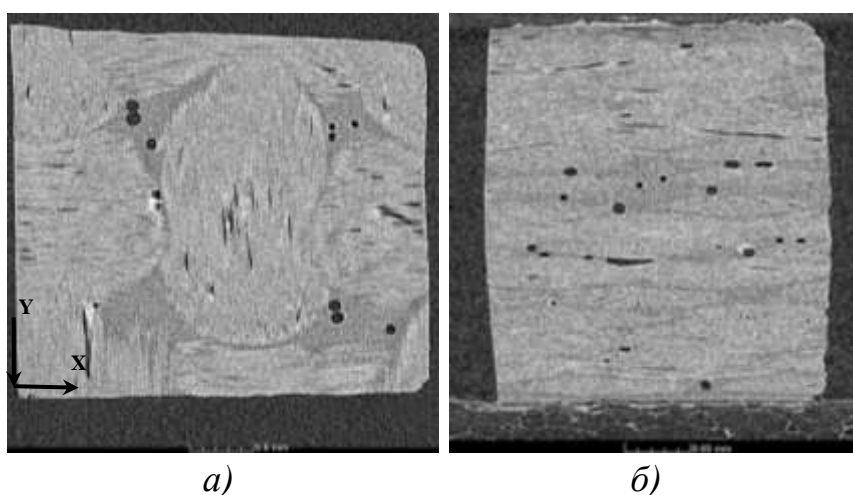


Рисунок 5 – Томограммы образца углепластика СС201

Для исследования зоны удара были использованы томограммы в двух плоскостях. На рисунках 6, 7 представлены результаты микротомографических исследований образцов. На томографических снимках образца ЕЕ380 наблюдаются радиальные разрушения от произведённого удара, трещиноватость, разуплотнение вдоль слоёв материала и полное разрушение вблизи к центру произведённого удара. Максимальная ширина повреждения составила: 19,5 мм, длина: 23,3 мм. На снимках образца СС201 наблюдается крестообразная трещина от произведённого удара и разуплотнение вдоль слоёв материала. Максимальная ширина повреждения составила: 63,7 мм, длина: 77,9 мм.

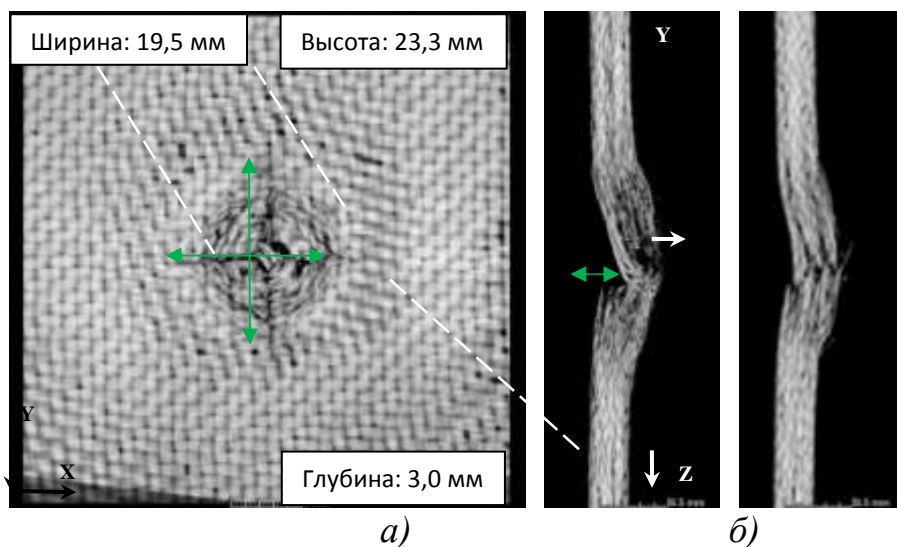


Рисунок 6 – Томограммы образца стеклопластика EE380: (а) по оси XZ, (б) сечение по оси YZ в месте удара, (в) 3 мм от удара

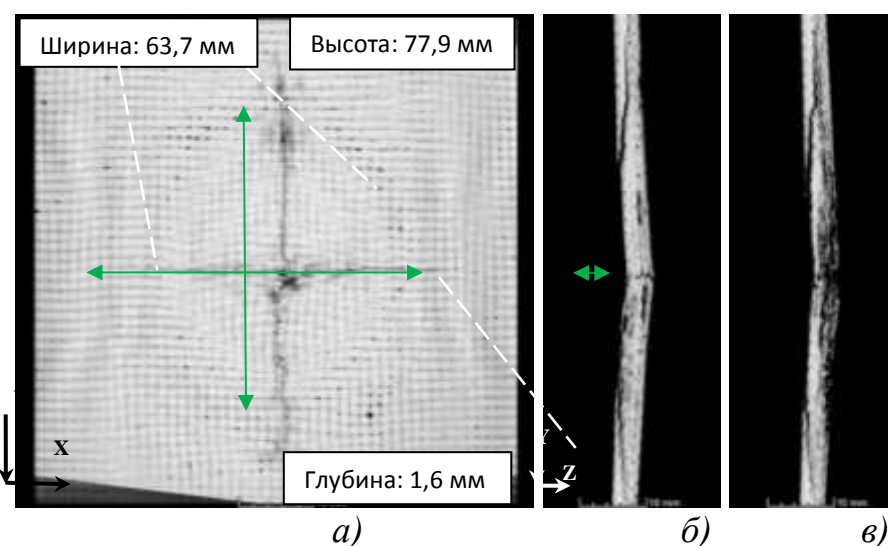


Рисунок 7 – Томограммы образца углепластика CC201: (а) по оси XZ, (б) сечение по оси YZ в месте удара, (в) 4 мм от удара

Выводы

Проведено исследование внутренней структуры образцов композиционных материалов, имеющих различную природу армирующего материала. Методом КТ определено объемное содержание пор в каждом типе материала. После нанесения ударного воздействия был изучен характер повреждений и определены его размеры. Исследование показало, что

характер разрушения зависит от типа переплетения и природы матрицы. По найденным размерам повреждений возможно провести расчет напряженно-деформированного и предельного состояния конструкции их ПКМ при различных условиях эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-08-00577).

Список литературы

1. Ключев В.П., Вайнберг Э.И. Новое поколение рентгеновских вычислительных томографов для технической диагностики // Дефектоскопия. 1991. № 1. С. 80-84.
2. Митряйкин В.И., Михайлов С.А, Бугаков И.С., Закиров Р.Х. Неразрушающий контроль композиционных конструкций компьютерным томографом: Монография. Казань: Изд-во Казан. Гос. Техн. ун-та, 2011. 192 с.
3. Метод испытания полимерных композиционных материалов на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом: СТО 1-595-30-406-2011. М.: ВИАМ. 2011.
4. ASD-STAN PREN 6038 EN-Aerospace Series Fiber Reinforced Plastics Test Method Determination of the Compression Strength After Impact- Edition P1.

УДК 620.192.63

Оценка объемной доли пористости в образцах из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии

Демидов А.А.; Михайлова Н.А., к.т.н.; Крупнина О.А.

lagazz@yandex.ru
natsavv@inbox.ru
fess.m.d@gmail.com

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

Рассмотрена процедура оценки объемной доли пористости в образцах из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии как альтернатива таким разрушающим испытаниям как гидростатическое взвешивание, травление и выжигание. Выбран подход к выделению пор из трехмерного массива данных. Дан обзор факторов, влияющих на точность оценки пористости, и проведено сравнение с разрушающими и акустическими методами.

Ключевые слова:

рентгеновская компьютерная томография, полимерный композиционный материал, пористость

Введение

Одной из важных и ответственных задач при оценке качества деталей и полуфабрикатов из полимерных композиционных материалов является определение объемной доли пористости (ОДП) в материале. Для решения данной задачи применяют как стандартные «прикладные» методы, такие как гидростатическое взвешивание, травление и выжигание, так и более технологичные методы неразрушающего контроля. У данных методов есть как свои преимущества, так и свои недостатки. Общим достоинством этих методов является простота выполнения исследования и отсутствие необходимости в дорогостоящем испытательном оборудовании. Метод химического травления (для углепластиков) и выжигания (для стеклопластиков) позволяет получить результаты измерений с достаточной точностью. Однако использование концентрированных кислот при химическом травлении накладывает ограничения на использование этого метода, а способ выжигания не обеспечивает достаточную точность при измерении пористости углепластиков. Метод гидростатического взвешивания наиболее прост, но его точность ниже, чем выжигание стеклопластика и травление углепластика. Кроме того, указанные здесь методы определения пористости ПКМ приводят к разрушению испытуемого материала, а также их точность теоретически не превышает 0,5-0,7%.

Альтернативными являются неразрушающие методы оценки пористости ПКМ. К таким методам контроля пористости относятся акустические методы (эхометод и теневой) и РКТ. Акустические методы универсальны и могут применяться для крупногабаритных изделий, но к сожалению, его точность недостаточна, особенно при низких значениях пористости (ниже 3%). Полученная погрешность ультразвуковых измерений пористости составляет до $\pm 0,7\%$, т. е. даже беспористый материал может дать результат измерения величины объёмной доли пор $0,7\%$.

При проведении томографии выполняется реконструкция трехмерного изображения объекта исследования с возможностью анализа внутренней структуры и поверхности. Кроме того, в отличие, например, от акустических методов НК, РКТ позволяет проводить исследования образцов из ПКМ на разной стадии отверждения для установления механизма развития пористости.

Методика оценки ОДП позволит не только оценить объёмную долю пористости, но и проводить морфологический анализ с установлением распределения по размерам, координатам расположения пор и пр., что невозможно сделать с помощью акустических методов НК. Для этого необходимо выбрать режимы сканирования, определить алгоритмы автоматизированного поиска пор и провести сравнение с другими методами, как разрушающими, так и неразрушающими. В перспективе это позволит определять пористость в конструктивно-подобных образцах и деталях из ПКМ, а также проводить арбитражные исследования для оценки эффективности других методов.

Факторы, потенциально влияющие на точность оценки значений ОДП в образцах ПКМ по результатам РКТ, можно разделить на три области - это параметры КТ-сканирования, параметры реконструкции [1], а также параметры и алгоритмы анализа томограммы и оценки доли пор.

Первая область охватывает саму систему РКТ и ее параметры. В данную секцию входит схема и геометрия сканирования (сканирование в конусном пучке, спиральное сканирование и т. д.), настройки рентгеновской трубки (ток, напряжение, размер фокусного пятна), предварительная фильтрация на рентгеновской трубке, коэффициент геометрического увеличения и результирующий размер вокселя, количество проекций, а также параметры детектора (время кадра, количество кадров на проекцию, усиление, свойства самого детектора) [2]. Вторая область охватывает этап реконструкции. Третья включает в себя анализ реконструированного объема данных РКТ,

алгоритмы выделения и распознавания областей, содержащих дефекты (поры).

По результатам проведения РКТ, информация о внутренней структуре исследуемого объекта представляется в виде трехмерного массива, составленного из объемных элементов – вокселей (англ. voxel – volumetric pixel). Каждый воксель характеризуется некоторым значением (уровнем серого), полученным путем восстановления величины ослабления излучения некоторым малым объемом исследуемого объекта в соответствии с определенным математическим алгоритмом.

На точность результатов оценки величины ОДП влияет, в первую очередь, алгоритм классификации вокселей как дефектных. Поры в ПКМ морфологически представляют собой полости, заполненные воздухом или газом, следовательно, значение уровня серого в зоне поры должно быть равно уровню серого воздуха или фона. На практике, в зависимости от размера поры, разрешения и величины уровня шума томографических данных, уровень серого в области пор может незначительно отличаться от величины серого материала. В любом случае эту задачу можно отнести к области обработки изображений, а именно сегментации и морфологическому анализу изображений. В результате сегментации на изображении выделяются области, в которые объединяются воксели (пиксели) по выбранным признакам.

Существует несколько подходов при сегментации серых полутоновых изображений. При анализе томографических данных наиболее применимы следующие алгоритмы:

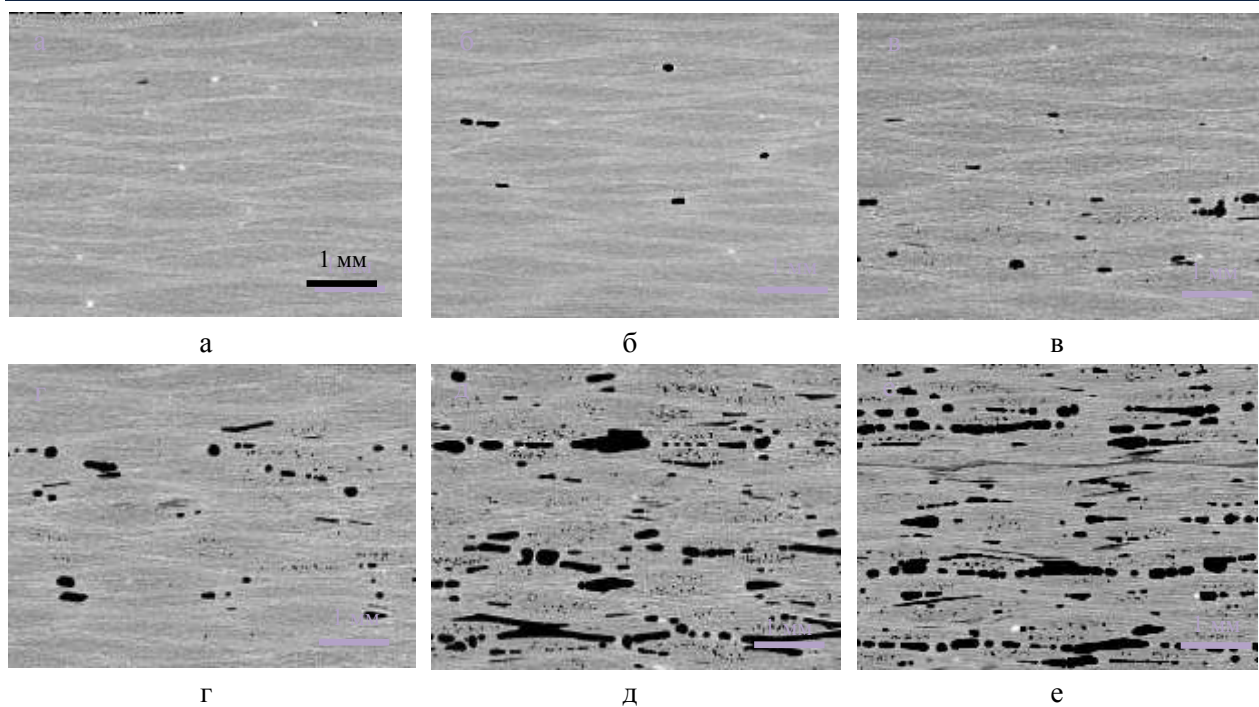
- пороговый метод, где для назначения вокселя к группе «пора» используется информация только об уровне серого, выше которого все воксели относятся к категории «материал»;

- методы выращивания регионов, при которых на изображении выделяются некоторое количество ядер или начальных точек, далее данные

ядра увеличиваются до тех пор, например, пока контраст между соседними вокселями не достигнет определенной величины. Начальные точки или ядра определяются пользователем вручную или автоматически по алгоритму.

Количественная оценка влияния режимов контроля (напряжение и ток трубки, время накопления и емкость усиления детектора) и параметров реконструкции не приводится, поскольку в результате исследований установлено, что влияние данных факторов на точность оценки ОДП при исследовании образцов углепластика небольших размеров - незначительно. Также установлено, что при выборе величины напряжения при условии ослабления исходной дозы излучения образцом углепластика на величину от 13 до 90% на всех проекциях в процессе сканирования, влияние самой величины напряжения на результаты оценки практически отсутствует.

На рисунке 1 приведены сечения томограмм в поперечном разрезе образцов углепластика с величинами ОДП от 0 до 5 %. Размер, форма и положение пор изменяются в зависимости от сечения. В образцах с низкой ОДП их форма в основном сферическая, тогда как в образцах с пористостью выше 3% поры становятся плоскими и более крупными. К тому же, поры не распределены однородно. В определенных слоях наблюдается высокая плотность расположения пор, в других слоях поры практически отсутствуют.



а: ~ 0%, б: ~ 0,15%, в: ~ 0,35%, г: ~ 0,9%, д: ~ 3,50%, е: ~ 5%;

Рисунок 1 - Изображения поперечного сечения томограмм образцов углепластиков с различной величиной ОДП

Информация о реконструированной величине серого всех элементов томограммы содержится в гистограмме. На рисунке 2 приведена гистограмма томографических данных образца из углепластика.

Гистограмма уровней серого для исследуемого образца углепластика со значением пористости около 2,5% приведена на рисунке 2. На гистограмме присутствует распределение значений серого, четко формируя два гауссовых распределения уровней серого, одно для воздуха / пор и одно – для материала. Порогом или пороговым уровнем является величина уровня серого, с которой сравнивается яркость каждого вокселя томограммы. По результатам сравнения, воксель и занимаемый им объем относятся либо к категории поры / воздух либо к материалу. Существует несколько вариантов определения порога Th [3].

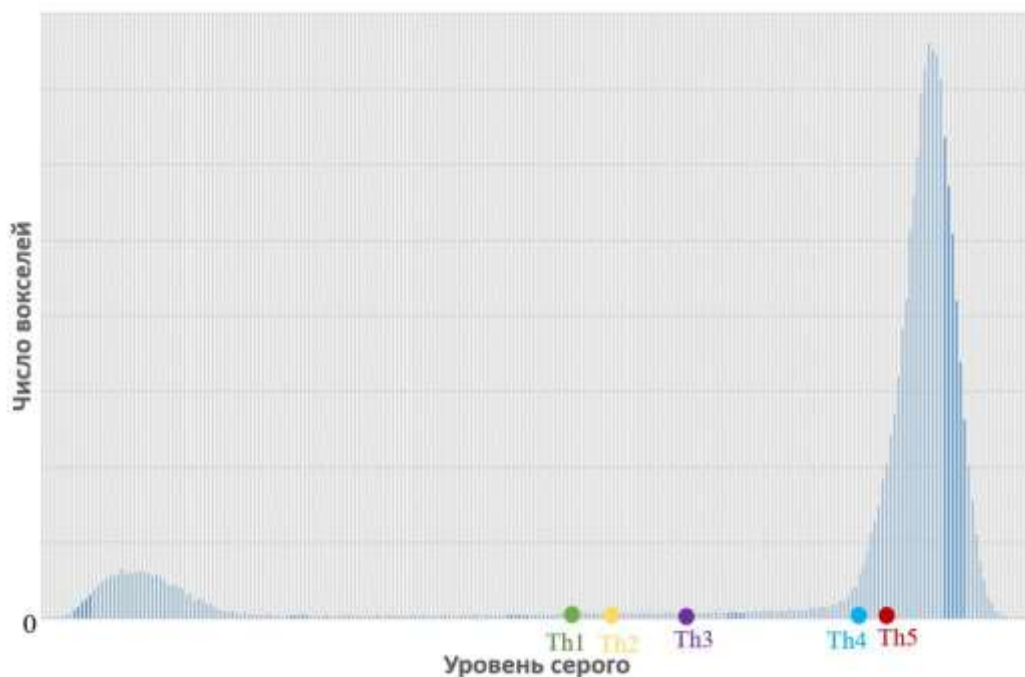


Рисунок 2 – Гистограмма уровней серого томограммы образца углепластика и расчётные значения порога при вычислении ОДП. Все воксели с уровнем серого левее порогового значения будут классифицированы как поры

Минимальный детектируемый элемент внутренней структуры не может быть меньше размера вокселя. Таким образом, размер вокселя определяет размер минимально выявляемой поры, потому является одним из ключевых параметров сканирования. Размер вокселя определяется величиной коэффициента увеличения (соотношение расстояния от выходного окна рентгеновской трубки до детектора к расстоянию от выходного окна трубки до оси вращения предметного стола томографа) и размером пикселя детектора.

Применение фильтра излучения позволяет изменять спектр излучения, что уменьшает проявление артефактов. Однако при увеличении толщины и атомного номера материала фильтра, снижается уровень сигнала на томограмме, что уменьшает контраст между дефектной и бездефектной зоной, что приводит к снижению точности оценки ОДП в образцах углепластика.

Чрезмерное количество проекций увеличивает продолжительность контроля, однако недостаточное количество проекционных данных приводит к потере информации. Обычно, считается достаточным, чтобы количество проекций равнялось максимальной ширине проекции образца, измеренной в пикселях. Для исключения потери информации об исследуемом образце, количество проекций можно рассчитать, умножив ширину проекции образца в пикселях на число π .

Следовательно, сокращение числа проекций ниже значений $\pi \cdot L$, где L – количество пикселей на горизонтальной линии между крайними точками проекции образца, приводит к снижению точности при оценке ОДП по результатам РКТ.

Оценка точности измерения ОДП

При определении точности проведения измерений, необходимо знать истинное значение измеряемой величины. В случае оценки значения ОДП не существует достоверного неразрушающего метода, который бы дал ее истинное значение для конкретного образца. В качестве решения данной задачи было решено, что за истинное значение ОДП принять результаты анализа томограммы с размером вокселя заведомо меньше трехкратного размера самой мелкой поры. В случае ПКМ за мелкие поры, совокупный объем которых составляет менее 0,01-0,09% от объемной доли всех пор (при $\text{ОДП} \leq 3\%$).

Для достижения высокого разрешения была использована технология сканирования Subpix. Особенностью данного типа сканирования является получение четырех наборов проекций объекта, полученных со смещением в половину пикселя друг относительно друга. Специализированный алгоритм трехмерной реконструкции позволяет виртуально повысить базовое пространственное разрешение детектора SR_b^{detector} в два раза с 200 до 100 мкм.

Для проведения исследований были отобраны 12 образцов ПКМ (углеродная ткань+стеклоткань) с различной ОДП.

Оценка точности измерения проводилась как для технологии Subpix, так и для метода классической цилиндрической томографии в конусном пучке.

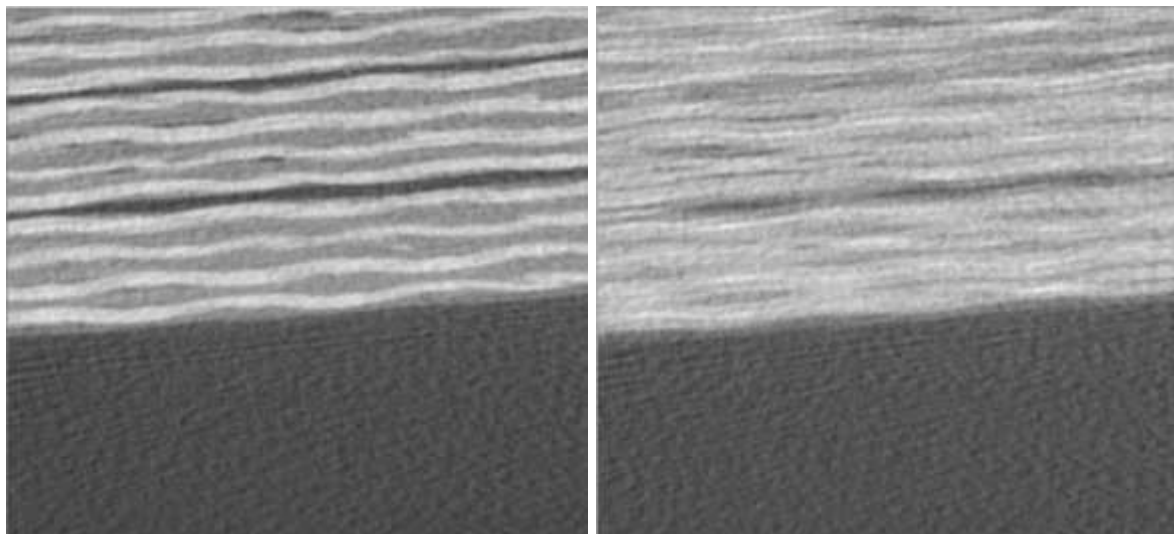
Значения напряжения и тока трубки определялись таким образом, чтобы создать сигнал на детекторе в диапазоне 20-80% и обеспечить минимальный размер фокусного пятна. В случае сканирования Subpix эти параметры выше, так как был использован алюминиевый фильтр, который отсекает низкоэнергетическую часть спектра рентгеновского излучения. Это позволяет снизить шум, уровень которого несколько выше для сканирования Subpix, чем для цилиндрического сканирования.

После того, как были получены наборы проекций для образцов № 1-12 при двух типах сканирования, были отработаны параметры реконструкции томографических данных. Работы проводились с использованием программного обеспечения EfxCT. Реконструкция состоит из нескольких этапов:

1) Построение геометрии области реконструкции. С помощью скана калибровочного образца проведено восстановление геометрии области реконструкции. Расхождение между координатой центров окружностей, образованных перемещением сфер составляет менее 0,5 пикселя, что подтверждает правильную калибровку томографа и механическую жесткость системы «детектор-источник-координатный стол».

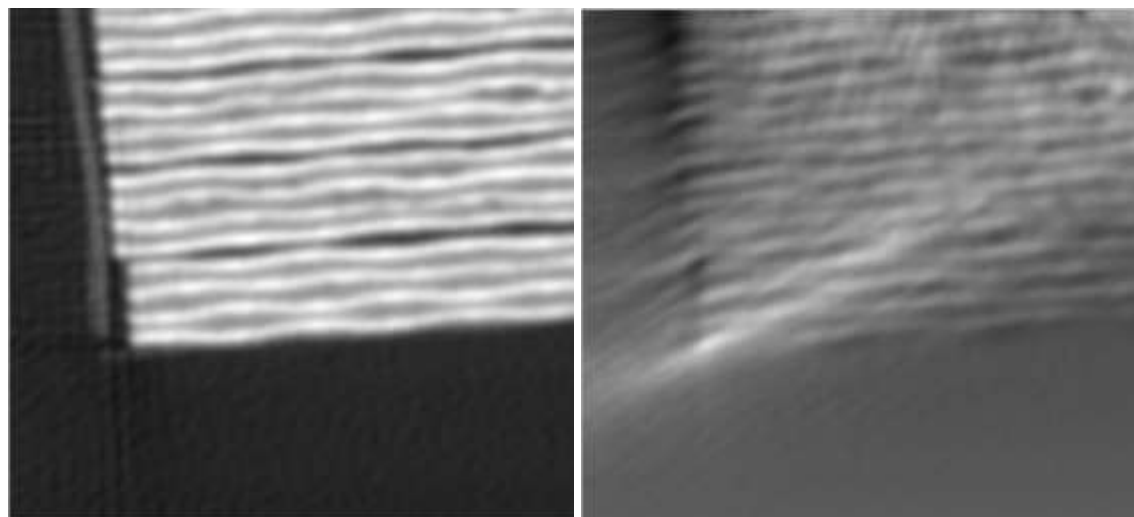
2) Определение оси вращения образца. Для того, чтобы ось томограммы максимально совпала с осью вращения образца во время сканирования, проводится расчет оси вращения (ReferenceX). Точность определения зависит от количества точек, координаты которых будут усреднены для расчета координаты оси. При дальнейшем увеличении числа точек время расчета увеличивается, качество изображения при этом не меняется. На рисунке 3 показаны два варианта изображения при количестве

точек равным 5: одно изображение с правильным значением ReferenceX, второе с заведомо неверным.



а) б)
Рисунок 3 – Определение значения ReferenceX: а) корректное изображение, б) некорректное изображение

3) Определение коэффициента компенсации жесткости пучка рентгеновского излучения. Проводится коррекция неравномерности пучка рентгеновского излучения (Beam hardening). Коррекция задается соответствующим коэффициентом. На рисунке 4 показаны сечения образца при правильном коэффициенте коррекции и при заведомо неверном.



а) б)
Рисунок 4 – Определение значения коэффициента коррекции Beam hardening: а) оптимальный, б) заведомо неверный

4) На последнем этапе реконструкции проведено восстановление трехмерного изображения.

Таким образом, для каждого из 12 образцов получено по две томограммы – с размером вокселя 15 (Subpix) и 31 мкм (цилиндрическое сканирование).

Далее в обеих томограммах провели оценку ОДП в каждом из 12 образцов использованием программного обеспечения VG Studio Max 3.4. Для определения ОДП использовались модули Advanced Surface Determination (определение поверхности образца), Gray value analysis (Статистический анализ уровней серого), Porosity/Inclusion Analysis (Модуль поиска пор/включений) Анализ проводился с помощью порогового метода, где для назначения вокселя к группе «пора» используется информация только об уровне серого, выше которого все воксели относятся к категории «материал». Пороговое значение получали путем вычитания из среднего значения уровня серого S_0 (Mean gray value), соответствующего материалу величину $k\sigma$, где σ – стандартное отклонение (standard deviation of gray value), k – эмпирический коэффициент. Таким образом, алгоритм поиска отмечает все воксели с уровнем серого ниже значения $S_0 - k\sigma$, как пора. Для получения значений среднего уровня серого и стандартного отклонения в каждом типе образцов выбирался фрагмент без дефектов и подвергался статистическому анализу с помощью модуля Gray value analysis, На рисунке 5 показаны результаты расчета для образца № 1.

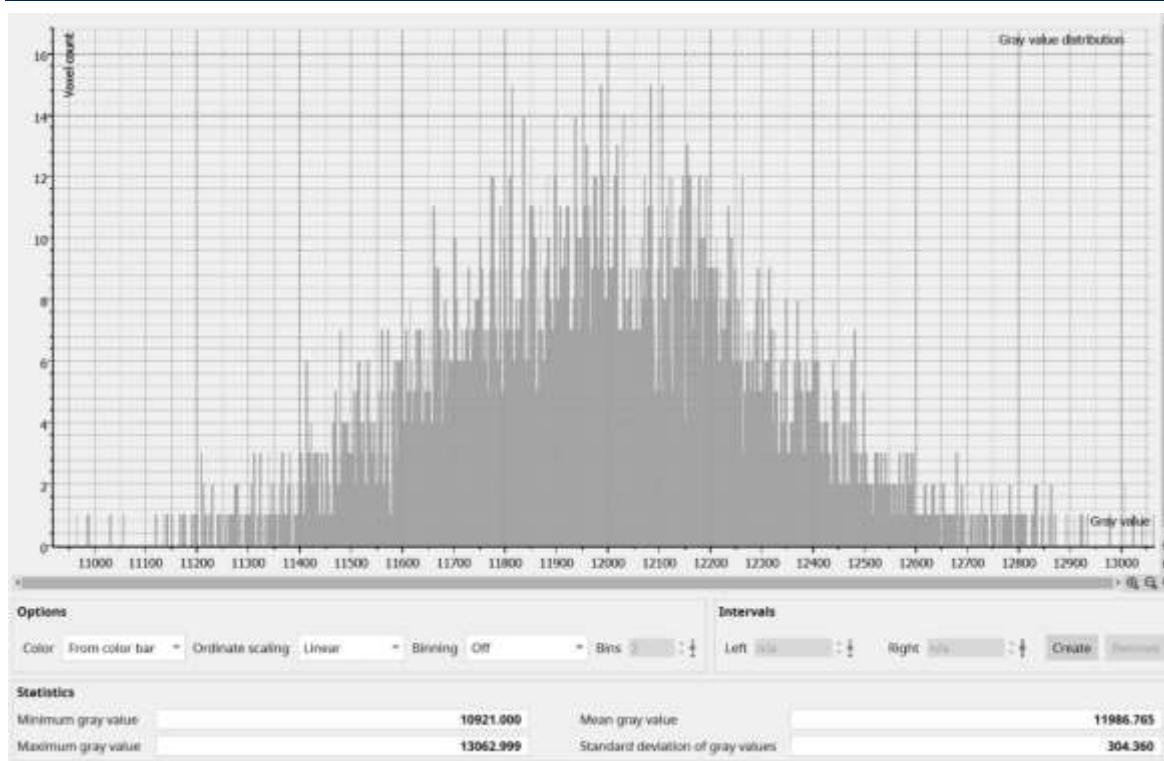


Рисунок 5 – Результаты статистического анализа образца № 1 с указанием значений среднего уровня серого и стандартного отклонения.

Таким образом, были рассчитаны пороговые значения для томограмм всех образцов. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические данные и пороговые значения для томограмм образцов № 1-12

№ образца/характеристика	Томограмма с размером вокселя 15 мкм (Subpix).	Томограмма с размером вокселя 30 мкм.
Образец № 1		
Средний уровень серого материала	11986,8	41,7
Стандартное отклонение	304,4	1,02
Порог	10410,0	36,6
Образец № 2		
Средний уровень серого материала	11115,6	38,3
Стандартное отклонение	228,4	1,3
Порог	9970,0	31,4

Анализ экспериментальных данных показал, что разница между значениями ОДП, посчитанными для двух вариантов сканирования образцов № 1-12 лежит интервале $\pm 0,15\%$. На основании анализа проведенных испытаний установлено, что морфология дефектов образцов ПКМ, имеющих различный состав (наполнитель-связующее) схожа. Тем самым определено, что проведение представленных выше методов сканирования применимо как для углепластиков, так и для стеклопластиков.

Определение объемной доли пористости методом РКТ акустическими методами неразрушающего контроля, гидростатическим взвешиванием и выжиганием

Для того, чтобы подтвердить воспроизводимость результатов определения ОДП была проведена оценка точности измерения.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 точность метода измерений описывается с помощью терминов «правильность» и «прецизионность». Правильность характеризует степень близости среднего арифметического значения большого числа измерений к истинному или принятому опорному значению, а прецизионность – степень близости результатов измерений друг к другу. Так как при определении ОДП нет истинного значения, точность рекомендуется оценивать, как стандартное (среднеквадратическое) отклонение результатов измерений по формуле 1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

Однако данный подход дает хорошие результаты (с надежностью 0,68) только в том случае, если одна и та же величина измерялась многократно, более 30 раз. Для проведения рентгеновской томографии этот метод является неоправданно трудоемким. Статистический подход справедлив и для малого числа измерений. Точность в этом случае является абсолютной ошибкой Δx для заданной доверительной вероятности. Абсолютная ошибка определяется по формуле 2.

$$\Delta x = S_{\bar{x}} t \quad (2)$$

где: $S_{\bar{x}}$ – среднеквадратическое отклонение среднего арифметического значения, t – коэффициент Стьюдента. $S_{\bar{x}}$ определяется по формуле 3.

$$S_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

где: n – число измерений.

Для сканирования отобраны 10 образцов из углепластика и 10 образцов из стеклопластика. Образцы собраны в единый пакет для сканирования за один раз.

С целью набора статистических данных проведено десять сканирований и получено 10 томограмм образцов. По рассмотренной выше процедуре для каждого образца получено 10 значений ОДП.

Далее для каждого образца было рассчитано значение среднеквадратического отклонения, среднеквадратическое отклонение среднего арифметического значения $S_{\bar{x}}$ и абсолютная погрешность Δx . Результаты расчетов указанных значений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения среднеквадратического отклонения σ , среднеквадратического отклонения среднего арифметического значения $S_{\bar{x}}$ и абсолютной погрешности Δx , полученные по результатам 10 сканирований образцов

Тип образца	Абсолютная погрешность измерений, Δx
Экспериментальные образцы углепластика на основе углеродной ткани марки Porcher и эпоксидного связующего марки ВСЭ (ОДП ~ 0,58 %)	
1.1	0,034
1.2	0,069
1.3	0,042
1.4	0,126
1.5	0,074
Экспериментальные образцы углепластика марки ВКУ-39/ВТКУ-2.200	
2.1	0,200
2.2	0,272
2.3	0,213
2.4	0,267
2.5	0,354
Экспериментальные образцы стеклопластика марки ВПС-70 (ОДП ~ 0,15%)	
3.1	0,027
3.2	0,016
3.3	0,015
3.4	0,031
3.5	0,031
4.1	0,000
4.2	0,000
4.3	0,000
4.4	0,000
4.5	0,000

Образцы 4.1 – 4.5 далее не использовались в расчетах, так как значения ОДП в них не репрезентативны. График зависимости Δx от ОДП представлен на рисунке 6.

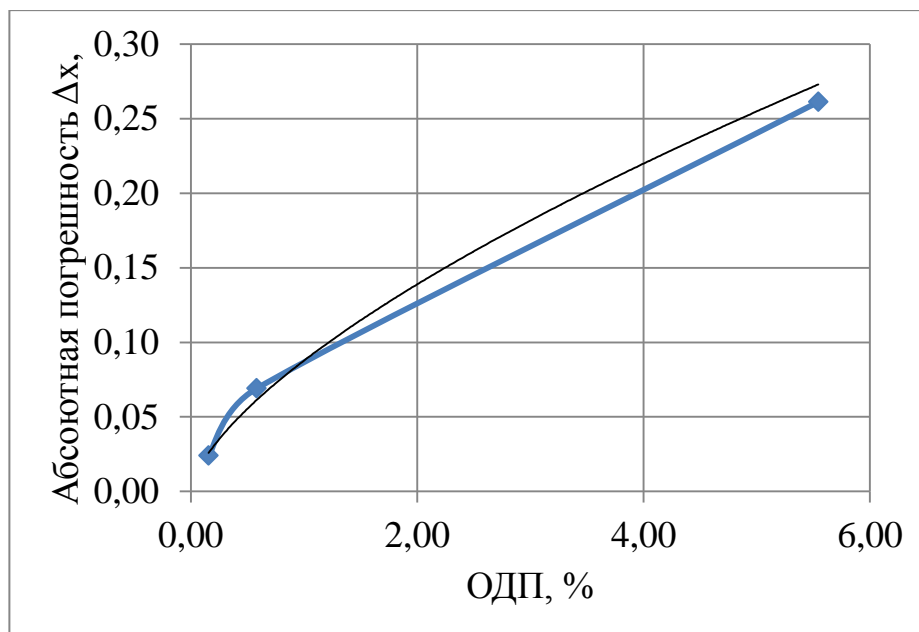


Рисунок 6 – График зависимости абсолютной погрешности Δx от величины ОДП

Помимо РКТ, для образцов 1.1 ÷ 4.5, а также для экспериментальных образцов стеклоуглепластика была оценена ОДП акустическими методами неразрушающего контроля (эхо-импульсный и теневой методы), выжиганием и гидростатическим взвешиванием.

Акустический эхо-импульсный метод (ультразвуковой) основан на излучении и приеме ультразвуковых импульсов, отраженных от несплошностей (дефектов) внутри контролируемого материала, а также от донной поверхности объекта контроля.

Теневой метод ультразвукового контроля основан на излучении и приеме ультразвуковых импульсов, прошедших сквозь материал объекта контроля [4].

При том и другом методах о наличии или отсутствии несплошностей (дефектов) в объектах контроля оценивается по величине амплитуды принятого ультразвукового сигнала и проводился по СТО 1-595-22-599-2020.

Оценка ОДП методом выжигания проводилась по ГОСТ Р 56682 метод I способ G. Оценка ОДП с использованием данных гидростатического взвешивания (расчетный метод) проводилась по ММ 1.2.151-2014.

На основании полученных данных установлено, что акустические методы контроля (эхо-импульсный и теневой) позволяют лишь предварительно (качественно) оценить наличие/отсутствие дефектных зон в ПКМ и определить места для вырезки образцов и дальнейших исследований по определению ОДП.

В этой связи, с целью дополнительного сравнения, определена ОДП в образцах 1.1 - 5.5 количественным металлографическим анализом.

ОДП, полученная методом выжигания, сопоставима с РКТ, но используемый метод - разрушающий, что является не всегда пригодным для оценки ОДП. Кроме того, метод выжигания малоприменим для определения объёмной доли пор в углепластиках ввиду невозможности полноценного проведения процесса при высоких температурах.

Усредненное значение ОДП, полученное расчетом с использованием результатов гидростатического взвешивания образца, сопоставима с результатами ОДП, полученными методом РКТ, но точность оценки в этом случае значительно ниже. Это связано с тем, что при расчёте ОДП методом гидростатического взвешивания используются значения поверхностной плотности наполнителя, плотность связующего и волокна, которые всегда имеют ошибку в третьем знаке после запятой. Этой ошибки достаточно, чтобы получать значения ОДП со значительным разбросом. Метод гидростатического взвешивания весьма эффективен для быстрой оценки ОДП в ПКМ, но его недостаточно для точного определения истинного значения пористости.

Сравнительный анализ значений ОДП, полученных различными методами показывает, что наименьшая разница наблюдается между РКТ и количественным металлографическим анализом.

При этом разброс в значениях ОДП в образцах 2.1-2.5 и 3.1-3.5 обусловлен следующим: при проведении количественного металлографического анализа суммарная площадь всех обнаруженных на шлифе пор относится к общей площади шлифа; в то время как оценка ОДП методом РКТ определяется во всем объеме образца ПКМ, в том числе деталей из ПКМ.

Ввиду этого, значения ОДП, определяемой методом РКТ, являются наиболее достоверными.

Выводы

Рентгеновская компьютерная томография является эффективным методом неразрушающего контроля для решения задач получения и обработки больших массивов данных.

Найден подход для оценки точности определения объемной доли пористости в образцах из полимерных композиционных материалов. Точность оценки ОДП методом РКТ выше, чем у других методов.

Создан задел для оценки объемной доли пористости в конструктивно-подобных образцах и далее – в конструкциях из полимерных композиционных материалов.

Список литературы

1. J.P. Kruth, M. Bartscher. Computed tomography for dimensional metrology //CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2011. № 60. с. 821-842.
2. Крупнина О.А., Косарина Е.И, Демидов А.А., Турбин Е.М. Выбор режимов и параметров контроля объектов авиационной техники методом цифровой радиографии// Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам – ежемесячное приложение к журналу «Все материалы. Энциклопедический справочник» 2017,№ 8. С. 50–51.

3. M. Kato, M. Takahashi. Evaluation of porosity and its variation in porous materials using microfocus x-ray computed tomography considering the partial volume effect// Materials Transactions. 2013. № 9, с 1678-1685.

4. Бойчук А.С., Чертищев В.Ю. Оценка возможности определения пористости в углепластике ультразвуковым теневым методом// Труды ВИАМ. 2017, № 7

УДК 620.192.63

Оценка качества отливок из алюминиевых и магниевых сплавов методом цифровой радиографии взамен традиционной пленочной технологии

Смирнов А.В.; Косарина Е.И., д.т.н.; Суворов П.В.

mr.smirnovalexey@gmail.com

ekaterina-kosar@mail.ru

suvorovpav@gmail.com

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

В российских нормативных документах по радиационному контролю регламентированы эталонные рентгеновские снимки, которые используют при расшифровке рентгенограмм объектов контроля для установки допустимости того или иного дефекта в отливках из магниевых и алюминиевых сплавов. Проблема сокращения использования радиографической пленки из техпроцесса рентгеновского контроля требует проведения исследований с целью получения альбомов в цифровом исполнении.

Ключевые слова:

рентгенограмма, цифровое изображение, детектор, базовое пространственное разрешение, нерезкость

Введение

Отливки из магниевых и алюминиевых сплавов, применяемые в авиационной технике, как правило, относятся к ответственным деталям. Поэтому важно особенно тщательно проводить их разбраковку. Для этой цели в ВИАМ разрабатываются альбомы типовых эталонов рентгенограмм для отливок из магниевых сплавов МЛ9, МЛ10, МЛ5, МЛ5пч, ВМЛ18, ВМЛ20, а так же шкалы рентгеновских эталонов пористости для отливок из алюминиевых сплавов типа «силумин», ВАЛ10, ВАЛ14.

Альбомы магниевых сплавов содержат рентгеновские снимки образцов или фрагментов отливок, содержащих, во-первых, типовые дефекты литья: усадочные раковины, более плотные включения, линии течения, плены, ликвации, и, во-вторых, специфические, сопровождающие только литейные магниевые сплавы. К таким дефектам относится микрорыхлота (рисунок 1). Рентгенограммы, составляющие альбом, получают при проведении рентгенографического экспонирования в соответствии с требованиями действующих отраслевых нормативных документов (НТД) с последующей фотообработкой, осуществляемой также в соответствии с действующими НТД. Изготовление альбома работа уникальная и трудоемкая. В связи с разработкой и внедрением новых магниевых сплавов, относящихся к той или иной группе, например, к группе жаропрочных литейных магниевых сплавов с редкоземельными металлами, эти альбомы увеличивают свой объем, так как дополняются новыми эталонными рентгеновскими снимками. Таким образом, трудоемкость изготовления альбомов, а, следовательно, и себестоимость альбомов возрастает.



Рисунок 1 - Рентгенограмма эталонных образцов диапазоном 4-10 мм из сплава МЛ5пч с микрорыхлотами слабой, средней и сильной степени

Альбомы алюминиевых сплавов предназначены для оценки интенсивности пористости в отливках. Шкалы устанавливают пятибальную градацию газовой пористости деталей из литейных алюминиевых сплавов (рис. 2). Перечисленные шкалы представляют собой альбомы рентгенограмм образцов сплавов с пятью баллами пористости (первый балл наиболее низкий). Зависимость балла пористости, определенного по рентгенограмме, от запаса механической прочности определена экспериментально и представлена в альбомах. Для каждой просвечиваемой толщины образцов с различными баллами пористости рекомендованы режимы просвечивания, аппаратура, тип радиографической пленки и другие условия и параметры контроля.



Рисунок 2 - Рентгенограмма эталонных образцов толщиной 5 мм из алюминиевых литейных сплавов типа «силумин» с газовой пористостью 1–5 баллов

Работа с альбомом дефектоскописта–рентгенолога осуществляется путем визуального сравнения рентгенограммы объекта контроля с эталонными рентгенограммами из альбома. Таким образом, в процессе эксплуатации альбомы изнашиваются, эталонные рентгеновские снимки получают повреждения (царапины, задиры и пр.). И это помимо того, что сами снимки имеют ограниченный срок службы: с течением времени они желтеют, меняется их оптическая плотность. Регламентированный срок службы альбомов составляет пять лет. По истечении его альбом необходимо изымать из производственного процесса контроля и заменять его вновь изготовленным [1-3].

Сущность исследований

Предварительная оценка

Внедрение цифровых технологий в процесс рентгеновского неразрушающего контроля побудило к проведению исследований замены эталонных рентгеновских снимков их цифровыми аналогами. Переход от традиционной радиографии с использованием радиографической пленки к цифровой радиографии оправдан лишь в том случае, если качество цифрового изображения не хуже качества радиографического изображения на снимке.

Свойства изображения, определяющие его качество: контраст, нерезкость и отношение сигнал/шум (ОСШ). Рассмотрим свойства радиографического и цифрового изображений.

При использовании радиографической пленки

1. Контраст радиографического изображения определяется радиационным контрастом $K_{\text{рад.из}}(U, I, t)$ [3], зависящим от режима экспонирования (анодного напряжения U , анодного тока I , продолжительности экспонирования t) и градиентом радиографической пленки G .

$$K_{\text{р/п}} = K_{\text{рад.из}}(U, I, t) \cdot G$$

При выполнении требований НТД достигают необходимую величину радиационного контраста. Для изделий авиационной техники регламентировано применение радиографических пленок классов С1–С4 по ISO 11699-2008. У радиографической пленки класса С4 градиент $G=4,6$ при оптической плотности снимка, равной двум белам, в остальных случаях он выше.

2. Нерезкость (величина обратная четкости) изображения зависит от геометрической и собственной нерезкости радиографической пленки. При использовании безэкранных радиографических пленок классов С1–С4 собственной нерезкостью можно пренебречь, так как она значительно ниже геометрической. Таким образом, четкость радиографического изображения определяется оптимальной схемой контроля и фокусным расстоянием для рентгеновского аппарата с заданным размером фокусного пятна Φ .

3. Отношение сигнал/шум у радиографических пленок – это отношение есть не что иное, как отношение градиента G к гранулярности σ_s :

$$\text{ОСШ}_{\text{р/п}} = \frac{G}{\sigma_s}$$

При использовании радиографических пленок классов С1–С4, $\text{ОСШ}_{\text{р/п}}$ колеблется в пределах от 170 для пленок класса С4 до 390 для пленок класса С1.

При использовании цифровых детекторных систем

1. Контраст цифрового изображения. Цифровое изображение представляет собой нюансную картину дискретных колебаний серого цвета от белого, соответствующего $S_6=0$, до черного соответствующего $S_4=1$.

2. При использовании плоскопанельных детекторов следует учитывать, что собственная нерезкость на порядок и более превосходит собственную нерезкость радиографических пленок. Собственная нерезкость соизмерима с геометрической нерезкостью.

3. Качество цифрового рентгенографического изображения

определяется, помимо контраста и нерезкости, таким параметром, как отношение сигнал-шум (ОСШ). Плоскопанельный детектор – устройство, которое обладает высоким уровнем собственных шумов, снижающих контраст изображения в большей степени, чем повышение энергии излучения снижает контраст радиационного изображения. В радиографии низкий радиационный выход источника можно скомпенсировать длительностью экспозиции. В цифровой радиографии низкий радиационный выход источника может привести к снижению ОСШ. Поэтому при использовании плоскопанельного детектора допускаются повышенные значения анодного напряжения по сравнению с пленочной радиографией.

При анализе цифрового изображения яркость на экране монитора должна быть не менее 250 кд/м^2 . При такой яркости глаз может зафиксировать ее изменение, равное $0,05 \text{ кд/м}^2$. Для детектора, имеющего показатель разрядности 16, количество градаций серого составляет $2^{16} = 65536$. Для диапазона яркости $250\text{--}350 \text{ кд/м}^2$ SNR должно быть не менее 70 для класса А (ГОСТ ISO17632-2), при этом уровень серого должен быть в пределах $GV=20\text{--}80 \%$.

4. Для цифровой радиографии важно достичь компромисса при выборе параметров контроля, так как большинство из них взаимосвязаны. В стандарте ГОСТ ISO17632-2 предусмотрен принцип использования геометрического увеличения при экспозиции, который позволяет увеличить детектирующую способность цифрового плоскопанельного детектора. Ограничивающие факторы здесь: размер фокального пятна источника, пространственное разрешение детектора, определяемое размером пикселя, и самое главное, достижимое увеличение применимо только для конкретного объекта исследования и применяемой установки.

Проведем теоретический расчет параметров для экспозиции с геометрическим увеличением по ГОСТ ISO17632-2:

- SR_b базовое пространственное разрешение детектора при коэффициенте увеличения, равном 1;
- SDD – расстояние от источника излучения до детектора;
- f – расстояние от источника излучения до объекта контроля;
- d – размер фокусного пятна или размер источника излучения в соответствии с EN 12543 или EN 12679;
- b – расстояние от объекта контроля до детектора;
- v – геометрическое увеличение, равное отношению SDD/f ;
- u – требуемая максимальная нерезкость изображения.

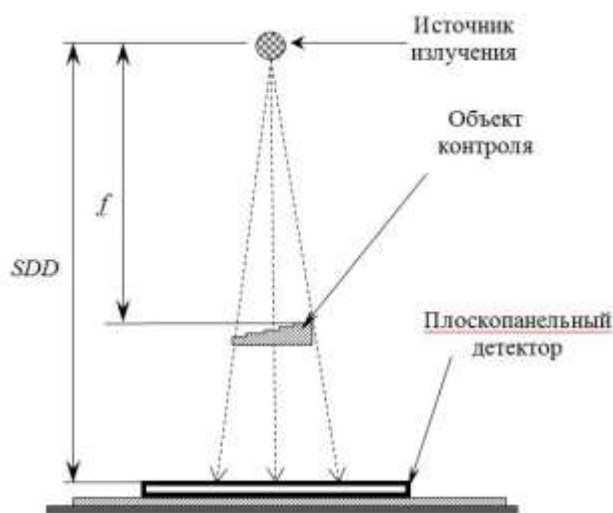


Рисунок 3 - Схема контроля

4.1 Расстояние f (рис. 3) следует выбирать таким образом, чтобы отношение этого расстояния к размеру источника излучения или к размеру фокусного пятна d , т.е. f/d , было не меньше значений, определяемых по формуле [5]:

$$\frac{f}{d} \geq 7,5 \frac{b}{\sqrt[3]{t}}$$

$f = 650$ мм	$f = 300$ мм
$8125 \geq 407$	$3750 \geq 19$

4.2 Определим максимально допустимое значение базового пространственного разрешения детектора:

$$SR_b^{\text{detector}} < \frac{\sqrt[3]{b}}{15},$$

$f = 650 \text{ мм}$	$f = 300 \text{ мм}$
$SR_b^{\text{detector}} < 0,49 \text{ мм}$	$SR_b^{\text{detector}} < 0,6 \text{ мм}$

4.3 Определим минимальное расстояние от источника излучения до объекта контроля:

$$f_{\min} = d \sqrt{\frac{b^2}{(b^{2/3}/7.5^2) - 4SR_b^2}},$$

$f = 650 \text{ мм}$	$f = 300 \text{ мм}$
$f_{\min} = 33,36$	$f_{\min} = 50,35$

4.4 Определим значение нерезкости изображения при выбранных параметрах:

$$u = \frac{1}{v} \sqrt{u_G^2 + 2SRb^2}$$

$f = 650 \text{ мм}$	$f = 300 \text{ мм}$
$u = 0,12 < 0.2$	$u = 0,08 < 0.2$

Исходя из проведенных расчетов, выберем следующие параметры контроля для достижения необходимого качества цифрового

рентгенографического снимка: $SDD = 1050$ мм, $f = 300$ мм, увеличение в 3.5 раза т.к. угол раскрытия конуса пучка излучения составляет 30 градусов.

Результаты экспериментов

Была проведена экспериментальная проверка предположительных оценок на оборудовании со следующими характеристиками (рис. 4, 5):

- цифровой плоскопанельный детектор с размером пикселя 100 мкм, АЦП 16 бит;

- микрофокусный рентгеновский аппарат с размером фокусного пятна в диапазоне 6-170 мкм, с мощностью трубки 300 Вт и максимальным напряжением 225 кВ.

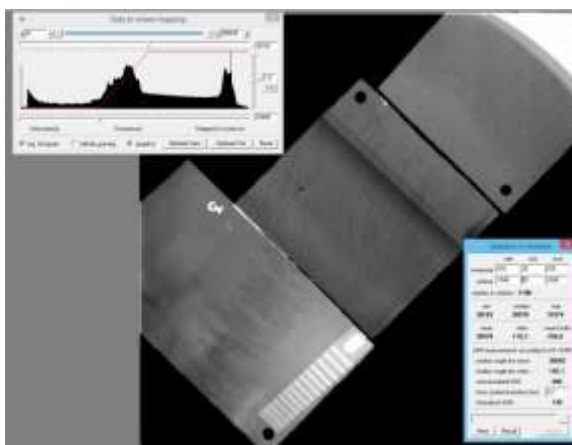


Рисунок 4 - Цифровые рентгенограммы микрорыхлот слабой, средней и сильной степени толщиной стенки от 4 мм до 10 мм МЛ5пч с увеличением в 3,5 раза

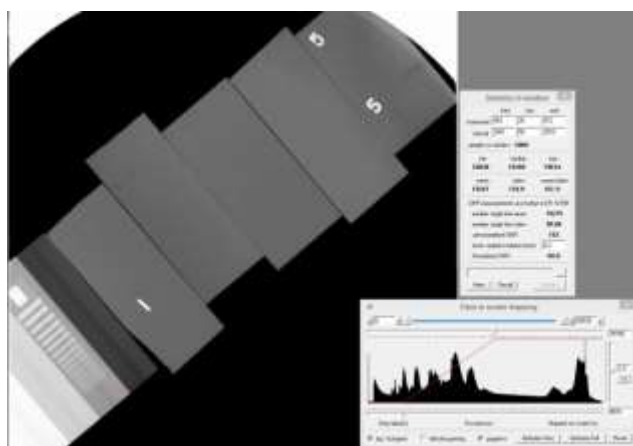


Рисунок 5 - Цифровая шкала рентгеновских эталонов пористости отливок сплава типа «силумин» толщиной 5 мм с увеличением в 3,5 раза

В результате проведения исследований было установлено, что оборудование обеспечивает возможность разработки цифровых альбомов рентгенограмм. При этом все параметры качества цифрового изображения достигаются:

- базовое пространственное разрешение изображения SRB_b^{image} при условии, что базовое пространственное разрешение плоскопанельного детектора $SR_b=100$ мкм при увеличении равном 1;

- отношение сигнал/шум $SNR_N > 70$;

- геометрическая нерезкость $u < 0.2$;

- GV находится в диапазоне 20-80%;

- достигнуты необходимые значения контрастной чувствительности по IQI проволочного типа (W 15), по IQI ступенчатого с отверстиями типа (H 6) [6].

Заключение

Современные ЦДС (плоскопанельный детектор с размером пикселя 100 мкм АЦП 16 бит, микрофокусный рентгеновский аппарат с размером фокусного пятна в диапазоне 6-100 мкм, с мощностью трубки 300 Вт при 225 кВ) позволяют представить альбом в цифровом варианте. Прогресс развития ЦДС настолько стремителен, что в ближайшем будущем следует ожидать их широкого внедрения в производство авиационной и другой техники. Переход на цифровую радиографию при контроле отливок из магниевых и алюминиевых сплавов позволит исключить трудоемкое тиражирование эталонных радиографических снимков, позволит снизить трудоемкость и себестоимость процесса.

Изготовление цифровых альбомов для магниевых сплавов и шкал пористости для алюминиевых сплавов необходимо проводить для определенной номенклатуры объектов контроля при заданных параметрах контроля.

Список литературы

1. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А., Усачев В.Е. Макро- и микропористость в сплавах на основе алюминия и никеля, обнаружение ее рентгеноскопическими методами неразрушающего контроля //Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 423–430.
2. Степанов А.В., Косарина Е.И., Демидов А.А. Компьютерная рентгенография с применением фотосимулированных пластин// Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4. С. 79–85
3. Ложкова Д.С., Степанов А.В., Косарина Е.И. Компьютерная радиография, результаты практических исследований и возможность замены пленочных технологий// Вестник МЭИ № 3, 2011. С. 57–62
4. Добромыслов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1999 –104 с.
5. ГОСТ ISO 17636 Контроль сварных швов неразрушающий. Радиографический контроль. Часть 2. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов// М. Стандартиформ, 2018. 76 с.
6. ISO 19232:2013. Non-destructive testing - Image quality of radiographs. Part 1: Determination of the image quality value using wire-type image quality indicators. Part 2: Determination of the image quality value using step/hole-type image quality indicators.

УДК 620.179.1

Разработка робота-дефектоскопа сочетающего методы контроля с использованием цифровых технологий

Алешин Н.П.¹, академик РАН, д.т.н.; Крысько Н.В.¹, к.т.н.;

Кириков А.В.², к.т.н.

aleshin@bmstu.ru

kryskonv@bmstu.ru

andrej.kirikov@nordinkraft.de

¹ *Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана»;*

² *Общество с ограниченной ответственностью «Компания «Нординкрафт» (ООО «Компания «Нординкрафт»), г. Череповец*

Аннотация:

Автоматическая классификация поверхностных эксплуатационных дефектов является важной и актуальной задачей. Сочетание различных методов неразрушающего контроля, а именно вихретокового, ультразвукового и визуального (телевизионного) позволяет существенно уменьшить вероятность ошибочной интерпретации данных, связанных с человеческим фактором, что реализовано в разрабатываемом роботе-дефектоскопе.

Ключевые слова:

сочетание данных, неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, вихретоковый метод, поверхностные дефекты

Введение

Для повышения качества продукции и обеспечения общественной безопасности выпускаемые изделия и конструкции регулярно проверяются на наличие дефектов или неисправностей, которые снижают их структурную целостность. Среди множества существующих способов испытаний методы неразрушающего контроля имеют колоссальное преимущество, заключающиеся в том, что после диагностирования объект контроля остается неповрежденными. В аэрокосмической отрасли неразрушающий контроль также применяется довольно широко [1, 2]. Сегодня основная часть методов неразрушающего контроля автоматизирована и управляется с помощью персонального компьютера, для облегчения интерпретации сигналов [3, 4]. Измерения, снятые одним датчиком, дают лишь ограниченную информацию об объекте контроля. Поскольку каждый метод неразрушающего контроля имеет свои преимущества и недостатки, для полноценного исследования контролируемого объекта требуется использование нескольких методов. Данные, собранные разными системами неразрушающего контроля, могут быть противоречивыми, неполными или неоднозначными, если анализировать результаты различных методов неразрушающего контроля по отдельности. Цифровые технологии сочетания данных используются для объединения информации, полученной несколькими методами неразрушающего контроля, и применяются для принятия решений о состоянии объекта контроля, что позволяет существенно уменьшить вероятность ошибочной интерпретации данных контроля, связанных с человеческим фактором.

Сочетание данных определяется как синергетический процесс объединения различных источников данных для получения более согласующейся, точной и полезной информации, чем информация от одного отдельного источника [5]. Сочетание мультисенсорных данных широко применяется в военной промышленности и робототехнике, а в последнее

время и в неразрушающем контроле. Впервые цифровые технологии сочетания данных были применены в неразрушающем контроле в [6], и в настоящее время их применение стремительно растет. В данной работе описан процесс разработки робота-дефектоскопа, сочетающего вихретоковый, ультразвуковой и визуальный (телевизионный) методы неразрушающего контроля для выявления дефектов основного материала, выходящих на поверхность с использованием цифровых технологий.

Особенности применение методов неразрушающего контроля по отдельности

В процессе эксплуатации в изделиях могут появляться дефекты различного типа. Такие дефекты называют эксплуатационными, основными типами которых являются коррозионные и стресс-коррозионные дефекты, расположенные на внешней поверхности. К ним относятся: равномерная коррозия, неравномерная коррозия, местная коррозия, точечная коррозия, коррозия пятнами, коррозионная язва, коррозионное растрескивание под напряжением [7-10]. При автоматизированном неразрушающем контроле необходимо определять типы эксплуатационных дефектов, таких, как «трещина» и «язва», так как они имеют разные степени опасности. К методам неразрушающего контроля, позволяющим выявлять поверхностные дефекты и легко поддающимся автоматизации можно отнести вихретоковый, ультразвуковой и визуальный (телевизионный). При анализе данных контроля каждого из перечисленных методов по отдельности, возникает множество неоднозначностей в определении типа поверхностного дефекта.

Сигнал в вихретоковом контроле представляется в виде изменений электромагнитного импеданса на комплексной плоскости, действительная ось которой является нормализованным активным сопротивлением вихретокового преобразователя (ВТП) ($\frac{R_L}{\omega L_0}$), а мнимая ось – нормализованным индуктивным сопротивлением ВТП ($\frac{\omega L}{\omega L_0}$) и имеет две основные характеристики: амплитуду и фазу [10]. Для определения

идентификационных признаков дефектов типа «трещина» и «язва» использовались образцы с искусственными дефектами в виде поверхностного паза (поз. 1 рисунок 1 - а) и вертикального сверления (поз. 2 рисунок 1 – б).

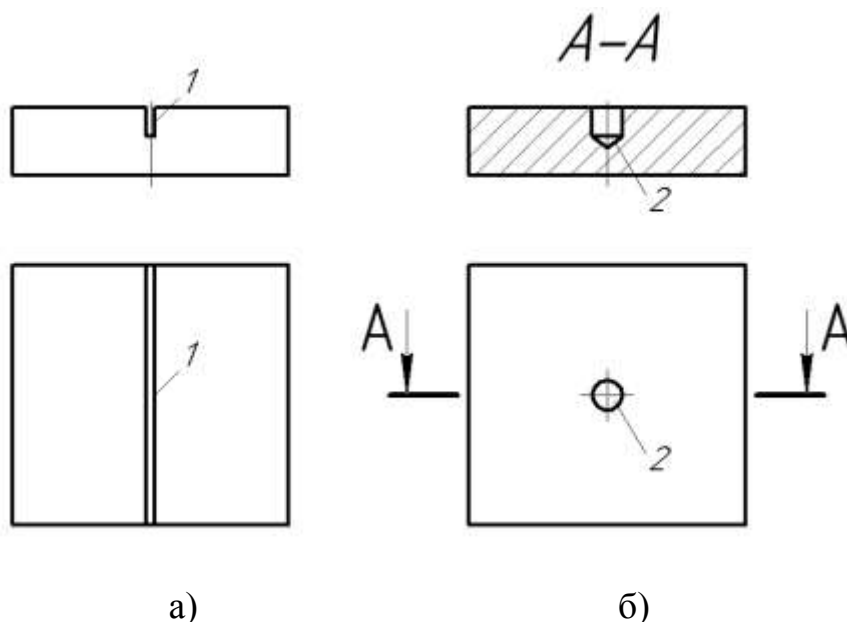


Рисунок 1 – Образцы с искусственными дефектами: поверхностным пазом – а), вертикальным сверлением – б)

Сигнал абсолютного ВТП на частоте 500 кГц, полученный на дефектоскопе Olympus Omniscan MX от поверхностного паза глубиной 1,5 мм и раскрытием 0,15 мм представлен на рисунке 2 - а), от вертикального сверления диаметром 2 мм – на рисунке 2 – б).

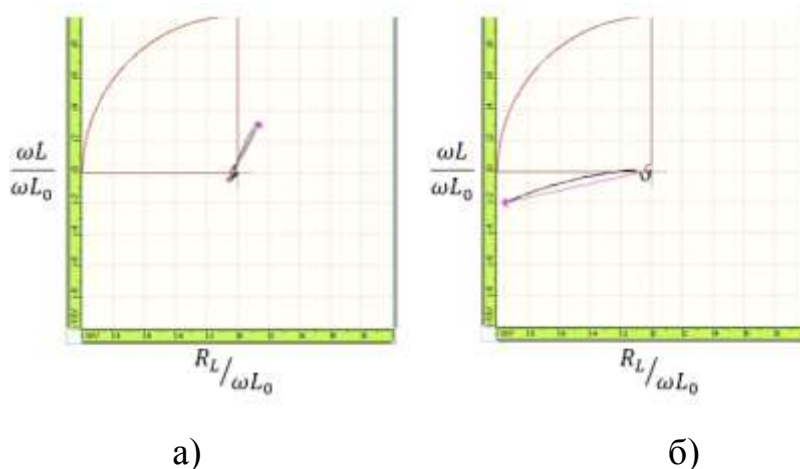


Рисунок 2 – Сигнал абсолютного ВТП от поверхностного паза глубиной 1,5 мм и раскрытием 0,15 мм – а), от вертикального сверления диаметром 2 мм - б)

Как видно из рисунка 2, фаза сигналов от паза и сверления различается на 132° , что является существенным идентификационным признаком для различия дефектов типа «трещина» и «язва». Но, как известно [10], при проведении вихретокового контроля существует множество факторов, приводящих к появлению ложных сигналов. Как правило, изменение зазора между ВТП и поверхностью объекта контроля вызывает изменение импеданса (кривая отрыва), которая по фазе близка к сигналу от вертикального сверления. Изменения относительной магнитной проницаемости, создают ложный сигнал, по фазе близкий к сигналу от паза. На рисунке 3 – а) и б) представлен сигнал того же ВТП, полученный помещением его вблизи постоянного магнита (имитация изменения относительной магнитной проницаемости), а также его кривая отрыва соответственно.

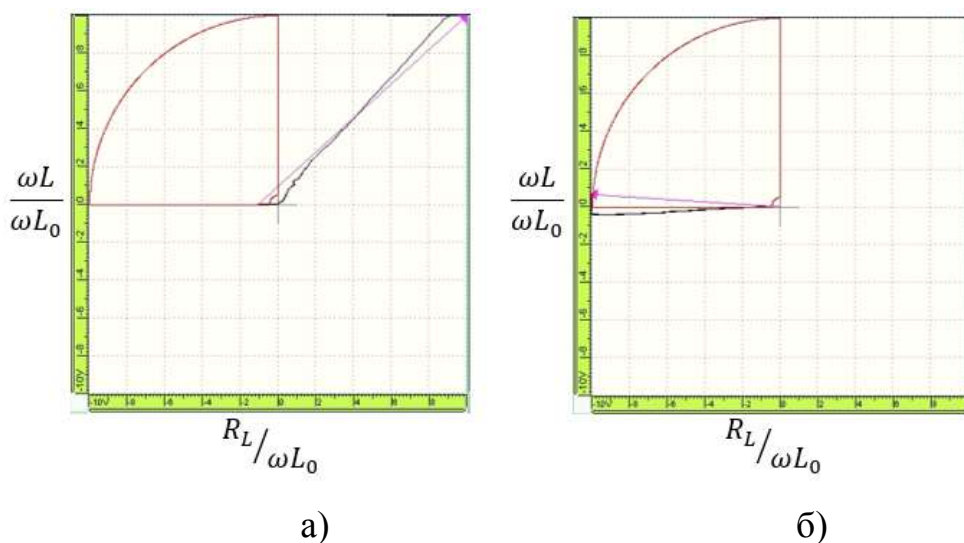


Рисунок 3 – Ложные сигналы абсолютного ВТП вблизи постоянного магнита– а), кривая отрыва - б)

Сравнивая рисунки 2 и 3 можно сказать, что фаза сигналов, вызванных поверхностным пазом и изменением относительной магнитной проницаемости отличается на 18° , а фаза сигнала от вертикального сверления и кривой отрыва – на 8° . Данное отличие существенно мало, что приводит к

неоднозначности интерпретации результатов вихретокового контроля, полученных по отдельности. На характер изменения импеданса в зависимости от внешних факторов влияет значение частоты контроля и тип ВТП. Дифференциальный ВТП менее чувствителен к изменению зазора, но его сигнал от дефектов является более сложным для интерпретации [10]. На рисунке 4 показаны сигналы от дифференциального ВТП на частоте 500 кГц от поверхностного паза глубиной 1,5 мм и раскрытием 0,15 мм и от вертикального сверления диаметром 2 мм. Различие фазы сигналов от отражателей типа «трещина» и «язва» составляет 139° , что соответствует значению, полученному абсолютным ВТП. На рисунке 5 показаны ложные сигналы от дифференциального ВТП. Сравнивая рисунки 4 и 5 можно сказать, что фаза сигналов, вызванных поверхностным пазом и изменением относительной магнитной проницаемости отличается на 44° , а фаза сигнала от вертикального сверления и кривой отрыва – на 33° . Кривая отрыва дифференциального ВТП существенно меньше сигнала от вертикального сверления, поэтому они различимы. По результатам проделанных измерений можно сказать, что применение дифференциального ВТП имеет большие преимущества по сравнению с абсолютным ВТП, но неоднозначность в выделении и классификации полезных сигналов от ложных все равно остается.

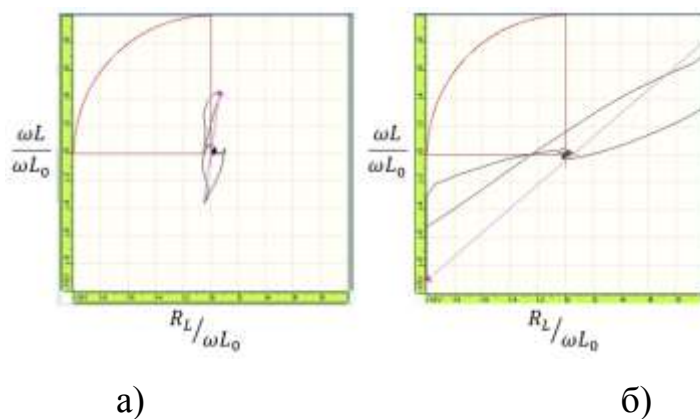


Рисунок 4 – Сигнал дифференциального ВТП от поверхностного паза глубиной 1,5 мм и раскрытием 0,15 мм – а), от вертикального сверления диаметром 2 мм - б)

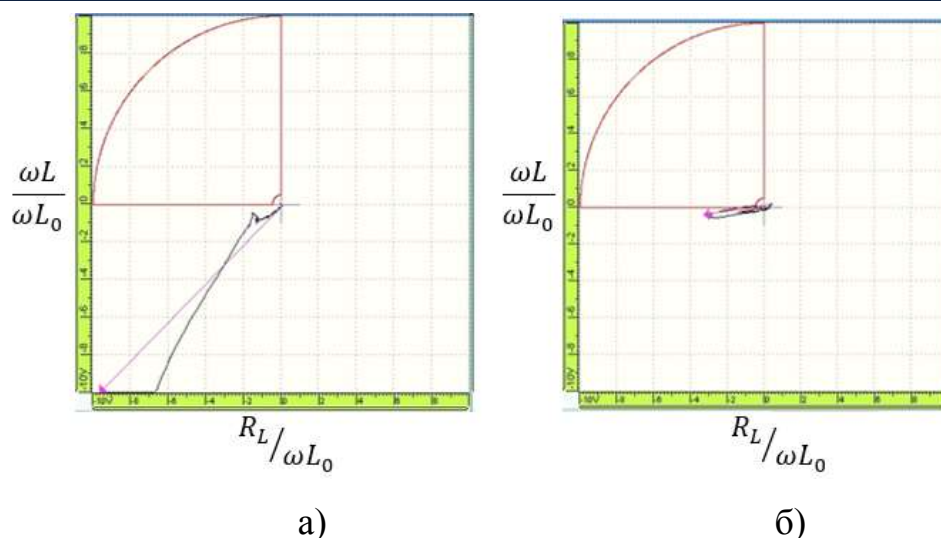


Рисунок 5 – Ложные сигналы дифференциального ВТП вблизи постоянного магнита – а), кривая отрыва - б)

В работе [11] исследовалось влияние различных несплошностей поверхности на коэффициент отражения и прохождения ультразвуковых поверхностных волн. В результате чего было выяснено, что экранирующая и отражающая способность щели (дефект типа «трещина») больше, чем выемки (дефект типа «язва»). Результаты измерений ультразвуковым эхоимпульсным методом электромагнитно-акустическим преобразователем, излучающим поверхностные волны на частоте 1 МГц на образцах, показанных на рисунке 1, показывают что разница амплитуды ультразвукового сигнала, отраженного от паза глубиной 0,15 мм (рисунок 6 - а поз.1) и вертикального сверления диаметром 2 мм (рисунок 6 -б поз.2) отличается на 7 дБ, что является дополнительным информационным признаком.

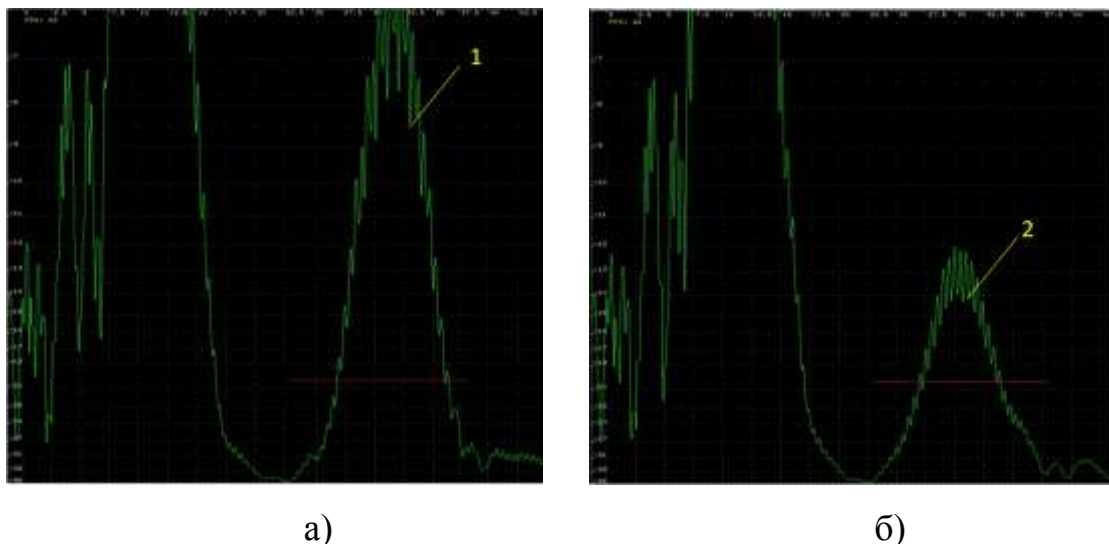


Рисунок 6 – Ультразвуковой сигнал от паза глубиной 1,5 мм – а), вертикального сверления диаметром 2 мм -б)

Визуальный (телевизионный) метод неразрушающего контроля так же несет полезную информацию о состоянии поверхности объекта контроля. С помощью технологий машинного зрения существует возможность идентифицировать различные препятствия на контролируемой поверхности, приводящие к увеличению зазора между преобразователем и поверхностью объекта контроля систем вихретокового и ультразвукового контроля. Коррозионное растрескивание под напряжением часто сопровождается наличием следов порошкообразного белого налета (сидерита железа) на поверхности [12], скопления которого так же могут быть идентифицированы визуальным (телевизионным) методом неразрушающего контроля и являться дополнительным признаком наличия коррозионных трещин.

В итоге можно сказать, что сочетание вихретокового, ультразвукового и визуального (телевизионного) методов неразрушающего контроля для выявления поверхностных дефектов поможет уменьшить неоднозначность в расшифровке данных и определении типа дефекта.

Описание разрабатываемого робота-дефектоскопа

Разрабатываемый робот-дефектоскоп предназначен для диагностики изделий цилиндрической формы (поз. 1 рисунок 7). Во время работы робот-дефектоскоп (поз. 2 рисунок 7) перемещает сканирующую головку (поз. 3 рисунок 7), оснащенную системами ультразвукового (УЗК) (на базе электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП)), вихретокового (ВТК) и визуального (телевизионного) (АВИК) методов неразрушающего контроля по спиралевидной траектории. Колеса приводятся в движение с помощью электродвигателей, которые питаются от источников питания. Система позиционирования, состоящая из датчика пути и гироскопа, отслеживает позицию сканирующей головки на поверхности цилиндрического изделия. Шаг спиралевидной траектории регулируется путем смещения центральных звеньев робота дефектоскопа на заданное расстояние. Разрабатываемый робот-дефектоскоп также может быть применен для контроля изделий другой формы в случае модернизации его составляющих частей.

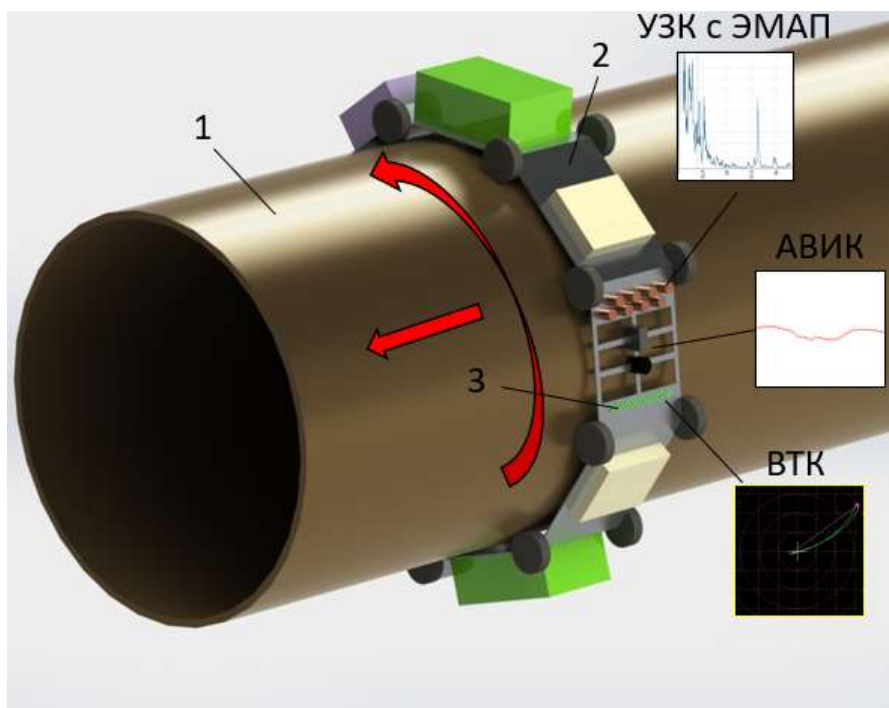


Рисунок 7 – Схема робота-дефектоскопа; 1 – цилиндрическое изделие, 2 – робот-дефектоскоп, 3 – сканирующая головка.

Данные, полученные в результате сканирования установленными на сканирующей головке системами вихретокового, ультразвукового и визуального (телевизионного) контроля поступают в устройство их обработки, где они преобразовываются в цифровые данные, после чего они поступают на вход в алгоритм сочетания данных (рисунок 8). По результатам работы алгоритма сочетания данных происходит принятие решения о годности изделия в соответствии с нормативно-технической документацией.

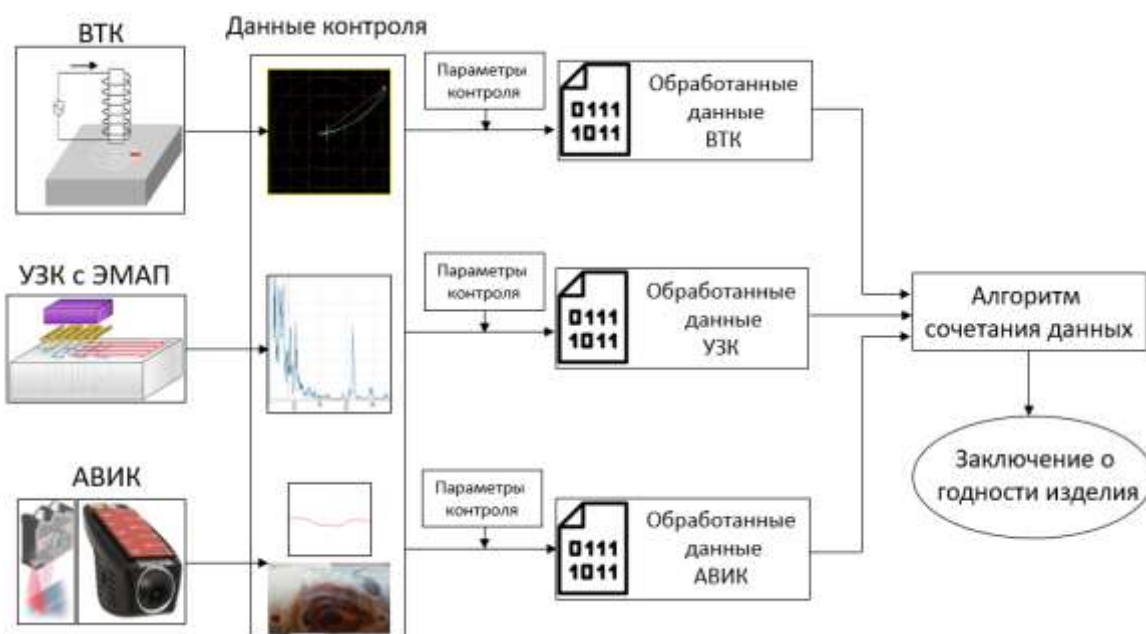


Рисунок 8 – Схема работы робота-дефектоскопа, сочетающего методы неразрушающего контроля

В качестве алгоритма сочетания данных может быть использован как детерминированный алгоритм, так и различные статистические алгоритмы и алгоритмы машинного обучения. Наиболее распространенными алгоритмами сочетания данных являются алгоритмы на основе Байесовского вывода или теории Демпстера — Шафера.

Принцип использования Байесовского вывода для сочетания данных от нескольких систем неразрушающего контроля основан на том факте, что Байесовский вывод позволяет объединять априорную и выборочную информации. Классифицируемые типы дефектов представляются как пространство гипотез $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, которые должны быть

взаимоисключающими и исчерпывающими. Здесь C_i является заранее определенным типом дефекта, который должен удовлетворять условию $\sum_i P(C_i) = 1$ [13], и

$$P(C_j | S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_n) = \frac{P(C_j)[P(S_1|C_j)P(S_2|C_j)\dots P(S_n|C_j)]}{\sum_i P(C_i)[P(S_1|C_i)P(S_2|C_i)\dots P(S_n|C_i)]} \quad (1),$$

где $P(C_i)$ - априорная вероятность того, что тип дефекта определен правильно, а $P(S \vee C_i)$ - вероятность наличия сигнала S , если известно, что в данной области находится дефект, относящийся к типу C_i .

В Байесовском выводе все вероятности должны быть взаимоисключающими и исчерпывающими. Теория Демпстера — Шафера вместо вероятностей использует функции масс, которые позволяют присвоить значение любому подмножеству [13]. Механизм для обновления значения массы представлен в (2):

$$m_{12}(A_k) = \frac{\sum_{A_i \cap A_j = A_k} m_1(A_i)m_2(A_j)}{1 - \sum_{A_i \cap A_j = 0} m_1(A_i)m_2(A_j)} \quad (2)$$

где $m_1(A_i)$ и $m_2(A_j)$ - функции массы по результатам измерений двух систем неразрушающего контроля, соответственно. Выходное значение $m_{12}(A_k)$ содержит информацию о том, насколько значения параметров сигнала соответствуют распределению определенных типов данных.

Заключение

В работе представлены результаты исследований по неоднозначности классификации поверхностных дефектов по отдельности и определено преимущество сочетания результатов вихретокового, ультразвукового и визуального (телевизионного) методов неразрушающего контроля.

Представлен разрабатываемый робот-дефектоскоп, сочетающий такие методы неразрушающего контроля, как вихретоковый, ультразвуковой, визуальный (телевизионный), показана схема его устройства и работы.

Список литературы

1. Hobbs C, Temple A. The inspection of aerospace structures using transient thermography, April 1993, The British Journal of Non Destructive Testing, 35(4).
2. Wassel AB. Safety and reliability in the air, June 1993, The British Journal of Non Destructive Testing, 35(6), 315-18.
3. McNab A, Dunlop I. Advanced visualisation and interpretation techniques for the evaluation of ultrasonic data: the NDT workbench, May 1993, The British Journal of Non Destructive Testing, 35(5), 233-40.
4. Smith RA. Evaluation and accuracy assessment of Andscan - a portable non- destructive scanner - Part 1: Andscan hardware and software, April 1995, Insight, 37(4), 284-9.
5. Haghighat M., Abdel-Mottaleb M., Alhalabi W. Discriminant Correlation Analysis: Real-Time Feature Level Fusion for Multimodal Biometric Recognition // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. — 2016. — Т. 11, issue. 9.
6. Edwards I, Gros XE, Lowden DW, Strachan P. Fusion of NDT data, Dec. 1993, British Journal of Non Destructive Testing, 35(12), 710-13.
7. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебно- методическое пособие / Н.П. Калиниченко, М.А. Васильева. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. - С. 55.
8. ГОСТ 2601-84 Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - С. 57.
9. ГОСТ 5272-68* Коррозия металлов. Термины. - М.: Изд-во стандартов, 1968.-С. 15.
10. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля: монография. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 288 с.

11. И. А. Викторов. О влиянии несовершенств поверхности на распространение рэлеевских волн, Докл. АН СССР, 1958, том 119, номер 3, 463–465.

12. Бутусов Д. С., Егоров С. И., Завьялов А. П., Ляпичев Д. М. Коррозионное растрескивание под напряжением газопроводов: Учебное пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2015. – 80 с.

13. Challa, S., and D. Koks. 2004. Bayesian and Dempster–Shafer fusion. *Sadhana* 29(2):145–76.

УДК 620.179.16

Опыт автоматизированного ультразвукового контроля монолитных и сотовых конструкций из ПКМ

Диков И.А.; Бойчук А.С., к.т.н.; Чертищев В.Ю.; Далин М.А.;
Генералов А.С., к.т.н.

dikov.viam@mail.ru

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

Освещены основные направления деятельности ФГУП «ВИАМ» в части автоматизированного ультразвукового контроля монолитных и сотовых конструкций из ПКМ. Разработаны технологии автоматизированного ультразвукового контроля плоских монолитных образцов из ПКМ перед проведением механических испытаний, автоматизированного ультразвукового контроля сотовых образцов из ПКМ, технологии повышения производительности и создания сухого акустического контакта для контроля монолитных конструкций. Приведены результаты проведенных исследований по выбору параметров ультразвукового контроля углепластиковых и стеклопластиковых монолитных и сотовых образцов. Представлены достигнутые результаты в части разработки и изготовлении средств для автоматизации процессов неразрушающего контроля.

Ключевые слова:

углепластик, полимерный композиционный материал, ПКМ, неразрушающий контроль, автоматизированный ультразвуковой контроль, теневой контроль, эхо-импульсный контроль

Введение

Ни для кого не секрет, что с каждым годом в авиационной и других областях промышленности растет объем применения современных полимерных композиционных материалов (ПКМ). Ряд отечественных предприятий существенно дооснастили и расширили производство изделий из композиционных материалов: на АО «Аэрокомпозит» выпускаются детали и конструкции для самолета МС-21, на АО «ПЗ «Машиностроитель» изготавливают детали мотогондолы для ПД-14, новые композитные детали выпускаются для современных изделий на АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина», ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева», филиале ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина», ПАО «ВАСО», ПАО «Роствертол», ПАО «ААК «Прогресс», ПАО «КВЗ», АО «КумАПП» и др. Объем использования ПКМ в конструкции планера самолетов достигает 50% по весу (рисунок 1). Такое широкое освоение композитов связано в первую очередь с высокими прочностными характеристиками одновременно с малым удельным весом готовых деталей из ПКМ, а также возможностью задания их свойств.

Однако, для реализации всех преимуществ композиционных материалов необходимо, чтобы детали и изделия из них удовлетворяли требованиям качества и не содержали дефектов. В российской авиационной отрасли основной объем выпускаемой продукции из ПКМ контролируется вручную. Ручной контроль характеризуется крайне высокой трудоёмкостью, малой достоверностью и надежностью результатов из-за влияния человеческого фактора. За рубежом на авиационных предприятиях уже достаточно давно применяют автоматизированный контроль деталей и полуфабрикатов из металлов и композитов.

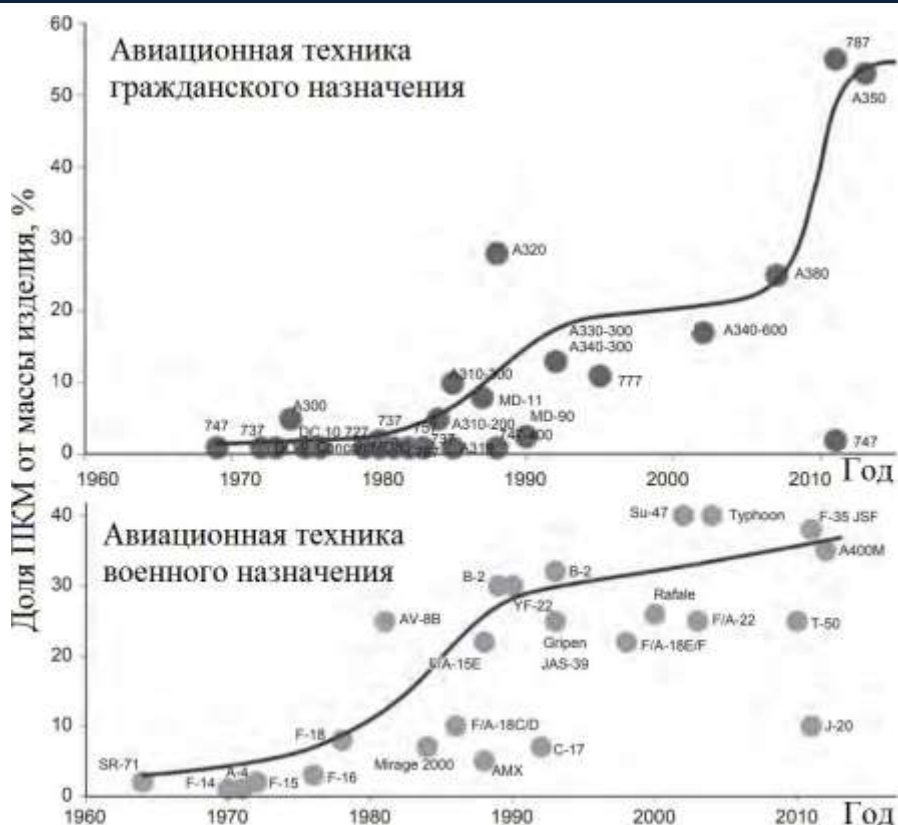


Рисунок 1 – Рост доли ПКМ от общей массы изделий авиационной техники для самолетов гражданского и военного назначения [1]

Во ФГУП «ВИАМ» активно развиваются автоматизированные методы неразрушающего контроля. Характерными производственными и эксплуатационными дефектами ПКМ в монолитных деталях являются расслоения, трещины, включения технологических пленок, зоны непропитки, а в многослойных сотовых конструкциях – непрочлеи между сотоблоком и обшивкой или склеиваемыми обшивками, расслоения в обшивках, включения, подмятия сотового заполнителя, ударные повреждения и пр. Большинство указанных дефектов в связи со слоистой структурой ПКМ располагаются параллельно поверхности изделия, поэтому для контроля большинства деталей и конструкций из ПКМ применяют акустические методы контроля, которые наилучшим образом справляются с задачей выявления таких дефектов. Поэтому особую роль в контроле деталей и

конструкций из ПКМ занимает развитие автоматизированных методов ультразвукового контроля.

Развитие методов автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля

В последнее десятилетие большинство предприятий авиационной отрасли дооснастило участки ультразвукового контроля серийными установками автоматизированного иммерсионного контроля и ввело новые технологии и методики контроля выпускаемой металлической продукции. Во ФГУП «ВИАМ» разработана новая нормативная документация на контроль основных деталей газотурбинных двигателей, которая активно внедряется на многих предприятиях отрасли. Это позволило заменить трудоемкий ручной контроль продукции высокопроизводительным, достоверным автоматизированным контролем. На территории ФГУП «ВИАМ» функционируют и применяются для серийного контроля две автоматизированные иммерсионные установки ScanMaster LS-500.

Однако решить задачу автоматизированного контроля деталей и конструкций из ПКМ имеющимися на рынке средствами не представляется возможным, вследствие специфических требований к системам контроля и оснастке для проведения исследований композитов, и, поэтому, необходимостью глубокой модернизации существующих серийных решений. Также весомым недостатком является высокая стоимость существующих предложение на рынке автоматизированных систем контроля ПКМ. К примеру, установка подобного класса фирмы Tecnatom стоит около 2 млн. долларов.

По этой причине ФГУП «ВИАМ» пошло несколькими путями решения данной проблемы:

1. Для проведения ультразвукового контроля плоских монолитных образцов из ПКМ с повышенным разрешением перед проведением механических испытаний была разработана технология контроля с помощью

автоматизированной иммерсионной установки ScanMaster LS-500, которая была дооснащена специализированным фокусированным преобразователем для эхо-импульсного контроля.

2. Для проведения автоматизированного ультразвукового контроля сотовых образцов из ПКМ была разработана специализированная оправка для проведения теневого контроля со струйным контактом с быстросъемным креплением на иммерсионную установку ScanMaster LS-500, а также была разработана технология контроля таких образцов.

3. Совместно с ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» был разработан и изготовлен полномасштабный макет автоматизированного комплекса для ультразвукового неразрушающего контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ со встроенным программным обеспечением (рисунок 2).



Рисунок 2 – Макет автоматизированного комплекса для ультразвукового неразрушающего контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ

Автоматизированный ультразвуковой контроль плоских монолитных образцов из ПКМ для проведения паспортизации и спецквалификации материала [2]

Для паспортизации, а также для проведения спецквалификации нового полимерного композиционного материала, необходимо провести большое количество механических испытаний для определения предела прочности и модуля упругости при растяжении, сдвиге, изгибе и сжатии. Полученные значения указанных характеристик зависят от многих факторов, одним из которых является наличие внутренних дефектов в испытываемых образцах, которые не могут быть выявлены при визуальном осмотре. При традиционном подходе ультразвуковой неразрушающий контроль таких образцов проводят на чувствительности эквивалентной выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 или 10 мм. При таком контроле могут быть выявлены только крупные дефекты типа расслоений или включений технологических пленок. Однако при проведении механических испытаний на результаты влияют дефекты и более мелкого размера, поэтому во ФГУП «ВИАМ» была разработана технология автоматизированного ультразвукового контроля монолитных образцов из ПКМ с повышенным разрешением.

Для исследований была изготовлена партия образцов из углепластика и стеклопластика, с различными толщинами и набором искусственных отражателей. Толщины образцов составили 1, 4,5 и 11,5 мм. В каждом образце были изготовлены плоскодонные отражатели диаметрами 1, 2, 3, 4 и 5 мм (Рисунок 3). Плоскодонные отражатели изготавливались в образцах на сверлильном станке Proxxon TBM 220 с использованием специальных твердосплавных сверл на основе карбида вольфрама. Также для станка был изготовлен глубиномер для контроля показаний глубины засверловки в процессе сверления. При этом скорость вращения сверла при обработке была установлена на максимальное количество оборотов (8500 об/мин).



Рисунок 3 – Схема расположения плоскодонных отражателей в исследуемых образцах для образцов толщинами 4,5 и 11,5 мм

На изготовленных образцах была выбрана оптимальная частота преобразователя, был опробован различный шаг сканирования, были определены разрешающая способность и чувствительность контроля.

Для определения разрешающей способности контроля в образцах использованы парные плоскодонные отражатели диаметром от 1 до 5 мм расположенные в середине толщины образца и расположенные друг относительно друга на расстоянии 1, 2, 3, 4 и 5 мм (Рисунок 3).

Для определения чувствительности контроля на образцах были использованы плоскодонные отражатели диаметром 1, 2, 3, 4 и 5 мм, расположенных на глубинах 0,5 мм, $H/2$ мм и $H-0,5$ мм от поверхности ввода ультразвуковых колебаний в образец, где H – толщина исследуемого образца.

Исследования проводились на автоматизированной иммерсионной установке ScanMaster LS-500, с применением фокусированных преобразователей Olympus Panametrics NDT V309-SU с центральной частотой 5 МГц и фокусным расстоянием 1,5 дюйма по воде и Olympus Panametrics NDT V327-SU с центральной частотой 10 МГц и фокусным расстоянием 1,5 дюйма по воде. При проведении ультразвуковых

исследований глубина фокусировки устанавливалась таким образом, чтобы фокус ультразвукового пучка приходился в середину исследуемого образца. Исследования проводились с различным шагом сканирования: 0,5 и 1,0 мм. В ходе исследований были определены оптимальная частота преобразователя и шаг сканирования.

На тонких образцах (1 мм) были опробованы преобразователи с частотами 5 и 10 МГц. На больших толщинах применение 10 МГц оказалось нецелесообразным из-за высокого затухания ультразвуковых колебаний на такой толщине. На рисунке 4 представлены результаты исследования на образце толщиной 1 мм с плоскодонными отражателями диаметром 1, 2, 3, 4 и 5 мм с шагом сканирования 0,5 мм.

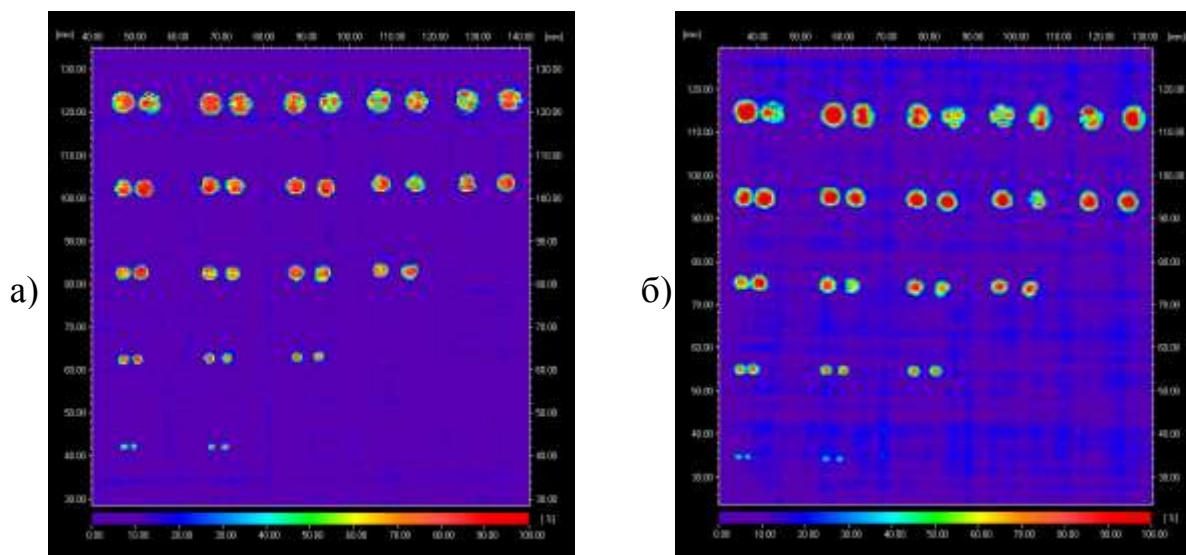


Рисунок 4 – Результаты сканирования образца из углепластика толщиной 1 мм с шагом 0,5 мм на частоте: а) 5 МГц; б) 10 МГц

На обеих частотах в образце толщиной 1 мм отражатели диаметрами 1, 2, 3, 4 и 5 мм выявляются с соотношением сигнал/шум более 8 дБ, что позволяет однозначно проводить идентификацию дефектов. Тем не менее, на больших толщинах применение частоты 10 МГц оказалось неэффективным, по этой причине для последующих исследований оптимальным преобразователем был выбран V309-SU с центральной частотой 5 МГц.

На углепластиковых и стеклопластиковых образцах толщинами 4,5 и 11,5 мм были опробованы разные величины шага сканирования: 0,5 и 1,0 мм. На рисунках 5 и 6 представлены результаты исследования на образцах из углепластика и стеклопластика соответственно толщинами 5 с плоскодонными отражателями диаметром 1, 2, 3, 4 и 5 мм с шагом сканирования 0,5 и 1,0 мм.

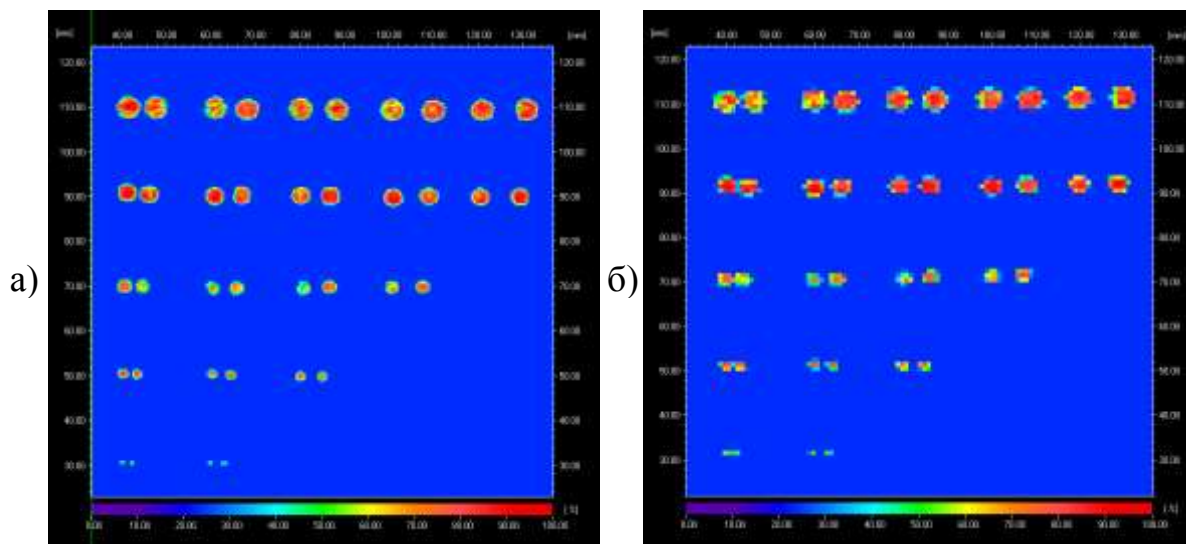


Рисунок 5 – Результаты сканирования образца из углепластика толщиной 4,5 мм на частоте 5 МГц с шагом: а) 0,5 мм; б) 1,0 мм

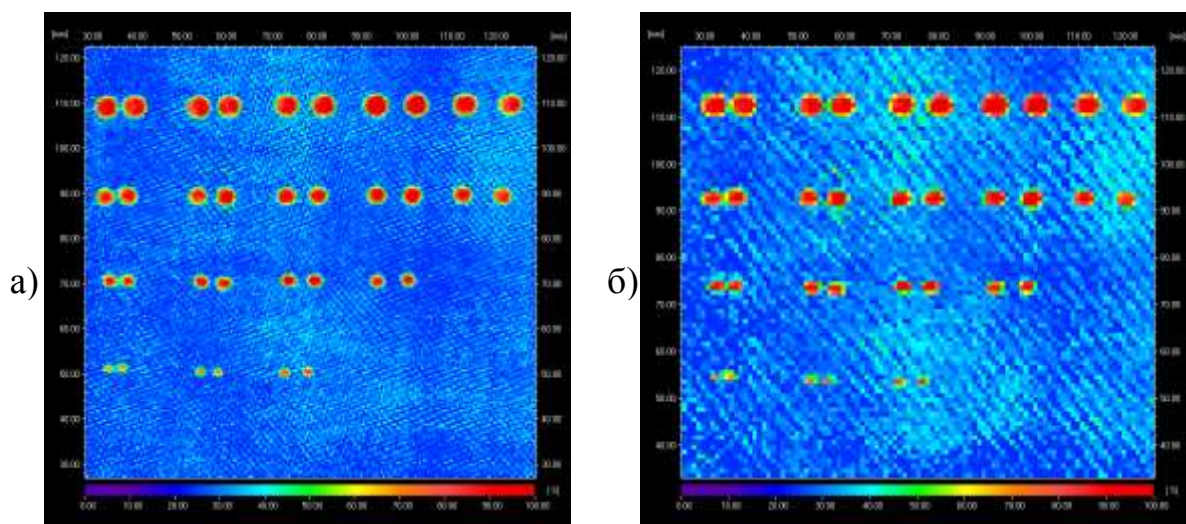


Рисунок 6 – Результаты сканирования образца из стеклопластика толщиной 4,5 мм на частоте 5 МГц с шагом: а) 0,5 мм; б) 1,0 мм

На рисунках 7 и 8 представлены результаты исследования разрешающей способности контроля на образцах из углепластика и стеклопластика соответственно толщинами 11,5 с плоскодонными отражателями диаметром 1, 2, 3, 4 и 5 мм с шагом сканирования 0,5 и 1,0 мм.

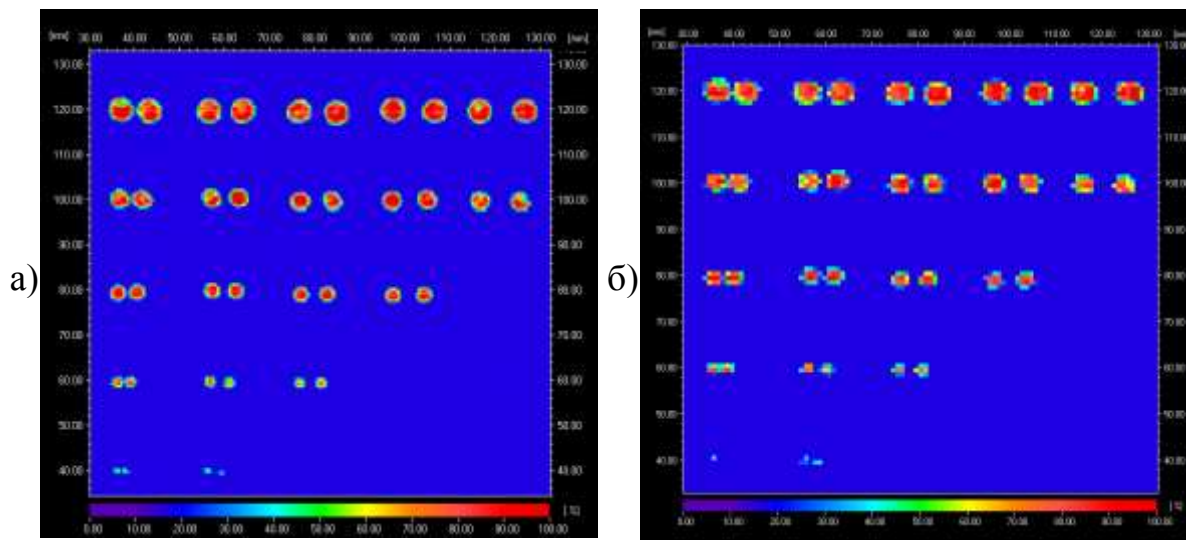


Рисунок 7 – Результаты сканирования образца из углепластика толщиной 11,5 мм на частоте 5 МГц с шагом: а) 0,5 мм; б) 1,0 мм

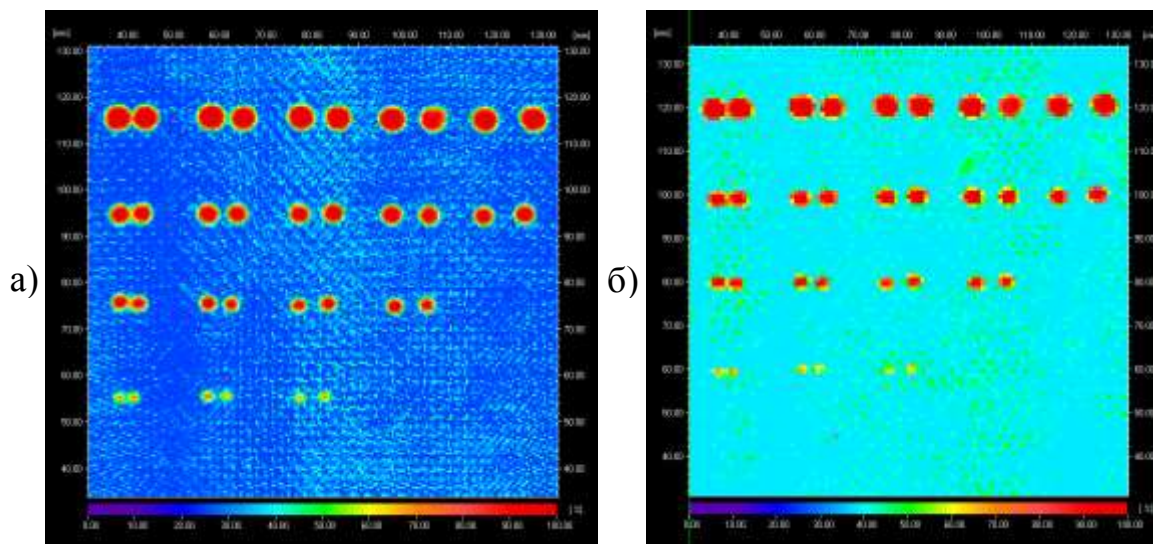


Рисунок 8 – Результаты сканирования образца из стеклопластика толщиной 11,5 мм на частоте 5 МГц с шагом: а) 0,5 мм; б) 1,0 мм

При анализе рисунков 5 и 7 видно, что на углепластиковых образцах падение амплитуды эхо-сигнала между парными плоскодонными

отражателями, находящимися на расстоянии до 1 мм друг от друга, при шаге сканирования 0,5 мм составляет более чем 6 дБ, для шага сканирования 1,0 мм падение более чем 6 дБ достигается при расстоянии между отражателями 2 мм. На стеклопластиковых образцах падение амплитуды эхо-сигнала между парными плоскодонными отражателями более чем 6 дБ достигается при расстоянии между отражателями 2 мм для обоих шагов сканирования. Таким образом, разрешающая способность для углепластиковых образцов при шаге сканирования 0,5 мм составляет 1 мм, при шаге сканирования 1,0 мм составляет – 2 мм. Для стеклопластиковых образцов для шагов сканирования 0,5 и 1,0 мм разрешающая способность составляет 2 мм. В дальнейшем для увеличения производительности контроля за счет снижения разрешающей способности шаг сканирования был выбран равным 1 мм.

Для определения чувствительности контроля участки образцов с отражателями диаметром 1, 2, 3, 4 и 5 мм, расположенных на глубинах 0,5 мм, Н/2 мм и Н-0,5 мм от поверхности ввода ультразвуковых колебаний в образец были просканированы преобразователем V309-SU с центральной частотой 5 МГц с шагом сканирования 1,0 мм. Результаты исследований углепластикового и стеклопластикового образцов толщинами 11,5 мм представлены на рисунке 9.

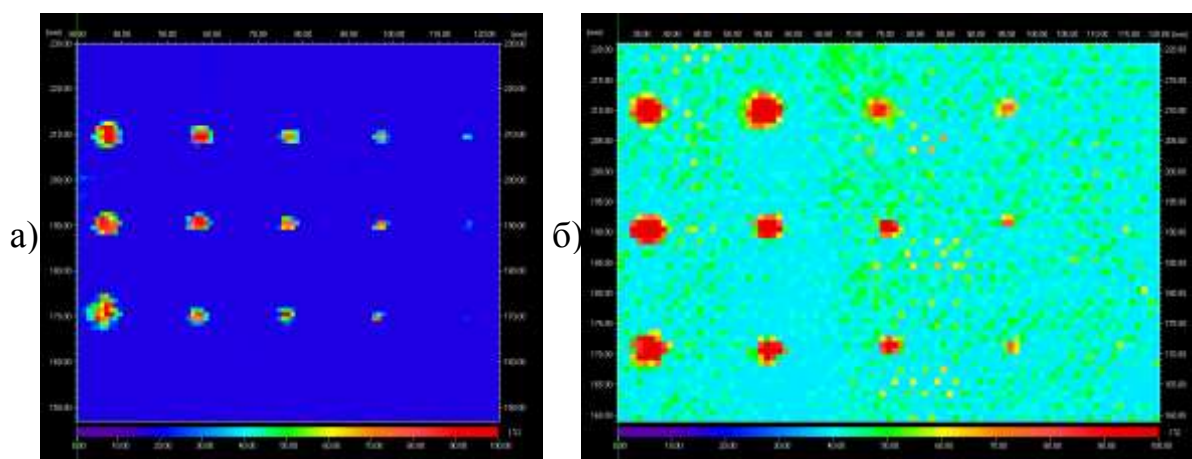


Рисунок 9 – Результаты сканирования образцов толщинами 11,5 мм на частоте 5 МГц с шагом 1,0 мм: а) из углепластика; б) из стеклопластика

Анализируя данные исследований представленных на рисунке 9, установлено, что чувствительность контроля углепластиковых образцов эквивалентна выявлению плоскодонного отражателя диаметром 2 мм и более, для стеклопластиковых образцов чувствительность составила от 3 мм и более.

В результате исследований для проведения ультразвукового контроля с повышенным разрешением плоских монолитных образцов из ПКМ перед проведением механических испытаний был разработан стандарт организации, в соответствии с которым возможно проводить контроль образцов из угле- и стеклопластика. Чувствительность контроля при этом эквивалентна выявлению плоскодонного отражателя диаметром 2 мм и более.

Автоматизированный ультразвуковой контроль сотовых образцов из ПКМ теньвым методом [3]

Аналогично контролю монолитных полимерных композиционных материалов перед проведением механических испытаний должны подвергаться неразрушающему контролю и трехслойные сотовые образцы. Для решения такой задачи во ФГУП «ВИАМ» была разработана технология теневого контроля со струйным контактом с помощью иммерсионной установки ScanMaster LS-500. В штатной поставке установка ScanMaster LS-500 не имеет оправки для проведения теневого контроля, поэтому для его реализации была разработана и изготовлена специализированная оправка со струйным контактом с быстросъемным креплением (рисунок 10).



Рисунок 10 – Специализированная оправка для проведения теневого контроля со струйным контактом с быстросъемным креплением

Для исследований использовались трехслойные сотовые образцы с обшивками из углепластика и сотовым наполнителем из полимерсотопласта (ПСП) высотой 15 мм и алюминиевой фольги высотой 16 мм. Образцы с сотовым наполнителем из ПСП имели размеры сторон ячеек сот 2,0 мм и 3,5 мм, образцы с наполнителем из алюминиевой фольги – 1,6 мм и 3,175 мм. В образцах двумя способами заложены искусственные дефекты диаметрами 6 мм, 8 мм и 10 мм:

1) дефекты имитирующие посторонние включения выполнены путем закладывания между слоями обшивки (поз. 1-3 на Рисунке 11) и между обшивкой и сотовым наполнителем (поз. 4-9 на Рисунке 11) фрагментов фторопластовой пленки;

2) дефекты имитирующие непроклеи выполнены путем подфрезеровки сотового наполнителя (поз. 10-15 на Рисунке 10).

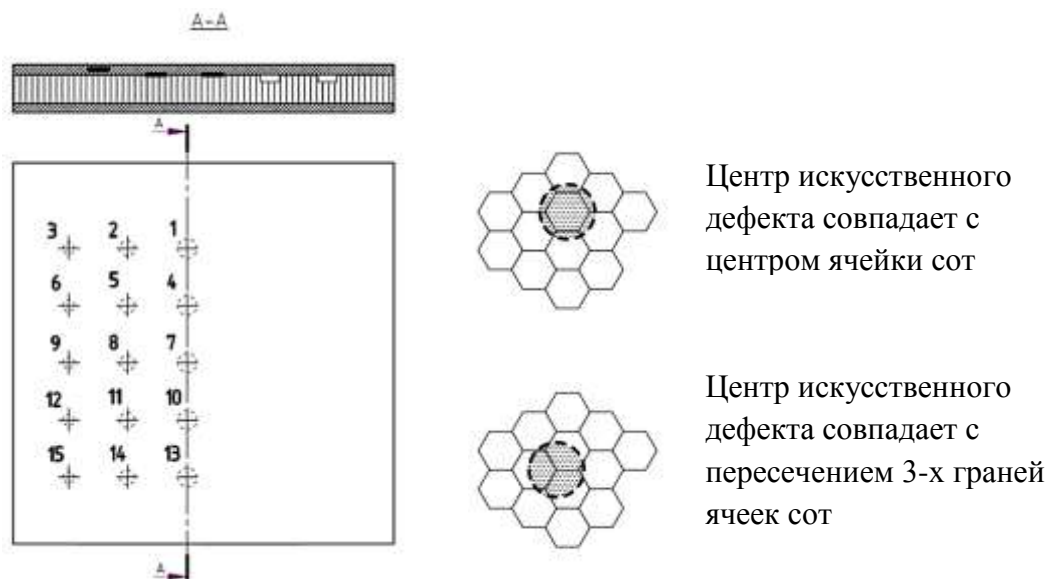


Рисунок 11 – Эскиз образца трехслойной сотовой конструкции из ПКМ с искусственными дефектами

Исследования проводились на установке ScanMaster LS-500, с применением двух пар слабодемпфированных преобразователей: фокусированных преобразователей с центральной частотой 2,25 МГц и фокусным расстоянием 1,5 дюйма по воде и нефокусированных преобразователей с центральной частотой 2,25 МГц. Исследования проводились с применением струйного контакта, диаметр отверстия в баблере составил 4,7 мм.

Настройка осуществлялась следующим образом: максимальная амплитуда прошедшего сигнала через образец устанавливалась на уровне 80 % высоты. На такой чувствительности проводилось исследование всей площади образца с сохранением результатов в виде А- и С-сканов. Анализ полученных данных проводился в программе ScanMaster CSI. В процессе анализа подбирался пороговый уровень для идентификации заложенных искусственных дефектов. Если амплитуда прошедшего сигнала через образец в области расположения искусственного дефекта была меньше порогового уровня, а площадь зоны, где выполнялось это условие, была не менее

площади описанной вокруг ячейки сот окружности, то дефект считался выявленным.

В процессе исследований при опробовании различных шагов сканирования на результирующих С-сканах проявился муаровый узор. Это происходит при близких значениях шага сканирования и размеров ячеек сот при условии соразмерности диаметра струи и размера ячейки. В зависимости от шага сканирования и размера ячейки, стенка сот то совпадает ровно с центром струи, то с некоторым смещением и на результирующем изображении появляется муар (рисунок 12). С учетом используемых размеров ячеек сот и проведенных экспериментов для исключения муарового узора шаг сканирования был выбран равный 1 мм.

Также были опробованы два различных расстояния между преобразователями и исследуемым образцом. Образцы устанавливались таким образом, чтобы расстояние от края каждого из преобразователей до поверхности образца составило 50 мм и 60 мм. Результаты исследования различных расстояний между преобразователями и исследуемым образцом в виде С-сканов представлены на Рисунке 13.

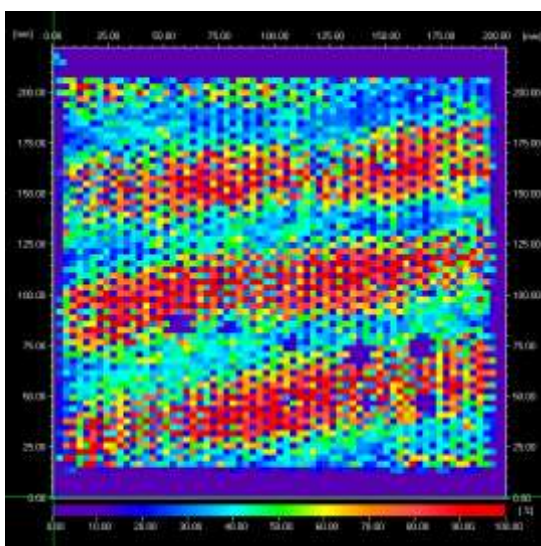


Рисунок 12 – Муаровый узор на С-скане образца при близком значении шага сканирования с размером ячейки

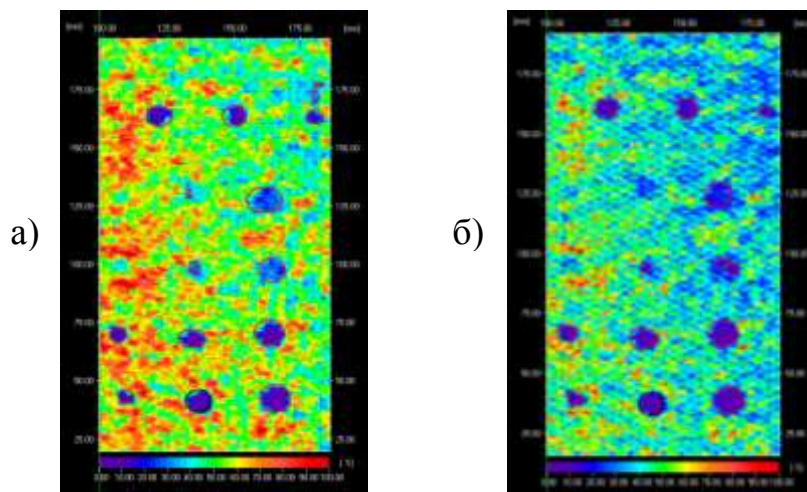


Рисунок 13 – С-сканы исследования образца с алюминиевым сотовым наполнителем с размером стороны ячейки 1,6 мм и расстоянием от края каждого из преобразователей до поверхности образца: а) 50 мм; б) 60 мм

Красным цветом обведены те дефекты, которые считаются выявленными. Таким образом, с учетом приведенных С-сканов можно сделать вывод, что увеличение расстояния между преобразователями и исследуемым образцом на 10 мм не приводит к существенным изменениям в части выявляемости заложенных дефектов.

При автоматизированном исследовании образцов трехслойных конструкций с обшивками из углепластика и сотовым наполнителем из ПСП и алюминиевой фольги было установлено следующее: использование фокусированных и нефокусированных преобразователей дает похожие результаты, с разницей в падении амплитуды прошедшего сигнала на дефектах на 2-3 дБ больше при использовании фокусированных преобразователей. Это связано с использованием малого диаметра струи воды (4,7 мм), что приводит к физической фокусировке ультразвукового пучка в пределах струи как при использовании фокусированного, так и нефокусированного преобразователей.

В результате исследований в образцах с размером сторон ячеек сот 1,6 мм и 2 мм были выявлены практически все заложенные искусственные дефекты (рисунок 14), т.к. размеры дефектов больше диаметров описанных

вокруг ячеек сот окружностей. В образцах с алюминиевыми сотами размером 3,175 мм при использовании фокусированных преобразователей выявляется и подфрезеровка, диаметром 6 мм (рисунок 15), которая практически соизмерима с диаметром описанной вокруг ячейки сот окружности. В образцах с размером ячейки сот 3,5 мм с наполнителем из ПСП, искусственные дефекты размером 6 мм не выявляются (рисунок 15), за исключением подфрезеровки, центр которой совпадал с местом пересечения 3-х граней, это связано с тем, что размеры дефектов меньше диаметров описанных вокруг ячеек сот окружностей. Также в процессе исследований установлено, что дефекты из фрагментов фторопластовой пленки заложенные между обшивкой и сотовым наполнителем выявляются неудовлетворительно. Поэтому при дальнейших экспериментах использование таких искусственных дефектов не целесообразно.

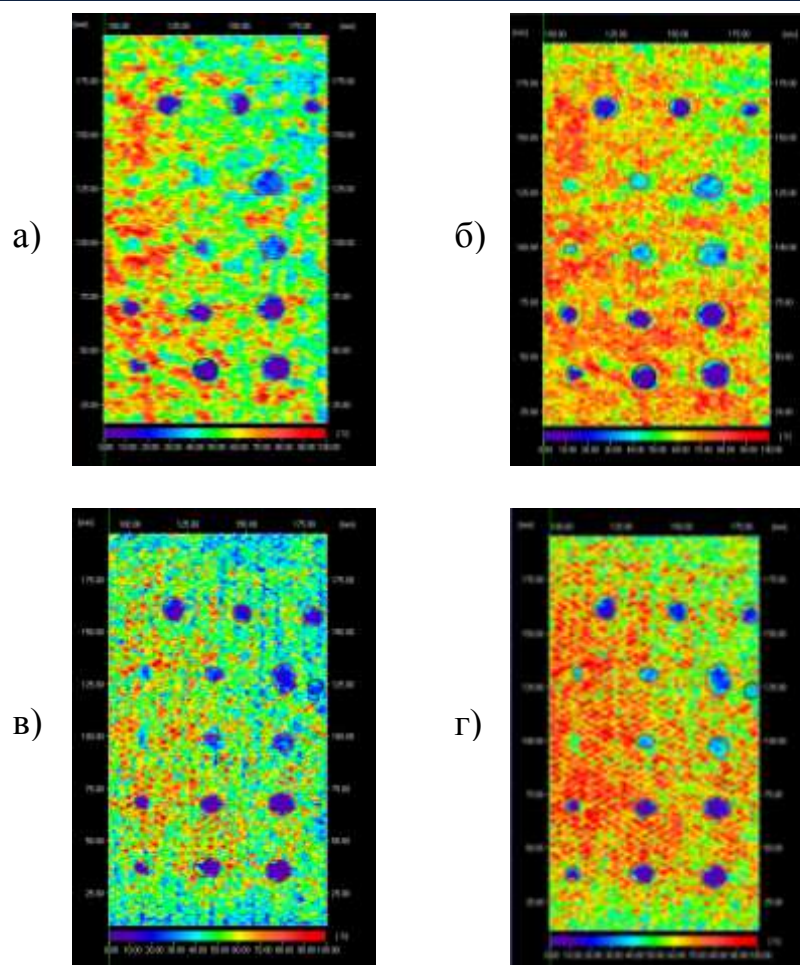


Рисунок 14 – С-сканы исследования образцов:

- а) алюминиевые соты со стороной 1,6 мм (фокусированные ПЭП);
- б) алюминиевые соты со стороной 1,6 мм (нефокусированные ПЭП);
- в) ПСП соты со стороной 2,0 мм (фокусированные ПЭП);
- г) ПСП соты со стороной 2,0 мм (нефокусированные ПЭП);

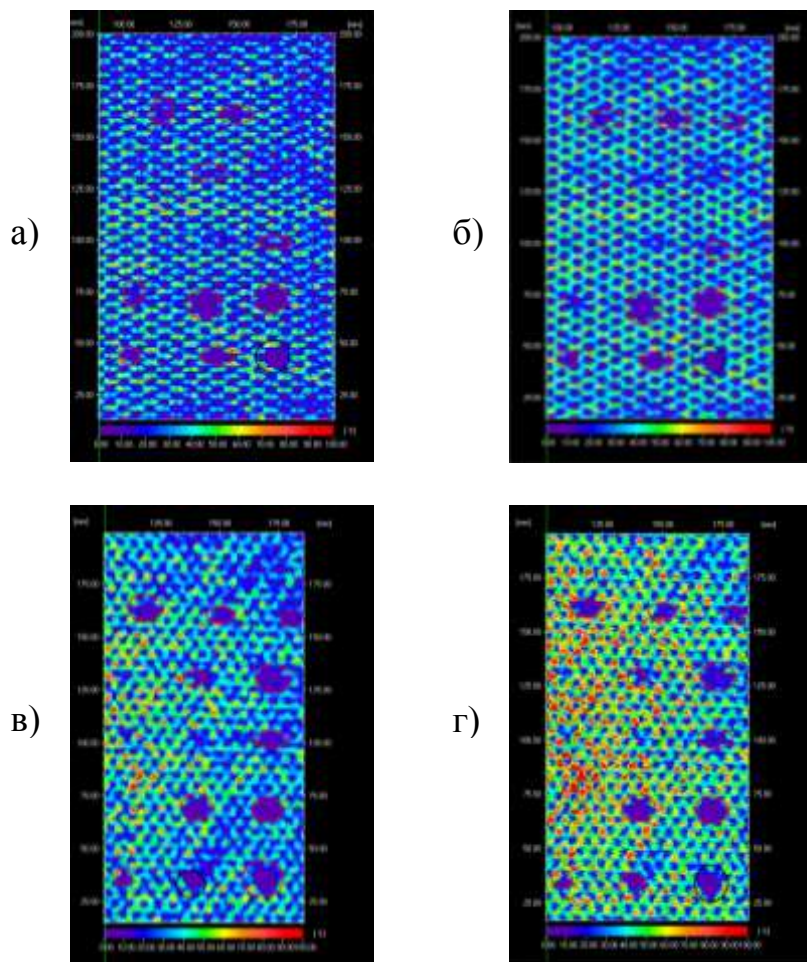


Рисунок 15 – С-сканы исследования образцов:

- а) алюминиевые соты со стороной 3,175 мм (фокусированные ПЭП);
- б) алюминиевые соты со стороной 3,175 мм (нефокусированные ПЭП);
- в) ПСП соты со стороной 3,5 мм (фокусированные ПЭП);
- г) ПСП соты со стороной 3,5 мм (нефокусированные ПЭП);

В результате проведенных работ изготовлена специальная оправка со струйным контактом с быстросъемным креплением для расширения возможностей иммерсионной установки ScanMaster LS-500. А также разработан стандарт организации, в соответствии с которым возможно проводить контроль сотовых образцов из ПКМ теньвым методом с обшивками из угле- и стеклопластика. Чувствительность контроля, в соответствии с проведенными исследованиями напрямую зависит от размера стороны ячейки сотового заполнителя и эквивалентна выявлению круга диаметром от 6 мм.

Макет автоматизированного комплекса для ультразвукового неразрушающего контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ [4]

Характеристики разработанного комплекса:

- позволяет проводить эхо-импульсный и теневой (с сухим контактом и со струйным контактом) ультразвуковой контроль деталей и конструкций из ПКМ;
- толщина контролируемых деталей:
 - до 24 мм для монолитных панелей из углепластика;
 - до 80 мм для сотовых панелей с обшивками из углепластика и стеклопластика;
- габаритные размеры контролируемых деталей: до 2,0×0,5×1,5 м;
- скорость сканирование с обеспечением стабильного акустического контакта между преобразователем и объектом контроля до 250 мм/с.
- представление результатов контроля в виде А, В и С – сканов. Разрешение С-скана не хуже 1х1 мм;
- задание программы сканирования деталей сложной формы двумя способами:
 - «обучением» по точкам на реальной детали;
 - импорт 3D-модели поверхности детали из САD-программ.

Несомненным преимуществом разработанного комплекса является возможность проводить теневой контроль с помощью роликовых катящихся преобразователей (рисунок 16). Такой тип преобразователей позволяет проводить контроль без использования контактной жидкости (сухой точечный контакт), что позволяет проводить исследование многослойных и монолитных деталей и конструкций из ПКМ, для которых недопустим контакт с контактной жидкостью (например, детали мотогондолы двигателя ПД-14).



Рисунок 16 – Теневой контроль монолитной плиты с помощью роликовых катящихся преобразователей

Для проведения автоматизированного контроля с помощью комплекса были разработаны три технологических рекомендации по неразрушающему контролю деталей и агрегатов из ПКМ (ТР 1.001-2015, ТР 1.002-2015 и ТР 1.003-2015). По ТР 1.001-2015 и ТР 1.002-2015 реализованы эхо-импульсный и теневой методы контроля монолитных деталей и многослойных конструкций с сотовым наполнителем соответственно. По ТР 1.003-2015 реализована возможность контролировать тонкостенные конструкций двойной кривизны зеркально-теневым методом (рисунок 17), для этой цели для комплекса было разработано специализированное устройство для адаптации прижима роликовых преобразователей.

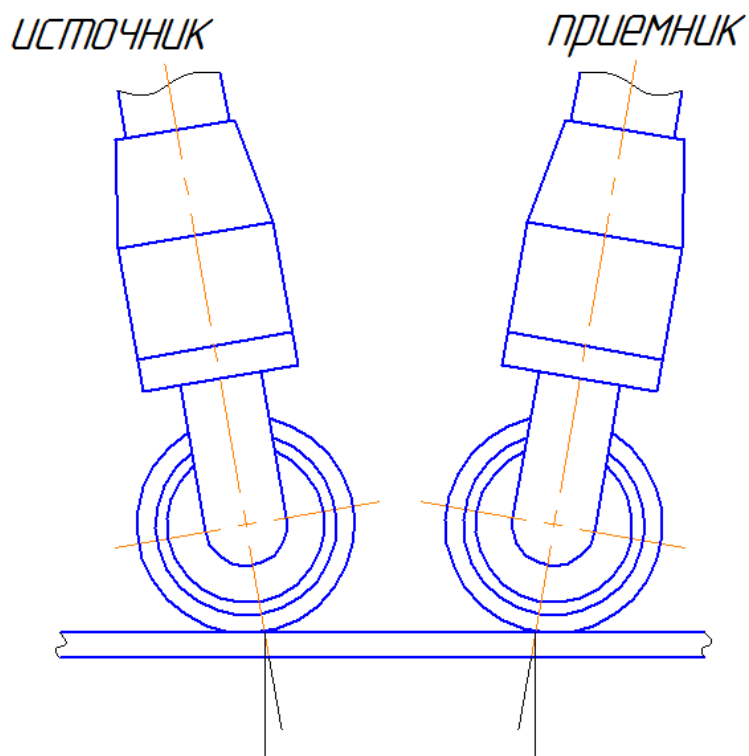


Рисунок 17 – Расположение преобразователей при зеркально-теновом методе контроля

В результате работ ФГУП «ВИАМ» по развитию автоматизированного ультразвукового контроля монолитных и сотовых конструкций из ПКМ был разработан и изготовлен полномасштабный макет автоматизированного комплекса для контроля деталей и агрегатов из ПКМ. Комплекс позволяет: реализовать эхо-импульсный и теневой (без использования контактной жидкости благодаря применению роликовых катящихся преобразователей) методы контроля, контролировать детали толщиной до 24 мм для монолитных панелей из углепластика и до 80 мм для сотовых панелей с обшивками из углепластика и стеклопластика.

Выводы

Во ФГУП «ВИАМ» проведен ряд работ по автоматизации процесса ультразвукового контроля монолитных и сотовых образцов из ПКМ.

Для проведения ультразвукового контроля плоских монолитных образцов из ПКМ с повышенным разрешением перед проведением механических испытаний был разработан стандарт организации, в соответствии с которым возможно проводить контроль образцов из угле- и стеклопластика. Были проведены исследования по выбору оптимальной частота преобразователя, был опробован различный шаг сканирования, были определены разрешающая способность и чувствительность контроля. Оптимальная частота преобразователя – 5 МГц, шаг сканирования выбран равный 1 мм, при этом разрешающая способность составила 2 мм между отражателями. Чувствительность контроля эквивалентна выявлению плоскодонного отражателя диаметром 2 мм и более.

Для проведения автоматизированного ультразвукового контроля сотовых образцов из ПКМ была разработана специализированная оправка для проведения теневого контроля со струйным контактом для иммерсионной установки ScanMaster LS-500, а также был разработан стандарт организации, в соответствии с которым возможно проводить контроль сотовых образцов из ПКМ тeneвым методом с обшивками из угле- и стеклопластика. Были проведены исследования по опробованию различного шага сканирования, расстояния между передающим и приемным преобразователями, а также чувствительности контроля. Шаг сканирования выбран равный 1 мм, а чувствительность контроля, в соответствии с проведенными исследованиями напрямую зависит от размера стороны ячейки сотового заполнителя и эквивалентна выявлению круга диаметром от 6 мм.

Совместно с ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» был разработан и изготовлен полномасштабный макет автоматизированного комплекса для ультразвукового неразрушающего контроля качества деталей

и агрегатов из ПКМ со встроенным программным обеспечением. Комплекс реализует эхо-импульсный и теневой (без использования контактной жидкости) методы контроля, позволяет контролировать детали толщиной до 24 мм для монолитных панелей из углепластика и до 80 мм для сотовых панелей с обшивками из углепластика и стеклопластика.

Список литературы

1. Чертищев В.Ю. Разработка технологий и средств акустического импедансного контроля многослойных сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. М, 2020. <http://bmstu.ru/mstu/works/science/degree-candidates/dissertants/?q=dissertation&id=595>
2. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Повышение чувствительности и разрешающей способности ультразвукового неразрушающего контроля монолитных образцов из ПКМ с использованием фазированных решеток // Авиационные материалы и технологии №3, 2019, с. 83-88, DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-83-88.
3. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С., Славин А.В. Автоматизированный неразрушающий контроль образцов из трехслойных сотовых конструкций ультразвуковым теневым методом // Авиационные материалы и технологии №2 (59), 2020, с. 74-80, DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-74-80.
4. Чертищев В.Ю. Разработка технологий автоматизированного неразрушающего контроля качества монолитных и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами // Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники». 17 июля 2017. Москва: ВИАМ, 2017, 198 с.

УДК 620.179.13

Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий аэрокосмической отрасли с использованием оптической и ультразвуковой стимуляции

Чулков А.О., к.т.н.; Вавилов В.П., д.т.н.; Шагдыров Б.И.; Бедарев А.М.

chulkovao@tpu.ru

vavilov@tpu.ru

batorshagdirov@mail.ru

anatoliy.bedarev@yandex.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Аннотация:

Работа посвящена решению проблем автоматизации процедуры теплового неразрушающего контроля крупногабаритных изделий и изделий сложной формы, используемых в аэрокосмической и ракетной технике.

Ключевые слова:

автоматизированный активный тепловой контроль, роботизированная система теплового контроля, нейронная сеть, композиционный материал, дефект

Введение

Активный тепловой контроль (ТК) развивается как эффективный метод неразрушающих испытаний композиционных материалов и теплозащитных покрытий, а его результаты могут быть использованы как базовые для принятия решения о дефектности исследуемого объекта [1 - 4]. В лабораторных и производственных условиях ТК проводят с использованием портативных дефектоскопов, в основном, построенных на базе компактных тепловизионных модулей и оптических источников нагрева [5, 6]. Для автоматизации процедуры неразрушающих испытаний тепловизионные дефектоскопы могут быть размещены на роботизированных манипуляторах [7].

Испытания крупногабаритных изделий авиакосмической и ракетной техники, в том числе, изделий цилиндрической формы, могут проводиться методом непрерывного сканирования [8, 9]. Такой подход повышает производительность испытаний, а также упрощает процедуру «сшивки» результатов контроля в панорамную карту дефектов всего изделия. Кроме того, метод линейного сканирования обеспечивает более равномерный нагрев поверхности объекта контроля по сравнению с контролем изделия отдельными зонами, что повышает достоверность испытаний. Основным недостатком испытаний методом сканирования является ограниченный диапазон времени, в котором происходят основные тепловые «события» в дефектных зонах, в частности, из рассмотрения выпадает фаза нагрева. Несмотря на этот недостаток, авторы разработали подход автоматизированной обработки результатов сканирования с применением алгоритма, реализованного на базе нейронных сетей (НС) [10, 11].

Помимо контроля крупногабаритных изделий, трудности в реализации ТК связаны со сложной формой изделий, например, авиационными нервюрами, изготовленными из композиционных материалов [12]. Наличие большого количества крепежных отверстий и усиливающих конструкцию

стрингеров предъявляет повышенные требования к качеству неразрушающих испытаний подобных конструкций. При проведении ТК изделий такого вида авторами предложено использовать два типа источников нагрева с последующим синтезом полученных данных [13]. Оптический нагрев выявляет расслоения сравнительно большой площади, расположенные параллельно контролируемой поверхности, но малоэффективен для выявления сомкнутых расслоений и трещин. Ультразвуковой (УЗ) метод тепловой стимуляции вызывает внутреннее трение в дефектах с соприкасающимися краями, например, трещинах и сомкнутых расслоениях, что сопровождается генерацией локальных температурных сигналов значительной амплитуды, надежно регистрируемые тепловизором [14].

В настоящей работе показаны решения по автоматизации процедуры ТК и обработке результатов контроля. Первая часть работы посвящена автоматизированной обработке результатов ТК, полученных методом сканирования, с использованием алгоритмов на базе НС. Во второй части работы описан роботизированный метод ТК композиционных изделий сложной формы при оптическом и ультразвуковом видах нагрева.

1. Автоматизированная дефектоскопия и дефектометрия по результатам ТК методом сканирования

Процедура ТК методом сканирования может быть реализована путем перемещения контролируемого изделия в зону нагрева, а затем в поле зрения тепловизора, при стационарном положении нагревателя и тепловизора. Основными средствами для реализации данного метода испытаний являются: источник линейного нагрева на базе галогенной лампы или трубчатого электрического нагревателя, тепловизор и система для линейного перемещения объекта контроля либо его вращения в случае цилиндрических изделий. Для испытаний крупногабаритных изделий используют роботизированный манипулятор, на котором размещают источник нагрева и

тепловизор. Лабораторная установка для проведения ТК методом сканирования приведена на рисунке 1.



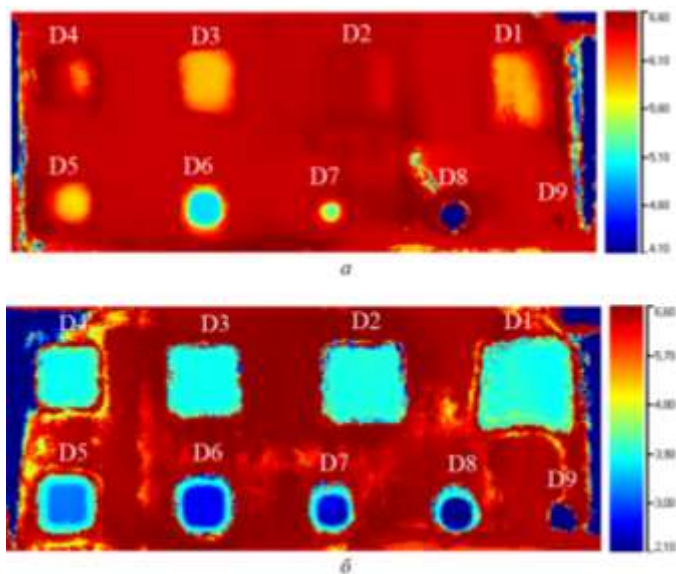
Рисунок 1 – Лабораторная установка для ТК композиционных материалов и многослойных покрытий методом сканирования

Следует заметить, что ТК методом сканирования требует более тщательной подготовки к испытаниям и учета ряда взаимосвязанных параметров, а именно, скорости перемещения контролируемой поверхности, частоты записи термограмм тепловизором, истинной величины сканируемых точек инфракрасного изображения в миллиметрах, а также расстояния от нагревателя и тепловизора до контролируемой поверхности.

Результаты ТК, проведенного методом сканирования, можно назвать «урезанными» по сравнению с результатами классического ТК. В частности, регистрацию температуры движущегося образца проводят в ограниченном диапазоне времени, связанном с размером поля зрения тепловизора. Температуру объекта контроля на стадии нагрева проблематично зарегистрировать из-за наличия помех со стороны нагревателя. Поэтому при обработке результатов испытаний классические методы не обеспечивают ожидаемых результатов. В то же время использование алгоритмов обработки

на базе НС позволяет осуществлять как дефектоскопию, так и дефектометрию, в автоматизированном режиме; при этом дефектометрия обеспечивает информацию о глубинах залегания и размерах дефектов в исследуемом материале [11, 15].

На рисунке 2 приведены результаты применения алгоритма ТК на базе НС, которые представляют собой карты глубин двух контрольных образцов с искусственными дефектами, контроль которых был проведен методом сканирования. Для обучения НС использовали результаты сканирующего ТК на комплекте из 23-х стандартного образца. Все 23 образца представляли собой пластины размерами 300×130 мм, которые имитировали трехслойное теплозащитное покрытие общей толщиной 6,3 мм на металлической подложке толщиной 4 мм (такие покрытия типичны в ракетной технике). Каждый образец содержал 9 искусственных дефектов в виде утонений размерами от 5×5 мм до 45×45 мм, толщиной от 0,1 мм до 2 мм, расположенные на глубине от 1 мм до 6,1 мм от контролируемой поверхности. Обучение нейронных сетей, а также предварительную обработку входных данных проводили с использованием программы ThermoFit Pro (НИ ТПУ). Процедура обучения НС и предварительной обработки данных подробно описана в [11, 15].



а - карта глубин контрольного образца №1 (дефекты расположены на глубинах от 6,1 до 4,2 мм);

б - карта глубин контрольного образца №2 (дефекты расположены на глубинах от 4,0 до 2,1 мм)

Рисунок 2 – Результаты автоматизированной дефектометрии образцов, имитирующих оболочку из многослойной теплозащиты на металлической подложке, с искусственными дефектами в виде расслоений

Численные значения определения глубины залегания дефектов h_e , истинных значений h_t , а также относительных ошибок E_r , приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты дефектометрии контрольных образцов, полученные с помощью НС

Номер образца	Параметр дефекта	Номер дефекта								
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
№1	h_t , мм	6,1	6,1	5,9	5,9	5,7	5,2	4,7	4,2	4,2
	h_e , мм	5,67	6,23	5,63	5,96	5,58	4,95	5,43	3,91	6,25
	E_r , %	7	2	5	1	2	5	16	7	49*
№2	h_t , мм	4,0	4,0	3,8	3,8	3,6	3,1	2,6	2,1	2,1
	h_e , мм	4,15	4,05	4,1	4,05	3,11	2,62	2,21	2,19	2,07
	E_r , %	4	1	8	7	14	15	15	4	1

*Выпавшее значение, связанное с температурными шумами

Полученные результаты демонстрируют низкий уровень относительной ошибки даже для дефектов, расположенных на глубине 6.1 мм, а именно, 7% и 2% для дефектов D1 и D2 в контрольном образце №1. Наибольшее значение относительной ошибки достигает 16% (за исключением выпадающей ошибки величиной 49% для D9 с поперечными размерами 5×5 мм, связанной с температурными шумами) для дефекта D7 контрольного образца №1, который расположен на глубине 4,2 мм и имеет поперечные размеры 15×15 мм. В контрольном образце №2 максимальная величина относительной ошибки дефектометрии достигала 15%, что для активного ТК является хорошим показателем, подтверждающим эффективность использования обученной нейронной сети для автоматизированной обработки результатов контроля.

2. Роботизированный ТК композиционных изделий сложной формы

Использование двух типов источников нагрева при контроле композиционных изделий сложной формы, позволяет выявлять различные типы скрытых дефектов, для которых можно выбрать предпочтительный вид тепловой стимуляции. Оптический нагрев, как правило, осуществляют в односторонней процедуре - когда тепловизор и источник нагрева расположены с одной стороны относительно контролируемой поверхности [16]. В зависимости от мощности нагревателя, например, галогенной лампы, а также угла зрения тепловизора, зона однократного контроля может достигать 0,1 м².

Процедура ТК с использованием ультразвукового (УЗ) нагрева требует обеспечения надежного контакта магнитострикционного или пьезокерамического излучателя с контролируемой поверхностью. Это можно достичь, применяя роботизированный манипулятор, что улучшает качество испытаний и обеспечивает их повторяемость. Следует заметить, что для ТК изделий сложной формы требуется стимулировать ультразвуком несколько

точек объекта контроля, например, по пространственной сетке с определенным шагом [17]. Данные требования проведения ТК с УЗ нагревом обусловлены сложным механизмом распространения волн и их затуханием в зависимости от геометрии исследуемого объекта.

На рисунке 3а приведена фотография лабораторной установки для ТК изделий сложной формы с использованием комбинированного оптического и УЗ видов нагрева. Галогенный нагреватель вместе с тепловизионным модулем были размещены стационарно на штативе. Ультразвуковой преобразователь магнитострикционного типа размещали на роботизированном манипуляторе, что позволило вводить УЗ колебания в объект контроля последовательно в 5-ти различных точках в автоматическом режиме. Расположение точек УЗ стимуляции (см. рисунок 3а) было определено эмпирически, критерием служило максимальное количество обнаруженных дефектных отметок в зоне интереса. Для оптического нагрева и УЗ нагрева каждой точки были записаны отдельные последовательности термограмм, которые после проведения испытаний были использованы для синтеза результирующей последовательности термограмм.

Объектом исследований являлась пластина сложной формы с размерами 163×281×25 мм и толщиной стенки 4,7 мм, изготовленная из углепластика. Образец содержал 7 искусственных дефектов: 4 фторопластовые вставки размерами 10×10×0,1 мм, расположенные на глубине от 0,2 до 2,2 мм с шагом 0,5 мм, а также 3 зоны плоскодонных утонений диаметром 10 мм и глубиной 1, 2 и 3 мм на внутренней стороне образца. Кроме того, в образце было выполнено отверстие диаметром 30 мм, имитирующее технологическое отверстие, а также были проделаны прорези, имитирующие места крепления стрингеров.

На рисунке 3б-г приведены результаты, полученные при оптическом нагреве (рисунок 3б) образца, в результате которого было выявлено 2 плоскодонных утонения, а также результаты УЗ стимуляции в точке 4

(рисунок 3в), которая наилучшим образом подчеркнула растрескивания вокруг отверстий и пропилов, возникших в результате механической обработки изделия.

Результатом комбинирования методов нагрева композиционного образца из углепластика является синтезированная последовательность инфракрасных изображений; оптимальная термограмма приведена на рисунке 3г. Полученное синтезированное изображение содержит наиболее полную информацию о имеющихся в изделии искусственных и производственных дефектах, а именно, о 3-х из 4-х фторопластовых вставок, 2-х из 3-х плоскодонных утонений, а также многочисленные растрескивания в зонах, подверженных механической обработки.

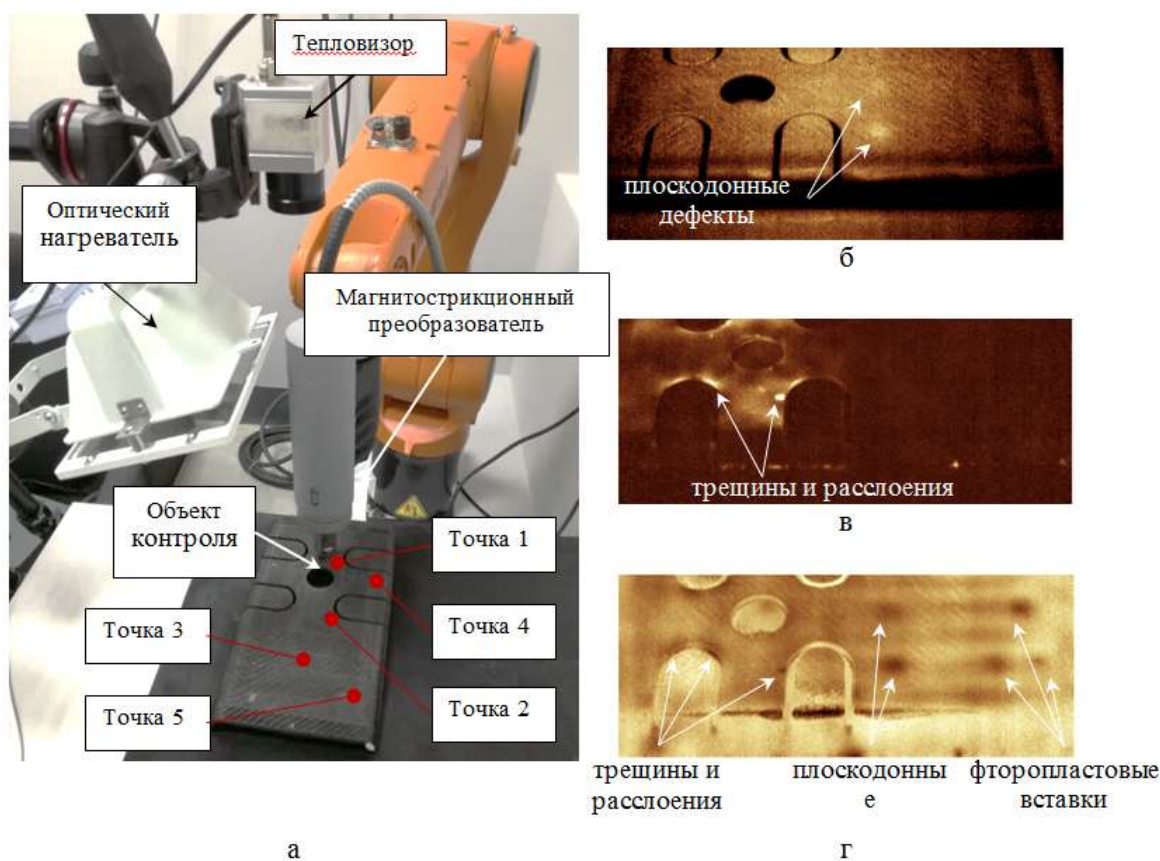


Рисунок 3 – Лабораторная установка и результаты автоматизированного ТК композиционных изделий сложной формы с применением оптического (а) и УЗ (б) источников нагрева, а также результаты их синтеза (г) (адаптировано из [13])

Заключение

Активный ТК эффективен при неразрушающих испытаниях материалов и изделий аэрокосмической и ракетной техники. Для улучшения качества, производительности и повторяемости неразрушающего контроля, а также для проведения количественной (дефектометрической) обработки результатов контроля, целесообразно использовать современные средства автоматизации, например, роботизированные манипуляторы и программные алгоритмы на базе нейронных сетей. Представленные в данной работе результаты демонстрируют работоспособность и эффективность методов, аппаратуры и алгоритмов автоматизированного проведения теплового неразрушающего контроля материалов и изделий аэрокосмической и ракетной техники.

Список литературы

1. Tashan J., Al-Mahaidi R. Detection of cracks in concrete strengthened with CFRP systems using infrared thermography. *Composites Part B Engineering* 2014. № 64. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.011>.
2. Arora V., Mulaveesala R., Rani A., Sharma A. Digitised frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive testing and evaluation of glass fiber reinforced polymers. *Nondestructive Testing and Evaluation* 2019. №34. P. 23-32.
3. Ciampa F., Mahmoodi P., Pinto F., Meo M. Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components. *Sensors* 2018. №18. P. 1-37. <https://doi.org/10.3390/s18020609>.
4. Чулков А.О., Вавилов В.П., Московченко А.И. Активный тепловой контроль отслоений в теплозащитных конструкциях // «Дефектоскопия». – 2019. - №3. - С. 58-65.

5. Vavilov V., Chulkov A. O., Derusova D.A., Pan, Y. Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University // Quantitative InfraRed Thermography Journal. - 2016. - Vol. 13. - P. 128-143 DOI: 10.1080/17686733.2015.1131855.
6. <https://www.automationtechnology.de/cms/en/mobile-ndt-systems-for-maintenance/>
7. http://activetest.ru/active_thermography_manual/?lang=en/
8. Khodayar, F., Lopez, F., Ibarra-Castanedo, C. Parameter optimization of robotized line scan thermography for CFRP composite inspection. J Nondestruct Eval 37, 5 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0459-8>.
9. Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П., Шильников Г.В., Перепелица А.А., Щепелин В.Я. Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль крупногабаритных изделий // В мире неразрушающего контроля. 2020. Т. 23. № 1. С. 56-59.
10. A.O. Chulkov, D.A. Nesteruk, V.P. Vavilov, A.I. Moskovchenko, N. Saeed, M. Omar. Optimizing input data for training an artificial neural network used for evaluating defect depth in infrared thermographic nondestructive testing // Infrared Physics and Technology. 2019. 102.
11. Chulkov A.O., Tuschl C., Nesteruk D.A., Oswald-Tranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V. Detecting and characterizing defects in metal/non-metal structures by using active thermal NDT based on optical/inductive uniform and line-scanning heating approaches, Journal of Nondestructive Evaluation. (2020). (Under review).
12. V.P. Vavilov, D.A. Derusova, A.O. Chulkov, A.N. Serioznov, A.A. Bragin Inspecting aviation composites at the stage of airplane manufacturing by applying 'classical' active thermal NDT, ultrasonic thermography and laser vibrometry // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2018. P. 1–7. <https://doi.org/10.1117/12.2304706/>.
13. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Bedarev A.M., Yarkimbaev S., Shagdirov B.I. Data fusion by applying optical and ultrasonic stimulation in

infrared thermographic NDT of graphite epoxy composites // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. № 7.

14. L.D. Favro et.al Sonic infrared imaging of fatigue cracks // December 2001. International Journal of Fatigue 23:471-476. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00151-7](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00151-7).

15. A.I. Moskovchenko, V.P. Vavilov, A.O. Chulkov Comparing the efficiency of defect depth characterization algorithms in the inspection of CFRP by using one-sided pulsed thermal NDT // Infrared Physics & Technology. 2020. 107. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103289>.

16. Palumbo D, Cavallo P, Galietti U. An investigation of the stepped thermography technique for defects evaluation in GFRP materials. NDT & E International 2019;102:254-263 <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.12.011>.

17. Чулков А.О., Московченко А.И., Вавилов В.П. Активный тепловой контроль изделий из углепластика сложной формы с использованием различных способов тепловой стимуляции // «Контроль. Диагностика» №12. 2018. с. 20-28.

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб; Загл. с экрана.

Использованное программное обеспечение: Microsoft Office Word 2010

Статьи представлены в авторской редакции

За содержание статей, точность приведенных фактов и цитирование
несут ответственность авторы публикаций

Объем издания: 10 Мб.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»
ГНЦ РФ)

Изд-во ФГУП «ВИАМ»

admin@viam.ru

