

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ РЕШЕТОК ПРИ ТЕНЕВОМ МЕТОДЕ КОНТРОЛЯ

Чан Цзянлэй¹, А.И.Солдатов²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), г. Томск

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), г. Томск

Композитный материал находит широкое применение, поэтому важными являются задачи контроля качества при производстве и применении материалов. На сегодняшний день используют различные методы ультразвукового контроля композитов. При теневом методе, излучение проходит через объект только один раз, поэтому у него меньше затухание по сравнению с другими методами. Теневым методом контроля композитов при использовании линейных решеток определяется размер и расположение дефекта, и этот метод недостаточно полно исследован в мире. В статье исследованы характеристики математической модели ультразвукового теневого метода контроля композитов при использовании линейных решеток в среде MathCad. Определена разрешающая способность метода для различных положений дефектов в зоне контроля.

Ключевые слова: композитный материал, ультразвуковой теневой контроль, разрешающая способность.

ВВЕДЕНИЕ

Композитом называется неоднородный (гетерогенный) материал, состоящий из двух или нескольких взаимно нерастворимых компонентов (фаз) [1].

Большинство операторов нефте- и газопроводов знакомы с композитными материалами. Несмотря на высокую стоимость, композитные материалы (КМ) завоевали свою популярность, из-за их преимуществ в техническом и коммерческом плане, а также в области охраны здоровья и окружающей среды, которые обеспечивает их применение. Наиболее часто упоминаются авиакосмические компоненты (хвосты, крылья, фюзеляж, пропеллеры), корпуса и весла судов, кузова автомобилей, велосипедные рамы, удилища [2].

Для обеспечения требуемых функциональных свойств композитных материалов необходимо проводить контроль их свойств (структура, плотность, неоднородность, размер и прочие).

Одним из методов неразрушающего контроля является ультразвуковой метод контроля (УЗК). Объем применения ультразвукового контроля в промышленности (энергетическое машиностроение, железнодорожный транспорт, судостроение, химическое машиностроение) как в России, так и за рубежом достиг 70... 80 % [3].

На сегодняшний день используют пять основных УЗК-методов: теневой, зеркальный, зеркально-теневой, эхо-метод и дельта-метод [4-6]. При теневом методе контроля используются преобразователи, которые располагаются на противоположных сторонах объекта контроля на одной акустической оси. Этот метод может быть применен с использованием непрерывного или импульсного излучения. При теневом методе, контроля о наличии дефекта судят по изменению амплитуды ультразвуковых колебаний, прошед-

ших от излучателя к приемнику. Амплитуда принятого сигнала зависит от размера дефекта. Преимуществами теневого метода являются высокая помехоустойчивость, низкая зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта и отсутствие мертвой зоны. Известно, что композит создают из двух или более компонентов с четкой границей раздела между этими компонентами, поэтому сигналы, прошедшие от излучателя к приемнику, имеют большое затухание. При теневом методе, излучение проходит через объект только один раз, поэтому у него меньше затухание по сравнению с другими методами. В связи с этим мы выбрали теневой метод для контроля композита.

Исследованиям теневого метода посвящено много работ, в основном используются одноканальные дефектоскопы [7-10], однако в последнее время стали использовать линейные решетки [11]. В нашей работе использовался новый алгоритм для моделирования.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Принцип работы акустического тракта, содержащего две акустические решетки (рис.1.а), между которыми расположен объект контроля, заключается в следующем: все излучатели излучают акустические сигналы по очереди, а приемники принимают их одновременно. При этом получают матрицу данных, состоящую из m^2 измерений, где m - количество элементов в линейной решетке. Исходя из дифракционной теории Кирхгофа [12] и акустического пути плоской волны, можно сказать, что интеграл дифракции в тени стремится к нулю [13].

Применение данной математической модели акустического тракта возможно, потому, что длина волны меньше размера дефекта и элемента преобразователя, и расстояние между излучателями и приемниками намного больше чем длина волны, что соответствует условию дифракции в дальней зоне. Это позволяет считать распределение ультразвукового давления

на приёмниках равномерным, а амплитуду принятого сигнала обратно пропорциональной площади “акустической тени” на приемнике от дефекта. Каждая пара элементов излучатель-приемник формирует лучевую трубку, форма и размеры которой определяются размером и распределением пары элементов излучатель-приемник [14].

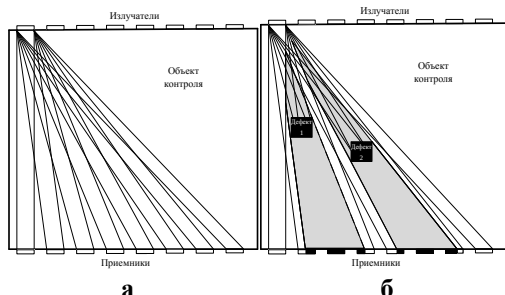


Рис. 1. Акустический тракт зоны контроля теневого метода: а – при отсутствии дефектов; б – при наличии двух дефектов

Для примера рассмотрим акустический тракт, содержащий излучающую и приемную антенные решетки и два дефекта расположенные между ними (рис.1.б). При излучении упругой волны каждый дефект даст акустическую тень, которая показана серым цветом. Приняв амплитуду сигнала в акустической тени за 1 (серая часть на приемной антенне), а в области отсутствия тени – за 0 (белая часть на приемной антенне). Математическая модель предусматривает представление зоны контроля в виде набора $m \times n$ мелких локальных областей, для которых рассчитывается эквивалентная амплитуда путем суммирования амплитуд всех проекций проходящих через эту локальную область. В результате получим томограмму (рис 2.а), в которой амплитуда каждой точки объекта контроля закодирована цветом. С учетом неравномерного распределения количества лучевых трубок в зоне контроля, необходимо, для получения лучшего результата моделирования, амплитуду каждой точки разделить на количество лучей, проходящих через эти точки (рис.2.б).

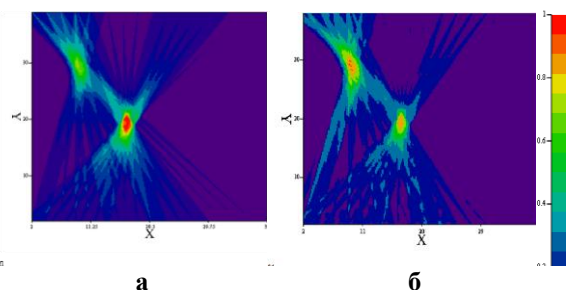


Рис. 2. Результат расчета положения дефекта, расположенного в центре зоны контроля с размером 4X7 мм: а – без обработки; б – после обработки

Разрешающая способность дефектоскопа, это наименьшее расстояние между двумя дефектами, при

котором возможна их раздельная регистрация. Максимальный ракурс можно найти из выражения:

$$\theta_0 = \arccos\left(\frac{h}{\sqrt{h^2 + l^2}}\right) \quad (1)$$

Для случая, показанного на рис.3 невозможна раздельная регистрация дефектов, и l_p определяется из формулы:

$$l_p = D_{\text{ц}} \cos \theta \quad (2)$$

где l - длина решеток, h - расстояние между излучателем и приемником, $D_{\text{ц}}$ - расстояние между соседними излучателями, θ - угол между линией соединяющей два дефекта и горизонтальной осью (рис.3.а).

Для модели акустического тракта, содержащего два дефекта, которые расположены в центре зоны контроля и $\theta \geq \theta_0$, расчетное значение $l_p \leq 10$ мм.

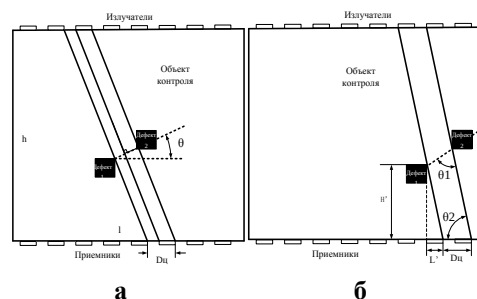


Рис. 3. Акустический тракт зоны контроля теневого метода: а – при $\theta_1 = 90^\circ$; б – при $\theta_1 < 90^\circ$

При угле θ_1 меньше 90° , разрешающая способность определяется по такой формуле:

$$l_p = \frac{D_{\text{ц}} \sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{D_{\text{ц}} * H'}{\sin \theta_1 * \sqrt{H'^2 + L'^2}} \quad (3)$$

где H' - расстояние между приемной решеткой и 1-ым дефектом, L' - расстояние между крайней точкой проекции 1-го дефекта на приемную решетку и точкой пересечения прямой линии, соединяющей i -излучатель и последний приемник с осью приемной решетки, θ_2 - угол между прямой линией, соединяющей i -излучатель с последним приемником и проходящей через второй дефект с осью приемной решетки (рис.3.б).

Для исследования разрешающей способности в разных частях зоны контроля были проведены исследования на модели.

В первом случае два дефекта расположили на одной оси между решетками в центре зоны контроля (рис.4), разрешающая способность составила 28 мм.

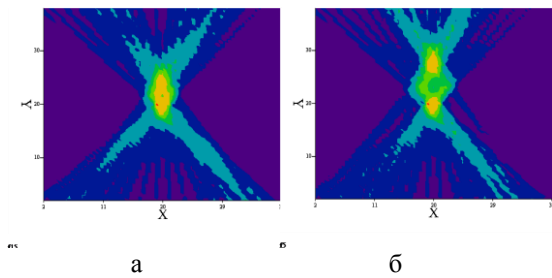


Рис. 4. Томограмма зоны контроля с двумя дефектами: а – расстояние между дефектами 24.5 мм; б – расстояние между дефектами 28 мм

Во втором случае два дефекта расположили параллельно оси решетки также в центре зоны контроля (рис.5), разрешающая способность составила 8 мм.

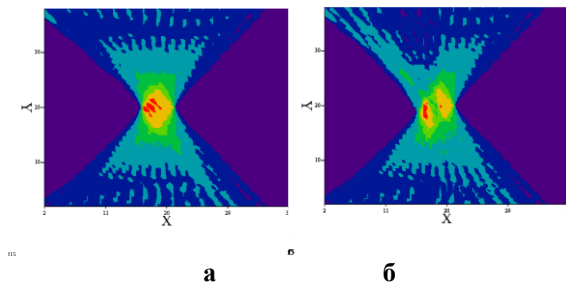


Рис. 5. Томограмма зоны контроля с двумя дефектами: а – расстояние между дефектами 6 мм; б-расстояние между дефектами 8 мм

В третьем случае два дефекта расположили близко к границе зоны контроля (рис.6), разрешающая способность составила 91 мм.

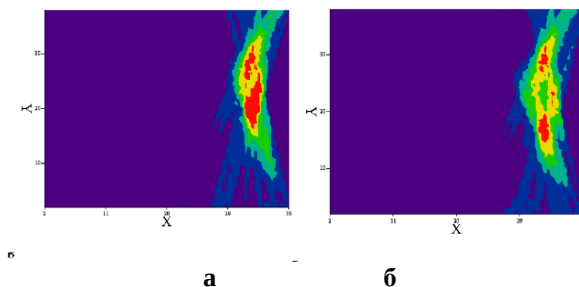


Рис. 6. Томограмма зоны контроля с двумя дефектами: а – расстояние между дефектами 70 мм; б-расстояние между дефектами 91 мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование показало, что разрешающая способность на модели лучше, чем результаты теоретического расчета, выполненного по формуле (1). Это связано с тем что, для теоретического расчета был выбран самый худший вариант. Экспериментальное исследование разрешающей способности в рамках этой работы не проводилось.

Следует отметить, что чем больше угол между линией соединяющей два дефекта и горизонтальной осью, тем хуже разрешающая способность.

Разрешающая способность зависит от расстояния между соседними элементами антенной решетки: чем больше расстояние, тем хуже разрешающая способность. Кроме того, выявлено, что разрешающая способность l_p неравномерна по зоне контроля и наилучшая разрешающая способность наблюдается в центре зоны контроля, наихудшая – по краям зоны контроля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скорцов Ю.В., Механика композиционных материалов М.: Мир, 2013. – 520 с.
2. Классификация и краткая характеристика акустических методов контроля: <http://library.mephi.ru/> - Загл. с экрана. (19.04.2018).
3. Матричные композиты <http://matrix-composite.com/ru/composites/articles/> - Загл. с экрана. (11.05.2018).
4. Выборнов Б. И., Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1985.
5. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов. Киев: Техшка, 1972.
6. Жарова ю.а., Обзор методов неразрушающего контроля изделий авиационной техники из полимерных композиционных материалов. Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. Издательство: Научно-информационный издательский центр и редакция журнала "Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук" (Москва), 2014. с. 34–38.
7. Солдатов А.И., Макаров В.С., Сорокин П.В., Солдатов Д.А. Акустическая дефектоскопия многослойных материалов, используемых в вертолетостроении // Контроль. Диагностика, 2013. – №13. – с. 74–77.
8. Е.П. Пыхтин, В.С. Киселёв, М.В. Радченко, Т.Б. Радченко, Обзор технических особенностей аппаратуры, применяемой при ультразвуковом контроле сварных соединений на опасных производственных объектах. Ползуновский альманах – № 4. 2015. с. 15–19.
9. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 342–347.
10. Ключев В.В., Неразрушающий контроль. Том 3. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – Том 3. – 864 с.
11. Буй Ван Донг, Акустический контроль композитных материалов малоракурсным теневым методом. [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.11.: защищена 22.01.02: утв. 15.07.02 / Буй Ван Донг. – М., 2015. – 145 с. – Библиогр.: с. 48–49.
12. Скучик Е., Основы акустики. – М.: Мир, 1976. – Том 1. – 520 с.
13. Provost J., Lesage F., The application of compressed sensing for photo-acoustic tomography // IEEE Trans. Med. Imaging. 2009. – Т. 28. – № 4. – P. 585–594.
14. Soldatov, A., Soldatov, A., Kostina, M., Bakanov, P., Polonskaya, M. Small angle tomography algorithm for transmission inspection of acoustic linear array (2016) MATEC Web of Conferences, – P. 2.

Чан Цзянлэй, аспирант инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности ТПУ, E-mail: vastchan@mail.ru

Солдатов А.И., д.т.н., профессор инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности ТПУ, E-mail: asoldatov@tpu.ru

THE RESOLUTION CAPABILITY OF THE THROUGH-TRANSMISSION METHOD OF TESTING OF COMPOSITES USING LINEAR ARRAYS

J. Chang¹, A.I. Soldatov^{1,2}

¹National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk

Composite material is widely used, therefore, quality control tasks in the production and application of materials are important. To date, various methods of ultrasonic testing of composites have been used. In the through-transmission method, radiation passes through the object only once, so it has less attenuation compared to other methods. The through-transmission method of testing composites using linear lattices determines the size and location of the defect, and this method has not been fully investigated up to the present time. In the article, the characteristics of the mathematical model of the ultrasonic through-transmission testing method using linear arrays in MathCad environment are investigated. A change in resolution on the PC has been presented with 2 defects.

Keywords: composite material, through-transmission method of testing, resolution.

REFERENCES

1. Skvortsov Yu., Mechanics of Composite Materials, Mir, 2013. - p.520.
2. Classification and a brief description of acoustic control methods: <http://library.mephi.ru/>. (19/04/2018).
3. Matrix Composites <http://matrix-composite.com/en/comp-osites/articles>. (11/05/2018).
4. Vybornov B.I, Ultrasonic Flaw Detection. Moscow: Me-Tallurgiya, 1985.
5. Gurvich A.K, Ermolov I.N Ultrasonic defect-copy of welded seams. Kiev: Techshka, 1972.
6. Zharova Yu.A., Review of methods for nondestructive testing of aviation equipment products from polymer composite materials. Actual problems of the humanities and natural sciences. Publisher: Scientific and information publishing center and editorial board of the journal "Actual problems of humanities and natural sciences" (Moscow), 2014. - p. 34-38.
7. Soldatov A.I, Makarov V.S, Sorokin P.V, Soldatov D.A Acoustic flaw detection of multilayer materials used in helicopter construction // Control. Diagnosis, 2013. - № 13. - p. 74-77.
8. E.P. Pykhtin, V.S. Kiselev, M.V. Radchenko, T.B Radchenko, Review of technical features of equipment used for ultrasonic testing of welded joints at hazardous production facilities. Polzunovsky almanac - No. 4. 2015. - p. 15-19.
9. Murashov V.V, Rumyantsev A.F. Defectoscopy and diagnostics of polymer composite materials by acoustic methods / In Sat. 75 years. Aviation materials. Selected works "VIAM" 1932-2007: Jubilee scientific-technical. Sat. M.: VIAM. 2007. - p. 342-347.
10. Klyuev V.V, Nondestructive testing. Volume 3. Ultra-sound control. - M.: Mechanical Engineering, 2004. - Volume 3. - p. 864.
11. Buy Van Dong, Acoustic control of composite materials with a low-angle shadow method. [Text]: dis. Cand. those. Sciences: 05.11.: it is protected 22.01.02: 07/15/02 / Bui Van Dong. - M., 2015. - 145 p. - Bibliography: - p. 48-49.
12. Skuchik E., Basics of Acoustics. - Moscow: Mir, 1976. - Volume 1.- p. 520.
13. Provost J., Lesage F., The application of compressed sensing for photo-acoustic tomography // IEEE Trans. Med. Imaging. 2009. - T. 28. - № 4. - p. 585-594.
14. Soldatov, A., Soldatov, A., Kostina, M., Bakanov, P., Polonskaya, M. Small angle tomography algorithm for transmission inspection of acoustic linear array (2016) MATEC Web of Conferences, - p. 2.

J. Chang – post-graduate student of the department of industrial and medical electronics, TPU, E-mail: vastchan@mail.ru.

A.I. Soldatov – Doctor of technical sciences. Professor of the Department of Industrial and Medical Electronics, TPU, E-mail: asoldatof@tpu.ru.