

**АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТОМОГРАФОВ
ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ ЦЕЛЬНОТКАНЫХ АРМИРУЮЩИХ СТРУКТУР***

**THE ANALYSIS OF COMPUTER TOMOGRAPHS
FOR DEFECTOSCOPY OF WHOLLY-WOVEN REINFORCING STRUCTURES**

В.А. ИВАНОВСКИЙ
V.A. IVANOVSKY

(Костромской государственной технологической университет)
(Kostroma State Technological University)
E-mail: info@kstu.edu.ru

Работа посвящена обзору и анализу характеристик компьютерных томографов с точки зрения возможности применения для дефектоскопии многомерных тканых структур. Рассмотрены основные критерии выбора томографов для поставленной задачи. Определены типы наиболее подходящих аппаратов.

Work is devoted to the review and the analysis of characteristics of computer tomographs from the point of view of possibility of their application for defectoscopy of multidimensional woven structures. The main criteria of a choice of tomographs are considered. Types of the most suitable devices are defined.

Ключевые слова: контроль качества тканых структур, компьютерная томография, основные характеристики компьютерных томографов.

Keywords: quality control of woven structures, computer tomography, main characteristics of computer tomographs.

На сегодняшний день в авиакосмической отрасли существует задача создания многомерных армирующих тканых структур для производства деталей из композитных материалов. Процесс создания таких деталей делится на два основных этапа – создание тканой арматуры и заливка связующим. Представляется целесообразным производить автоматизированный контроль качества армирующей тканой структуры до заливки связующим. Подобные армирующие полуфабрикаты имеют сложную геометрию, а следовательно, представляют собой серьезную задачу для автоматизации контроля качества. Анализ традиционных методов неразрушающего контроля [1...5] показал, что для контроля как внешней, так и внутренней структуры,

геометрии и дефектов наиболее эффективным является применение метода компьютерной томографии. Цель работы заключается в определении наиболее важных характеристик компьютерных томографов для данной задачи и в определении наиболее подходящего оборудования.

Согласно [6] можно выделить следующие основные технические характеристики компьютерных томографов: 1) габариты и масса исследуемого объекта; 2) энергия источника излучения, определяющая проникающую способность; 3) предел пространственного разрешения внутри объекта контроля; 4) формат и качество томограмм; 5) чувствительность к локальным дефектам и разноплотностям; 6) точность измерения размеров внутри исследуемого

* Работа выполнена под руководством проф., докт. техн. наук С.Н.Титова.

объекта; 7) производительность; 8) надежность оборудования, техническая и методическая поддержка; 9) средства радиационной защиты; 10) цена.

В рамках данной статьи рассмотрены наиболее важные характеристики с точки зрения возможности технического применения для указанной задачи: габариты исследуемого объекта, энергия источника излучения, предел пространственного разрешения, формат и качество томограмм.

Энергия ионизирующего излучения является одним из важных параметров при выборе томографов. Оптимальная энергия определяется по следующей формуле [7]:

$$\mu(E) = 4 / \rho \ell, \quad (1)$$

где $\mu(E)$ – массовый коэффициент ослабления контролируемого материала при заданном значении энергии рентгеновского излучения E , $\text{см}^2 / \text{г}$; ρ – средняя плотность материала, $\text{г}/\text{см}^3$; ℓ – средняя толщина контролируемого изделия, см.

Композитные материалы имеют относительно низкую плотность, следовательно, метод компьютерной томографии адекватен для контроля изделий из данных материалов. Согласно исследованию [8] контроль изделий из композитных материалов с $\rho \ell \leq 40 \text{ г}/\text{см}^2$ может быть осуществлен при помощи рентгеновских трубок $E \leq 40 \text{ кВ}$. Для контроля изделий, содержащих металлические части, следует учитывать, что, например, для стали толщиной 50 мм необходимо 450 кВ, а для стали толщиной 150 мм уже необходимо применение тормозного излучения ускорителей электронов с энергией 4...6 МэВ. Практически все универсальные промышленные томографы могут использовать трубки 450 кВ, однако ускорителями на 5 МэВ оснащены отечественные томографы, например ВТ-600(800) ХА.

В табл. 1 приведены наиболее известные модели зарубежных и отечественных томографов с габаритными характеристиками контролируемых объектов.

Т а б л и ц а 1

Зарубежные			Отечественные		
Фирма производитель	Марка томографа	Максимальный диаметр ОК, мм	Фирма производитель	Марка томографа	Максимальный диаметр ОК, мм
Marconi	Mx8000Dual	1020	"Проминтро"	ВТ-1200	1500
Siemens	SomatomPlus 4	1020		ВТ-800	850
Toshiba	AsteionMulti	1000		ВТ-600ХА	600
Ge	HiSpeed NX/i	950		ВТ-500	600
Varian	BIR600/450	600		ВТ-50	50

При производстве изделий из композитных материалов для авиакосмической отрасли, таких как лонжероны, лопасти, обтекатели ракет и т.д., можно сузить требования к габаритным характеристикам, так как диаметральные размеры в основном колеблются до 1 метра, однако очевидно, что разумное расширение данных характеристик томографа всегда благоприятно в плане универсальности.

Одним из необходимых параметров для идентификации структуры армирующего тканого полуфабриката является определение геометрического расположения нити. Как показано в исследовании [9], эффективным средством для анализа допус-

тимого геометрического расположения нитей, а также определения рисунка переплетения ткани является математический аппарат нечеткой логики. При этом на качество распознавания сильное влияние оказывают такие факторы, как разрешение, формат и качество изображений.

Предел пространственного разрешения (ППР) – комплексный параметр функции рассеяния ("резкости"), зависящий от многих факторов, таких как размер фокусного пятна, интервала между детектирующими элементами, положение объекта контроля, формата, алгоритма свертки, точности механизмов системы, жесткости механики и др.

В табл. 2 приведены уровни пространственного разрешения и формат реконструируемых томограмм для исследуемых томографов.

руируемых томограмм для исследуемых томографов.

Т а б л и ц а 2

Зарубежные			Отечественные		
Марка томографа	Уровень ППР, пер/см	Формат томограммы	Марка томографа	Уровень ППР, пер/см	Формат томограммы
Mx8000Dual	24	1024x1024	BT-1200	10	512x512
SomatomPlus 4	15	512x512	BT-800	30	1024x1024
AsteionMulti	14	512x512	BT-600XA	50(100)	2048x2048
HiSpeed NX/i	17	512x512	BT-500	30(50)	1024x1024
BIR600/450	25	2048x2048	BT-50	200	512x512

Для распознавания структуры ткани необходим анализ фрагментов изображения с линейными размерами L_{\min} :

$$L_{\min} = d/2, \quad (2)$$

где d – условный диаметр нити ткани. Как показало исследование [10], на каждый фрагмент (нить или межниточное расстояние) изображения должно приходиться не менее 4 пикселей, следовательно, на поперечный размер нити должно быть порядка 8 пикселей. Учитывая, что исследуемые ткани ткнутся из нитей с условным диаметром от 0,4 мм, размер одного пикселя должен быть не более 0,05 мм, что соответствует размеру элемента томограммы при пространственном разрешении 50 пер/см. Уровень погрешности измерений при данном пространственном разрешении обеспечивается на уровне $< \pm 20$ мкм. Как видно из табл. 2 наилучшими характеристиками ППР в совокупности с форматом реконструируемых томограмм обладают томографы марок BT-600XA, BIR600/450 и BT-50.

Стоит учитывать, что при повышении разрешения кардинально увеличивается объем вычислений, так, например, повышение разрешения в N раз ведет к увеличению объема обработки информации в N^3 раз. Однако, несмотря на это, данный параметр является одним из основополагающих для решения поставленной задачи.

На качество томограмм помимо пространственного разрешения и высокого формата оказывают влияние различные артефакты: артефакт жесткости излучения, артефакт частичного объема, артефакт

подвыборки, артефакты при спиральном сканировании, артефакт конусности пучка, ступенчатый артефакт и др.

Влияние данных артефактов на качество может быть уменьшено за счет малой толщины срезов, большого числа проекций, малого интервала между проекциями, алгоритмов фильтрации низкоэнергетических компонентов, применения узких коллиматоров, большого числа рядов детекторов. Данные параметры необходимо также учитывать при выборе томографа.

В Ы В О Д Ы

Таким образом, как показало исследование, существуют универсальные современные томографы, которые применимы для анализа изделий из композитных материалов, анализа геометрической структуры пространственного армирования.

В частности, для решения задачи автоматизированной дефектоскопии армирующих тканых структур при производстве изделий из композитных материалов наиболее подходящими оказались томографы марок BT-600XA и BIR600/450. Также томограф марки BT-50 дает возможность исследования минимальных структур анализируемых материалов (при малых диаметрах объекта контроля) за счет своего уникального пространственного разрешения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Павлихина И.Ю., Сумарукова Р.И. Исследование расположения нитей в многослойной ткани облегченного типа // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №4. С.28...31.

2. Некрасова Н.П. Анализ существующих методов неразрушающего контроля параметров строения ткани // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №4. С.54...56.

3. Ивановский В.А. Применение вейвлет-анализа при распознавании дефектов ткани // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №5. С.124...126.

4. Стенюгина О.В., Коробов Н.А., Гусев Б.Н., Алешина Д.А. Определение геометрических характеристик петлеобразования трикотажного полотна по компьютерному изображению // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, №1. С.134...136.

5. Волгин А.Б., Рудовский П.Н. Обработка и распознавание цифрового изображения самокрученных нитей с целью определения значения и направления крутки // Вестник КГТУ. – 2012, №2. С.37...38.

6. Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И. Универсальные компьютерные томографы для отработки технологии и сертификации ответственных промышленных изделий. Критерии выбора. Двигатель. – 2011, №4(76).

7. Бугаков И.С., Митряйкин В.И., Павлова Н.В. Результаты использования компьютерного томо-

графа при неразрушающем контроле композиционных деталей вертолета // Сб. тр.: Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2004. С.31...35.

8. Бугаков И.С. Расчетно-экспериментальная оценка несущей способности многослойных композиционных конструкций летательных аппаратов с учетом внутренних дефектов, определенных компьютерным томографом: Дисс. ... канд. техн. наук. – Казань, ОАО "Казанский вертолетный завод", 2006.

9. Романов В.В., Ивановский В.А. Детектирование пороков ткани на основе аппарата нечеткой логики // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №3. С.134...136.

10. Ивановский В.А. Совершенствование методики распознавания пороков тканых полотен на основе применения математического аппарата нечеткой логики: Дисс. ... канд. техн. наук. – Кострома: КГТУ, 2002.

Рекомендована кафедрой теории механизмов и машин, деталей машин и проектирования технологических машин. Поступила 07.06.13.