

УДК 620.179.11

И.П. ВНУКОВ, И.Н. ЗЯНЧУРИНА, М.М. СЕРБОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье приведены данные по применению полимерных композитных материалов (ПКМ) в авиастроении. Проведен анализ методов неразрушающего контроля качества отверстий в деталях из ПКМ. Рассматривается оптический метод контроля как наиболее подходящий для решения задачи выявления дефектов сквозных отверстий. Предлагается использовать принцип Г.Б. Эйри для наблюдения дифракционной картины на круглом отверстии. Принцип основан на анализе сигнала в фазовом пространстве, информативным параметром является отношение значений амплитуд нечетных или четных производных измерительного сигнала, при произвольном значении независимой текущей переменной.

Ключевые слова: отверстие, оптический прибор, контроль, спектральный коэффициент, интенсивность излучения, дифракционная картина.

Введение

Развитие авиационной отрасли неразрывно связано с применением полимерных композиционных материалов, созданных с учетом новейших достижений науки и техники.

Европейские авиастроительные компании, в том числе и украинские, используют углепластик при создании фюзеляжа, крыльев, хвостового оперения и других аэродинамических элементов самолетов. Фактически, уровень использования композитных материалов в современном авиалайнере достигает 53%.

В свое время компания Airbus стала первой авиастроительной компанией, которая начала широкомасштабное использование композитных материалов при создании новых самолетов. На лайнерах A310 углепластик использовался в производстве элементов хвостового оперения, чуть позже самолеты семейства A320 стали первыми воздушными судами, на которых использовалось крыло, полностью выполненное из композитных материалов. С появлением каждой новой модели доля углепластика в их конструкции постоянно увеличивалась. Если в конструкции A310 композитные материалы составляли лишь 5%, то в лайнерах A380 их доля была доведена до 25%.

Возможность варьирования в широких пределах характеристиками эксплуатационных свойств, экономия материальных и энергетических ресурсов приводят к росту объема производства полимерных композитных материалов (ПКМ) и неуклонному расширению их применения. В процессе обработки и изготовления изделий из ПКМ возникает необходимость проведения оперативного контроля отвер-

стей в конструкции, с последующим уточнением параметров выявленных дефектов (диаметра, округлости, ворсистости, глубины залегания и формы выкрашивания). Опасность влияния дефектов на работоспособность зависит от их вида, формы, типа и количества [1]. Форма дефекта определяет его опасность с точки зрения разрушения конструкции. Дефекты правильной формы, без острых краёв, наименее опасны, так как вокруг них не происходит концентрации напряжений. Дефекты с острыми краями, являются концентраторами напряжений. Эти дефекты увеличиваются в процессе эксплуатации изделия по линиям концентрации механических напряжений, что, в свою очередь, приводит к разрушению изделия. Классификация возможных дефектов в изделии позволяет правильно выбрать метод и средства контроля.

Методы и средства контроля отверстий

Методы неразрушающего контроля (МНК) нашли наиболее широкое применение в технологии контроля ПКМ благодаря своей высокой функциональности, точности, научной и методической строгости. И, безусловно, главное достоинство этих методов в том, что при их применении конструктивно-технологическая и функциональная структура изделия сохраняется к дальнейшему применению [2]. МНК, не изменяя качества, параметров и характеристик изделия, позволяют по косвенным вторичным признакам обнаружить скрытые дефекты, либо вскрыть такие особенности, которые влекут за собой потенциальную ненадежность изделий. Они позволяют исследовать изделия в процессе производства,

испытаний и эксплуатации, а также могут применяться для оценки качества технологических процессов и отработки изделий, не удовлетворяющих требованиям технического задания. Классификация видов и методов неразрушающего контроля приведена в ГОСТ 18353-79 [3]. Исторически глаз человека является основным контрольным прибором в дефектоскопии. Глазом обнаруживают отклонения формы и размеров, изъяны поверхности и другие дефекты в процессе производства деталей из ПКМ. Однако возможности глаза ограничены, предметы, находящиеся в покое на расстоянии наилучшего зрения в условиях нормальной освещенности, человек может испытать трудности из-за ограниченной разрешающей способности и контрастной чувствительности зрения. Для расширения возможностей глаза используют оптические приборы. Они увеличивают угловой размер объекта, при этом острота зрения и разрешающая способность глаза увеличивается примерно во столько же раз, во сколько увеличивает оптический прибор. Это позволяет увидеть мелкие дефекты, невидимые невооруженным взглядом, или их детали.

На сегодняшний день, оптические средства контроля изделий из композиционных материалов занимают 80%. К ним относятся: жесткий эндоскоп, гибкий эндоскоп, видеоэндоскоп, ультратонкий бороскоп.

Согласно ГОСТ 24521-80, эндоскоп – это оптический прибор, имеющий осветительную систему и предназначенный для осмотра внутренних поверхностей объекта контроля [4]. Визуальный контроль с использованием оптических приборов называется визуально-оптическим. Основные преимущества этого метода – простота контроля, несложное оборудование, сравнительно малая трудоемкость. К недостаткам следует отнести низкую достоверность и чувствительность.

Современные методы оптического контроля основаны на взаимодействии светового излучения с поверхностью контролируемого объекта. При этом рассматриваются такие спектральные характеристики, как коэффициент спектрального излучения и поглощения, спектральный коэффициент поглощения $\alpha(\lambda)$ является отношением потока излучения, поглощенного внутри оптически прозрачной среды, к падающему потоку излучения. Спектральный коэффициент пропускания $\tau(\lambda)$ представляет собой отношение потока излучения, прошедшего через среду, к потоку энергии, упавшего на ее поверхность. Спектральный коэффициент отражения $\rho(\lambda)$ определяют для составляющих светового потока с параллельными и перпендикулярными колебаниями по отношению к плоскости падения. При нормаль-

ном падении светового потока при переходе из одного материала с показателем преломления η_1 в другой с показателем преломления η_2 спектральный коэффициент отражения определяется как

$$\tau(\lambda) = \left[\frac{(h_2 - h_1)}{(h_2 + h_1)} \right]^2.$$

Спектральный коэффициент отражения, спектральный коэффициент пропускания и спектральный коэффициент поглощения связаны соотношением $\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$. К лазерным методам контроля относится дифрактометрия. Практическое применение дифракции для измерения и контроля параметров изделия в большинстве случаев основывается на изучении явления дифракции и разработке способов выделения измерительной информации из регистрируемой дифракционной картины (ДК) [5].

При использовании принципа Гюенса – Френеля каждую точку в плоскости отверстия, на котором происходит дифракция, считают источником сферических волн. Для описания дифракционного поля в дальней зоне используют интеграл Френеля – Кирхгофа в приближении Фраунгофера имеющий вид:

$$U(\rho) \approx \frac{j e^{jkR}}{\lambda R} \times \int_s F(\xi, \eta) \times e^{jk \times \sin \theta (\xi \times \cos \varphi + \eta \times \sin \varphi)} d\xi d\eta, \quad (1)$$

где R – расстояние от точки $P(x, y, z)$ до заданной точки $P(\xi, \eta, 0)$ на поверхности интегрирования S (рис. 1);

λ – длина волны излучения;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

$F(\xi, \eta) = A_0(\xi, \eta) \times e^{-j\psi(\xi, \eta)}$ – поле в плоскости отверстия;

$A_0(\xi, \eta)$ – зона распределения амплитуды поля;

$\psi(\xi, \eta)$ – закон распределения фазы поля;

θ, φ – углы дифракции;

ξ, η – координаты в плоскости отверстия;

x, y, z – координаты в плоскости наблюдения.

При этом предлагают [6], что отверстие находится в бесконечно тонком непрозрачном экране, а источник излучения и плоскость наблюдения удалены от экрана на расстояние:

$$H \gg \frac{4a^2}{\lambda}, \quad (2)$$

где a – радиус отверстия.

Одним из типовых объектов дифракции является отверстие или экран круглой формы. Математическое моделирование ДК объекта круглой формы более удобно при использовании полярных координат.

нат ρ, φ^* , которые связаны с декартовыми координатами: $\xi = \rho \times \cos \varphi^*$; $\eta = \rho \times \sin \varphi^*$.

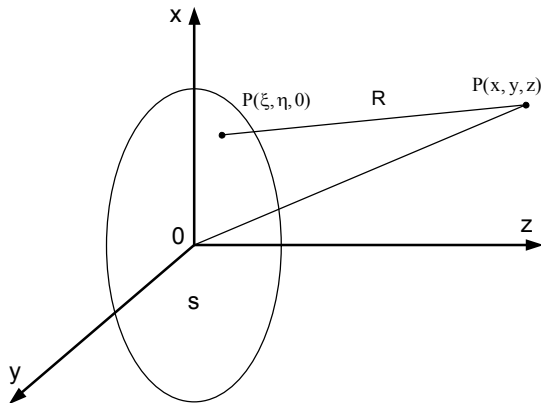


Рис. 1. Схема дифракционной задачи

Обозначая распределения поля по отверстию через $F(\rho, \varphi^*)$ и используя выражение (1), получим выражение, описывающее распределение амплитуды в ДК Фраунгофера:

$$U(\theta, \varphi) = C \int_0^{2\pi} \int_0^a F(\rho, \varphi^*) \times e^{jk\rho \times \sin \theta \times \cos(\varphi - \varphi^*)} \rho d\rho, dk^* \quad (3)$$

где C – постоянная величина.

Если ввести переменные

$$r = \frac{\rho}{a}; \quad u = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta,$$

то функция $F(\rho, \varphi^*)$ переходит в $f(r, \varphi^*)$, а $U(\theta, \varphi)$ в новую функцию $U(u, \varphi)$. Тогда выражение (3) можно записать в виде:

$$U(u, \varphi) = a^2 C \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi^*) \times e^{ju r \cos(\varphi - \varphi^*)} r dr, d\varphi^* \quad (4)$$

Выражение (4) описывает распределение амплитуды в ДК Фраунгофера при заданном распределении амплитуды и фазы поля по отверстию, то есть, при $f(r, \varphi^*) = 1$, выполняя интегрирование по φ^* получим выражение пропорциональное распределению амплитуды поля:

$$U(u) = 2\pi a^2 C \int_0^1 r J_0(u, r) dr \quad (5)$$

где $J_0(u, r)$ – функция Бесселя нулевого порядка,

$$u = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta.$$

Интегрируя по r , получим:

$$U(u) = 2\pi a^2 C \frac{2J_1(u)}{u} \quad (6)$$

Интенсивность излучения в дифракционной картине от круглого отверстия определяется как

$$I(u) = [U(u)]^2 = I_0 \left[\frac{2J_1(u)}{u} \right]^2 \quad (7)$$

где $I_0 = (2\pi a^2 C)^2$ – интенсивность в центре ДК.

Уравнение (7) впервые вывел Г.Б. Эйри и картина дифракции на круглом отверстии известна под названием картина Эйлера [6]. Постоянная C в уравнении (6) сложным образом зависит от характеристик источника излучения и оптического прибора, определяется через величины, связанные с положением источника излучения и точки наблюдения [6].

На практике для моделирования относительно-го распределения интенсивности в ДК удобнее выражать величину C через полную энергию излучения E падающую на отверстие, тогда

$$C = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{S}} \quad (8)$$

где $S = \pi a^2$ – площадь облучаемого отверстия [6].

Интенсивность излучения в центре ДК можно определить из выражения $I_0 = \frac{ES}{\lambda^2} = \frac{E\pi a^2}{\lambda^2}$. Функция (7) имеет главный максимум $I_0 = 1$ при $u = 0$ и с увеличением u осциллирует с монотонным уменьшением амплитуды максимумов по закону u^3 .

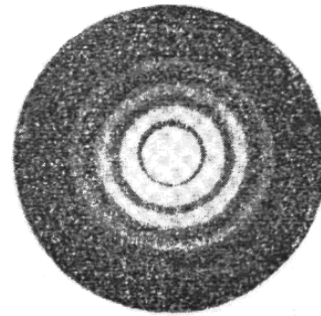


Рис. 2. Дифракционная картина отверстия круглой формы

Дифракционная картина от отверстия круглой формы (рис. 2) имеет вид светлого диска с центром в геометрическом изображении источника излучения, окруженного концентрическими, светлыми и темными кольцами, интенсивность которых уменьшается с увеличением радиуса. Восемьдесят четыре процента полной мощности ДК сосредоточено в ее центре диска [6]. Контрастность изображения концентрических колец зависит от чистоты обработки отверстия. Наибольшее распространение дифрактометрия получила при изменении размеров изделий массового производства, имеющих круглые микроотверстия.

Заключение

Проведенный анализ методов и средств контроля отверстий в деталях из полимерных композитных материалов, позволяет сделать выводы, что оптический метод контроля наиболее подходящий для организации автоматического контроля в заводских условиях. Применение принципов дифрактометрии для измерения дефектов в отверстиях начиная от $\approx 10\lambda$ и более позволит создать математическую модель и качественно с высокой точностью обработать полученный результат.

Литература

1. Лупкин, Б.В. *Научные основы механической обработки композиционных материалов, применяемых в авиационной промышленности [Текст]: автореф. дис. Доктора*

техн. наук: 05.07.04 / Лупкин Борис Владимирович; Украинский НИИ авиационной технологии. – К., 1997. – 61 с.

2. Каневский, И.Н. *Неразрушающие методы контроля [Текст] / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: ДВГТУ, 2007. – 243 с.*

3. ГОСТ 18353-7. *Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов [Текст]. – Взамен ГОСТ 18353-73; введ. с 01.07.1980. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 11 с.*

4. ГОСТ 24521-80. *Контроль неразрушающий оптический. Термины и определения [Текст]. – Введ. с 01.01.1982. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 6 с.*

5. Клюев, В.В. *Неразрушающий контроль [Текст] / В.В. Клюев, Ф.Р. Сосин, С.В. Румянцев. – М.: Машиностроение, 2001. – 616 с.*

6. Борн, М. *Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1970. – 855 с.*

Поступила в редакцию 25.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. ИУС В.М. Левыкин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ОТВОРІВ В ДЕТАЛЯХ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

І.П. Внуков, І.М. Зянчурина, М.М. Сербов

У статті наведені дані щодо використання полімерних композитних матеріалів в авіабудуванні. Проведено аналіз методів неруйнівного контролю якості отворів у деталях з ПКМ. Розглядається оптичний метод контролю, як найбільш гідний для рішення завдання виявлення дефектів наскрізних отворів. Пропонується використовувати принцип Г.Б. Айрі для спостереження дифракційної картини на круглomu отворі. Принцип заснований на аналізі сигналу у фазовому просторі. Інформативним параметром є відношення значень амплітуд непарних або парних похідних вимірювального сигналу, при довільному значенні незалежної поточної змінної.

Ключові слова: полімерні композитні матеріали, отвір, оптичний прилад, контроль, спектральний коефіцієнт, інтенсивність випромінювання, дифракція, дифракційна картина.

QUALITY CONTROL OF HOLES IN DETAILS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

I.P. Vnukov, I.N. Zyanchurina, M.M. Serbov

The article presents data on polymer composite materials use in aircraft building. The analysis of nondestructive quality control methods for holes in parts made from PCM was made. An optical control method is considered as the most suitable for solving the problem of defect detection in through apertures. The principle of G.B. Airy usage was proposed for diffraction pattern observation in circular aperture. The principle is based on an analysis of the signal in the phase space, where informative parameter is the amplitudes ratio of the odd or even derivatives of the measured signal, for an arbitrary current independent variable value.

Key words: polymer composite materials, reach-through hole, an optical instrument, control, spectral ratio, the intensity of radiation, diffraction, diffraction pattern.

Внуков Игорь Павлович – канд. техн. наук, профессор, зав. каф. «Электротехника и мехатроника», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Зянчурина Ирина Николаевна – канд. техн. наук, доцент каф. «Электротехника и мехатроника», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Сербов Михаил Михайлович – аспирант каф. «Электротехника и мехатроника», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: mihailserbov@rambler.ru