



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. ТРОИЦКИЙ, М. Н. КАРМАНОВ, Н. В. ТРОИЦКАЯ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Композиционные материалы (КМ) находят широкое применение во многих отраслях промышленности, особенно в авиакосмической, поскольку при минимальной массе конструкции и изделия из КМ имеют высокую прочность, не подвержены коррозии, более долговечны. Обеспечение высокого качества и надежности изделий из КМ невозможно без применения эффективных современных методов неразрушающего контроля (НК). Рассматриваются особенности применения известных методов НК применительно к КМ. Библиогр. 17, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: композиционные материалы, дефекты, неразрушающий контроль, радиационный контроль, ультразвуковой контроль, томография, термография

Композиционные материалы – это многокомпонентные материалы [1], состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или др. основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и др. По структуре наполнителя КМ подразделяют на волокнистые (армированы волокнами и нитевидными кристаллами), слоистые (армированы пленками, пластинками, слоистыми наполнителями), дисперсноармированные или дисперсноупрочненные (с наполнителем в виде тонкодисперсных частиц). Матрица в КМ обеспечивает монолитность материала, передачу и распределение напряжения в наполнителе, определяет тепло-, влаго-, огне- и химическую стойкость. По природе матричного материала различают полимерные, металлические, углеродные, керамические и др. композиты. Путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, ориентации наполнителя можно получить материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических свойств, таких как прочность, жесткость, уровень рабочих температур. Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам, по усталостной прочности, термостойкости, виброустойчивости, шумопоглощению, ударной вязкости и другим свойствам и в то же время они легче. Созданы композиты с ударной прочностью и ударным модулем упругости в 2...5 раза большими, чем у обычных конструкционных сплавов [1, 2].

Композиционные материалы широко применяются в авиации, ракетно-, автомобиле-, машиностроении, металлургии, в химической и нефтехимической промышленности, медицине, ядерной энергетике, для изготовления спортивного снаряжения [3]. Так,

почти весь фюзеляж Boeing 787 изготовлен из КМ [4]. В настоящее время технологии производства элементов и изделий из КМ развиваются опережающими темпами практически во всех промышленно развитых странах.

Особенность КМ состоит в том, что они не являются монолитным материалом в классическом смысле слова, как, например, металлы. КМ – это фактически конструкция, создаваемая в процессе изготовления изделия. Стоит проблема объективной оценки качества КМ, возможности применения различных физических методов для контроля их качества.

Все дефекты КМ разделены на два больших класса: производственные дефекты, которые появляются в конструкциях либо в процессе их изготовления, либо в процессе изготовления составляющих материалов компонента, и эксплуатационные повреждения, возникающие в процессе эксплуатации. Дефекты могут быть разделены на три группы: микро-, мини- и макродефекты [3].

Микродефекты – это дефекты армирующих волокон (микротрещины, микровключения, микропустоты, отклонения от формы, изломы и др.), дефекты матрицы в промежутках между элементарными волокнами (микропоры, микротрещины, микровключения и др.), дефекты на поверхности раздела волокно–матрица и др.

Минидефекты – это крутка, искривления, разориентация волокон, мелкие риски, царапины, вмятины, обрыв отдельных нитей, жгутов или групп элементарных волокон.

Макродефекты – это трещины, пересекающие слои вглубь (надрезы), раковины, вмятины на поверхности КМ, дефекты ударного характера, растрескивание, расслоения, выпучивания, непрочлеи, воздушные макровключения и др.

В процессе полимеризации композитов при их изготовлении из-за внутренних напряжений, неравномерного распределения связующего и других технологических факторов могут возникать расслоения, отслоения отдельных слоев, рыхлость, трещины и др. Также возможны обрывы нитей, жгутов арматуры и т. п. (рис. 1). Основные типы дефектов, причины возникновения и их влияние на механические характеристики изделий из композитов достаточно подробно изложены в работах [3, 5]. Характерные виды эксплуатационных дефектов, выявляемые при визуальном контроле, показаны на рис. 2 [6].

В отличие от металлических, дефекты КМ в процессе эксплуатации могут быстро увеличиваться, что приводит к снижению надежности конструкции. Через поверхностную трещину матрицы влага проникает внутрь композита и разрывает его, снижает его модуль упругости. Частый дефект в виде расслоения приводит к снижению прочности на сжатие, обрыву волокон, уменьшает усилие на разрыв [7].

КМ – весьма сложные объекты для контроля, так как характеризуются существенной неоднородностью структуры, анизотропией свойств, большим разнообразием типов армирования (однонаправленный, продольно-поперечный, комбинированный и др.), специфическими физическими свойствами: высокими электроизоляционными качествами, низкой теплопроводностью, звукоизоляцией, большим разбросом физико-механических характеристик, малыми значениями плотности ($0,02 \dots 2,0 \text{ г/см}^3$). Для композитов у одних и тех же физических методов дефектоскопии отношение сигнал/шум меньше, чем для однород-

ных структур (металлов). Поэтому для одних и тех же методов НК чувствительность и разрешающая способность применительно к композитам соответственно ниже, чем для металлов [3, 7]. С подобной проблемой сталкиваются при УЗ контроле крупнозернистых структур, таких как чугун и некоторые виды нержавеющей стали.

Большинство видов КМ в зависимости от используемого вида наполнителя относятся к диэлектрикам или плохим проводникам. Практически все КМ являются немагнитными материалами, поэтому многие методы НК, используемые при НК металлов, не подходят для контроля изделий из КМ.

Неэффективны для контроля композитов также высокочастотные УЗ методы, так как УЗ волны с частотой выше $1 \dots 5 \text{ МГц}$ сильно ослабляются и рассеиваются матрицей, волокнами, различными включениями. Это существенно ограничивает диапазон контролируемых толщин КМ [3, 7]. Некоторые виды КМ могут впитывать влагу. В этом случае неприменимы методы НК, которые предполагают смачивание поверхности контролируемых объектов.

Основные методы, которые применяются при НК изделий из КМ, представлены в таблице.

Опишем особенности применения основных методов НК применительно к КМ.

При бесконтактном УЗ контроле для возбуждения волн часто используют мощные лазеры. Эта технология требует определенных мер безопасности при работе персонала и имеет ограниченное применение в полевых условиях.

Среди акустических методов НК, особенно многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), особое место занимают низкочастотные методы, в которых применяется сухой контакт преобразователя с поверхностью контролируемого изделия [8]. Основная область применения этих низкочастотных методов – обнаружение зон нарушения соединений в многослойных клееных конструкциях из ПКМ на основе углеродных, борных, стеклянных, органических волокон (угле-, боро-, стекло-, органопластиков и т. п.). Этими методами УЗК могут быть выявлены дефекты в неметаллических покрытиях зоны нарушения клеевого соединения между покрытием и каркасом объекта.

Основными преимуществами специальных низкочастотных методов контроля перед другими методами НК многослойных клееных конструкций из ПКМ являются:

- отсутствие необходимости смачивания конструкций или погружения их в жидкость, что позволяет проводить контроль деталей и агрегатов из гигроскопичных материалов;

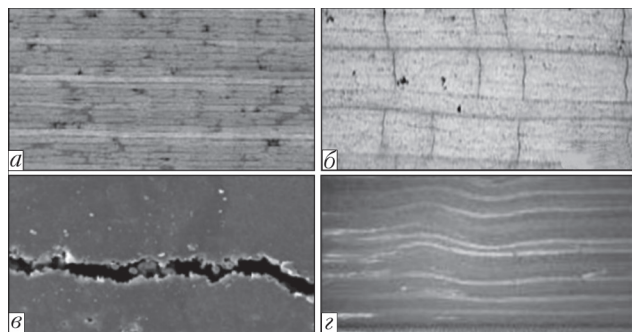


Рис. 1. Дефекты КМ: а – поры (темные); б – трещины; в – расслоение; г – волнистость

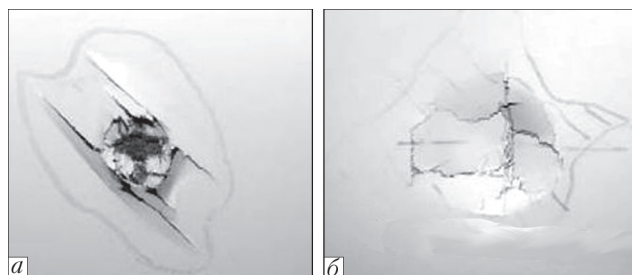


Рис. 2. Примеры внешних повреждений КМ: повреждения поверхности крыла (а) и фюзеляжа (б)



Методы НК контроля изделий из КМ

Область применения	Методы контроля КМ	Информационный параметр	Производительность контроля, м ² /ч (ориентировочно)	Размеры выявляемых дефектов, мм	
				минимальное раскрытие	минимальная протяженность
Нарушение сплошности	Активный тепловой контроль	Температура, тепловое поле	0,6	0,15	10
Трещина (раскрытый дефект)	УЗ контроль поверхностными волнами	Время прохождения УЗ сигнала между приемным и передающим УЗ преобразователями	2,1	0,1	15
Нераскрытые трещины (несплавленные)	Метод УЗ термографии	Акустическое излучение + температурное поле	0,6	0,001	5...7
Различные дефекты и трещины	Радиография Радиоскопия Радиометрия	Интенсивность рентгеновского излучения, преобразованного в оптическое	4...5	0,15	3
Трещины	Радиоволновой	Характеристики излучения	0,5	0,1	15
Инородные включения, несплошности	Рентгенотелевизионный	Сравнение рентгеновского и видеозображений	7	0,2	0,2
Несплошности многослойных конструкций типа тел вращения	Тангенциальное просвечивание	Изменение размеров и глубины расположения	3	0,2	10

– кривизна поверхности контролируемых конструкций обычно не является препятствием для проведения контроля, причем возможен контроль как выпуклых, так и вогнутых деталей;

– возможность контроля деталей, выполненных из анизотропных материалов с различной шероховатостью поверхности.

У негигроскопичных КМ акустический контакт между датчиком и объектом осуществляется через связывающие жидкости. Для больших корпусов УЗ колебания могут передаваться по струе воды.

Очень часто для контроля КМ используется метод свободных колебаний, который основан на анализе характеристик свободных колебаний изделия, вибрирующего после удара [7]. Простейший случай практического применения этого метода – контроль на слух целостности стеклянной или фарфоровой посуды. Этот метод с соответствующей электронной аппаратурой широко используется для определения расслоений и воздушных полостей, непрочности, расслоений, характеризующихся наличием заполненного газом промежутка. Зоны с нарушением сцепления слоев, не имеющие заполненного газом промежутка, низкочастотными акустическими методами не выявляются [9].

Преимущества метода свободных колебаний перед другими низкочастотными акустическими методами НК (импедансным, велосиметрическим, акустико-топографическим и др.) заключаются в возможности [9, 10]:

- обнаружения дефекта на больших глубинах;
- контроля конструкций из материалов с малыми модулями упругости;

– контроля конструкций из материалов с высокими коэффициентами затухания упругих колебаний.

Один из наиболее распространенных и понятных для изготовителей и эксплуатационников ответственных изделий является радиационный контроль [11]. Этот метод может широко применяться при контроле КМ. Радиационные методы контроля композитов особенно эффективны для выявления различных пустот, для выявления посторонних материалов различных включений, для структурных неоднородностей, таких как пропуски, обрывы армирующих элементов.

Однако также как и в случае металлов, дефекты, которые не приводят к значительным изменениям общей толщины КМ в направлении просвечивания (трещины, расслоения, ориентированные перпендикулярно пучка излучению) не могут быть обнаружены при рентгеновском контроле.

Для этих материалов может использоваться капиллярно-радиационный метод [3], при котором контрастность элементов просвечиваемого объекта повышается введением жидкого рентгеноконтрастного пенетранта. Для этих целей выпускается достаточно широкий спектр органических и неорганических пенетрантов с высоким коэффициентом поглощения рентгеновского излучения. Наиболее широко используемым из них является йодид цинка, который имеет высокую радиационную непрозрачность по сравнению с другими веществами [7]. Рентгеноконтрастный пенетрант наносится на поверхность контролируемого объекта, выдерживается 30 мин и затем удаляется с поверхности абсорбиру-

ющей тканью. В этом случае рентгеновское излучение, проходящее через несплошность, заполненную таким пенетрантом, достаточно сильно поглощается, что позволяет обнаруживать повреждения, которые невозможно выявить обычным просвечиванием. Естественно, применение этого метода предполагает наличие поверхностных или сквозных повреждений, обеспечивающих капиллярными силами доступ пенетранта в полости расслоений или трещин.

В радиационной дефектоскопии высшим достижением последних лет является отказ от промежуточных носителей информации (пленок, многоразовых гибких пластин «ФОСФОМАТИК» и т. п.) и использование цифрового рентгенотелевизионного контроля [11, 12]. Здесь с помощью рентгенооптических преобразователей прошедшее через объект рентгеновское излучение преобразуется в оптическое, которое методами телевидения выводится на экран ТВ монитора. Для этого используются сравнительно недорогие рентгенооптические сцинтилляционные кристаллы, оптическое изображение с которых считывается с помощью высокочувствительных малогабаритных ПЗС камер. Рентгеновские ПЗС матрицы [12, 13] широко используются в флэш-радиографии (рис. 3). Линейные размеры анализируемого изображения – до 40 мм. Дискретный формат матрицы составляет 1300×1700 пикселей. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой здесь используется 12...14 разрядный ЦАП. Такие матрицы отличаются высокой разрешающей способностью (20...28 пар линий/мм), что в два раза выше, чем для рентгеновской пленки и в 3...4 раза выше, чем для сцинтилляционных рентгенооптических преобразователей. Выпускаются также матрицы разных размеров: от миниатюрных для стоматологии и очень больших размеров для промышленного НК.

Цифровая радиоскопия с подключением компьютера (ноутбука) обеспечивает мгновенное получение цифрового рентгеновского изображения, улучшение визуального восприятия изобра-

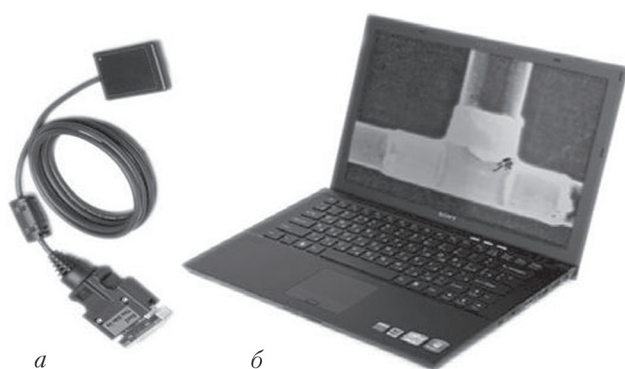


Рис. 3. Флэш-радиография с рентгеновской ПЗС матрицей фирмы «Hamamatsu Photonics»: а – ПЗС сенсор; б – рентгеновское изображение композитного тройника на экране ноутбука

жений, измерение геометрических параметров контролируемых объектов по их изображениям. Встроенная база данных обеспечивает ввод, хранение, выбор и отображение изображения, вывод результатов контроля, обеспечивает защищенный доступ, а также передачу данных по локальным и внешним сетям (интернет). Этот комплекс возможностей на основе рентгенотелевизионного контроля называется флэш-радиографией [12].

Возможности применения цифровой радиоскопии для анализа качества композитов показаны в работе [14]. На исходном цифровом рентгеновском изображении волокна корда имеют низкую контрастность, ширина волокон составляет всего несколько пикселей (рис. 4, а). В этом случае достаточно сложно исследовать структуру волокон. Предлагается набор специализированных цифровых фильтров обработки изображений, обеспечивающих существенное улучшение рентгеновских изображений волокон (рис. 4, б). Предусмотрена возможность выделения изображений кордов, ориентированных в заданном направлении (рис. 4, в, г).

Если позволяет геометрия объекта, то очень эффективно использование компьютерной томографии, которая применяется практически для любых материалов и объектов. Эта достаточно дорогостоящая технология предоставляет уникальные возможности для объемных исследований внутренней структуры. Ее развитием стала компьютерная микрофотография, обеспечивающая разрешающую способность до нескольких мкм. Это позволяет выявлять отдельные углеродные волокна и их обрывы в углепластиках [15]. Пример выявления обрыва кордов показан на рис. 5.

Практическое применение томографии для диагностики композитов усложняется большими габаритами контролируемых изделий, для которых необходимо получить 360...720 снимков при круговом

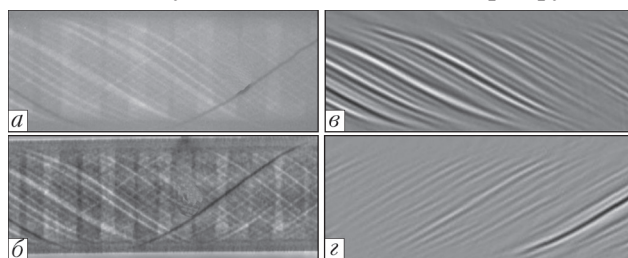


Рис. 4. Рентгеновское изображение образца КМ: а – исходное; б – после цифрового контрастирования; в, г – выделение изображений волокон корда, ориентированных в заданном направлении

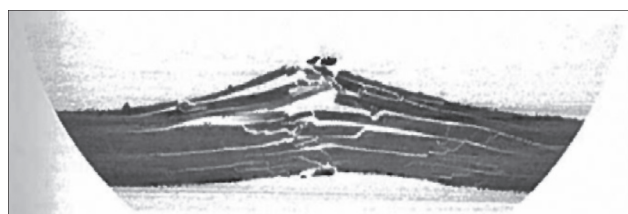


Рис. 5. Обрыв корда внутри композита на томограмме

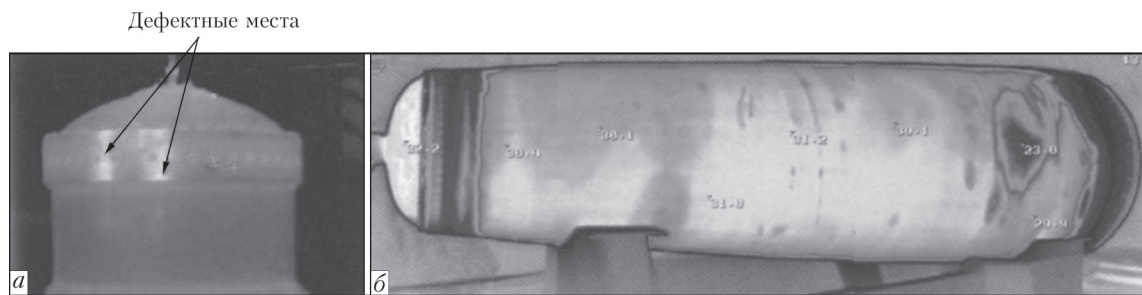


Рис. 6. Термограмма изделия с дефектами типа нарушения герметичности (а) и нарушение сплошности (б)

их вращения на 360°. В случае, когда имеется возможность получить только 6, 12, 24 проекции, то реализуется малоракурсная томография, когда недостающие экспозиции получают виртуально. Но в этом случае погрешность реконструкции геометрических параметров резко возрастает [16].

Термография – это одна из перспективных направлений НК конструкций из КМ [5, 7, 17]. В основу этого метода положен анализ признаков наличия дефектов по изменениям температурных полей с использованием инфракрасной техники (тепловизор или пирометр). Термография фиксирует изменения температуры на уровне 0,01 °С. Поэтому даже при механическом нагружении фиксируются места концентрации энергии, где может происходить пластическая деформация с выделением тепла. Зафиксировав температурное поле на поверхности, можно определить местоположение концентратора энергии относительно поверхности изделия. Решив обратную задачу нестационарной теплопроводности, можно определить местоположение и размер дефекта [5].

На рис. 6 [5] показаны примеры распределения тепловых полей (термограммы) объектов из КМ.

Выводы

Для КМ исследование их качества физическими методами НК намного важнее, чем для металлических конструкций. НК композиционных материалов ввиду их специфических свойств требует особого подхода при использовании традиционных методов НК. Наиболее эффективна для этих целей флэш-радиография.

1. *Электронный справочник. Химическая энциклопедия.* Web: <http://www.chemport.ru>
2. *Союз производителей композитов.* Web: <http://www.uncm.ru>

Composite materials have recently become ever wider accepted in many industries, particularly in aerospace, as at minimum weight, CM structures and products have high strength, are not prone to corrosion, and have longer service life. Ensuring high quality and reliability of CM products is impossible without application of effective modern NDT techniques. In this work, features of application of known NDT methods to CM are considered. 17 References, 1 Table, 6 Figures.

Key words: composite material, defects, nondestructive testing, radiation testing, ultrasonic testing, tomography, thermography

Поступила в редакцию
23.06.2014

3. *Воробей В. В., Маркин В. Б.* Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.
4. *Корпорация «Olympus».* Web: <http://www.olympus-ims.com/>
5. *Барынин В. А., Будадин О. Н., Кульков А. А.* Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. – М.: Спектр, 2013. – 242 с.
6. *Allen J. Fawcett (ATF/DER), Gary D. Oakes (ATF).* Boeing Composite Airframe Damage Tolerance and Service Experience. Boeing Commercial Airplanes, 787 Program.
7. *Kapadia A.* Non Destructive Testing of Composite Materials. Best Practice Guide TWI Ltd National Composites Network.
8. *Мурашов В. В.* Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2011. – № 10. – С. 16–23.
9. *Мурашов В. В.* Контроль клееных конструкций акустическим методом свободных колебаний // Там же. – 2012. – № 4. – С. 40–44.
10. *Бакунов А. С., Мурашов В. В., Сысоев А. М.* Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 6. – С. 72–74.
11. *Троицкий В. А.* Пособие по радиографии сварных соединений. – Киев: Феникс, 2008. – 312 с.
12. *Троицкий В. А.* Флэш-радиография // Территория NDT. – 2013. – № 4. – С. 44–49.
13. *Hamamatsu Photonics.* Web: <http://www.hamamatsu.com>
14. *Tschumperle D., Fadili J.* Wire Structure Pattern Extraction and Tracking From X-Ray Images of composite Mechanisms. In proceeding of: 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2006), 17–22 June 2006, New York, USA.
15. *Analysis of inner fracture surfaces in CFRP based on μ-CT image / R. Stoessel, O. Wirjadi, M. Godehardt et al.* // Conference on Industrial Computed Tomography (ICT). – 19–21 Sept., 2012, Austria.
16. *Филонин О. В.* Малоракурсная компьютерная томография в физическом эксперименте. Ч. 1. Web: <http://www.science63.ru/nauka/166-malorakursnaya-kompyuternaya-tomografiya-v-fizicheskom-eksperimente.html>
17. *Троицкий В. А., Глуховский В. Ю.* Термографический контроль как метод, предшествующий стандартным видам технической диагностики // Междунар. конф. и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: Матер. конф. – Гурзуф, 2011. – С. 61–66.