

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кудрявцев В.В., Бочкарев С.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь*

Ключевые слова: композит, неразрушающий контроль, ультразвуковая диагностика.

Аннотация. Показаны перспективные методы неразрушающего контроля полимерных композитных материалов. Традиционные способы не позволяют в полной мере решить задачу гарантирования качества контроля композиционных материалов, в связи с этим предлагается совместное использование наряду с наиболее распространенными методами неразрушающего контроля и современные в процессе диагностики КМ, таких как визуальное тестирование (VT или VI), ультразвуковое тестирование (UT), термография, радиографическое тестирование (RT), электромагнитное тестирование (ET), акустическое излучение (AE) и ширография (спекл-интерферометрия – метод измерения и тестирования, аналогичный голографической интерферометрии), вихретоковый метод, акустически - эмиссионный метод (АЭ), магнитный метод, метод ультразвуковой диагностики и другие.

ANALYSIS OF PROMISING METHODS OF QUALITY CONTROL OF PRODUCTS MADE OF COMPOSITE MATERIALS

Kudryavcev V.V., Bochkarev S.V.

Perm National Research Polytechnic University, Perm

Keywords: composite, nondestructive control, ultrasound diagnostics.

Abstract. Promising methods of non-destructive testing of polymer composite materials are shown. Traditional methods do not fully solve the problem of guaranteeing the quality of control of composite materials, in this regard, it is proposed to use together with the most common methods of non-destructive testing and modern in the process of KM diagnostics, such as visual testing (VT or VI), ultrasound testing (UT), thermography, radiographic testing (RT), electromagnetic testing (ET), acoustic radiation (AE) and shirography (speckle interferometry – measurement and testing method similar to holographic interferometry), eddy current method, acoustic emission method (AE), magnetic method, ultra-jet diagnostics method and others.

Широкое применение полимерные композиционные материалы в авиации, космонавтике обусловлено необходимостью обеспечения в силовых конструкциях высокой эксплуатационной надежности и долговечности.

Помимо традиционных отраслей применения (авиация, космонавтика, судостроение) весьма актуально их использование в строительной индустрии, энергетике, машиностроении, конструкциях дорожной инфраструктуры (в частности, мостовые сооружения) и других отраслях.

Требования оптимального проектирования, сокращения времени и материальных затрат на экспериментальную отработку определили значительный интерес к совершенствованию методов прогнозирования деформационных и прочностных свойств композитов. Снижение их механических свойств

обусловлено, в частности, с возможностью появления пор (пустот) при создании композитных конструкций [1-3].

В [4] указывается, что композитные материалы представляют серьезную проблему для исследователей, поскольку эти материалы могут вызывать несколько типов повреждений в процессе эксплуатации, таких как расслаивание, пустоты, пористость, растрескивание матрицы, разрыв волокна и т.д.

Распространенные способы не позволяют в полной мере решить задачу гарантирования качества контроля КМ, в связи с этим возникла необходимость совместного использования наряду с традиционными методами и современные в процессе диагностики КМ с помощью наиболее распространенных методов неразрушающего контроля [5-11], таких как визуальное тестирование (VT или VI), ультразвуковое тестирование (UT), термография, радиографическое тестирование (RT), электромагнитное тестирование (ЕТ), акустическое излучение (АЕ) и широкография (спекл-интерферометрия – метод измерения и тестирования, аналогичный голографической интерферометрии), вихретоковый метод, акустически - эмиссионный метод (АЭ), магнитный метод, метод ультразвуковой диагностики и другие.

Показано, что для обеспечения высокой надежности конструкций ответственного назначения целесообразно применение, как методов дефектоскопии, так и неразрушающих методов определения состава и физико-механических свойств ПКМ [12, 13].

Влияние пустот [14] на механическую прочность и затухание ультразвука было исследовано на ряде многослойных композитных систем, армированных графитовым волокном и из препрега из тканой ткани, содержащих широкий диапазон пустот. Показано, прочность зависит не только от содержания пустот, но и от их геометрии.

Так в работе [15] установлены связи между данными ультразвукового контроля, прочностными характеристиками и содержанием пористости в образцах из полимерных композиционных материалов на основе углеродной ткани ЭЛУР-П, а в [16] приведены результаты исследований пористости образцов из углепластика.

Одновременно показана связь разрушения матрицы, порванных волокон, расслоений монослоя, пустот с активной локацией сигналов АЭ при исследовании образцов из углепластика Т700 на ранней стадии развития дефектов при статическом нагружении.

Используя метод лазерно-ультразвуковой дефектоскопии в [17] определялся уровень пористости ПКМ на примере образцов и стрингерной панели. Полученные результаты сравнивались с данными рентгеновской томографии.

В [18] предложена методика выявления неоднородностей, образующихся в процессе производства композитных конструкций, с помощью лазерно-ультразвукового метода. Показан способ определения локального объемного содержания матрицы и наполнителя в углепластиковых конструкциях.

Авторы [19, 20] показали возможности лазерно-акустического способа ультразвукового контроля при диагностике ПКМ. Предложено оценивать степень

накопления микрповреждений в ПКМ по их прочностным характеристикам, определяемым неразрушающим методом по комплексному параметру, включающему значения скорости распространения импульса ультразвуковых колебаний (УЗК) в плоскости изделия и значения частоты основной составляющей спектра импульса УЗК, прошедшего изделие по толщине в прямом и обратном направлениях.

Как альтернатива ультразвуковому методу в [21] использованы голографические подповерхностные радиолокаторы для контроля качества КМ.

В [22] предлагается усовершенствованная методология ускоренного тестирования (АТМ-II, *accelerated testing methodology*) для долгосрочного прогнозирования срока службы ламинатов из углепластика, подвергающихся действительной нагрузке. Долговременная усталостная прочность ламината CFRP при фактической нагрузке сформулирована на основе трех условий: коэффициента ползучести, температурно-временного сдвига, модифицированного принципа время-температура. Применимость АТМ-II подтверждается прогнозированием долговременной усталостной прочности ламинатов из углепластика для морского использования.

В [23] использовались оптический, ультразвуковой и индукционный устройства тепловой стимуляции для активного контроля дефектов различного типа в углепластиковой панели сложной формы.

При одновременном тепловом и статическом нагружении образцов из препрега Torayca T800 исследования проводились с использованием метода акустической эмиссии [24].

В [25] показана возможность неразрушающей оценки углеродных композитов совместно инфракрасной термографии с ультразвуком.

В [26] использовался волоконно-оптический лазерный ультразвуковой сканер для получения изображений с высоким разрешением при исследовании углепластика. Однако недостатком тепловидения является сложность интерпретации полученных результатов.

К желательным бесконтактным технологиям относятся лазерная широгрфия (*laser shearography*) и голографическая интроскопия. Эти способы можно использовать для исследования внутреннего напряжения инспектируемого материала; однако их результаты искажаются из-за зависимости изображения от шумов, вызванных вибрацией.

В последние десятилетия широко применяется для волокнистых и текстильных композитов микро-компьютерная томография (μ СТ) – благодаря быстрому развитию оборудования μ СТ. Используя метод обработки трёхмерных изображений можно получать информацию о локальных направлениях волокон, используя так называемый «тензор структуры». Эта модель может служить основой для различных видов анализа материала: внутренней геометрии, описания дефектов, проницаемости, микромеханики КМ [27, 28].

В последнее время в литературе для диагностики предлагается выделить метод ультразвуковой диагностики (УСД) [29-34]. Применение ультразвуковой диагностики материалов предлагается использовать для экспресс-диагностирования материалов [35], для выбора информативных признаков для

решения конкретных задач диагностики и технологических режимов ультразвукового воздействия при решении задач технологической подготовки производства изделий ракетно-космической техники [36].

Таким образом, технология УСД, используемая при изучении проблем качества композитных материалов, дополняет известные методы неразрушающего контроля, диагностики и испытаний изделий.

Кроме того, применение технологии УСД на ранних этапах жизненного цикла изделий позволит в значительной мере обеспечить функциональную адекватность ресурсно-прочностных расчетов при их проектировании путем экспресс-определения необходимых параметров ФМС при конструкторско-технологической обработке изделия.

Для оценки качества КМ предлагается применять визуальный (VT или VI), ультразвуковой (UT), радиографический (RT) контроль, электромагнитное тестирование (ET), термографию, акустического излучения (AE) и широкоугольную (спекл-интерферометрия – метод измерения и тестирования, аналогичный голографической интерферометрии), вихретоковой, акустико - эмиссионный, магнитный методы, метод ультразвуковой диагностики и другие.

Для выявления разломов и расслоений предлагается использовать улучшенные способы, такие как тепловидение и активную термографию.

Для получения информации о локальных направлениях волокон предлагается использовать микро-компьютерную томографию (μ СТ).

Список литературы

1. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники (Обзор) // Конструкции из композиционных материалов. – 2011. – №4. – С. 44-59.
2. Каблов Е. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. – 2015. – №1. – С. 36-39.
3. Панскова О.А. Современные методы диагностики и контроля качества материалов и изделий // Приоритеты и научное обеспечение технологического прогресса. Сборник статей по итогам Международной научно - практической конференции. – Уфа: ООО "Агентство международных исследований", 2017. – С. 51-53.
4. Datia D., Venkatesh C.V., Kishore N.N. Application of multi dimensional cluster analysis in identification of defects in fibre composites // Nondestr, Test, Eval. – 1995. – Vol. 12. – P. 197-210.
5. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials // Conference: XV Portuguese Conference on Fracture, PCF 2016, 10-12 February 2016, Paço de Arcos, Portugal, Vol. 1.
6. Мурашов В.В. Контроль качества изделий из полимерных композиционных материалов акустическими методами // Контроль. Диагностика. – 2016. – №12. – С. 16-29.
7. Teti R. Ultrasonic identification and measurement of defects in composite material laminates. CIRP Annals. – 1990. – No.39(1). – P. 527-530.
8. Барсук В.Е., Анохин Г.Г., Степанова Л.Н. и др. Прочностные испытания элементов авиационных конструкций из углепластика с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии // Полет. – 2016. – № 7. – С. 53-60.
9. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Чернова В.В. Вейвлет-анализ структуры сигналов акустической эмиссии при прочностных испытаниях образцов из углепластика // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 7. – С. 54-62.
10. Степанова Л.Н., Анохин Г.Г., Чернова В.В. Использование метода акустической эмиссии при циклических испытаниях образцов из углепластика с разными типами укладки монослоев // Контроль. Диагностика. – 2016. – №2. – С. 66-74.

11. Степанова Л.Н., Батаев В.А., Чернова В.В. Исследование разрушения образцов из углепластика при статическом нагружении с использованием методов акустической эмиссии и фрактографии // Дефектоскопия. – 2017. – №6. – С. 26-33.
12. Потапов А.И., Сяськов В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий: Научное, методическое и справочное пособие. – СПб.: Гуманистика, 2009. – 1100с.
13. Aymerich F, Meili S. Ultrasonic evaluation of matrix damage in impacted composite laminates // Composites. Part B: Engineering. – 2000. – №31(1). – P. 1-6.
14. Jeong H. Effects of Voids on the Mechanical Strength and Ultrasonic Attenuation of Laminated Composites// Journal of Composite Materials. – 1997. – Vol.31.– №3.– P. 276-292.
15. Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А., Генералов А.С., Славин А.В. Влияние морфологии пор на ультразвуковой контроль пористости в углепластике эхоимпульсным методом // Контроль. Диагностика. – 2018. – №8. – С. 22-29.
16. Батаев В.А., Степанова Л.Н., Лапердина Н.А., Чернова В.В. Акустико-эмиссионный контроль ранней стадии развития дефектов при статическом нагружении образцов из углепластика // Контроль. Диагностика. – 2018. – №8. – С. 14-20.
17. Соколовская Ю.Г., Карабутов А.А. Лазерно-ультразвуковая дефектоскопия конструкций из мультиаксиальных полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. – 2018. – №1. – С.56-61.
18. Соколовская Ю.Г., Жаринов А.Н., Карабутов А.А. Применение лазерно-ультразвукового метода для контроля неоднородностей распределения полимерной матрицы в углепластиковых конструкциях // Контроль. Диагностика. – 2018. – №9. – С. 48-53.
19. Мурашов В.В. Методология исследования физико-механических свойств и состава полимерных композиционных материалов методами технической диагностики. Часть 1 // Контроль. Диагностика. – 2018. – №6. – С. 16-22.
20. Мурашов В.В. Методология исследования физико-механических свойств и состава полимерных композиционных материалов методами технической диагностики. Часть 2 // Контроль. Диагностика. – 2018. – №7. – С. 20-29.
21. Ивашов С.И., Чиж М.А., Журавлев А.В., Разевиг В.В., Мильяченко А.А., Кологов А.В. Выбор частоты при СВЧ-диагностике композиционных изделий с помощью голографических радиолокаторов // Контроль. Диагностика. – 2017. – №1. – С. 16-23.
22. Parvesh Anti, Sarbjit Singh, Alakesh Manna. Glass fibers/SiCp reinforced epoxy composites: Effect of environmental conditions // Journal of Composite Materials. – July 2017. – Vol. 52(9). – P. 1253-1264.
23. 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. – 2018. – №12. – С. 20-27.
24. Степанова Л.Н., Чернова В.В., Кабанов С.И. Анализ модового состава сигналов акустической эмиссии при одновременном тепловом и статическом нагружении образцов из углепластика T800 // Контроль. Диагностика. – 2018. – №11. – С. 4-13.
25. Pelivanov I., Ambroziński L., Khomenko A., Koricho E.G., Cloud G.L., Haq M. et al. High resolution imaging of impacted CFRP composites with a fiber-optic laser-ultrasound scanner // Photoacoustics. – 2016. – No.4(2). – P. 55-64.
26. Sadighi M., Tooski M.Y., Alderliesten R.C. An experimental study on the low velocity impact resistance of fibre metal laminates under successive impacts with reduced energies // Aerospace Science and Technology. – 2017. – No.67. – P. 54-61.
27. Дегтярь В.Г., Калашников С.Т., Кречка Г.А., Савельев В.Н. Углерод-углеродные композиционные материалы для изделий ракетно-космической техники//Конструкции из композиционных материалов. – 2013. – №2. – С. 12-17.
28. Кондратенко А.Н., Голубкова Т.А. Полимерные композиционные материалы в изделиях зарубежной ракетно-космической техники (Обзор) // Конструкции из композиционных материалов. – 2009. – №2.– С. 24-35.

29. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Троицкая Н.В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – №3. – С. 29-33.
30. Галиновский А.Л., Сальников С.К., Сайфутдинов Р.Р., Чорный И.Н., Новожилов С.А., Медведева А.К. Ультразвуковая технология обработки и диагностики керамических и композиционных материалов // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Тр. XXXIV академических чтений по космонавтике. – М.: Комиссия РАН, 2010. – С. 558-559.
31. Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Моисеев В.А. Техничко-экономическое обоснование выполнения контрольно-диагностических операций // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 1. – С. 133-139.
32. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Сысоев Н.Н., Федянин А.А., Филимонов А.С. Ультразвуковая экспресс-диагностика анизотропии поверхностного слоя материалов и изделий ракетно-космической техники // Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружения: сборник научных статей, посвящ. 80-летию фак. "Специальное машиностроение" МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – №617. – С. 297-308.
33. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Сысоев Н.Н., Федянин А.А., Филимонов А.С. Ультразвуковая экспресс-диагностика анизотропии поверхностного слоя материалов и изделий ракетно-космической техники // Инженерный журнал: Наука и инновации. – 2018. – №6(78). – С. 4.
34. Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий в ракетно-космической технике // Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружений: сб. ст. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – № 606. – С. 272-283.
35. Ковалев А.А., Тищенко Л.А., Савенков Ф.А. К вопросу о разработке модели ультразвуковой экспресс-диагностики материалов // Наука и образование. – 2013. – №10. – С.23-34.
36. Абашин М.И., Галиновский А.Л., Сгибнев А.В. Технологическое обеспечение процедуры ускоренного определения параметров качества поверхностного слоя материала изделий ракетно-космической техники // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – №3. – С. 73-79.

Сведения об авторах:

Кудрявцев Владимир Владимирович – аспирант;
Бочкарев Сергей Васильевич – д.т.н., профессор.