

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРИСТОСТИ МОНОЛИТНЫХ ЗОН ДЕТАЛЕЙ И АГРЕГАТОВ САМОЛЕТА, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ИЗ ПКМ, С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭХОИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА

© 2019 г. А.С. Бойчук^{1,*}, И.А. Диков^{1,**}, В.Ю. Чертищев^{1,***}, А.С. Генералов^{1,****}

¹ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Россия 105005 Москва, ул. Радио, 17

E-mail: *bas140185@rambler.ru; **dikov.viam@mail.ru; ***chertishchevv@mail.ru; ****generalovas.86@mail.ru

Поступила в редакцию 14.08.2018; после доработки 14.09.2018;
принята к публикации 21.09.2018

В настоящее время при контроле деталей и агрегатов самолета, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов, одновременно с основным контролем на поиск дефектов необходима также оценка пористости по всей площади деталей. В результате исследований разработаны технологии контроля пористости деталей и агрегатов крыла самолета, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов, ультразвуковым эхоимпульсным методом. Особенностью этих технологий является то, что сбор данных для дальнейшей обработки и получения расчетных значений пористости осуществляется одновременно с основным контролем без увеличения его трудоемкости. Приведены построенные корреляционные зависимости между величиной пористости и амплитудой донного эхосигнала в углепластике, изготовленного методом автоклавного формования и инфузии, а также результаты оценки погрешностей определения пористости по разработанным технологиям, сформулированы основные причины их возникновения.

Ключевые слова: углепластик, полимерные композиционные материалы, ультразвуковой контроль, ультразвуковые колебания, пористость, поры.

DOI:10.1134/S01303082190100019

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в авиастроении для снижения массы конструкции и повышения экономической эффективности все более широкое применение находят полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1—4]. В соответствии с имеющимся зарубежным опытом и отечественными разработками их применение целесообразно при создании как средненагруженных деталей и агрегатов планера, так и высоконагруженных.

При неразрушающем контроле деталей и элементов конструкции из ПКМ, помимо задачи выявления отдельных дефектов [5—7], влияющих на эксплуатационные свойства конструкции в целом, важнейшими задачами являются выявление зон с повышенной пористостью и оценка величины объемной доли пор в этих зонах. За рубежом фирмы Airbus, Boeing и Bombardier при изготовлении деталей из ПКМ сами проводят и требуют от поставщиков деталей проводить при ультразвуковом контроле оценку пористости материала.

Известно, что прочностные свойства ПКМ существенно снижаются при наличии микродефектов в материале, таких как пористость [8—10]. Так, при значении объемной доли пор более 3–4 % прочность при межслоевом сдвиге снижается в 2 раза, при пористости, равной 5 %, внутрислоевая прочность при сдвиге снижается на 35 % (от 0,063 до 0,042 МПа), а при продольном сжатии — на 30 % (от 1,12 до 0,773 МПа) [10]. Поэтому большинство производителей ограничивает допустимую величину объемной доли пор в изготавливаемых деталях и элементах конструкций. Airbus допускает объемную долю пор в изделиях из ПКМ не более 2,5 % [11]. Согласно стандарту ASTM (США), изделие с пористостью более 2 % должно быть забраковано [10].

В [12] установлено, что для определения пористости в ПКМ с помощью ультразвуковых неразрушающих методов контроля существует несколько различных подходов, в частности с использованием корреляционных зависимостей, построенных предварительно на образцах с известной пористостью. В качестве информативного параметра, коррелирующего с величиной пористости, в основном выступают несколько ультразвуковых параметров: затухание ультразвука, скорость ультразвуковых волн, характеристики шумов обратного рассеяния.

В ходе ранее проведенных работ, а также на основе литературных данных [8] было определено, что, кроме пористости в материале изделия, на корреляционные зависимости влияют параметры используемого материала, такие как толщина монослоя и тканая форма наполнителя, схема укладки, наличие покрытия на поверхностях изделия (лакокрасочного, молниезащитного), а также параметры применяемого оборудования.

Основная задача при определении пористости в изделиях из ПКМ, в особенности крупногабаритных, в процессе их производства заключается в том, чтобы оценивать пористость по всей пло-

щади контролируемой детали и при этом не увеличивать трудоемкость процесса основного контроля изделия на наличие макродефектов, то есть параллельно основному контролю с использованием одного и того же оборудования.

Для решения данной задачи в ФГУП «ВИАМ» совместно с предприятиями-изготовителями деталей и агрегатов из ПКМ были проведены исследования. Работы выполнялись в рамках реализации комплексного научного направления 2.3 «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным для возможности оценивания пористости в ПКМ ультразвуковым методом является установление корреляционных связей между ультразвуковыми параметрами и величиной объемной доли пористости. Для этого методом автоклавного формования и инфузии были изготовлены специальные конструктивноподобные образцы (КПО), имитирующие типовые конструкции деталей и агрегатов крыла самолета, изготавливаемые из ПКМ (рис. 1). Образцы были изготовлены с различной величиной объемной доли пор.

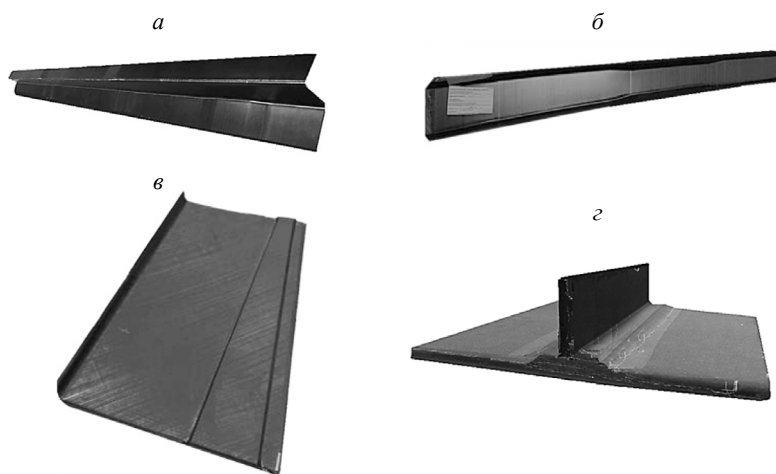


Рис. 1. Конструктивноподобные образцы, изготовленные из углепластика методом:
а, б, в — автоклавного формования; г — вакуумной инфузии.

Для получения объемной доли пор в КПО в диапазоне от 0 до 4 % были выбраны следующие способы [14]: формование без внешнего давления и при сниженном давлении под вакуумным мешком (при автоклавном формовании); путем введения в связующее различного количества порообразователя (при инфузионном формовании).

Для реализации этих способов были подобраны специальные режимы формования. Получение нулевой и близкой к нулю пористости проводилось путем формования по штатным режимам (без каких-либо нарушений).

Для ультразвуковых исследований применяли дефектоскоп OmniScan MX с двухкоординатным сканером Glider, автоматизированные установки для проведения ультразвукового контроля, фазированные решетки (ФР) с рабочими частотами 3,5 и 5 МГц и одноэлементные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) с рабочими частотами 1; 2,25 и 5 МГц.

В процессе исследований КПО результаты контроля были записаны в виде С-сканов по амплитуде донного эхосигнала для последующего их анализа.

В качестве информативных параметров, коррелирующих с пористостью, были рассмотрены такие, как скорость ультразвуковых волн в материале образцов, коэффициент затухания ультразвука в материале, центральная частота донного сигнала, амплитуда донного сигнала.

Для определения фактического содержания пористости в образцах из углепластика, а также анализа объемного содержания пор была выбрана рентгеновская микрофотография, которая проводилась с использованием системы промышленной рентгеновской микрофотографии Phoenix V|tome|X S 240, для полученных томограмм образцов — нанофокусная трубка. Съемка проводилась при ускоряющем напряжении 90—100 кВ и токе 140—150 мА, разрешение — 17-18 мкм

(максимальный линейный размер одного вокселя — трехмерного пикселя изображения). Для проведения рентгеновской микротомографии каждый образец фиксировался в держателе и помещался на вращающийся столик камеры рентгеновского компьютерного томографа на оптимальном расстоянии от источника рентгеновского излучения. Снимки 2D-срезов получены в программном обеспечении (ПО) VG Studio MAX 2.1 (рис. 2). Общая пористость образцов рассчитывалась с помощью ПО Avizo Fire 7.1. Для исключения дефектов съемки в расчетах использовались элементы объема с размерами более одного вокселя (17-18 мкм).

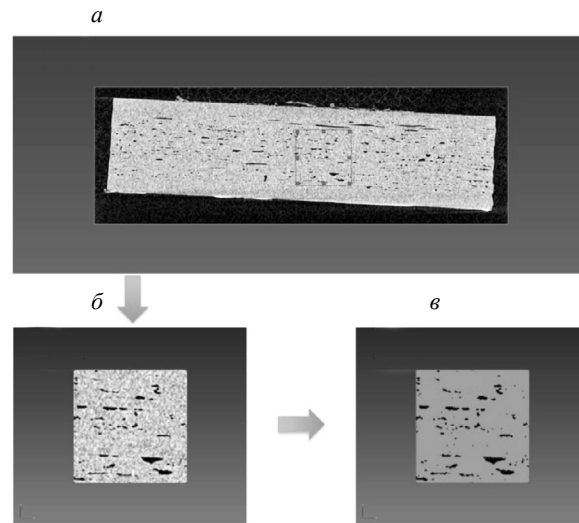


Рис. 2. Фрагмент сечения томограммы:
а, б — исходное изображение; в — изображение после сегментации.

В результате микротомографии для каждого образца были получены томограмма, распределение пор по объему и общие характеристики пористости.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

В настоящий момент на предприятиях-изготовителях деталей и агрегатов самолета, изготавливаемых из ПКМ, контроль на наличие макродефектов осуществляется на автоматизированных установках с использованием преобразователей с рабочими частотами от 1 до 5 МГц.

Выбор частоты преобразователей для определения пористости проводился с использованием дефектоскопа OmniScan MX и двухкоординатного сканера Glider, позволяющих реализовать настройки, аналогичные настройкам автоматизированных установок. Для проведения исследований были использованы ФР с рабочими частотами 3,5 и 5 МГц и одноэлементные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) с рабочими частотами 2,25 и 5 МГц. Путем предварительного сканирования одноэлементными ПЭП образцов из углепластика, изготовленных методом автоклавного формования, а также путем сканирования с использованием ФР образцов, изготовленных методом вакуумной инфузии, были выбраны зоны условно «беспористые» и «пористые». За условно «беспористые» были приняты зоны с максимальной величиной донного эхосигнала, за условно «пористые» — зоны, в которых наблюдалось сильное снижение донного эхосигнала (более чем на 6 дБ). Для каждой из выбранных зон были построены С-сканы по донному эхосигналу.

Таблица 1

Результаты определения средних значений величин донных эхосигналов и их СКО в исследуемых образцах из углепластика

Тип преобразователя	Одноэлементный ПЭП		ФР	
Частота, МГц	2,25	5	3,5	5
Среднее значение амплитуды донного эхосигнала в условно «беспористой» зоне, % (СКО)	73 (1,5)	143 (4)	151 (13)	138 (15)
Среднее значение амплитуды донного эхосигнала в условно «пористой» зоне, % (СКО)	14,4 (2,4)	6,6 (1,9)	13,9 (3,9)	8,5 (2)

С помощью специализированного программного обеспечения TomoView Analysis на персональном компьютере проводили статистический анализ каждого С-скана и определяли средние значения величин донных эхосигналов и их среднеквадратическое отклонение (СКО) (табл. 1).

Видно, что одноэлементные ПЭП с частотой 5 МГц более чувствительны к наличию пористости в углепластике, чем ПЭП на 2,25 МГц. Принимая во внимание эту разницу в чувствительности и то, что автоматизированный ультразвуковой контроль монолитных деталей и монолитных зон трехслойных сотовых конструкций, изготавливаемых методом автоклавного формования, с использованием одноэлементных ПЭП производится на частоте 5 МГц, для определения в них пористости целесообразно использовать такую же частоту.

Также видно, что падение амплитуды донного эхосигнала на условно «пористом» образце относительно амплитуды эхосигнала на условно «беспористом» составило 5 и 3,5 МГц (21 и 24 дБ) соответственно. Поэтому для автоматизированного ультразвукового контроля пористости с использованием ФР допустимо использовать частоты от 3,5 до 5 МГц.

ВЫБОР ИНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА

С целью выбора информативного параметра, наилучшим образом коррелирующего с величиной пористости, и определения фактической величины объемной доли пористости по полученным С-сканам исследуемых КПО были выбраны зоны и вырезаны образцы из КПО диаметром 14 мм, изготовленных из углепластика по технологии вакуумной инфузии (50) и автоклавного формования (50).

В результате исследования каждого образца методом рентгеновской микротомографии были определены величины объемной доли пор (от 0,05 до 5,393 %) и построены 3D-изображения пор в объеме образцов.

В ходе исследований информативных параметров были рассмотрены такие, как скорость ультразвуковой продольной волны и коэффициент затухания в материале образцов, центральная частота спектра и амплитуда донного эхосигнала, построены корреляционные зависимости между пористостью и указанными величинами. Для оценки возможности использования в качестве информационного критерия центральной частоты спектра донного эхосигнала данные С-сканов были обработаны с использованием программы MathCad и встроенной функции дискретного преобразования Фурье (ДПФ) (рис. 3).

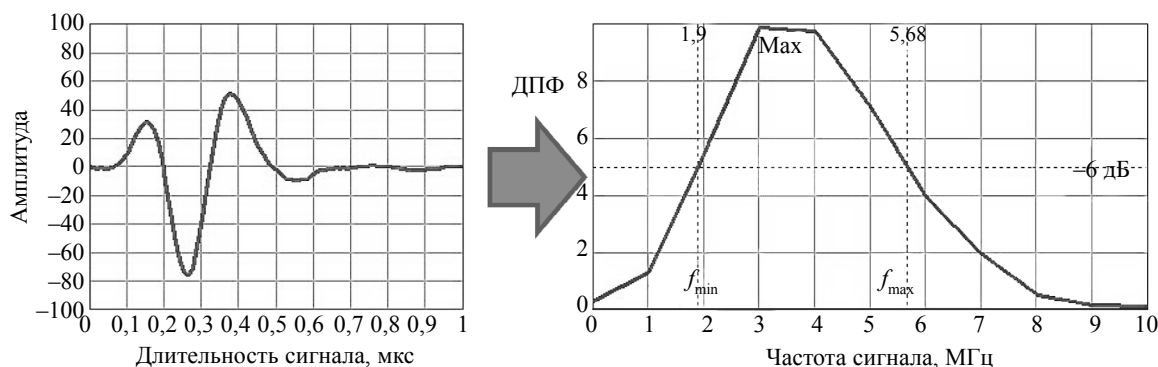


Рис. 3. Процесс построения амплитудно-частотного спектра донного эхосигнала.

Для каждого построенного амплитудно-частотного спектра донного эхосигнала центральные частоты спектров рассчитывались с помощью следующего выражения:

$$F_c = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2}, \quad (1)$$

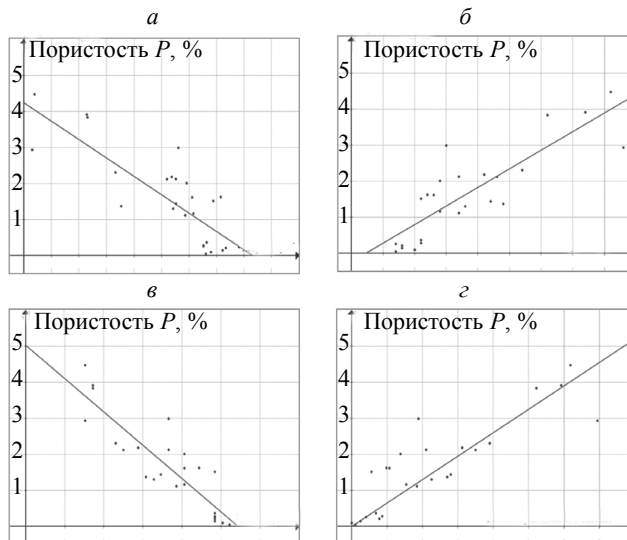
где $f_{\min}$ — минимальная частота спектра на уровне –6 дБ относительно максимума (Max) спектра; $f_{\max}$ — максимальная частота спектра на уровне –6 дБ относительно максимума (Max) спектра.

На рис. 4 представлены результаты построения корреляционных зависимостей для углепластика, изготовленного методом автоклавного формования.

Все рассмотренные информативные параметры показали высокую степень корреляции с пористостью (коэффициенты корреляции составили 0,84, 0,88, 0,81 и 0,86 соответственно для данных,

Рис. 4. Корреляционные зависимости между пористостью в углепластике, изготовленном методом автоклавного формования, и информативными параметрами: *а* — скоростью ультразвука; *б* — коэффициентом затухания; *в* — центральной частотой прошедшего сигнала; *г* — амплитудой донного сигнала.

представленных на рис. 4*а—г*), но в силу того, что стояла задача оценивать пористость параллельно основному контролю, в качестве информационного параметра была выбрана амплитуда донного эхосигнала. Применение остальных информативных параметров, таких как скорость ультразвуковых волн, коэффициент затухания и центральная частота донного сигнала, требует проведения большого количества математических операций (обрабатывается довольно большой массив данных), что увеличивает время, затрачиваемое на проведение контроля.



ПОЛУЧЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

В результате дальнейших исследований были получены корреляционные зависимости (рис. 5) и рассчитаны уравнения связи между величиной объемной доли пор и амплитудой донных эхосигналов при ультразвуковом контроле КПО из ПКМ, полученных автоклавным формованием (для толщин 3,4 и 5,75 мм) и инфузией (для толщин 4,85 и 17,6 мм).

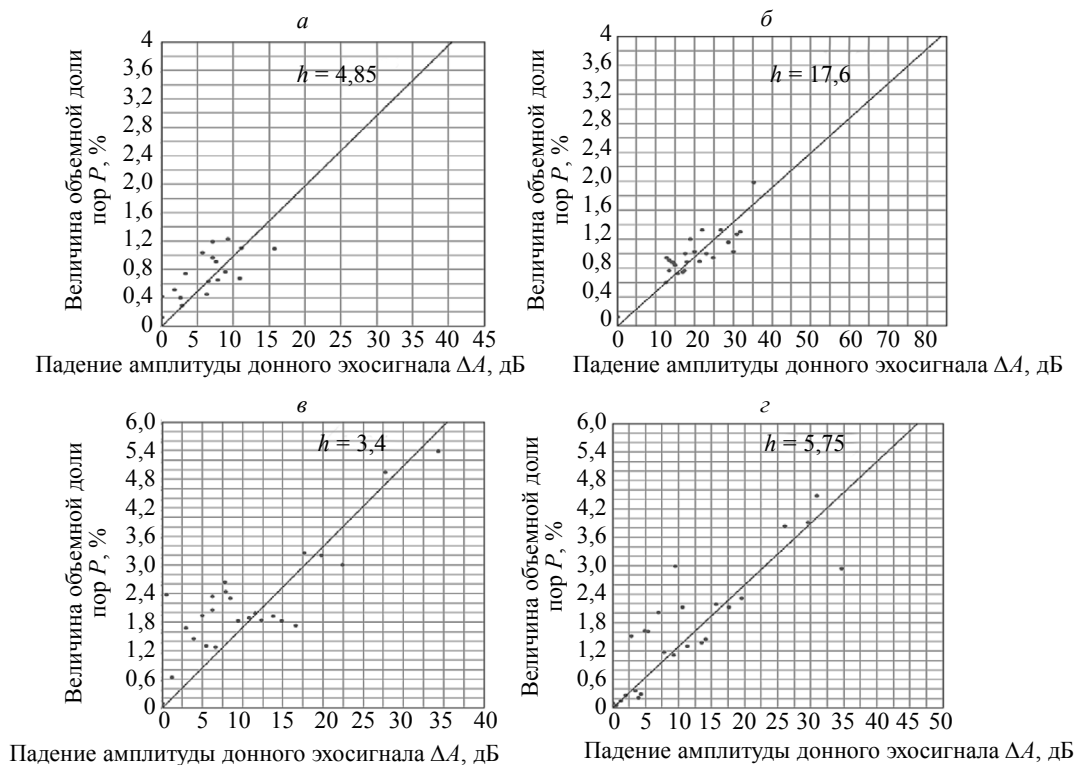


Рис. 5. Корреляционные зависимости между величиной объемной доли пор и падением амплитуды донного эхосигнала для КПО из углепластика, изготовленных методом: *а* и *б* — инфузии; *в* и *г* — автоклавного формования.

Для подтверждения объективности полученных корреляционных зависимостей для каждого набора статистических данных при каждой толщине были посчитаны коэффициент корреляции и

Таблица 2

Результаты расчета коэффициентов корреляции и среднеквадратического отклонения для полученных статистических данных

Материал	Углепластик, изготовленный методом инфузии		Углепластик, изготовленный методом автоклавного формования	
Толщина h , мм	4,85	17,60	3,40	5,75
Коэффициент корреляции R	0,72	0,85	0,84	0,86
Среднеквадратическое отклонение D , %	0,32	0,21	0,89	0,71

среднеквадратическое отклонение фактического значения величины объемной доли пор от величины пористости, определяемой по полученным корреляционным зависимостям (табл. 2).

На основе полученных корреляционных зависимостей и уравнения связи между величиной объемной доли пор и амплитудой донных эхосигналов были разработаны две технологии неразрушающего ультразвукового контроля пористости деталей и агрегатов крыла самолета, изготавливаемых из ПКМ, основным преимуществом которых является то, что с их помощью можно проводить оценку пористости путем анализа данных, полученных по результатам проведения основного контроля, не увеличивая его трудоемкость.

Однако использование способа оценки пористости по донному эхосигналу имеет свои недостатки. Так, невозможна оценка пористости зон деталей и агрегатов, где имеются особенности, влияющие на амплитуду донного сигнала, в частности:

- с непараллельными поверхностями;
- содержащих клеевое соединение, полученное с использованием клея холодного отверждения;
- отремонтированных путем закачки клея холодного отверждения в обнаруженное расслоение;
- имеющих на донной поверхности контакт с герметиком;
- оребранных панелей в зоне Т-образного соединения полотна с ребром;
- обшивок собранных сотовых панелей.

Для разработанных технологий экспериментальным путем были посчитаны значения абсолютных погрешностей определения пористости, которые составили 0,25 и 0,78 % соответственно для углепластиков, изготовленных методом инфузии и автоклавного формования. Достаточно большое значение абсолютной погрешности, полученной по разработанным технологиям, обусловлено тем, что на параметры ультразвуковых донных эхосигналов оказывают влияние морфология и пространственное распределение пор, образующихся в углепластике. Это было установлено при анализе данных зависимости амплитуд донных эхосигналов от значений величины объемной доли пористости, ее морфологии и пространственного распределения в углепластике, полученных по результатам рентгеновской микротомографии [15]. Наибольшее влияние на эту ситуацию оказывает механизм изготовления образцов: в случае автоклавного формования изначально используется наполнитель с нанесенной эпоксидной смолой и поэтому поры имеют более сферическую форму, а в случае инфузионного формования — сухая ткань, которая в процессе формования пропитывается связующим и поэтому поры имеют более продолговатую форму, растягиваясь вдоль волокон.

ВЫВОДЫ

В результате проведения ряда исследований на конструктивноподобных образцах, изготовленных по технологии автоклавного формования и инфузии с объемной долей пор в диапазоне от 0,05 до 5,39 %, в качестве информативного параметра для построения корреляционной связи с объемной долей пор в композиционных материалах выбрана амплитуда донного эхосигнала, т.к. остальные информативные параметры оказались малоприменимы в условиях производства. Получены корреляционные зависимости и уравнения связи между объемной долей пор и амплитудой донного эхосигнала для двух типов углепластиков, на основе которых разработаны две технологии контроля пористости. Разработанные технологии позволяют оценивать пористость в диапазоне от 0 до 4 % деталей и агрегатов крыла самолета, изготавливаемых из ПКМ методами автоклавного формования и вакуумной инфузии. Значения абсолютных погрешностей определения пористости по разработанным технологиям составили 0,25 и 0,78 % для инфузионных и автоклавных деталей соответственно. Большие погрешности обусловлены тем, что на параметры ультразвуковых донных эхосигналов оказывают влияние морфология и пространственное распределение пор, образующихся в углепластике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пащенко Ж.А., Рыбальченко С.Н., Сердюк А.Д. Полимерные композиционные материалы и их применение в самолетостроении / Уч. пособие. Изд-во: «Таганрогский авиационный колледж им. В.М. Петлякова». Таганрог, 1993. 63 с.
2. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4(2). С. 686—693.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI в. Перспективы и задачи. Авиационные материалы / Избр. труды ВИАМ 1932—2002. М.: МИСИС-ВИАМ. 2002. С. 23—47.
4. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы — основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. № 1. С. 64—67.
5. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток. Все материалы / Энциклопедический справочник, 2012. № 10. С. 38—44.
6. Boychuk A.S., Generalov A.S., Stepanov A.V. Nondestructive testing of FRP by using phased array ultrasonic technology / Abstracts The 12th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering» September 4—6, 2013, Portorož, Slovenia. P. 51—57.
7. Бойчук А.С., Генералов А.С., Диков И.А. Контроль деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов с применением технологии ультразвуковых фазированных решеток // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 1. С. 45—50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-45-50.
8. Stone D.E.W., Clarke B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fibre reinforced plastics // Non-Destructive Testing. June 1975. V. 8. Is. 3. P. 137—145. DOI: 10.1016/0029-1021(75)90023-7.
9. Zhu Hong-yan, Li Di-hong, Zhang Dong-xing, Wu Bao-chang, Chen Yu-yong. Influence of voids on interlaminar shear strength of carbon/epoxy fabric laminates // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. September 2009. V. 19. Sup. 2. P. s470—s475. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60091-X.
10. Душин М.И., Хрульков А.В., Караваев Р.Ю. Параметры, влияющие на образование пористости в изделиях из ПКМ, изготавливаемых безавтоклавными методами (обзор) // Труды ВИАМ. Электрон. науч.-техн. журн. 2015. № 2. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.12.2017) DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-10-10.
11. Ulf Schnars, Rudolf Henrich. Applications of NDT Methods on Composite Structures in Aerospace Industry // Airbus Operations GmbH. Bremen. URL: <http://www.ndt.net/article/cdcm2006/papers/schnars.pdf> (дата обращения: 20.12.2017).
12. Диков И.А., Бойчук А.С. Способы определения объемной доли пор в полимерных композиционных материалах с помощью ультразвуковых методов неразрушающего контроля (обзор) // Труды ВИАМ. Электрон. науч.-техн. журн. 2017. № 2. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.12.2017) DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-10-10.
13. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3—33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
14. Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А. Изготовление тест-образцов из углепластика с различной пористостью для разработки методик оценки пористости неразрушающим методом // Труды ВИАМ. Электрон. науч.-техн. журн. 2017. № 1. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.12.2017) DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-11-11.
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 эхо-импульсным методом // Контроль. Диагностика. 2018. № 8. С. 22—29. DOI: 10.14489/td.2018.08.pp.022-029.