

УДК 678.747.2:620.19

А.С. Бойчук<sup>1</sup>, В.Ю. Чертищев<sup>1</sup>, И.А. Диков<sup>1</sup>, А.С. Генералов<sup>1</sup>**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ  
В УГЛЕПЛАСТИКЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-11-11

*В настоящее время полимерные композиционные материалы, в особенности углепластики, широко используются в конструкциях авиационной техники. Одной из сложностей, с которой сталкиваются изготовители деталей и конструкций из углепластиков, является определение пористости в них без разрушения по всей площади изготавливаемых деталей. В данной работе для решения этой задачи приводятся результаты опробования ультразвукового теневого метода неразрушающего контроля. Проведены исследования образцов из углепластика без пористости и с величиной объемной доли пористости 4–5%. Результаты исследований показали, что между величиной объемной доли пор и амплитудой прошедшего через углепластик ультразвукового сигнала, а также центральной частотой его амплитудно-частотного спектра существует корреляция. Следовательно, ультразвуковой теневой метод можно применить для оценки пористости в углепластике.*

**Ключевые слова:** углепластик, пористость, неразрушающий контроль, теневой метод.

*Fiber reinforced plastics (FRP) especially carbon-based plastics (CFRP) is widely used in aircraft structures at present time. Porosity determination of parts and structures full area by nondestructive testing technique is one of the difficulties for specialists in production process. For that purpose the results of ultrasonic through transmission method application are given in this paper. The researches of CFRP specimens without porosity and with 4–5% level of volume porosity were carried out. The results are shown correlation of the level of volume porosity vs. through transmitted pulse amplitude and the response spectrum center frequency. Consequently ultrasonic through transmission method can be useful for the CFRP porosity estimation.*

**Keywords:** carbon fiber reinforced plastic (CFRP), porosity, nondestructive testing, through transmission method.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

В последнее десятилетие российскими учеными активно ведутся разработки полимерных композиционных материалов (ПКМ) нового поколения и технологий их изготовления для перспективной гражданской и военной авиационной техники [1–5]. Особое место в этих разработках занимают углепластики. Эти материалы привлекательны тем, что они позволяют повысить прочность конструкций и при этом снизить массу готового изделия по сравнению с металлами. В соответствии с имеющимся зарубежным опытом и отечественными разработками применение углепластиков целесообразно при создании как средненагруженных деталей и агрегатов планера, таких как предкрылки, закрылки, элероны, так и высоконагруженных, таких как кессон киля, стабилизатор и крыло, а также силовые отсеки фюзеляжа.

В настоящее время наиболее распространенной технологией изготовления деталей и конструкций из углепластика является автоклавное формование, суть которого заключается в пропитке сухого наполнителя связующим (изготовлении препрега), выкладке на специальную оснастку слоев препрега, сборке технологического пакета и формовании детали в автоклаве при повышенном давлении и температуре. Данная технология используется при изготовлении механизации крыла, хвостового оперения, панелей крыла и отсеков фюзеляжа. Еще одной перспективной технологией формования изделий из ПКМ является метод вакуумной инфузии. Суть данной технологии состоит в выкладке армирующего наполнителя в необходимом количестве на специальную оснастку с закрепленным на ней вакуумным мешком, пропитке связующим собранного пакета за счет разрежения, создаваемого под вакуумным мешком, и отверждении детали в печи по специальному температурному режиму. Данная технология была впервые применена при изготовлении панелей крыла ближне-среднемагистрального самолета МС-21.

Несмотря на совершенствование технологий формования, в процессе изготовления могут происходить сбои в работе технологического оборудования, применяемого при формовании, а также нарушения технологий изготовления вследствие влияния человеческого фактора. Из-за этого детали и конструкции из углепластика могут получаться с довольно высокой пористостью, которая может существенно снижать механические характеристики готового изделия. Так, наличие в углепластике толщиной 3 мм пористости от 0 до 4% может привести к снижению его прочности при межслойном сдвиге до 18%, при испытаниях на сжатие – к снижению прочности при сжатии до 21%.

Для определения объемной доли пор в образцах из ПКМ применяются разрушающие методы: травление кислотами, выжигание, исследование шлифов с помощью оптического микроскопа (металлография), гравиметрический метод. Все перечисленные методы предполагают частичное или полное разрушение образцов из ПКМ и в процессе производства неприменимы. Как уже отмечалось в работе [6], для определения содержания пористости в изделиях из углепластика при недопустимости использования разрушающих методов (требуется оценить пористость в уже готовых деталях и конструкциях без их разрушения) можно использовать неразрушающие методы контроля. Поэтому задача разработки методик оценки пористости в деталях и конструкциях из углепластика без его разрушения на данный момент является актуальной. Очень важным является то, что желателен проводить оценку пористости в изделиях из углепластика в процессе основного контроля, который проводится с целью обнаружения в изделии дефектов, превышающих порог чувствительности контроля. Это существенно сократит общее время на проведение контроля.

В настоящее время известно много научных работ, посвященных данной проблематике [7–11], анализ которых показывает [12], что наиболее предпочтительными для решения этой задачи являются ультразвуковые методы. В частности, наиболее применимым для этой цели является ультразвуковой эхо-импульсный метод, который в основном используется при контроле монолитных изделий из углепластика [13–15]. Однако стоит отметить, что в некоторых случаях на предприятиях-изготовителях деталей и агрегатов из ПКМ при неразрушающем контроле монолитных частей используется и ультразвуковой амплитудный теневой метод, следовательно, в этом случае необходимо оценивать пористость в процессе проведения контроля теневым методом.

Для решения данной задачи во ФГУП «ВИАМ» проведены исследования и показана принципиальная возможность использования теневого метода неразрушающего контроля для оценки пористости в углепластике. Работа выполнена 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») [16].

### Материалы и методы

Для проведения исследований по опробованию определения пористости в углепластике ультразвуковым теневым методом неразрушающего контроля изготовили два специальных образца из углепластика с квазиизотропной выкладкой слоев препрега из однонаправленной углеродной ленты. Образцы формовали методом автоклавного формования. Для получения образцов с различной пористостью использовали способ, описанный в работе [5]. Так, с целью получения в образце из углепластика нулевой пористости формование проводили в автоклаве с соблюдением штатных режимов. Получение образца с величиной объемной доли пор 4–5% осуществляли путем формования в автоклаве без внешнего давления и при давлении под вакуумным мешком ~0,5 ат (0,05 МПа). Следует отметить, что для формования образца по такому режиму можно использовать обычную печь, предназначенную для изготовления углепластиков методом вакуумной инфузии. Толщина изготовленных образцов составляла 5,5 мм.

Фактическое содержание пористости в образцах из углепластика измеряли с помощью металлографического метода после проведения ультразвуковых исследований. Определение объемных долей микропористости и распределения пор по размерам проводили на металлографическом комплексе фирмы Leica при увеличении  $\times 50$  по специальной методике измерения. Съемку изображений вели при помощи цифровой камеры VEC-335 (3 мегапикселя), подготовку изображений к количественному анализу и их математическую обработку выполняли при помощи компьютерной программы Image Expert Pro 3x.

Ультразвуковые исследования изготовленных образцов проводили теневым методом неразрушающего контроля с использованием ультразвукового дефектоскопа OmniScam MX (Olympus NDT), специализированной оправки для теневого контроля JTWX-14-10 (Olympus NDT), одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей с рабочими частотами 5 МГц. В качестве акустического контакта использовали струйный контакт. Для уменьшения влияния человеческого фактора сканирование исследуемых образцов проводили в автоматизированном режиме с использованием специальных роботов.

Для установления корреляции между параметрами теневого контроля и величиной объемной доли пористости в углепластике в качестве информативных параметров были выбраны:

- величина амплитуды прошедшего через углепластик ультразвукового сигнала;
- центральная частота амплитудно-частотного спектра прошедшего ультразвукового сигнала.

Анализ величин амплитуд прошедших через углепластик ультразвуковых сигналов проводили на компьютере с использованием специализированного программного обеспечения TomoViwe версии Analysis и математической программы MathCad.

Для анализа влияния пористости на центральную частоту амплитудно-частотного спектра прошедшего ультразвукового сигнала проводили его оцифровку и в программе MathCad с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) строили его амплитудно-частотный спектр. Далее рассчитывали центральную частоту спектра по следующему выражению:

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

где  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$  – минимальная и максимальная частоты спектра на уровне -6 дБ относительно максимума (Max) спектра (рис. 1).

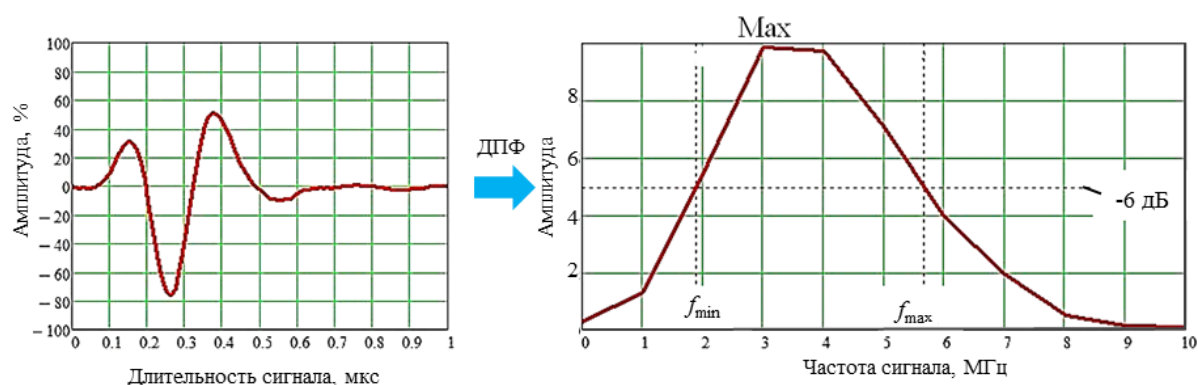


Рис. 1. Построение амплитудно-частотного спектра прошедшего ультразвукового сигнала

### Результаты

Для опробования в качестве информативных параметров с целью оценки пористости в углепластике ультразвуковым теневым методом амплитуды прошедшего от передатчика к приемнику ультразвукового сигнала и центральной частоты его амплитудно-частотного спектра одноэлементными преобразователями с рабочими частотами 5 МГц в автоматизированном режиме с использованием теневого метода проведено сканирование двух изготовленных образцов: образца 1, отформованного по штатному режиму для получения нулевой пористости, и образца 2, отформованного с нарушением штатного режима с целью получения величины объемной доли пор 4–5%. При проведении сканирования устанавливали такое расстояние между преобразователями, чтобы между ними мог поместиться исследуемый образец, при этом преобразователи должны располагаться соосно относительно друг друга. Напор воды при реализации струйного контакта устанавливали таким, чтобы струи били друг в друга без провисаний, но при этом поток воды был ламинарным. При проведении исследований следили за тем, чтобы акустический контакт оставался стабильным и отсутствовал сильный разброс в амплитуде прошедшего сигнала в статическом режиме, т. е. при отсутствии перемещения преобразователей. Настройку дефектоскопа осуществляли таким образом, чтобы максимальная амплитуда прошедшего ультразвукового сигнала на исследуемых образцах не превышала 80–90% экрана А-скана дефектоскопа, при этом режим детектирования устанавливали «радиочастотный» (рис. 2), а частотные фильтры должны быть отключены.

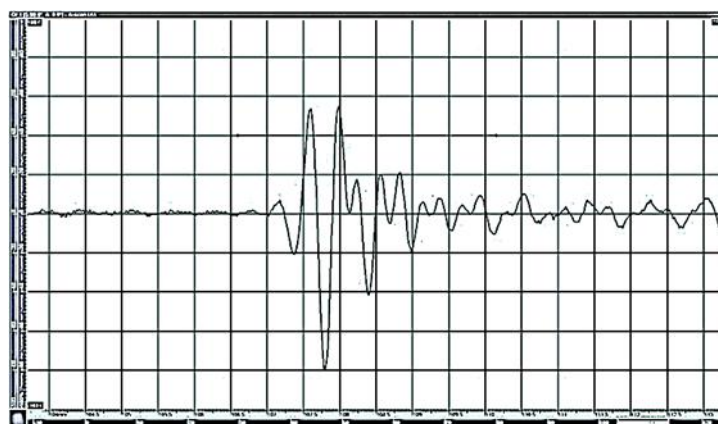


Рис. 2. Экран А-скана дефектоскопа

По результатам сканирования образцов получены *C*-сканы по амплитуде прошедшего ультразвукового сигнала (рис. 3), где цветовой палитре от белого до красного цвета соответствует значение амплитуды прошедшего ультразвукового сигнала соответственно – от 0 до 100%.

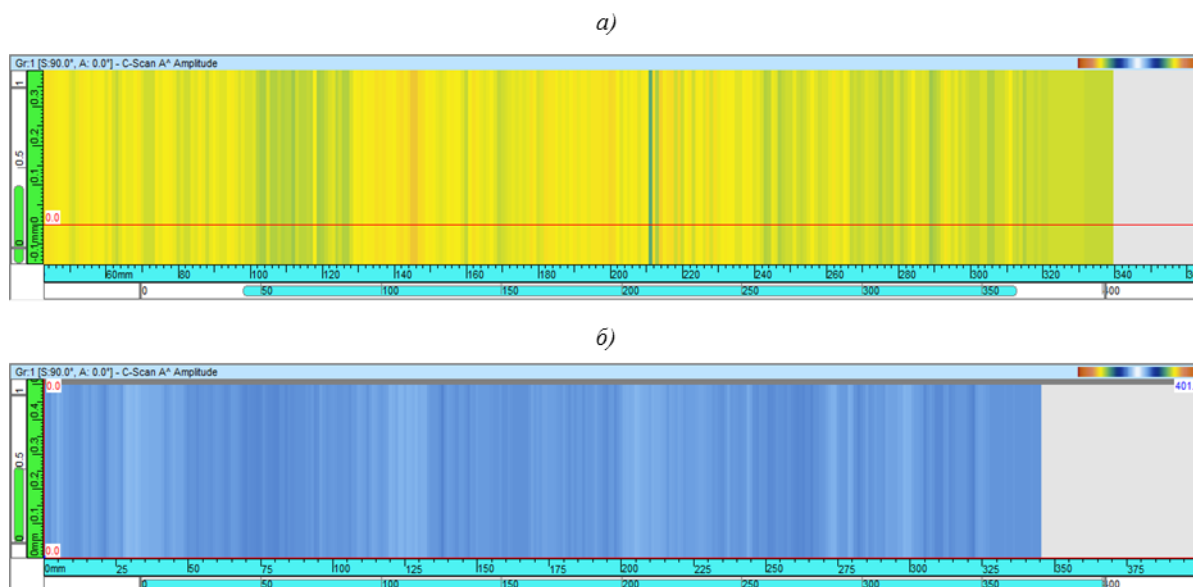


Рис. 3. *C*-сканы прошедших ультразвуковых сигналов через образцы 1 (а) и 2 (б)

Для установления корреляции между первым информативным параметром (амплитудой прошедшего ультразвукового сигнала) и величиной объемной доли пористости измерены амплитуды прошедших ультразвуковых сигналов в 10 близко расположенных точках *C*-сканов образцов 1 и 2. Для каждого из образцов рассчитаны средние значения амплитуд для выбранных 10 точек *C*-сканов. Результаты замеров приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты замеров амплитуд прошедших ультразвуковых сигналов**

Условный номер образца	Амплитуда прошедшего ультразвукового сигнала, %, при измерении в точках										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение
1	82	82,5	79,7	73,4	82,8	78,1	78,1	77,3	79,7	77,3	79,1
2	13,8	18,1	14,4	16,5	14,9	19,1	14,6	19,6	21,4	16,9	16,98

Как видно из данных табл. 1, среднее значение амплитуды прошедшего ультразвукового сигнала через образец 1 составило 79,1%, а через образец 2: 16,98%, т. е. разница между амплитудами прошедших ультразвуковых сигналов через образцы 1 и 2 составила ~4,7 раз или 13,4 дБ.

Для установления корреляции между пористостью в углепластике и величиной амплитуды прошедшего ультразвукового сигнала после проведения сканирования образцов, из зон, на которых замерены амплитуды прошедших ультразвуковых сигналов, вырезали фрагменты размером 15×20 мм, а затем в них методом металлографического анализа измеряли фактическое содержание величины объемной доли пор (рис. 4). Для образца 1 средняя величина объемной доли пор составила 0,0154%, для образца 2: 4,32%.

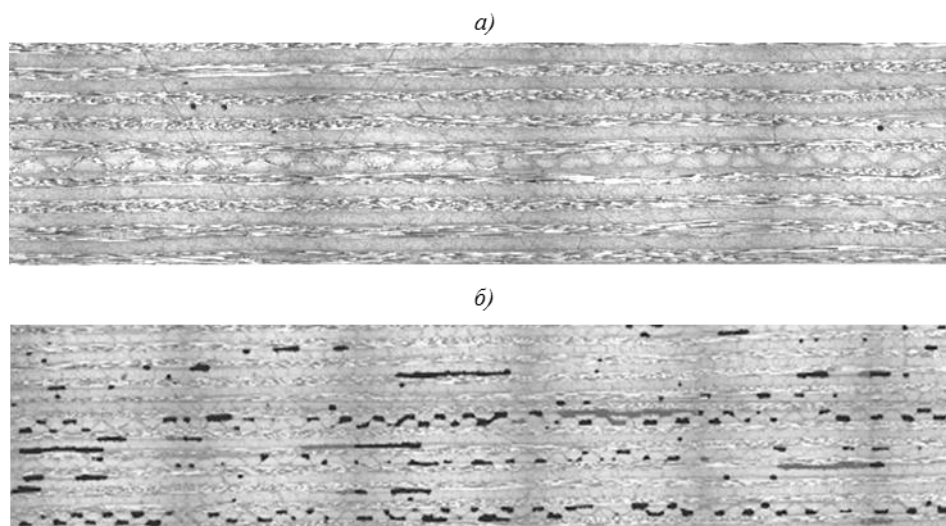


Рис. 4. Металлографические снимки образцов 1 (а) и 2 (б)

Таким образом, можно сделать вывод, что наличие 4–5% величины объемной доли пористости в углепластике приводит к значительному уменьшению амплитуды прошедшего через углепластик ультразвукового сигнала вследствие рассеивания ультразвуковой волны на порах в углепластике. Исходя из этого можно утверждать, что для оценки пористости в монолитных конструкциях из углепластика можно применять ультразвуковой теневой метод, а в качестве информативного параметра, коррелирующего с пористостью, использовать амплитуду прошедшего ультразвукового сигнала.

Опробование второго информативного параметра (центральной частоты амплитудно-частотного спектра) для оценки пористости в монолитных конструкциях из углепластика теневым методом проводили с помощью оцифровки прошедших ультразвуковых сигналов (С-сканов) в специализированном программном обеспечении TomoView и их обработки в математической программе Mathcad. Для этого в 10 точках С-сканов, в которых оценены значения амплитуд прошедших ультразвуковых сигналов (табл. 1), с использованием программы Mathcad и функции дискретного преобразования Фурье «СFFT» построены амплитудно-частотные спектры, а с использованием выражения (1) рассчитаны значения центральных частот спектров. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты вычислений центральных частот амплитудно-частотных спектров прошедших ультразвуковых сигналов**

Условный номер образца	Центральная частота спектра прошедшего ультразвукового сигнала, МГц, при измерении в точках										Среднее значение
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	3,73	3,76	3,75	3,72	3,75	3,73	3,73	3,73	3,71	3,79	3,74
2	2,56	2,48	2,56	2,52	2,42	2,67	2,4	2,48	2,65	2,6	2,53

Как видно из данных табл. 2, наличие пористости в углепластике влияет и на центральную частоту амплитудно-частотного спектра прошедшего ультразвукового сигнала, что свидетельствует о возможности использования в качестве информативного параметра для оценки пористости ультразвуковым теневым методом центральной частоты амплитудно-частотного спектра ультразвукового сигнала, прошедшего от

передатчика к приемнику. Уменьшение центральной частоты с увеличением пористости, в свою очередь, можно объяснить тем, что наличие пористости в углепластике приводит к выфльтровыванию высокочастотных составляющих спектра прошедшего ультразвукового сигнала.

### Обсуждение и заключения

На основании полученных в результате исследований данных можно утверждать, что для оценки пористости в углепластике можно применить ультразвуковой теневой метод неразрушающего контроля. При использовании данного метода в качестве информативных параметров, коррелирующих с величиной объемной доли пористости в углепластике, можно использовать величину амплитуды прошедшего через углепластик ультразвукового сигнала, а также центральную частоту его амплитудно-частотного спектра. Следует отметить, что для оценки пористости в углепластике теневым методом можно использовать и сочетание двух этих информативных параметров.

Тем не менее следует отметить, что для того, чтобы определить насколько этот метод точно может оценивать пористость в углепластике (какова его погрешность), необходимо получить большее количество данных зависимости информативных параметров ультразвукового теневого метода от величины пористости в образце. В частности, необходимо получить данные зависимости амплитуды и центральной частоты сигнала от пористости в промежуточных точках между нулевой пористостью и пористостью 4–5%. Рекомендуются, в частности, чтобы дополнительные точки зависимости информативных параметров теневого контроля от пористости были равномерно распределены во всем интересующем интервале пористости.

В заключение также отметим, что для оценки пористости в крупногабаритных деталях и конструкциях из углепластика теневым методом с использованием в качестве информативного параметра центральной частоты спектра прошедшего ультразвукового сигнала необходимо иметь довольно мощную вычислительную систему, поскольку потребуется обработка довольно большого объема цифровых данных.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. *Авиационное материаловедение в XXI век. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбил. науч.-технич. сб. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.*
2. Каблов Е.Н. *Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.*
3. Платонов А.А., Душин М.И. *Конструкционный углепластик ВКУ-25 на основе однонаправленного препрега // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №11. Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6.*
4. Алдошин С.М., Бадамшина Э.Р., Каблов Е.Н. *Полимерные нанокомпозиты – новое поколение полимерных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками // Сб. тез. докл. науч.-технологич. секций I Междунар. форума по нанотехнологиям «Роснанотех 08», 2008. С. 385–387.*
5. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. *Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.*
6. 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.-технич. журн. 2017. №1 (49). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-11-11.*
7. Lin L., Luo M., Tian H.T. et al. *Experimental investigation on porosity of carbon fiber-reinforced composite using ultrasonic attenuation coefficient // 17<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive*

- Testing (China, Shanghai. October 25–28, 2008). URL: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/222.pdf> (дата обращения: 01.08.2016).
8. Daniel I.M., Wooh S.C. and Komsky I. Quantitative Porosity Characterization of Composite Materials by Means of Ultrasonic Attenuation Measurements // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 1992. Vol. 11. No. 1. P. 1–8.
  9. Ding S., Jin S. et al. Investigations on relationship between porosity and ultrasonic attenuation coefficient in CFRP laminates based on RMVM // 7<sup>th</sup> International Symposium on NDT in Aerospace. Mo.5.A.1. URL: <https://www.ndt-aerospace.com/Portals/aerospace2015/BB/mo5a1.pdf> (дата обращения: 01.08.2016).
  10. Dominguez N., Mascaro B. Ultrasonic Non-Destructive Inspection of Localised Porosity in Composite Materials // ECNDT 2006-9th European Conference on NDT 2006. Germany, Berlin. URL: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.2.1.4.pdf> (дата обращения: 01.08.2016).
  11. Hillger W., Elze S. Determination of porosity in aerospace structures by ultrasonic pulse echo technique // 8<sup>th</sup> ECNDT Barcelona, 2002. URL: [http://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/institut/2002/u2002\\_2.pdf](http://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/institut/2002/u2002_2.pdf) (дата обращения: 15.05.2017).
  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.-технич. журн.* 2017. №2. Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-10-10.
  13. 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 (46). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-45-50.
  14. 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.
  15. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В. Неразрушающий контроль углепластиков на наличие несплошностей с использованием ультразвуковых фазированных решеток // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №3 (36). С. 84–89. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-84-89.
  16. 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.