

УДК 678.8

И.А. Диков¹, А.С. Бойчук¹

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ПОР В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-10-10

Как известно, пористость полимерных композиционных материалов (ПКМ) снижает прочностные свойства изделий. В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» ведутся работы по разработке технологий автоматизированного неразрушающего ультразвукового контроля пористости деталей крыла самолета. В статье рассмотрены основные способы определения объемной доли пор в изделиях из ПКМ с помощью ультразвуковых методов неразрушающего контроля. Рассмотрены различные подходы к определению пористости: с использованием коэффициента затухания ультразвуковых колебаний, по скорости продольных ультразвуковых волн, по энергии шумов обратного рассеяния, по прошедшему сигналу в зеркально-теневого режиме. Описан механизм рассеяния ультразвука в ПКМ. Приведены эмпирические зависимости, полученные разными авторами, для коэффициента затухания, скорости ультразвуковых колебаний, энергии шумов обратного рассеяния от объемной доли пор в материале изделия.

Ключевые слова: углепластик, ПКМ, пористость, ультразвуковой контроль, ультразвуковые колебания, коэффициент затухания, скорость звука, шумы обратного рассеяния.

The FRP porosity reduces structural strength, as known. At present FSUE «VIAM» specialists develop the automated ultrasonic testing method of aircraft wing porosity. Main ways of FRP volume porosity definition with use of ultrasonic non-destructive technique are observed in this paper. They are based on using ultrasonic waves attenuation coefficient, longitudinal ultrasonic wave velocity, backscattering noise energy, back-wall echo monitoring. Ultrasound scattering mechanism in FRP is described. Empiric curves for attenuation coefficient, ultrasonic wave velocity, backscattering noise energy vs pore quantity obtained by different authors are shown.

Keywords: FRP, CFRP, porosity, ultrasonic testing, ultrasonic fluctuation, attenuation coefficient, sound velocity, backscattering noise.

¹Федеральное 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

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») [1].

В современном самолетостроении для снижения массы конструкции и повышения экономической эффективности все более широкое применение находят полимерные композиционные материалы (ПКМ). Объем использования ПКМ за рубежом в конструкции планера самолетов достигает 50% массы – например, 50% в Boeing 787 (США), 30% в A380 и 50% в A350 фирмы Airbus (Европа) [1–4]. В отечественном самолетостроении ПКМ нашли свое применение в самолетах МС-21, ПАК ФА, ПАК ДА, в

конструкции пассажирского самолета «Сухой Суперджет», в мотогондоле двигателя ПД-14.

Важной проблемой является получение беспористых ПКМ, так как поры значительно снижают прочностные свойства материала. Так, при значении объемной доли пор более 3–4% прочность при межслойном сдвиге снижается в 2 раза. При пористости, равной 5%, внутрислойная прочность при сдвиге снижается на 35% (с 0,063 до 0,042 МПа), а при продольном сжатии – на 30% (с 1,12 до 0,773 МПа) [5]. Согласно стандарту ASTM (США) изделие с пористостью >2% должно быть забраковано [6]. Согласно работе [7] Airbus допускает объемную долю пор в изделиях из ПКМ не более 2,5%.

Основными причинами [8] образования пор являются влага, содержащаяся в связующих и армирующих наполнителях, которая при нагреве превращается в пар, а также легколетучие продукты и воздух. Механизм образования пор во многом зависит от используемой технологии получения изделия из ПКМ. При автоклавном формовании поры образуются в небольшом количестве за счет избыточного давления. При вакуумном формовании давление существенно ниже, поэтому получение беспористых изделий становится непростой задачей. Для ее решения необходимо тщательно контролировать влажность помещений, где хранится и выкладывается препрег. При инфузионных методах формования [9–11] основной причиной порообразования являются влага, летучие вещества и запертый воздух. Поэтому необходимо использовать дегазированное связующее и сухие наполнители, а также обеспечить удаление воздуха с помощью полупроницаемых мембран. Кроме того, для получения беспористых изделий нужно обеспечить равномерность течения связующего [5, 8].

Для определения объемной доли пор в образцах из ПКМ применяются разрушающие методы: травление кислотами, выжигание [12], 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. Поэтому важной задачей является определение значения объемной доли пор на этапе производства изделий из ПКМ с помощью неразрушающих методов контроля.

В настоящее время для определения объемной доли пор с помощью неразрушающих методов контроля перспективными являются компьютерная томография и ультразвуковые методы. Однако с учетом стоимости оборудования для компьютерной томографии, ультразвуковые методы – более приоритетны для определения пористости в изделиях из ПКМ. Проводить оценку пористости с помощью ультразвуковых методов возможно с использованием стандартных ультразвуковых дефектоскопов.

Данная статья посвящена вопросу рассмотрения способов определения объемной доли пор с помощью ультразвуковых методов неразрушающего контроля.

Материалы и методы

Определение объемной доли пор по коэффициенту затухания

В работах [7, 13–21] для определения величины объемной доли пор применяются ультразвуковые методы, где в качестве информативного параметра выбрано затухание ультразвука.

Коэффициент затухания для твердых материалов складывается из коэффициентов поглощения и рассеяния. В упругоанизотропных материалах, таких как ПКМ, которые имеют разнородную слоистую структуру, затухание определяется в основном рассеянием. При рассеянии на частицах звуковая энергия уходит в стороны от направления распространения волны.

Согласно работе [13] затухание ультразвука главным образом зависит от потери энергии на углеродном волокне и смоле, а также от рассеивания на порах. Затухание от

волокна и смолы можно принять за константу, а затухание вследствие рассеяния на порах стоит рассмотреть подробнее. С учетом отношения длины волны (λ) и диаметра рассеивателя (D) (сделано допущение, что рассеиватели имеют форму сферы) механизм рассеяния на порах складывается из трех составляющих:

1. Рэлеевское рассеяние ($\lambda \gg D$) – $\alpha(\lambda, D) = C_1 D^3 \lambda^{-4}$;
2. Стохастическое рассеяние ($\lambda \approx D$) – $\alpha(\lambda, D) = C_2 D \lambda^{-2}$;
3. Диффузное рассеяние ($\lambda \ll D$) – $\alpha(\lambda, D) = C_3 D^{-1}$,

где α – коэффициент затухания; C_1 , C_2 и C_3 – константы, зависящие от упругих параметров среды, плотности, скорости звука.

Для большинства углеродных ПКМ длина волны может составлять от 300 до 6000 мкм, при условии, что скорость ультразвуковой волны составляет ~ 3000 м/с, а частота лежит в пределах – от 0,5 до 10 МГц. В то же время реальный размер пор находится в пределах – от десятков до сотен микрометров. Соответственно, отношение длины волны к размеру пор составляет приблизительно 1 к 10, поэтому наблюдаются два вида рассеяния – рэлеевское и стохастическое. На практике механизм рассеяния на порах усложняется тем, что поры имеют неправильную форму, неоднородные размеры и могут быть распределены неравномерно по площади изделия.

В статье [13] исследуется связь затухания ультразвука с пористостью с помощью иммерсионного эхо-метода с использованием фокусированного преобразователя с диаметром пьезопластины 12 мм и центральной частотой 5 МГц. Экспериментальный коэффициент затухания вычислялся по формуле:

$$\alpha_e = \frac{10}{d} \left[\log \frac{A_{12}}{A_1} + 2 \log(1 - R_1^2) \right], \quad (1)$$

где d – толщина образца; A_{12} , A_1 – соответственно эхо-сигнал от донной поверхности без образца и с образцом; R_1 – коэффициент отражения на границе «вода–образец».

В качестве метода определения реальной объемной доли пор использовали металлографию. С учетом данных, полученных по результатам металлографии, смоделирован теоретический коэффициент затухания. В результате получена зависимость, представленная на рис. 1, а.

При моделировании получены меньшие значения коэффициента затухания при низкой пористости, а при высокой пористости – наоборот, более высокие значения в сравнении с результатами эксперимента. Это может быть связано с тем, что для эксперимента использовали 104 образца, а для моделирования 441. Кроме того, результаты моделирования получены для двухмерных моделей, в то время как реальные образцы и пустоты трехмерные. В статье [13] также отмечалось, что при одинаковой пористости могут наблюдаться различные коэффициенты затухания и наоборот. Это связано с многофакторностью зависимости коэффициента затухания: на него влияет форма, размер и распределение пор.

В работе [14] исследовали образцы с объемной долей пор в диапазоне от 0,03 до 4,96%. Образцы для исследований состояли из 16-ти слоев общей толщиной $2 \pm 0,05$ мм; площадь одного образца 200×250 мм²; содержание волокна $69 \pm 3\%$. С помощью построенного С-скана донного сигнала выбирали области с равномерным распределением пор. Использовали эхо-импульсный иммерсионный преобразователь с центральной частотой 5 МГц. Действительное значение объемной доли пор определяли с помощью металлографии. Авторы отмечают, что затухание от пористости в пределах от 0,03 до 0,5% зависит линейно, а при пористости более 0,5% характер зависимости меняется (рис. 1, б).

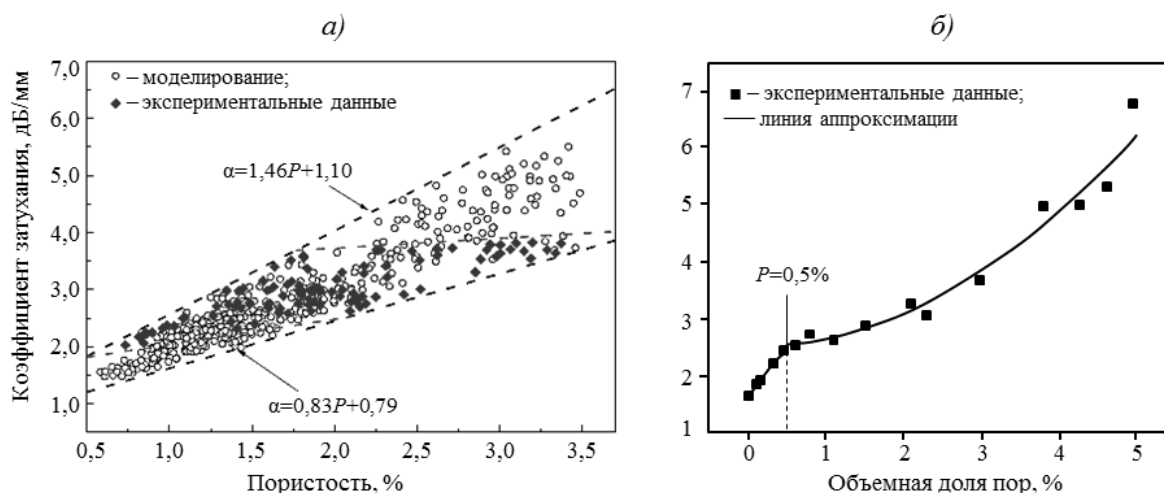


Рис. 1. Зависимости коэффициента затухания ультразвука от пористости, представленные в работах [13] (а) и [14] (б)

Получены эмпирические зависимости коэффициента затухания ультразвука от значения пористости для двух диапазонов:

– для образцов с пористостью от 0,03 до 0,5%

$$\alpha = 1,65 + 1,78P, \tag{2}$$

где P – объемная доля пор, %;

– для образцов с пористостью >0,5 до 4,96%

$$\alpha = 2,5 + 0,15P^2. \tag{3}$$

Относительная погрешность измерения пористости представлена на рис. 2 [14]. В работе отмечено, что наибольшие относительные погрешности наблюдаются при пористости 0,03; 0,09; 0,12; 0,54 и 0,69%. Это явление объясняется тем, что трудно гарантировать, что место измерения затухания ультразвука и место проведения металлографии совпадут, а также на это может влиять случайное распределение пористости в образце, которое вызывает колебание значения затухания ультразвука.

Способы определения пористости в плоских образцах, помещенных в иммерсионную среду, с помощью эхо-импульсного и теневого методов описаны в работах [15, 16]. Эксперименты проводили на образцах толщиной 2, 5 и 8 мм с однонаправленной и квазиизотропной укладкой. Пористость на каждом образце подтверждали с помощью разрушающего метода. Диапазон пористости составил от 0,1 до 4%, величина пор – от 0,1 до 1,0 мм. В качестве информативного параметра использовали коэффициент затухания, измеренный на трех различных частотах для каждой толщины образца:

Толщина образца, мм	2	5	8
Диапазон частот, МГц	5–12	3–7	3–5.

В работе [16] приведена эмпирическая формула расчета пористости (P) на основании значения «изменения затухания в зависимости от частоты»:

$$P = 0,45 \cdot d\alpha/df + 0,41 [\%], \tag{4}$$

где 0,45 – коэффициент для образцов из углепластика; $d\alpha/df$ – изменение (приращение; тангенс угла наклона) затухания в зависимости от частоты, дБ/(см·МГц); 0,41 – смещение значения пористости при нулевом изменении затухания.

Для толщины образцов 2 мм построена графическая зависимость «изменение затухания в зависимости от частоты» от пористости (рис. 3). В работе [16] отмечено, что погрешность измерения пористости с помощью данного метода составляет $\pm 0,5\%$.

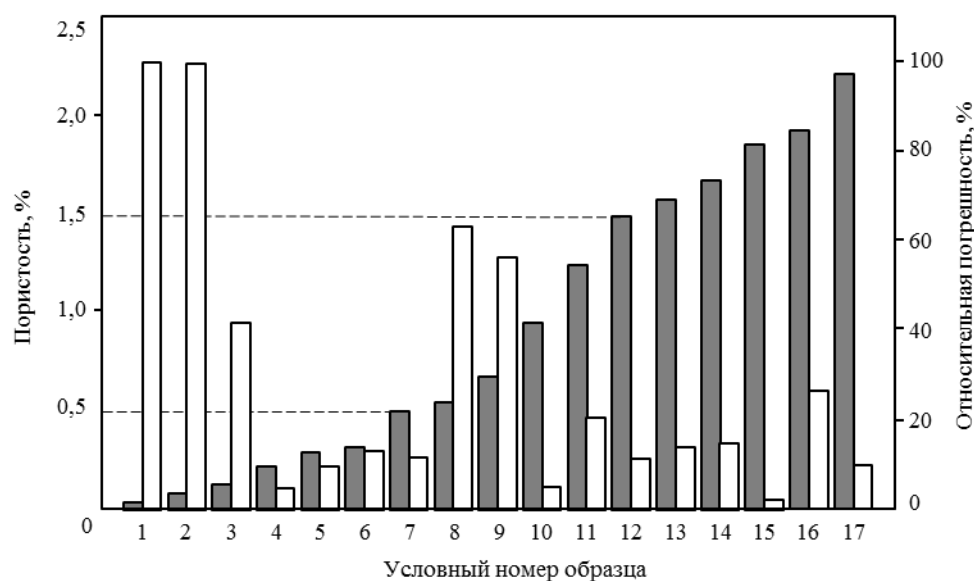


Рис. 2. Относительная погрешность (□) измерения пористости (■) с помощью ультразвукового метода

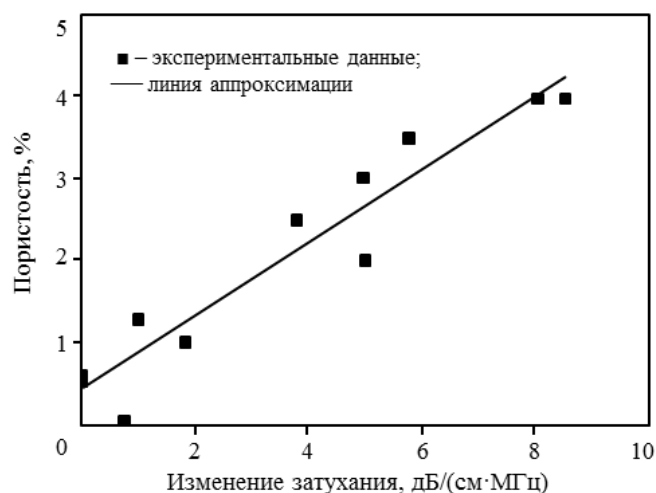


Рис. 3. Зависимость изменения затухания от значения пористости

В статье [17] авторами исследовано три группы образцов.

Первая группа состояла из четырех 16-слойных углерод-эпоксидных образцов с однонаправленной укладкой (пористость в образцах составила: 6,51; 2,04; 1,14 и 0,2% соответственно). В эту группу также входили четыре углерод-эпоксидных образца, состоящих из 16-ти слоев с квазиизотропной укладкой $[\pm 45/0/90]_{2s}$ (пористость в образцах составила: 4,05; 2,82; 1,25 и 0,34% соответственно). Значения пористости для образцов первой группы предоставлены производителем по результатам травления их кислотой.

Во *вторую группу* входило четыре углерод-эпоксидных образца, состоящих из 8-ми слоев и имеющих крупный плетный рисунок (пористость в образцах составила: 5,09; 3,41; 1,58 и 0,01% соответственно).

В *третьей группе* использовали пять углерод-полиамидных образцов, состоящих из 6-ти слоев плетеного сатина (пористость составила: 1,2; 2,9; 5,4; 9,0 и 11,2% соответственно).

Толщина образцов для этих групп варьировалась от 2 (для образцов с низкой пористостью) до 2,5 мм (для образцов с высокой пористостью). Реальную пористость в

работе [17] определяли с помощью металлографии. Для исследований применяли иммерсионный теневой метод с широкополосными преобразователями с диаметром пьезопластины 6,35 мм с центральной частотой 10 МГц. В результате экспериментов получены зависимости [17] затухания от частоты и от пористости (рис. 4, а), а также зависимость изменения затухания, упомянутая в работах [15, 16], от пористости (рис. 4, б).

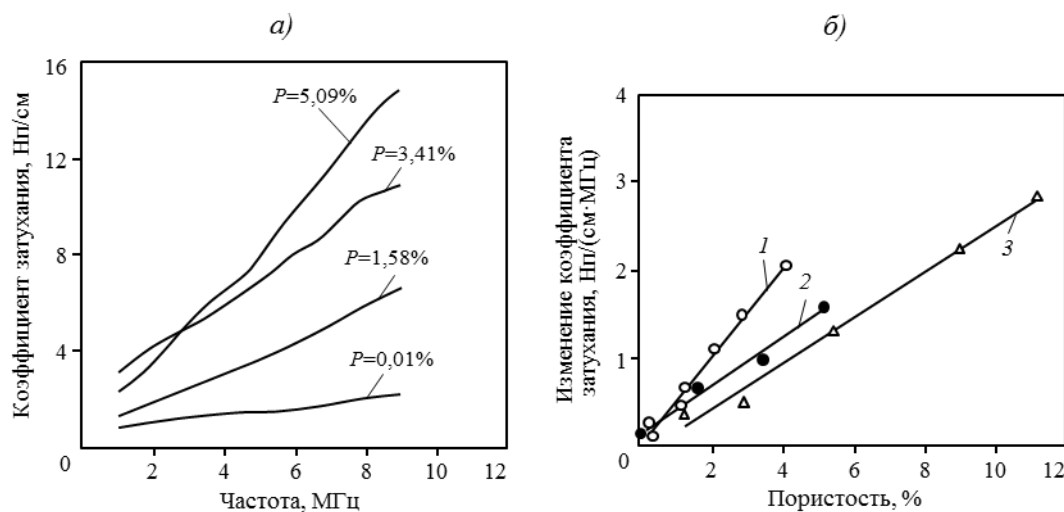


Рис. 4. Зависимости коэффициента затухания от частоты и пористости (P) для второй группы образцов (а) и изменения коэффициента затухания от пористости для трех групп образцов (1–3) (б)

В статье [18] для определения пористости использовали теневой и эхоимпульсный иммерсионные методы. Использовали широкополосные преобразователи с центральной частотой 5 МГц, каждый преобразователь находился на расстоянии 50,8 мм (2 дюйма) от поверхности образца. Исследованные образцы изготовлены из однонаправленного препрега марки AS4/3501-6 с общей толщиной 2,54 мм и количеством слоев 20. Изготовленные образцы имели пористость от 0 до 11%. Действительное значение пористости определяли с помощью металлографии. В результате получили зависимости [18] затухания от частоты для различных уровней пористости (рис. 5, а), а также пористости от затухания ультразвука при частоте 5 МГц (рис. 5, б).

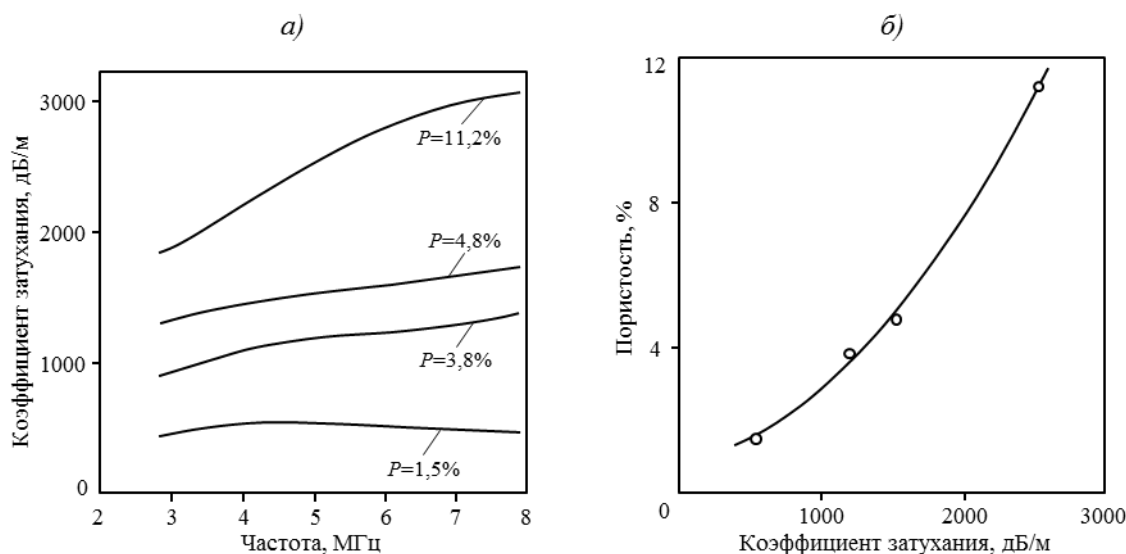


Рис. 5. Зависимость коэффициента затухания ультразвука от частоты для различных уровней пористости (а) и корреляция между значением пористости и коэффициентом затухания ультразвука на частоте 5 МГц (б)

В справочнике по неразрушающему ультразвуковому контролю [19] описан способ определения пористости в 16-слойных образцах из ПКМ общей толщиной 2 мм. Пористость определялась иммерсионным методом прохождения и эхо-методом. Средняя пористость в образцах составила 2%. Использовались короткие импульсы с центральной частотой 18 МГц. При использовании метода прохождения оценивалась амплитуда прошедшего сигнала в присутствии образца и при его отсутствии, затем рассчитывалось затухание. Эхо-методом пористость определялась по результатам анализа спектра донного эхо-сигнала.

Авторами в работе [20] исследованы 16-слойные однонаправленные образцы из препрега марки 5208-T300 размерами от 12 до 16 дюймов (от 304,8 до 406,4 мм). Для имитации пористости в образцы между 12 и 13 слоями добавлен стеклярус размером – от 75 до 150 мкм. Образцы разрезали на темплеты размером 3,75×3,75 дюйма (95,25×95,25 мм) со значениями пористости 1; 2; 4; 6 и 8%. Исследования проводили с помощью иммерсионного теневого метода с использованием преобразователей с центральной частотой 25 МГц, диаметром пьезопластины 0,25 дюйма (6,25 мм) и с фокусным расстоянием 1 дюйм (25,4 мм).

Исследованы также стеклопластиковые образцы с пористостью 0; 1; 3; 6 и 12%, в которых использовали стекловолокно $\varnothing 12$ мкм и длиной 4–5 см. Плотность волокна составила $2,43 \pm 0,09$ г/см³, плотность матрицы $1,10 \pm 0,01$ г/см³. Пористость имитировали путем использования стекляруса из свинцового стекла с плотностью $2,47 \pm 0,04$ г/см³ диаметром – от 74 до 150 мкм. В результате получены зависимости [20] изменения затухания ультразвука от пористости для углепластиковых и стеклопластиковых образцов (рис. 6).

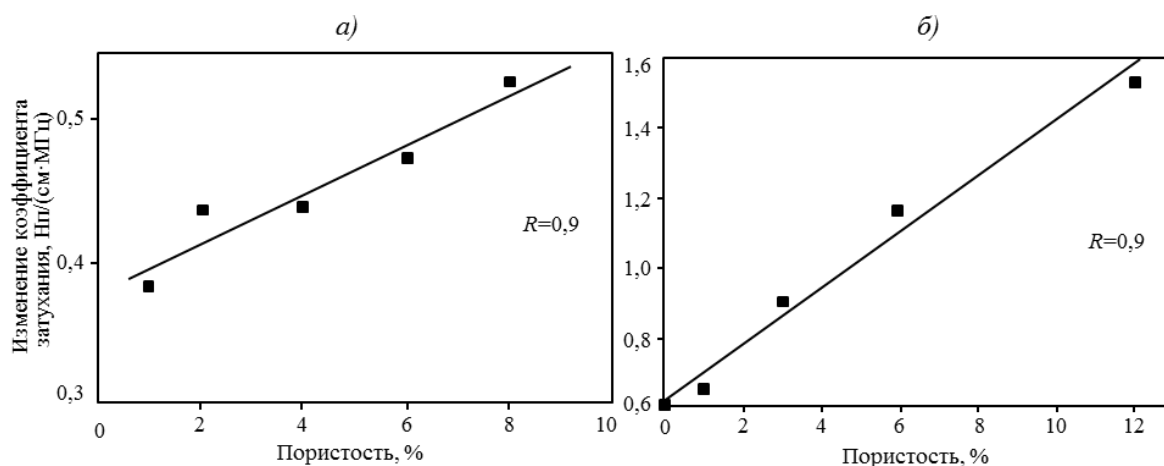


Рис. 6. Зависимости изменения коэффициента затухания от пористости для углепластиковых (а) и стеклопластиковых образцов (б); R – коэффициент корреляции

В работе также получена модель зависимости затухания от частоты (рис. 7). Согласно этой модели затухание в низкочастотном диапазоне связано с рэлеевским рассеянием, которое пропорционально частоте $\sim f^4$, а в высокочастотном диапазоне наблюдается частотно-независимое геометрическое рассеяние. В среднем диапазоне существует линейная зависимость затухания от частоты, что подтверждается экспериментами [20].

В работе [21] авторами исследован способ определения значения пористости с помощью лазерно-ультразвуковой спектроскопии. В работе представлены результаты экспериментов на трех углепластиковых образцах размером 40×40 мм и толщиной 8 мм. Количество слоев в каждом образце 36, толщина монослоя 0,2 мм. Образцы имеют

укладку $[0^\circ/90^\circ]_s$. На каждом образце по результатам компьютерной рентгеновской томографии было выбрано по две области с различной пористостью. В работе отмечено, что для количественного анализа пористости композитов коэффициент затухания необходимо измерять в достаточно широкой полосе частот, чему препятствуют технические возможности традиционных ультразвуковых дефектоскопов с широкополосными датчиками. Лазерно-ультразвуковые приборы лишены этих недостатков. В статье [21] представлены результаты определения частотной зависимости коэффициента затухания продольных акустических волн в областях с различным уровнем пористости (рис. 8). Отмечено, что резонансный пик затухания ультразвука наблюдается в окрестности частоты 6,5 МГц. Построены также зависимости максимума пика затухания и его спектральной ширины от пористости (рис. 9).

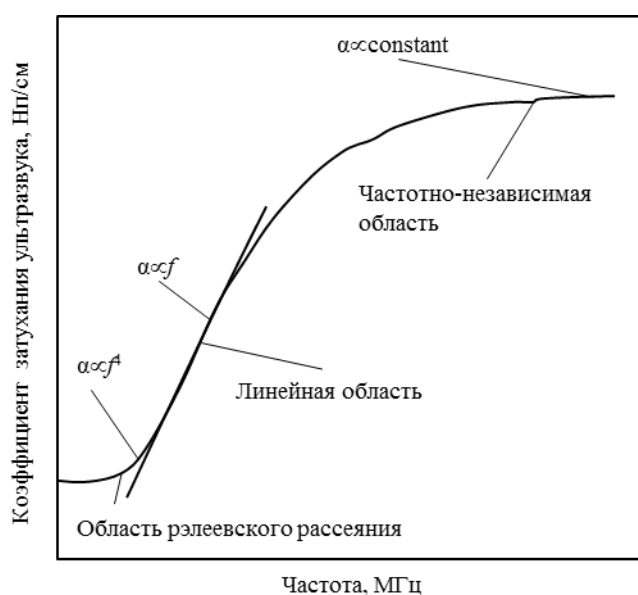


Рис. 7. Модель зависимости затухания от частоты

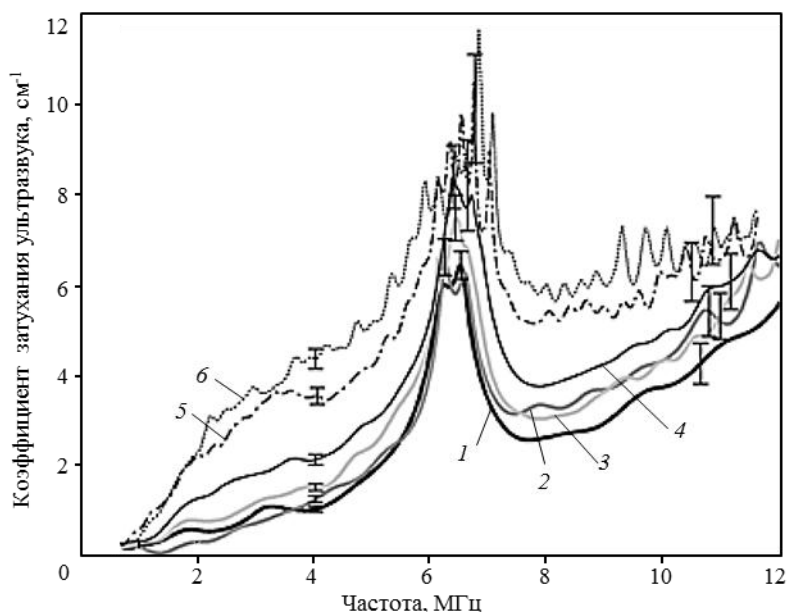


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента затухания продольных волн в углепластиковых образцах с различной пористостью: 1,6 (1); 2,5 (2); 3,8 (3); 5,2 (4); 9,7 (5); 10,5% (6)

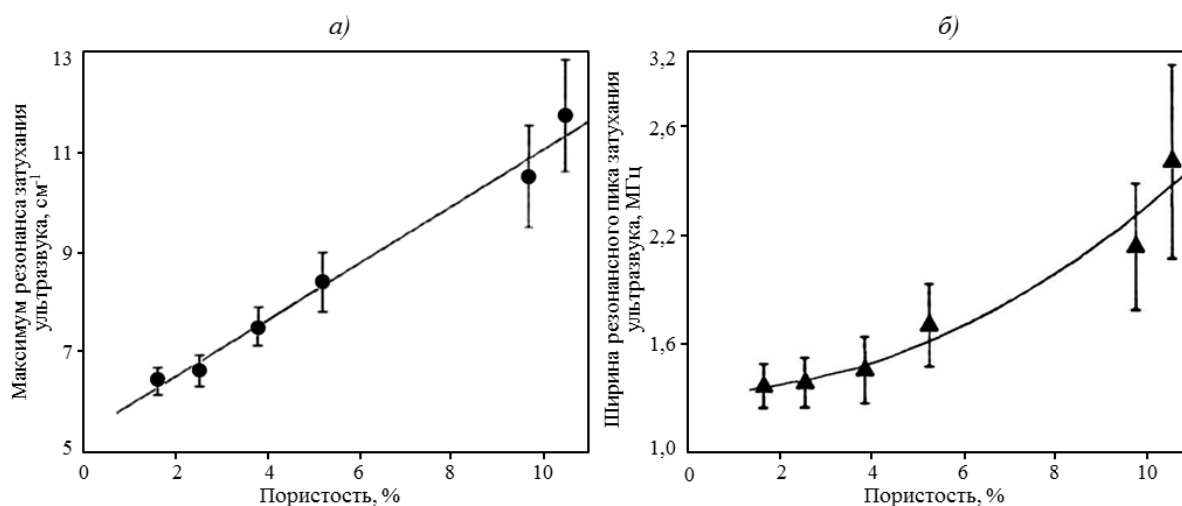


Рис. 9. Зависимости максимума пика затухания (а) и его спектральной ширины по полувысоте (б) от пористости углепластиковых образцов

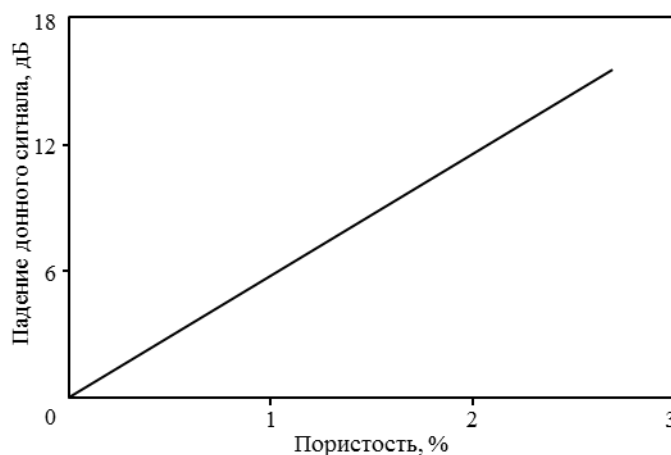


Рис. 10. Падение донного эхо-сигнала в зависимости от значения пористости

Значение донного сигнала связано со значением коэффициента затухания ультразвука, поэтому компанией Airbus предложен способ [7] определения значения объемной доли пор по падению донного сигнала (рис. 10).

Определение объемной доли пор по скорости ультразвука

Скорость ультразвуковых волн в упругоанизотропных материалах зависит от плотности материала. Пористость напрямую влияет на значение плотности материала, поэтому измерение малых изменений скорости ультразвуковых волн позволяет исследовать структуру вещества и, соответственно, определять пористость.

Как ранее отмечено в работе [17] исследованы три группы образцов с различной пористостью. В результате экспериментов получены зависимости фазовой скорости от частоты и от пористости (рис. 11), а также зависимость изменения затухания от пористости (рис. 12). По зависимостям видно, что увеличение пористости на 2% приводит к снижению скорости в диапазоне от 50 до 150 м/с.

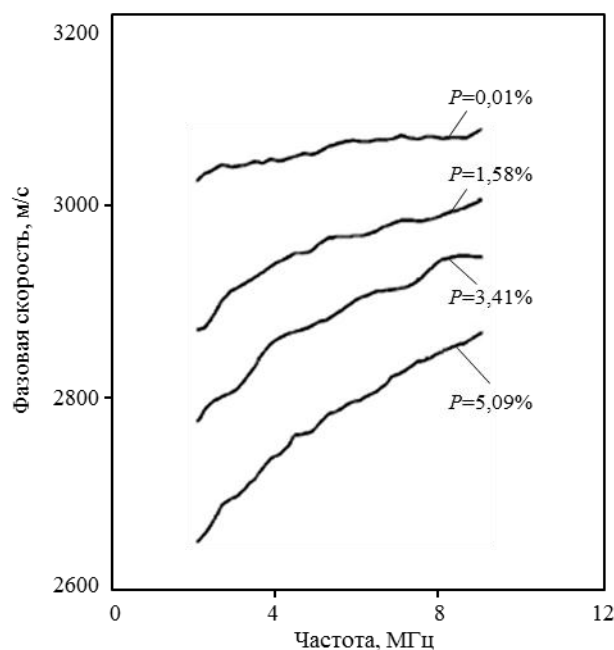


Рис. 11. Зависимость фазовой скорости от частоты и пористости (P) для плетеных углерод-эпоксидных образцов

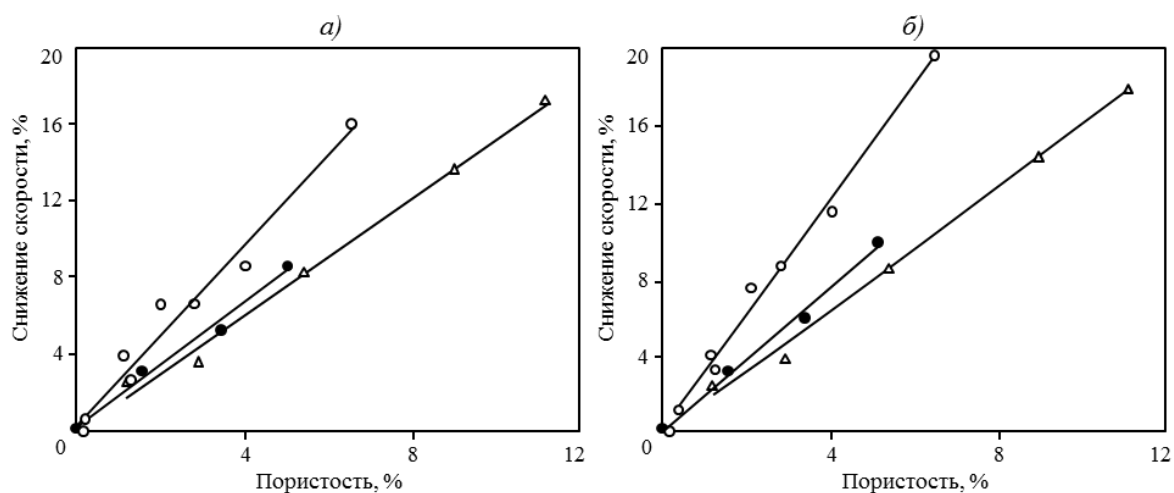


Рис. 12. Зависимость снижения скорости от пористости на частоте 6 (а) и 4 МГц (б) для трех групп образцов:

○ – однонаправленные и квазиизотропные; ● – плетеные углерод-эпоксидные и △ – углерод-полиамидные соответственно

Определение объемной доли пор по шумам обратного рассеяния

В работах [22, 23] описан способ определения пористости с помощью нормированной величины энергии структурного шума. Для возбуждения ультразвуковых волн применяется лазерное термооптическое возбуждение – оптико-акустический эффект. Используется продольная волна (спектральный диапазон 1–10 МГц), отраженная от донной поверхности. При этом на неоднородностях структуры (порах) возникают шумы обратного рассеяния. Спектр сигнала, рассеянного на неоднородностях, состоит из регулярной (гладкой) и нерегулярной (шумовой) компонент. Гладкая – определяется спектральной чувствительностью приемника. Шумовая часть определяется рассеянием

на неоднородностях. Ее полная энергия может служить характеристикой пористости среды.

Нормированная энергия шумовой компоненты, согласно работе [22], определяется по формуле

$$W_H = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} [S(f) - S_0(f)]^2 df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_0^2(f) df}, \quad (5)$$

где $S(f)$ – спектр импульсов, рассеянных структурой в обратном направлении; $S_0(f)$ – спектр зондирующего импульса; f – частота; f_{\min} и f_{\max} – граничные частоты спектрального диапазона.

Значение пористости определяется по эмпирической формуле

$$V_H = 290,66W_H^2 + 0,2934W_H. \quad (6)$$

Корреляционная связь для углепластика ВКУ-17КЭ0,1 между пористостью и энергией структурного шума представлена на рис. 13. Относительная погрешность данного метода составляет не более $\pm 5\%$ [22].

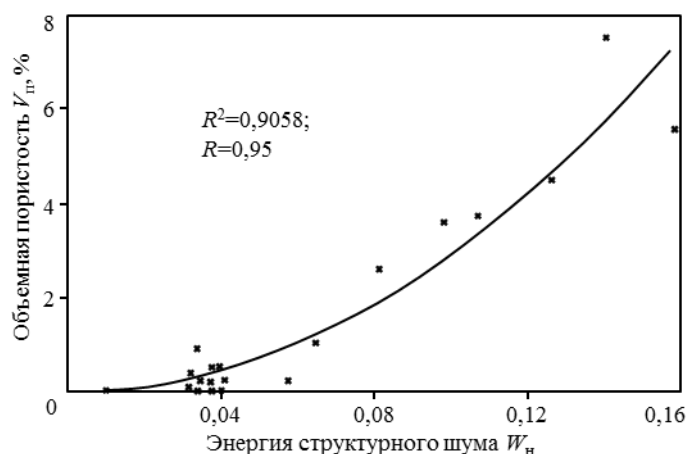


Рис. 13. Корреляционная связь для углепластика ВКУ-17КЭ0,1 между пористостью и энергией структурного шума

В работе [24] для определения пористости анализировались частотный спектр и энергия шумов обратного рассеяния. Для исследований использовали образцы, состоящие из следующих слоев: 10 беспористых слоев, затем 8 слоев с объемной долей пор $\sim 10\%$, затем 10 беспористых слоев. Итоговая пористость образцов составила 3%. Реальную пористость определяли с помощью металлографии. В работе применяли эхоимпульсный метод с частотами преобразователей 4 и 5 МГц. Снимали радиочастотные А-сканы поверхностного и донного сигналов, а также сигналов обратного рассеяния. Для этих сигналов определяли частотный и энергетический спектры. Затем проводили сравнение полученных спектров на беспористых образцах и образцах с объемной долей пор 3%. В результате прохождения ультразвука через образец с пористыми слоями, происходило смещение резонансной частоты в область низких частот. Таким образом, установлена корреляционная связь между частотной и энергетической составляющими шумов обратного рассеяния и пористостью.

Определение объемной доли пор прочими ультразвуковыми методами

Авторами работ [25–27] использовались специфические способы определения объемной доли пор, которые не подходят под предыдущие категории. В работах [25, 26] для определения пористости использовали преобразователи рэлеевских волн с центральной частотой 2,25 МГц. Преобразователи имеют угол призмы 64 град, который обеспечивает ввод волны Рэлея в изделия из углеродистой стали, скорость ультразвуковых волн в призме составляет 2,79 мм/мкс. В образцах из композитов с указанным углом призмы возникают одновременно продольные и поперечные волны. На рис. 14 представлен *A*-скан прошедшего сигнала в радиочастотном отображении, полученного при работе преобразователей в зеркально-теневом режиме в локальной иммерсионной ванне. На рис. 15 приведена схема эксперимента и дано описание пиков прошедшего сигнала [25].

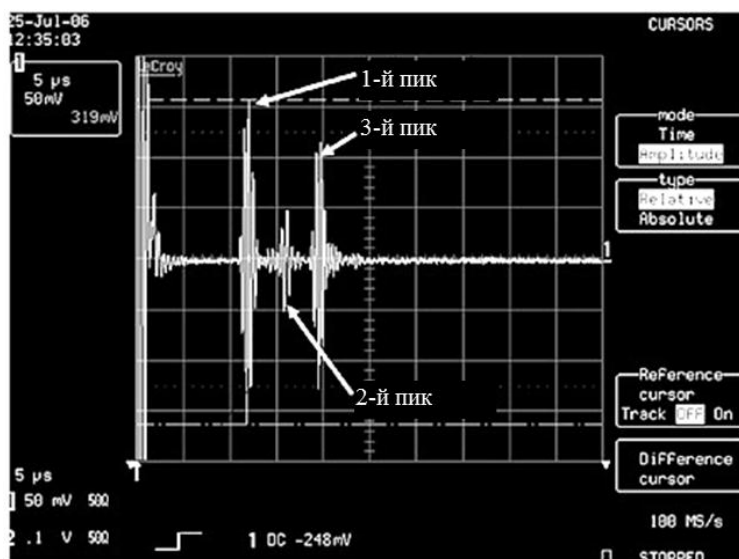


Рис. 14. *A*-скан прошедшего сигнала при работе преобразователей в зеркально-теневом режиме

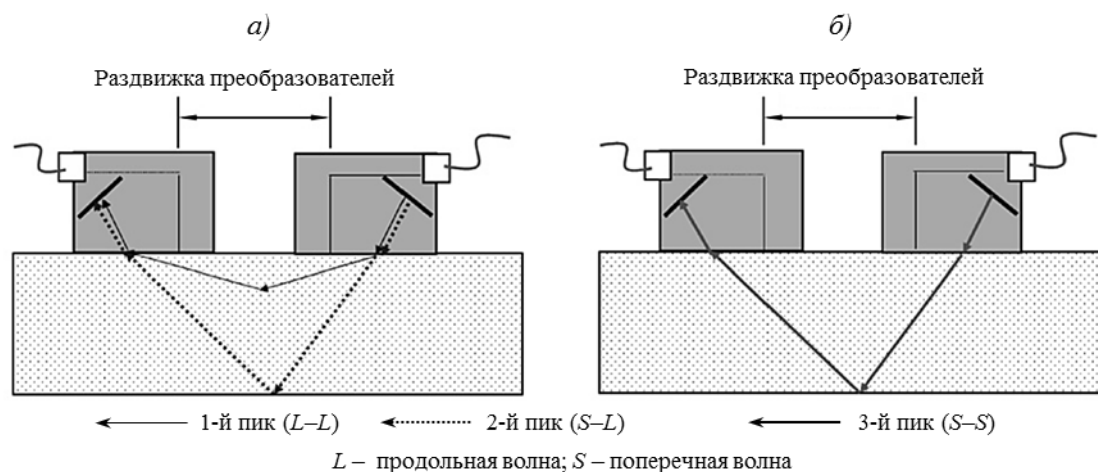


Рис. 15. Схема эксперимента и описание пиков прошедшего сигнала

В ходе эксперимента строили *C*-скан прошедшего сигнала, далее определяли среднюю амплитуду прошедшего сигнала и стандартное отклонение. В результате получены зависимости [25] усредненной амплитуды прошедшего сигнала от пористости на двух типах образцов (рис. 16). В ходе работы также получены данные с помощью

эхо-импульсного преобразователя и установлено, что метод с использованием двух преобразователей в зеркально-теновом режиме более эффективен.

В работе [27] авторы использовали преобразователь с фазированной решеткой с центральной частотой 5 МГц. Проконтролировано три образца из ПКМ толщиной 7 мм с различной пористостью. Затем выбраны участки с отсутствием пор и с их наличием и обработаны с использованием математического аппарата Matlab. Для обработки данных использовали метод RQA (количественный анализ рекуррентных диаграмм), вычисляли значение детерменизма (DET), определяли корреляцию между DET и значением высоты донного эхо-сигнала (BWE), затем строили рекуррентные диаграммы (рис. 17).

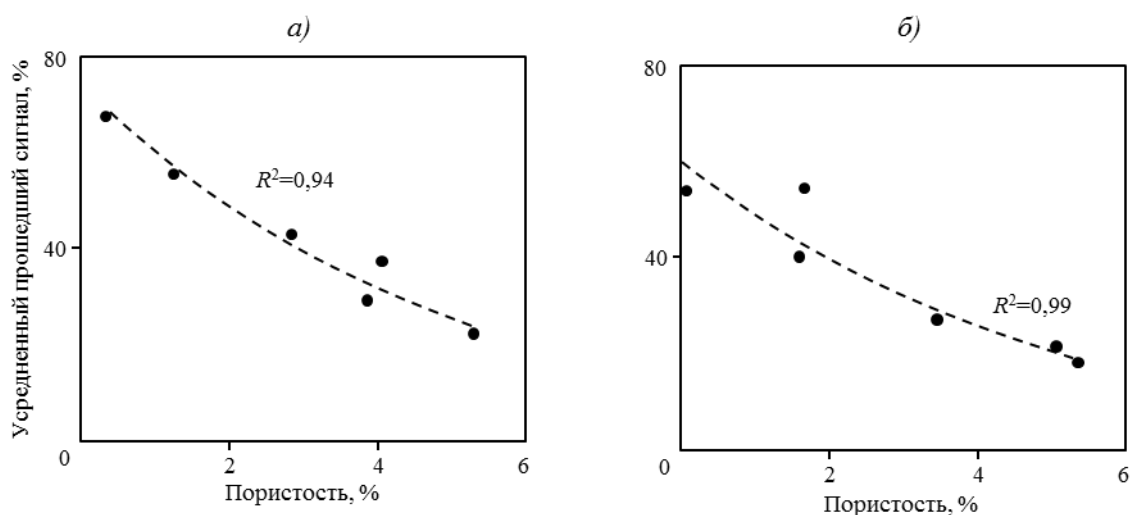


Рис. 16. Графические зависимости усредненной амплитуды прошедшего сигнала от пористости для квазиизотропных [45/-45/0/90/45/-45/0/90]_s (а) и плетеных [0/-45/45/90]_s образцов (б)

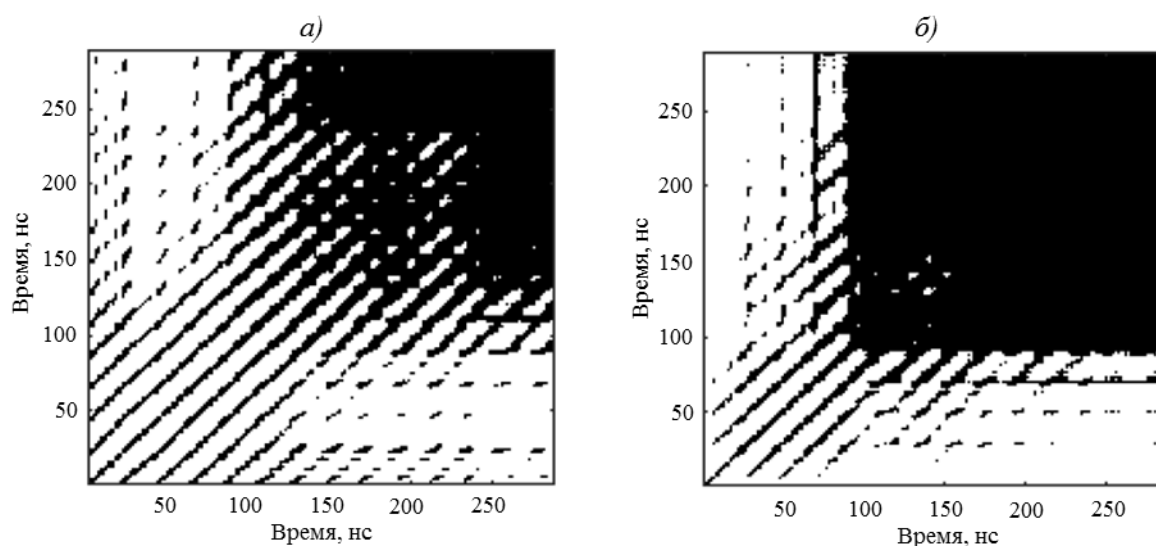


Рис. 17. Рекуррентные диаграммы для беспористого (а) и пористого образца (б)

В дальнейшем предполагается, что с помощью рекуррентных диаграмм появится возможность определять зоны с повышенной пористостью в автоматическом режиме.

Результаты

В результате проведенного обзора установлено, что для определения пористости в ПКМ с помощью ультразвуковых неразрушающих методов существует несколько различных подходов.

Наиболее распространенным оказался способ определения объемной доли пор с использованием коэффициента затухания. Установлено, что коэффициент затухания в упругоанизотропных материалах, к которым относятся ПКМ, в основном определяется рассеянием. Рассеяние ультразвуковых колебаний сильно зависит от наличия пор и их размеров. С учетом отношения длины волны (соответственно и частоты f) и диаметра рассеивателя механизм рассеяния на порах складывается из трех составляющих: рэлеевское, стохастическое и диффузное рассеяния. Рэлеевское рассеяние пропорционально $\sim f^4$, стохастическое – пропорционально $\sim f^2$, а диффузное является частотно-независимым. В работе [21] отмечено, что резонансный пик затухания ультразвука наблюдается около частоты 6,5 МГц. Это значение частоты соответствует длине волны ~ 460 мкм (при скорости ультразвука 3000 м/с), а реальный размер пор находится в диапазоне от десятков до сотен микрометров. Поэтому в основном наблюдается два вида рассеяния: рэлеевское и стохастическое.

В большинстве работ использовался иммерсионный теневой метод, который имеет ограничения в виде необходимости двухстороннего доступа к исследуемому образцу. Большинство авторов для аппроксимации также используют линейную функцию. В работе [7] для определения пористости используется значение донного сигнала, которое связано с коэффициентом затухания. Этот подход позволяет одновременно проводить контроль для поиска несплошностей материала и определять значение его пористости. В работе [14] оценена погрешность определения пористости с помощью иммерсионного эхо-импульсного метода, в основном она составляет не более $\pm 25\%$. Отмечено, что величина погрешности зависит от значения объемной доли пор, наибольшая погрешность наблюдается на образцах с пористостью до 1%.

Определение объемной доли пор с помощью скорости ультразвуковых колебаний построено на зависимости скорости от плотности материала. Пористость напрямую влияет на значение плотности материала, поэтому измерение малых изменений скорости ультразвуковых волн позволяет исследовать структуру вещества и, соответственно, определять пористость. Авторы в работе [17] использовали иммерсионный теневой метод, который, как отмечалось ранее, обладает недостатком – для его использования необходим двухсторонний доступ.

Хорошие результаты показывает способ определения объемной доли пор с помощью энергии шумов обратного рассеяния (погрешность не более $\pm 5\%$), полученных с помощью лазерного термооптического возбуждения, однако недостатком данного подхода является нераспространенность метода и довольно большие габариты применяемого оборудования.

Использование двух преобразователей в зеркально-теновом режиме для определения пористости образцов имеет преимущество перед методами с использованием затухания и скорости ультразвука – отсутствует необходимость в получении донного сигнала и в двухстороннем доступе к контролируемому изделию. На реальных изделиях с ограниченным доступом это обстоятельство является преимуществом перед остальными методами.

Обсуждение и заключения

Рассмотрены способы определения объемной доли пор в изделиях из ПКМ с помощью ультразвуковых методов неразрушающего контроля. Рассмотрены различные подходы к определению пористости: с использованием коэффициента затухания ульт-

тразвуковых колебаний, по скорости продольных ультразвуковых волн, по энергии шумов обратного рассеяния.

В дальнейшем будет выбран и подробно описан наиболее эффективный метод определения объемной доли пор в изделиях из ПКМ. В настоящее время, по мнению авторов, эффективным является метод определения пористости по значению донного эхо-сигнала, связанного с затуханием ультразвуковых колебаний в материале. В этом случае определение объемной доли пор в изделии в процессе производства или эксплуатации можно будет вести параллельно с процессом контроля на наличие несплошностей в материале, что существенно сократит суммарную трудоемкость проведения неразрушающего контроля.

Благодарности

Авторы выражают благодарность С.И. Яковлевой за помощь в подготовке статьи к изданию.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. №4 (2). С. 686–693.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002*. М.: 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. Душин М.И., Хрульков А.В., Караваев Р.Ю. Параметры, влияющие на образование пористости в изделиях из полимерных композиционных материалов, изготавливаемых безавтоклавными методами (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №2. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-10-10.
6. Void Content of Reinforce Plastic: ASTM D 2734-09. Standard by ASTM International. 2009. 3 p.
7. 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: 01.08.2016).
8. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №6 (42). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2016) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8.
9. Меркулова Ю.И., Мухаметов Р.Р. Низковязкое эпоксидное связующее для переработки методом вакуумной инфузии // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 39–41. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-39-41.
10. 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.
11. Душин М.И., Хрульков А.В., Платонов А.А., Ахмадиева К.Р. Безавтоклавное формование углепластиков на основе препрегов, полученных по растворяющей технологии // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 43–48.
12. ГОСТ Р 56682–2015. Композиты полимерные и металлические. Метод определения объема матрицы, армирующего наполнителя и пустот. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
13. Shanshan Ding, Shijie Jin, Zhongbing Luo, Huan Liu, Jun Chen, Li Lin. Investigations on relationship between porosity and ultrasonic attenuation coefficient in CFRP laminates based on

- RMVM // 7th International Symposium on NDT in Aerospace. Мо.5.A.1. URL: <https://www.ndt-aerospace.com/Portals/aerospace2015/BV/mo5a1.pdf> (дата обращения: 01.08.2016).
14. Lin L., Luo M., Tian H.T., Li X.M., Guo G.P. Experimental investigation on porosity of carbon fiber-reinforced composite using ultrasonic attenuation coefficient // 17th World Conference on Nondestructive Testing, October 25–28, 2008. China, Shanghai. URL: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/222.pdf> (дата обращения: 01.08.2016).
 15. Methods and apparatus for porosity measurement: United States Patent US 7,389,693 B2; Appl. No.: 11/355,217; US 2007/0186655 A1; publ. 16.08.07.
 16. Francis A. Reed, Thomas J. Batzinger, Robert W. Reed and Staffan Jonsson. Porosity Measurement in Composites Using Ultrasonic Attenuation Methods // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1993. Vol. 12. P. 1265–1272.
 17. Jeong H., Hsu D.K. Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites // Ultrasonics. 1995. Vol. 33. No. 3. P. 195–203.
 18. 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.
 19. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
 20. Hughes M.S., Handley S.M., Miller J.G. and Madaras E.I. A Relationship between frequency dependent ultrasonic attenuation and porosity in composite laminates // Review in Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1987. P. 1037–1044.
 21. Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Беляев И.О. Исследование влияния пористости на затухание ультразвука в углепластиковых композитах методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Акустический журнал. 2013. Т. 59. №6. С. 714–721.
 22. Мурашов В.В. Определение пористости углепластиков в авиаконструкциях лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля // Авиационная промышленность. 2011. №3. С. 33–37.
 23. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // Контроль. Диагностика. 2008. №8. С. 13–17.
 24. 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).
 25. Je-Woong Park et al. Ultrasonic Influence of Porosity Level on CFRP Composite Laminates Using Rayleigh Probewaves // Acta Mechanica Solida Sinica. 2008. Vol. 21. No. 4. P. 298–307. DOI: 10.1007/s10338-008-0834-1.
 26. Im K.H. et al. On fiber direction and porosity content using ultrasonic pitch-catch technique in CFRP composite solid laminates // 18th International Conference on Composite Materials. 2011. URL: [http://iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/data/2.%20Oral%20Presentation/Aug25 \(Thursday\)/Th04%20Numerical%20Methods%20in%20Composite%20Materials/Th04-6-AK0992.pdf](http://iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/data/2.%20Oral%20Presentation/Aug25%20(Thursday)/Th04%20Numerical%20Methods%20in%20Composite%20Materials/Th04-6-AK0992.pdf) (дата обращения: 01.08.2016).
 27. Carsten Brandt, Peter Maa. A State Space Approach for the Non-Destructive Evaluation of CFRP with Ultrasonic Testing // 7th International Symposium on NDT in Aerospace. Мо.3.A.1. 2015. URL: http://www.ndt.net/article/aero2015/papers/Мо_3_A_1_Brandt_v2.pdf (дата обращения: 01.08.2016).