

Применение широкополосной лазерно-ультразвуковой спектроскопии для неразрушающего контроля пористости углепластиков с различным объемным содержанием углеродного волокна

Ю. Г. Соколовская, Н. Б. Подымова, А. А. Карабутов

Методом широкополосной лазерно-ультразвуковой спектроскопии, основанным на лазерном термооптическом возбуждении широкополосных акустических импульсов, получены частотные зависимости фазовой скорости продольных акустических волн в композиционных материалах. Исследованы частотные зависимости фазовой скорости в спектральном диапазоне 0,8 – 10 МГц для образцов однонаправленных углепластиков с различным объемным содержанием матрицы и волокна. Показано существование дисперсии фазовой скорости в данном диапазоне. Дисперсию скорости продольных акустических волн в образце рассчитывали с помощью фазовых спектров зондирующего ультразвукового импульса и импульса, прошедшего через исследуемый образец. Определено, что величина относительной дисперсии фазовой скорости характеризует пористость образца, и чем выше пористость, тем больше величина относительной дисперсии. Получены эмпирические соотношения для связи пористости и относительной дисперсии, которые могут быть использованы для оперативной неразрушающей оценки пористости композитов. Полученные результаты могут быть полезны как для контроля качества материалов с целью модернизации технологий изготовления, так и для предсказания поведения конструкций и деталей из данного материала под действием внешних нагрузок.

Ключевые слова: углепластики, полимерные композиционные материалы, ультразвуковые методы, лазерная ультразвуковая спектроскопия, пористость, продольные акустические волны, фазовая скорость.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-3-76-84

Введение

Полимерные композиционные материалы находят все более широкое применение в современной промышленности [1 – 3]. Одним из примеров таких материалов, часто используемых в авиации и ракетостроении, являются углепластики [1 – 5]. Использование углеродных волокон в сочетании с полимерной матрицей позволяет получать материалы, удельные физико-механические характеристики которых выше аналогичных характеристик для металлических сплавов, благодаря чему они могут заменять металлы в тех случаях, когда необходимо снижение массы конструкции.

Известно, что в углепластиках уже на этапе изготовления возможно возникновение некоторой пористости [6 – 9]. Причиной образования пор может являться как присутствие захваченного воздуха внутри пучков углеродных волокон, так и наличие влаги и летучих продуктов в наполнителе или связующем [6]. Пористость может возникать также в процессе эксплуатации изделий из углепластика при усталостных изменениях структуры материала. Пористость в углепластике может присутствовать как в виде изолированных сферических пор микронного размера в слоях полимерной матрицы, так и в виде расслоений длиной до нескольких миллиметров, возникающих на границах раздела

матрицы и углеродного наполнителя. Наличие пористости будет оказывать негативное влияние на механические свойства материала: упругие модули, межслойную сдвиговую прочность, прочность на сжатие, растяжение и изгиб, а также на усталостную долговечность [8, 9]. Как результат, происходит уменьшение срока службы композитных конструкций. Таким образом, актуальной задачей является развитие и усовершенствование методов количественной оценки пористости углепластиков.

Для неразрушающей диагностики структуры и физико-механических свойств различных конструкционных материалов в настоящее время часто применяются ультразвуковые методы, основанные на измерении величин коэффициента затухания и скорости распространения акустических волн в исследуемом материале [10 – 12]. В данной работе для количественного анализа структуры пористых углепластиков предлагается использовать метод широкополосной акустической спектроскопии. Размер пор и неоднородностей в углепластиках может варьироваться от нескольких микрометров до нескольких миллиметров, поэтому для исследования таких материалов необходимо применять зондирующие импульсы, обеспечивающие широкий частотный диапазон для проводимых измерений (от нескольких сотен кГц до десятков МГц). Следует отметить, что исследования частотных зависимостей фазовой скорости акустических волн в различных композиционных материалах и полимерах часто проводят с применением традиционных пьезоэлектрических излучателей ультразвука. Известно, что использование пьезоэлектрических преобразователей имеет некоторые проблемы, связанные с низкой эффективностью пьезовозбуждения широкополосных акустических сигналов и с трудностями в получении равномерной частотной характеристики в широком спектральном диапазоне [13]. К настоящему времени было проведено значительное количество исследований по разработке эффективных широкополосных пьезокерамических и пьезополимерных акустических преобразователей [14, 15]. Однако их конструирование требует некоторых сложных методов подавления возбуждения собственных резонансов пьезоэлемента для обеспечения равномерной частотной характеристики, что приводит к дополнительным потерям при электроакустическом преобразовании и к снижению эффективности широкополосного возбуждения ультразвука. Кроме того, для этих преобразователей могут использоваться только специальные мелкозернистые керамики и пьезополимеры, изготовленные по осо-

бым технологиям. В качестве альтернативы пьезоэлектрическим преобразователям представляется перспективным использование метода, основанного на лазерном термооптическом возбуждении широкополосных акустических импульсов (оптико-акустический эффект [16 – 20]). Такой метод позволяет получить короткие и мощные широкополосные зондирующие импульсы продольных акустических волн со спектральным диапазоном от долей до десятков МГц и амплитудой до сотен МПа, что актуально для исследования сильно поглощающих и рассеивающих ультразвуком композиционных материалов [18, 19]. Подобные методы, основанные на лазерном возбуждении ультразвуковых волн, ранее успешно применяли для измерения упругих модулей композиционных материалов [16, 17], а также для оценки пористости металл-матричных композитов [20]. Однако, в [20] не учитывали частотную зависимость фазовой скорости, которая может быть весьма существенной в случае пористых материалов.

Цель работы — применение широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником для получения частотных зависимостей фазовой скорости продольных акустических волн $C(f)$ в пористых углепластиках. Главная идея заключается в том, что связь между величиной относительной дисперсии фазовой скорости и пористостью образца может быть использована для количественной оценки объемного содержания пористости в исследуемом материале.

Методика эксперимента

Блок-схема используемого в настоящей работе широкополосного лазерно-ультразвукового спектрометра представлена на рис. 1а. Спектрометр состоит из Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности, оптико-акустической (ОА) ячейки, цифрового осциллографа и персонального компьютера. Длина волны излучения составляла 1064 нм, характерная длительность лазерного импульса — 10 – 12 нс, частота повторения импульсов — 10 Гц, энергия в импульсе — 10 – 15 мДж. Схема ОА-ячейки представлена на рис. 1б. При поглощении лазерного импульса в специальном оптико-акустическом источнике звука (ОА-источнике) происходит неоднородный нестационарный нагрев и тепловое расширение приповерхностного слоя. Это приводит к возникновению в нем механических напряжений, которые, в свою очередь, будут являться источниками продольных акустических волн. ОА-сигнал, возбуждаемый в источнике, является зондирую-

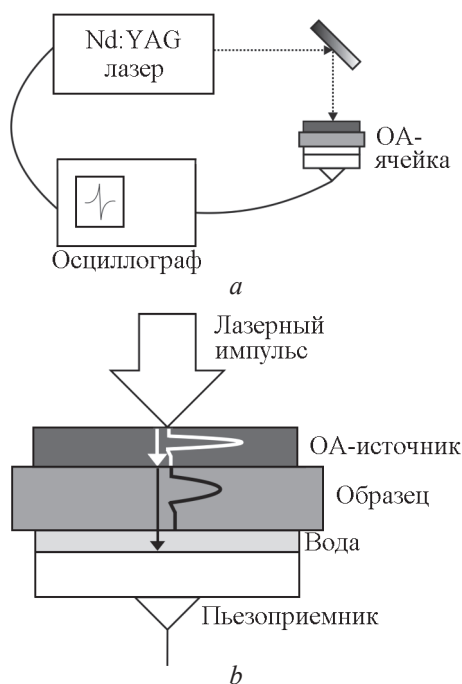


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки (а) и оптико-акустическая ячейка (b).

Fig. 1. Block scheme of experimental setup (a) and optoacoustic cell (b).

щим (или опорным). В качестве ОА-источника ультразвука в данных экспериментах был использован водный раствор черной туши. На рис. 2 приведены временной профиль, амплитудный и фазовый спектры зондирующего ультразвукового импульса. Регистрацию ультразвуковых импульсов, прошедших через исследуемый образец, осуществляли с помощью широкополосного пьезоприемника, изготовленного на основе ПВДФ пленки толщиной 30 мкм, и имеющего рабочую полосу частот 0,1 – 30 МГц. Акустический контакт между образцом и пьезоприемником в ОА-ячейке обеспечивался слоем дистиллированной воды. Электрические сигналы с пьезоприемника передавались на цифровой осциллограф с аналоговой полосой частот 200 МГц и затем обрабатывались на персональном компьютере. Запуск осциллографа был синхронизирован с моментом излучения лазерного импульса. Максимальное соотношение сигнал-шум регистрируемых электрических сигналов составляло порядка 2000.

Дисперсия фазовой скорости продольных акустических волн $C(f)$ в образце толщиной H рассчитана с помощью фазового спектра опорного ультразвукового импульса $\varphi_0(f)$, и фазового спек-

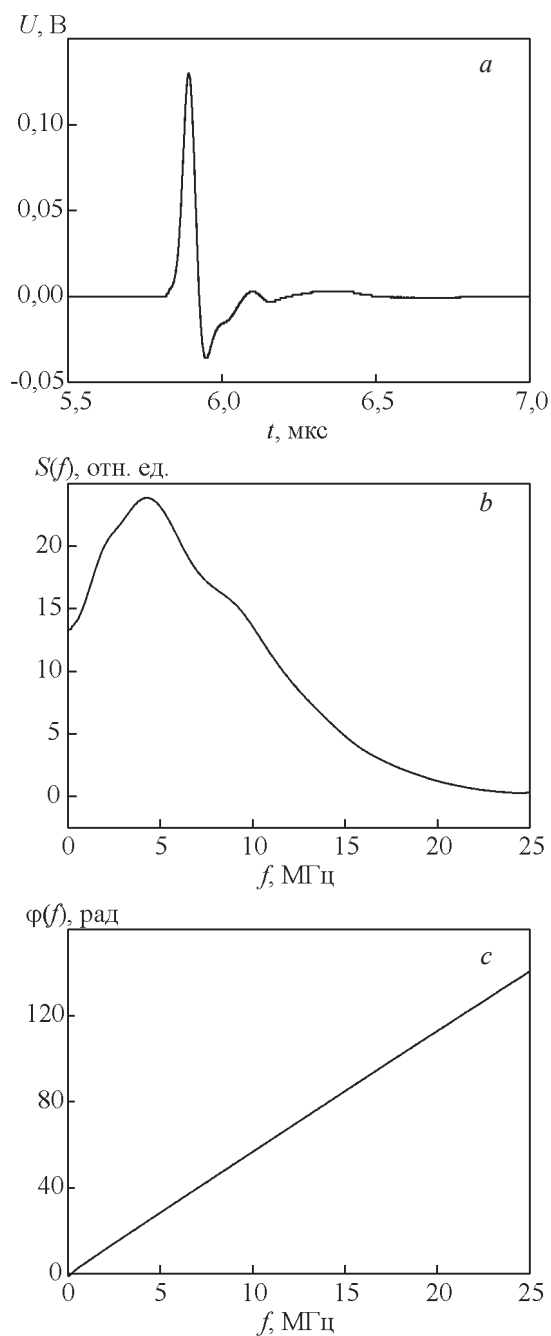


Рис. 2. Временной профиль зондирующего ультразвукового импульса (а), его амплитудный спектр (b) и фазовый спектр (c).

Fig. 2. Reference ultrasonic pulse: time profile (a), amplitude spectrum (b) and phase spectrum (c).

тра импульса $\varphi(f)$, прошедшего через исследуемый образец [21]:

$$C(f) = \frac{H}{\Delta T + [\varphi(f) - \varphi_0(f)] / 2\pi f}, \quad (1)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$ — разность моментов начала записи в осциллографе ультразвукового импульса, прошедшего исследуемый образец, и опорного ультразвукового импульса. Оба значения T_1 и T_2 отсчитывают от момента излучения лазерного импульса [22]. Разность фаз $\delta\varphi(f) = \varphi(f) - \varphi_0(f)$ определяется искажением временной формы опорного импульса из-за затухания и дисперсии фазовой скорости акустических волн в образце. Величины $\varphi_0(f)$ и $\varphi(f)$ определяли с использованием стандартной процедуры “развертывания фазы” для получения непрерывных фазовых спектров [22]. Спектры ультразвуковых импульсов рассчитывали с использованием стандартного программного пакета быстрого преобразования Фурье, также для всех спектров применяли процедуру компенсации частотно-зависимого дифракционного искажения широкополосных ультразвуковых импульсов, детально описанную в [23].

Исследуемые образцы

В настоящей работе исследовали восемь образцов углепластиков с различными пористостью и объемным содержанием полимерной матрицы и углеродного наполнителя. Исследуемые образцы — однонаправленные углепластики, в которых все ленты углеродных волокон, образующих армирующую ткань, сонаправлены. Толщина образцов составляла 10 – 11 мм. Образцы условно разделены на группы с одинаковым содержанием компонентов. Составы исследованных образцов приведены в табл. 1.

Величина фазовой скорости продольных акустических волн C_0 в беспористом композиционном

материале может быть рассчитана исходя из модели двухкомпонентной среды, которая связывает объемные концентрации матрицы и наполнителя и фазовые скорости в отдельных компонентах с фазовой скоростью продольных акустических волн в композитном материале [24]:

$$C_0^2 = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{n_m}{\rho_m C_m^2} + \frac{n_f}{\rho_f C_f^2} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Плотности матрицы и наполнителя составляют $\rho_m = 1200$ кг/м³ и $\rho_f = 1744$ кг/м³ соответственно, а фазовые скорости в матрице и наполнителе C_m и C_f могут быть измерены с использованием методики широкополосной акустической спектроскопии и считаются известными. Величины C_0 для каждой группы образцов с различным содержанием компонентов, полученные с помощью формулы (2), также представлены в табл. 1.

Пористость P , усредненная по всему объему образца, определяется как

$$P = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right),$$

где ρ_0 — плотность твердой фазы образца (без пор), а ρ — фактическая плотность образца. Плотность ρ_0 рассчитывается по известным плотностям полимерной матрицы ρ_m и углеродной ткани ρ_f и их объемным концентрациям n_m и n_f в данном образце: $\rho_0 = n_m \rho_m + n_f \rho_f$ (где $n_m + n_f = 1$). Оценку пористости исследованных образцов проводили с использованием рентгеновской компьютерной томографии. Результаты томографии показали, что суммарная пористость P в исследованных образцах варьируется от 0 % до 4,2 % (табл. 1).

Таблица 1

Состав углепластиковых образцов

Table 1

Composition of carbon fiber plastic composite samples

№ образца	Объемное содержание матрицы, %	Объемное содержание наполнителя, %	Скорость продольных акустических волн в беспористом образце, м/с	Пористость, %
1-1	32,8	67,2	3035 ± 15	2,5
1-2				4,2
2-1	34,9	65,1	3008 ± 15	0
3-1	37,5	62,5	2977 ± 15	0
3-2				0,7
3-3				2
4-1	44,2	55,8	2905 ± 15	1,4
4-2				2,9

Результаты и обсуждение

Расчет фазовой скорости продольных акустических волн в образцах углепластика проводили по измеренным фазовым спектрам с помощью формулы (1). Частотные зависимости фазовой скорости $C(f)$ для исследованных образцов получены в частотном диапазоне от 0,8 до 10 МГц. Величину фазовой скорости для частот $f < 0,8$ МГц не определяли по причине достаточно большой погрешности, которая возникает из-за дифракции низкочастотных составляющих сигнала в образцах. Из-за сильного затухания высоких частот в углепластиковых образцах для частот $f > 10$ МГц амплитуда прошедшего импульса достаточно мала и сравнима с уровнем шума. Поэтому на частотах выше 10 МГц фазовую скорость также не изучали. В данных экспериментах относительная погрешность измерения скорости ультразвука составляла около 0,5 %. Точность измерения фазовой скорости акустических волн определяется погрешностью измерения толщины исследуемого образца, а также соотношением сигнал-шум для спектральной амплитуды каждой гармоники сигнала. Локальность исследования образцов в поперечном направлении определяется характерным радиусом ультразвукового зондирующего пучка, совпадающим с радиусом лазерного пучка на облучаемой поверхности ОА-источника, и составляет 2 – 3 мм.

На рис. 3 показаны полученные частотные зависимости фазовой скорости продольных акустических волн $C(f)$ в углепластиках. Видно, что величина дисперсии скорости для образцов с различной пористостью будет отличаться. Увеличение относительной дисперсии фазовой скорости для пористого материала происходит из-за преобразования исходной продольной акустической волны в объемную волну, которая будет огибать поры по их границам [25]. Это приводит к уменьшению скорости ультразвуковых волн на низких частотах по сравнению со скоростью в беспористом материале. Отсутствие резонансов в $C(f)$ для исследуемых композитных образцов связано с технологией производства материала, обеспечивающей близкие значения акустических импедансов слоев волокон и матрицы (различие порядка 3 %) и высокой адгезией волокон к матрице. Следует также отметить, что во всем исследуемом спектральном диапазоне абсолютное значение фазовой скорости для беспористого материала будет тем выше, чем больше объемная концентрация углеродного волокна в образце (поскольку скорость ультразвука в волокне выше, чем в матрице).

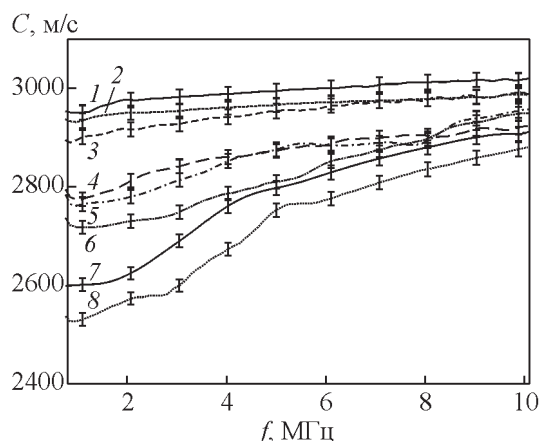


Рис. 3. Зависимости фазовой скорости продольных акустических волн в пористых углепластиках от частоты (в скобках указаны номера образцов): 1 — $P = 0$ % (обр. 2-1), 2 — $P = 0$ % (3-1), 3 — $P = 0,7$ % (3-2), 4 — $P = 1,4$ % (4-1), 5 — $P = 2$ % (3-3), 6 — $P = 2,5$ % (1-1), 7 — $P = 2,9$ % (4-2), 8 — $P = 4,2$ % (1-2).

Fig. 3. Frequency dependences of phase velocity of longitudinal acoustic waves in porous carbon fiber plastic composites (sample numbers are shown in parentheses): 1 — $P = 0$ % (no. 2-1), 2 — $P = 0$ % (no. 3-1), 3 — $P = 0.7$ % (no. 3-2), 4 — $P = 1.4$ % (no. 4-1), 5 — $P = 2$ % (no. 3-3), 6 — $P = 2.5$ % (no. 1-1), 7 — $P = 2.9$ % (no. 4-2), 8 — $P = 4.2$ % (no. 1-2).

Для получения зависимости дисперсии фазовой скорости от пористости углепластика предлагается рассматривать ее относительное изменение

$$\Delta C_1 = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max}},$$

где C_{\max} и C_{\min} — максимальная и минимальная величины фазовой скорости продольных акустических волн в диапазоне 0,8 – 10 МГц. Экспериментально полученная зависимость $\Delta C_1(P)$ показана на рис. 4а. Анализ полученных результатов показал, что $\Delta C_1(P)$ может быть аппроксимирована по методу наименьших квадратов степенной функцией с корреляцией не хуже 0,978:

$$y = 0,021 + 0,024x^{1,04}, \quad (3)$$

где независимая переменная x соответствует пористости углепластика P , а переменная y — величине относительного изменения фазовой скорости продольных акустических волн ΔC_1 в исследуемом частотном диапазоне.

Величина фазовой скорости C на высоких частотах должна стремиться к величине скорости C_0 для беспористого материала, зависящей только от процентного содержания компонентов. Для большинства исследуемых образцов данная вели-

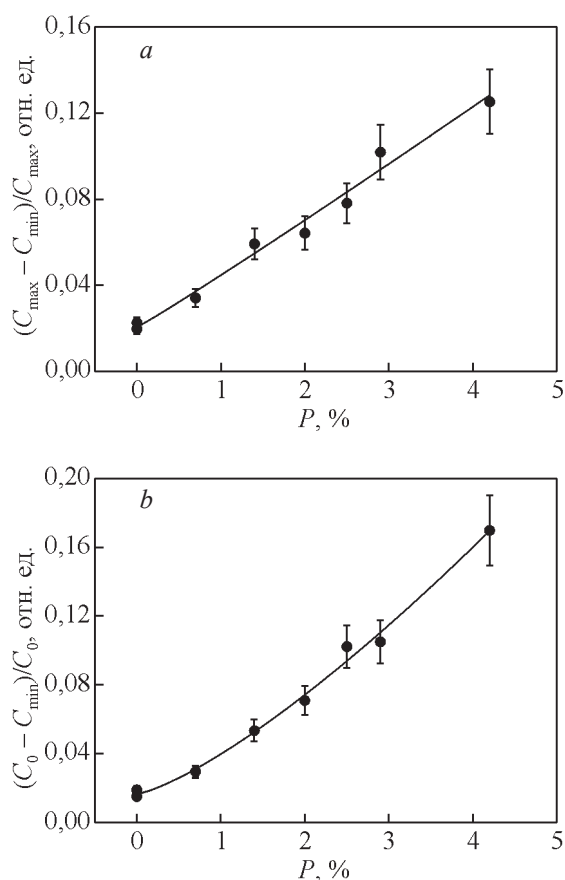


Рис. 4. Зависимости относительного изменения фазовой скорости продольных акустических волн для пористых углепластиков: а — $\Delta C_1 = (C_{\max} - C_{\min})/C_{\max}$, б — $\Delta C_2 = (C_0 - C_{\min})/C_0$.

Fig. 4. Dependences of the relative change in the phase velocity of longitudinal acoustic waves for porous carbon fiber plastic composites: а — $\Delta C_1 = (C_{\max} - C_{\min})/C_{\max}$, б — $\Delta C_2 = (C_0 - C_{\min})/C_0$.

чина скорости с учетом погрешностей измерения достигается уже на частотах 9 – 10 МГц, причем достигается тем раньше, чем меньше величина абсолютной дисперсии скорости $\Delta C = C_{\max} - C_{\min}$. Для двух образцов с наибольшей величиной абсолютной дисперсии величина C_0 в исследуемом спектральном диапазоне не достигается, C будет стремиться к C_0 на несколько больших частотах, недоступных в данных экспериментах из-за сильного затухания высоких частот в данных образцах. Это может быть обусловлено как высокой пористостью этих образцов, так и тем, что они имеют наиболее высокое содержание волокон (рассеяние на волокнах является дополнительным фактором, влияющим на затухание ультразвука в образце).

Тем не менее, учитывая закономерность $C \rightarrow C_0$, можно также оценить величину относительной дисперсии фазовой скорости продольных акустических волн в образцах как $\Delta C_2 = (C_0 - C_{\min})/C_0$. Полученная зависимость $\Delta C_2(P)$ показана на рис. 4б. Анализ результатов показал, что $\Delta C_2(P)$ может быть аппроксимирована по методу наименьших квадратов степенной функцией с корреляцией не хуже 0,997:

$$y = 0,017 + 0,023x^{1,32}, \quad (4)$$

где независимая переменная x , как и в предыдущем случае, соответствует пористости углепластика P , а переменная y — величине относительного изменения фазовой скорости ΔC_2 . Отметим, что в данном случае точность аппроксимации выше, чем для зависимости $\Delta C_1(P)$. Полученные эмпирические соотношения (3) и (4) могут быть использованы для оперативной неразрушающей оценки пористости композитов.

Выводы

Метод широкополосной лазерно-ультразвуковой спектроскопии, представленный в данной работе, позволяет получать частотные зависимости фазовой скорости ультразвуковых волн в углепластиковых композитах в спектральном диапазоне от единиц до десятков мегагерц.

Исследованы образцы однонаправленных углепластиков с различной средней пористостью и различным объемным содержанием матрицы и наполнителя. Пористость исследованных образцов предварительно определяли методом рентгеновской томографии для получения связи между пористостью материала и частотной зависимостью фазовой скорости продольных акустических волн. Получены частотные зависимости фазовой скорости продольных акустических волн в диапазоне 0,8 – 10 МГц. Показано, что величина относительной дисперсии фазовой скорости тем больше, чем выше пористость материала.

Полученные эмпирические зависимости относительной дисперсии скорости ультразвука от пористости материала могут быть использованы для оперативной неразрушающей оценки пористости углепластиков. Это может применяться для контроля качества получаемых материалов с целью анализа влияния условий производства на свойства получаемого материала при модернизации технологий изготовления композитов. Также представленный метод может быть полезен для предсказания поведения конструкций и деталей из композиционных материала под действием внешних нагрузок.

Аналогичный подход может быть использован и для количественного анализа структуры других композиционных материалов, например, стеклопластиков или металломатричных композитов.

Литература

1. Diamanti K., Soutis C. Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 2010, v. 41, pp. 342 – 352.
2. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, v. 41, pp. 143 – 151.
3. Бирюкова М.И., Юрков Г.Ю., Кирюхин Д.П. и др. Модифицирование углеродных волокон теломерными растворами тетрафторэтилена. *Перспективные материалы*, 2014, № 5, с. 49 – 53.
4. Любин Дж. Справочник по композиционным материалам. М.: Машиностроение, 1988, 447 с.
5. Прикладная механика композитов. Сборник статей под ред. Ю.М. Тарнопольского. М.: Мир, 1989, 358 с.
6. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ. *Электронный научный журнал “Труды ВИАМ”*, 2016, № 6, с. 68 – 78.
7. Adams R.D., Cawle P.A. review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. *NDT Int.*, 1988, v. 21, no. 4, pp. 208 – 222.
8. Scott A.E., Sinclair I., Spearing S.M. et al. Influence of voids on damage mechanisms in carbon/epoxy composites determined via high resolution computed tomography. *Compos. Sci. Technol.*, 2014, v. 90, pp. 147 – 153.
9. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов. *Контроль. Диагностика*, 2007, № 4, с. 23 – 32.
10. Рошупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А. и др. Исследование акустических свойств жаропрочного сплава на никелевой основе. *Перспективные материалы*, 2015, № 8, с. 69 – 74.
11. Рошупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А. и др. Экспериментальное исследование акустических свойств и микротвердости стали 45. *Перспективные материалы*, 2018, № 3, с. 72 – 78.
12. Chimenti D.E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization. *Ultrasonics*, 2014, v. 54, pp. 1804 – 1816.
13. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972, 302 с.
14. Chung, C.-H., Lee, Y.-C. Broadband poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) ultrasound focusing transducers for determining elastic constants of coating materials. *J. Nondestruct. Eval*, 2009, v. 28, pp. 101 – 110.
15. Foster F.S., Ryan L.K., Turnbull D.H. Characterization of lead zirconate titanate ceramics for use in miniature high-frequency (20 – 80 MHz) transducers. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 1991, v. 38, pp. 446 – 453.
16. Колмаков А.Г., Калашников И.Е., Болотова Л.К. и др. Исследование свойств композиционных материалов на основе антифрикционного сплава Б83. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2019, т. 85, № 5, с. 38 – 45.
17. Калашников И.Е., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. и др. Локальные упругие модули дисперсно-наполненных композиционных материалов на основе баббита Б83, изготовленных методами порошковой металлургии. *Неорганические материалы*, 2016, т. 52, № 4, с. 473 – 478.
18. Карабутов А.А., Подымова Н.Б. Влияние пористости на дисперсию фазовой скорости продольных акустических волн в изотропных металломатричных композитах. *Акуст. журн.*, 2017, т. 63, № 3, с. 265 – 274.
19. Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Соколовская Ю.Г. Локальные соотношения Крамерса-Кронига для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в полимерных композитах. *Акуст. журн.*, 2019, т. 65, № 2, с. 182 – 189.
20. Подымова Н.Б., Карабутов А.А., Кобелева Л.И., Чернышова Т.А. Лазерный оптико-акустический метод измерения локальной пористости дисперсно-наполненных металломатричных композиционных материалов. *Перспективные материалы*, 2013, № 3, с. 81 – 87.
21. Fitting D.W., Adler L. *Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation*. New York: Plenum Press, 1981, 354 p.
22. Podymova N.B., Karabutov A.A. Broadband laser-ultrasonic spectroscopy for quantitative characterization of porosity effect on acoustic attenuation and phase velocity in CFRP laminates. *J. Nondestruct. Eval.*, 2014, v. 33, no. 1, pp. 141 – 151.
23. Karabutov A.A., Savateeva E.V., Podymova N.B. et al. Backward mode detection of laser-induced wide-band ultrasonic transients with optoacoustic transducer. *J. Appl. Phys.*, 2000, v. 87, no. 4, pp. 2003 – 2014.
24. Жаркий С.М., Карабутов А.А., Пеливанов И.М. и др. Исследование слоев пористого кремния лазерным ультразвуковым методом. *Физика и техника полупроводников*, 2003, т. 37, вып. 4, с. 485 – 489.
25. Wright T.W. Elastic wave propagation through a material with voids. *J. Mech. Phys. Solids. J. Mech. Phys. Solids*, 1998, v. 46, no. 10, pp. 2033 – 2047.

References

1. Diamanti K., Soutis C. Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 2010, vol. 41, pp. 342 – 352.
2. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, vol. 41, pp. 143 – 151.

3. Biryukova M.I., Yurkov G.Yu., Kiryuhin D.P. et al. Modificirovanie uglerodnih volokon telomernymi rastvorami tetraftoretilena [Modification of carbon fibers with tetrafluoroethylenetelomer solutions]. *Perspektivnye materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2014, no. 5, pp. 49 – 53.
4. Lubin G. Handbook of composites. New York, 1982, 786 p.
5. Tarnopol'skogo Yu.M. *Prikladnaya mekhanika kompozitov* [Applied mechanics of composites]. Moscow, Mir Publ., 1989, 358 p.
6. Dushin M.I., Doneckij K.I., Karavaev R.Yu. Ustanovlenie prichin obrazovaniya poristosti pri izgotovlenii PKM [Identification of the reasons of porosity formation when manufacturing composites]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2016, no. 6, pp. 68 – 78.
7. Adams R.D., Cawle P.A. Review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. *NDT Int.*, 1988, vol. 21, no. 4, pp. 208 – 222.
8. Scott A.E., Sinclair I., Spearing S.M. et al. Influence of voids on damage mechanisms in carbon/epoxy composites determined via high resolution computed tomography. *Compos. Sci. Technol.*, 2014, vol. 90, pp. 147 – 153.
9. Murashov V.V., Romyancev A.F. Defekty monolitnyh detalej i mnogoslojnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov i metody ih vyyavleniya. Chast' 1. Defekty monolitnyh detalej i mnogoslojnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Defects of monolithic details and laminated structures made of polymer composite materials and methods of detecting them. Part.1 Defects of monolithic details and laminated structures made of polymer composite materials]. *Kontrol. Diagnostika — Testings. Diagnostics*, 2007, no. 4, pp. 23 – 32.
10. Roshchupkin V.V., Lyahovickij M.M., Pokrasin M.A. et al. Issledovanie akusticheskikh svojstv zharoprochnogo splava na nikel'noj osnove [Investigation of the acoustic properties of heat-resistant alloy based on nickel]. *Perspektivnye Materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2015, no. 8, pp. 69 – 74.
11. Roshchupkin V.V., Lyahovickij M.M., Pokrasin M.A. et al. Eksperimental'noe issledovanie akusticheskikh svojstv i mikroverdsti stali 45 [Experimental study of acoustic properties and microhardness of 45-type steel]. *Perspektivnye Materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2018, no. 3, pp. 72 – 78.
12. Chimenti D.E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization. *Ultrasonics*, 2014, vol. 54, pp. 1804 – 1816.
13. Truell R., Elbaum C., Chick B.B. Ultrasonic methods in solid state physics. Academic Press, N-Y, London, 1969, 464 p.
14. Chung C.-H., Lee Y.-C. Broadband poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) ultrasound focusing transducers for determining elastic constants of coating materials. *J. Nondestruct. Eval.*, 2009, vol. 28, pp. 101 – 110.
15. Foster F.S., Ryan L.K., Turnbull D.H. Characterization of lead zirconate titanate ceramics for use in miniature high-frequency (20-80 MHz) transducers. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 1991, vol. 38, pp. 446 – 453.
16. Kolmakov A.G., Kalashnikov I.E., Bolotova L.K. et al. Issledovanie svojstv kompozicionnyh materialov na osnove antifrikcionnogo splava B83 [Study of the properties of composite materials based on antifriction alloy B83]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2019, vol. 85, no. 5, pp. 38 – 45.
17. Kalashnikov I.E., Podymova N.B., Karabutov A.A. et al. Local elastic moduli of particle-filled B83 babbitt-based composite materials prepared by powder metallurgy techniques. *Inorganic Materials*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 429 – 434.
18. Karabutov A.A., Podymova N.B. Influence of the porosity on the dispersion of the phase velocity of longitudinal acoustic waves in isotropic metal-matrix composites. *Acoustical Physics*, 2017, vol. 63, no. 3, pp. 288 – 296.
19. Karabutov A.A., Podymova N.B., Sokolovskaya Yu.G. Local Kramers–Kronig relations between the attenuation coefficient and phase velocity of longitudinal ultrasonic waves in polymer composites. *Acoustical Physics*, 2019, vol. 65, no. 2, pp. 158 – 164.
20. Podymova N.B., Karabutov A.A., Kobeleva L.I., Chernyshova T.A. Lazernyj optiko-akusticheskij metod izmereniya lokal'noj poristosti dispersno-naplnennyh metallomatrichnyh kompozicionnyh materialov [Laser optoacoustic method of local porosity measurement of dispersed particlesreinforced metal-matrix composite materials]. *Perspektivnye Materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2013, no. 3, pp. 81 – 87.
21. Fitting D.W., Adler L. Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation. New York, Plenum Press, 1981, 354 p.
22. Podymova N.B., Karabutov A.A. Broadband laser-ultrasonic spectroscopy for quantitative characterization of porosity effect on acoustic attenuation and phase velocity in CFRP laminates. *J. Nondestruct. Eval.*, 2014, vol. 33, no. 1, pp. 141 – 151.
23. Karabutov A.A., Savateeva E.V., Podymova N.B. et al. Backward mode detection of laser-induced wide-band ultrasonic transients with optoacoustic transducer. *J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 87, no. 4, pp. 2003 – 2014.
24. Zharkii S.M., Karabutov A.A., Pelivanov I.M., Podymova N.B., Timoshenko V.Y. Laser ultrasonic study of porous silicon layers. *Semiconductors*, 2003, vol. 37, no. 4, pp. 468 – 472.
25. Wright T.W. Elastic wave propagation through a material with voids. *J. Mech. Phys. Solids*, 1998, vol. 46, no. 10, pp. 2033 – 2047.

*Статья поступила в редакцию — 10.08.2020 г.
после доработки — 12.09.2020 г.
принята к публикации — 13.09.2020 г.*

Соколовская Юлия Глебовна — МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет (119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2), механик, специалист в области лазерных оптико-акустических методов исследования композиционных материалов и других конденсированных сред. E-mail: yu.sokolovskaya@mail.ru.

Подымова Наталья Борисовна — МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет (119991, Москва, Ленинские Горы, д.1, стр. 2), кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, специалист в области лазерной оптоакустики, оптико-акустических методов исследования композиционных материалов и других конденсированных сред. E-mail: prodymova@mail.ru.

Карабутов Александр Алексеевич — Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские Горы, д.1, стр. 62), доктор физико-математических наук, профессор, специалист в области акустики и лазерной оптоакустики. E-mail: aak@optoacoustic.ru.

Application of wideband laser-ultrasonic spectroscopy for non-destructive control of porosity in carbon plastics with various volume content of carbon fiber

Yu. G. Sokolovskaya, N. B. Podymova, A. A. Karabutov

In this work, to obtain the frequency dependences of the phase velocity of longitudinal acoustic waves in composite materials, we use the method of broadband laser-ultrasonic spectroscopy, based on laser thermo-optical excitation of broadband acoustic pulses. Unidirectional carbon fiber reinforced plastics samples with different volume contents of the matrix and fiber were taken as objects of study. For the studied samples, the frequency dependences of the phase velocity were obtained in the spectral range of 0.8 – 10 MHz, and the existence of the phase velocity dispersion in this range was shown. The phase velocity dispersion of longitudinal acoustic waves in the sample was calculated using the phase spectra of the probe ultrasonic pulse and the pulse transmitted through the sample under study. It is also shown that the relative dispersion of the phase velocity characterizes the porosity of the sample, and the higher the porosity, the greater the relative dispersion. Empirical relations obtained for the relationship between porosity and relative dispersion can be used for the operational non-destructive assessment of the porosity of composites. The results obtained can be useful both for quality control of the materials obtained with the aim of modernizing manufacturing technologies and for predicting the behavior of structures and parts of this material under external loads.

Keywords: carbon fiber reinforced plastics (CFRPs), polymer composite materials, ultrasonic methods, laser ultrasonic spectroscopy, porosity, longitudinal acoustic waves, phase velocity.

Sokolovskaya Yulia — M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics (Moscow 119991, Leninslie Gori, 1/2), engineer, specialist in the field of laser optoacoustic methods of studying composite materials and other condensed matter. E-mail: yu.sokolovskaya@mail.ru.

Podymova Natalia — M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics (Moscow 119991, Leninslie Gori, 1/2), PhD, associate professor, specialist in the field of laser optoacoustics, optoacoustic methods of studying composite materials and other condensed matter. E-mail: npodymova@mail.ru.

Karabutov Alexander — M.V. Lomonosov Moscow State University, International Laser Center (Moscow 119991, Leninslie Gori, 1/62), PhD, professor, specialist in the field of acoustics and laser optoacoustics. E-mail: aak@optoacoustic.ru.