АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2013, том 59, № 6, с. 714–721

ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.212

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ НА ЗАТУХАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТАХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2013 г. А. А. Карабутов*, Н. Б. Подымова, И. О. Беляев*****

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Международный учебно-научный лазерный центр*
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы
Тел.: (495) 939-5309; E-mail: aak@ilc.edu.ru
***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет*
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы
Тел.: (495) 939-5309; E-mail: npodymova@mail.ru
****ЗАО "Аэрокомпозит"*
125284, Москва, ул. Поликарпова 27, стр. 3
Тел.: (495) 940-8710; E-mail: i_belyaev@aerocomposit.ru

Поступила в редакцию 19.04.2013 г.

Экспериментально реализован метод широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвука для количественного анализа влияния пористости на коэффициент затухания продольных акустических волн в углепластиковых композитных материалах. Исследуемые образцы имели различный уровень объемной пористости (до 10%), определенный методом рентгеновской компьютерной томографии. Для всех образцов наблюдался резонансный пик затухания ультразвука, связанный с одномерной периодичностью слоистой структуры композита. Абсолютное значение максимума и ширина резонансного пика зависят от локальной концентрации микроскопических изолированных пор и протяженных расслоений в структуре образцов. Полученные эмпирические соотношения между этими параметрами частотной зависимости коэффициента затухания ультразвука и типом неоднородностей и их объемной концентрацией могут быть использованы для оперативной оценки качества структуры углепластиковых композитов.

Ключевые слова: широкополосная акустическая спектроскопия, слоистые структуры, пористость, коэффициент затухания ультразвука.

DOI: 10.7868/S0320791913060099

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время углепластиковые композитные материалы находят все более широкое распространение в промышленности в качестве высоконапряженных силовых элементов, поскольку они позволяют создавать прочные и легкие конструкции. Однако из-за своей двухфазной структуры такие материалы уже при изготовлении могут обладать значительной пористостью (объемной концентрацией газовых пор). Пористость может возникать также при усталостных изменениях структуры материала в процессе эксплуатации изделий, что может привести к значительному уменьшению их прочности [1, 2]. Суммарная пористость материала может быть обусловлена присутствием как изолированных пор (с размером порядка десятков микрон) в слоях эпоксидной смолы, так и крупных протяженных расслоений размером до нескольких миллиметров. Известно, что влияние этих двух типов неоднородностей на межслойную сдвиговую прочность и жесткость материала различно [3]. Поэтому разработка методов количественного анализа типа дефектов, формирующих пористость, и их объемного содержания является актуальной для решения задач выработки критериев зависимости прочности и остаточного ресурса углепластиковых композитов от степени поврежденности структуры материала.

Поры и расслоения оказывают существенное влияние на затухание и скорость распространения ультразвука в материале из-за эффективного рассеяния на них акустических волн (см., например, [4, 5]). Поэтому в настоящее время для неразрушающей диагностики структуры композитных материалов широко применяются ультразвуковые методы, основанные на анализе коэффициента затухания и фазовой скорости ультразвуковых волн, распространяющихся в объекте контроля [6]. Поскольку эффективность рассеяния ультразвука на

неоднородности существенно зависит от соотношения ее размера и формы и длины зондирующей акустической волны, для количественного анализа пористости композитов перспективным представляется использование метода широкополосной акустической спектроскопии (см., например, [7, 8]). Как указывалось выше, размер несплошностей в композитах может варьироваться от десятков микрометров до нескольких миллиметров. Поэтому для количественного анализа пористости композитов необходимо измерять коэффициент затухания ультразвука в достаточно широкой полосе частот – от долей до десятков мегагерц. Однако эффективное возбуждение коротких и мощных зондирующих акустических импульсов в широком спектральном диапазоне с использованием традиционных пьезоэлектрических излучателей ультразвука сталкивается с определенными трудностями, прежде всего, из-за низкой эффективности пьезовозбуждения широкополосных акустических сигналов [9]. Также существенными недостатками традиционных ультразвуковых систем являются технические трудности обеспечения равномерности частотной характеристики пьезоэлектрических излучателей и приемников ультразвука в широком спектральном диапазоне. Отсутствие такой равномерности может привести к уменьшению динамического диапазона при регистрации сигналов в материалах с сильной зависимостью коэффициента затухания ультразвука от частоты [9].

Для преодоления этих трудностей в системах широкополосной акустической спектроскопии целесообразно применение лазерного термооптического механизма возбуждения ультразвука – оптико-акустического (ОА) эффекта [10]. При использовании импульсных лазеров с модуляцией добротности амплитуда возбуждаемых ультразвуковых импульсов – ОА сигналов – может достигать сотен мегапаскалей в спектральном диапазоне от долей до сотен мегагерц. Основными преимуществами использования лазерных источников ультразвука в системах широкополосной акустической спектроскопии являются малая длительность и большая амплитуда зондирующих ультразвуковых сигналов [11]. Это позволяет существенно повысить точность измерений и спектральный диапазон для обнаружения влияния структурных изменений в сильно поглощающих и рассеивающих ультразвук композитных материалах на спектры затухания акустических волн [12].

Целью настоящей работы является развитие метода акустической спектроскопии с лазерным источником и широкополосной пьезоэлектрической регистрацией ультразвуковых импульсов для количественного анализа влияния типа несплошностей – изолированных микроскопических пор и протяженных расслоений – и их объемной концентрации на коэффициент затухания продольных акустических волн в углепластиковых композитах. Исследуемые образцы имели различный уровень суммарной объемной пористости (до 10%), определенный методом рентгеновской компьютерной томографии, этим же методом определялся тип несплошностей в образцах. Основная идея заключается в изучении особенностей распространения широкополосных ультразвуковых импульсов в слоистой периодической структуре композита и анализе влияния нарушений периодичности, вызванных несплошностями различных типов, на частотную зависимость коэффициента затухания продольных акустических волн.

МЕТОДИКА ШИРОКОПОЛОСНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ЛАЗЕРНЫМ ИСТОЧНИКОМ УЛЬТРАЗВУКА

Блок-схема экспериментальной установки широкополосного акустического спектрометра с лазерным источником ультразвука показана на рис. 1. Лазерный импульс поглощается в специально подобранной среде – источнике ультразвука – что приводит к неоднородному нестационарному нагреву приповерхностного слоя этой среды. Его последующее тепловое расширение приводит к возникновению импульса продольных ультразвуковых волн – ОА сигнала. Амплитуда, временная форма и, соответственно, спектр ОА сигнала определяется временным профилем интенсивности поглощенного лазерного импульса, оптическими и теплофизическими свойствами поглощающей среды, а также граничными условиями возбуждения ультразвука [10]. ОА сигнал, возбуждаемый в источнике, является опорным в данной системе. После пробега по исследуемому образцу профиль опорного сигнала искажается за счет затухания ультразвуковых волн. Сигнал, прошедший образец, регистрируется специально разработанным широкополосным пьезоэлектрическим приемником. Акустические контакты между источником ультразвука, образцом и приемником обеспечиваются слоями слабо поглощающей ультразвук жидкости, как правило, дистиллированной воды.

Амплитудный спектр $S(f)$ ультразвукового импульса, прошедшего исследуемый образец толщины H, описывается выражением:

$$S(f) = S_0(f)\exp[-\alpha(f)H], \tag{1}$$

где $S_0(f)$ – амплитудный спектр опорного импульса, $\alpha(f)$ – частотно-зависимый коэффициент затухания продольных акустических волн в образце. Соответственно

$$\alpha(f) = \frac{1}{H}\ln\frac{S_0(f)}{S(f)}. \tag{2}$$

Дисперсия фазовой скорости продольных акустических волн $C(f)$ в образце определяется по из-

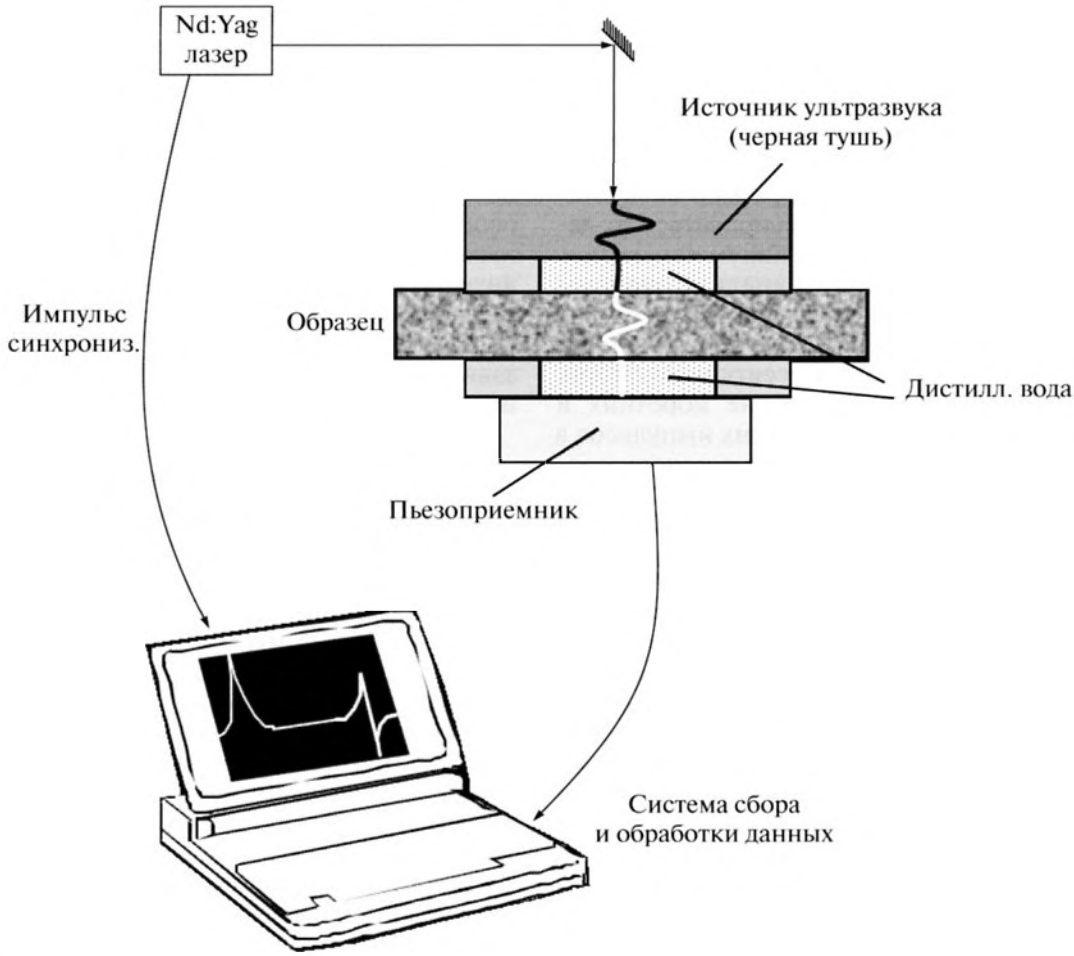

Рис. 1. Блок-схема широкополосного акустического спектрометра с лазерным источником ультразвука.

меренным фазовым спектрам опорного ультразвукового импульса, $\varphi_0(f)$, и импульса, прошедшего через образец, $\varphi(f)$:

$$C(f) = \frac{2\pi f H}{\varphi(f) - \varphi_0(f)}. \quad (3)$$

В применяемом в настоящей работе спектрометре для возбуждения ультразвука использовались импульсы Nd:YAG лазера с модуляцией добротности на основной длине волны излучения 1.064 мкм. В качестве источника ультразвука применялся водный раствор черной туши в герметичной кварцевой кювете. Характерная длительность лазерного импульса 10–12 нс, энергия в импульсе 10–15 мДж, частота повторения импульсов 10 Гц. Временной профиль и амплитудный спектр опорного ультразвукового импульса, возбуждаемого в растворе туши, представлены на рис. 2.

Характерный радиус ультразвукового опорного пучка совпадает с радиусом лазерного пучка на облучаемой поверхности туши и составляет $a = 2$–3 мм. Поэтому локальность тестирования в поперечном направлении будет практически такой же при условии, что толщина образца меньше, чем дифракционная длина для акустической волны в образце [13]. В нашем случае широкополосных импульсов дифракционная длина $L_{difr} = \pi a^2/\lambda$ может быть оценена для длины волны λ, соответствующей частоте f_{sm} максимума спектра опорного ультразвукового импульса ($f_{sm} \approx 2.5$ MHz). Значение L_{difr} для этой частоты для типичного образца углепластикового композита составляет $L_{difr} \approx 17$ мм (для расчета взяты значения $a = 2.5$ мм, $C = 2900$ м/с). Поэтому для образцов толщиной $H \leq L_{difr}$ локальность тестирования в поперечном направлении сохранится на уровне 2–3 мм и будет ухудшаться при увеличении толщины образца из-за дифракционной расходимости ультразвукового пучка.

Для регистрации широкополосных ультразвуковых импульсов использовался специально изготовленный пьезоприемник на основе органической пленки ПВДФ толщиной 30 мкм, рабочая полоса частот составляла 0.1–30 МГц. Электриче-

ские сигналы с пьезоприемника поступали на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), частота дискретизации которого составляла 100 МГц, и затем обрабатывались на персональном компьютере. Запуск АЦП был синхронизирован с лазерным импульсом.

Максимальная толщина исследуемых образцов углепластиковых композитов определяется величиной коэффициента затухания в материале и динамическим диапазоном системы регистрации и обработки сигналов в спектрометре. Для типичного углепластикового композита значение коэффициента затухания на частоте 10 МГц составляет 0.4–0.7 дБ/см [8], динамический диапазон составлял 50–60 дБ. Таким образом, данная установка позволяет осуществлять акустическую спектроскопию образцов углепластиковых композитов толщиной до 25–30 мм.

Спектры ультразвуковых импульсов рассчитываются с использованием стандартного программного пакета быстрого преобразования Фурье, учитывая амплитудные коэффициенты отражения акустической волны на каждой границе раздела в оптико-акустической ячейке. Частотные зависимости коэффициента затухания $\alpha(f)$ и фазовой скорости $C(f)$ продольных ультразвуковых волн в образцах могут быть рассчитаны в реальном масштабе времени благодаря высокому отношению сигнал–шум и высокой стабильности временного профиля опорных ультразвуковых импульсов.

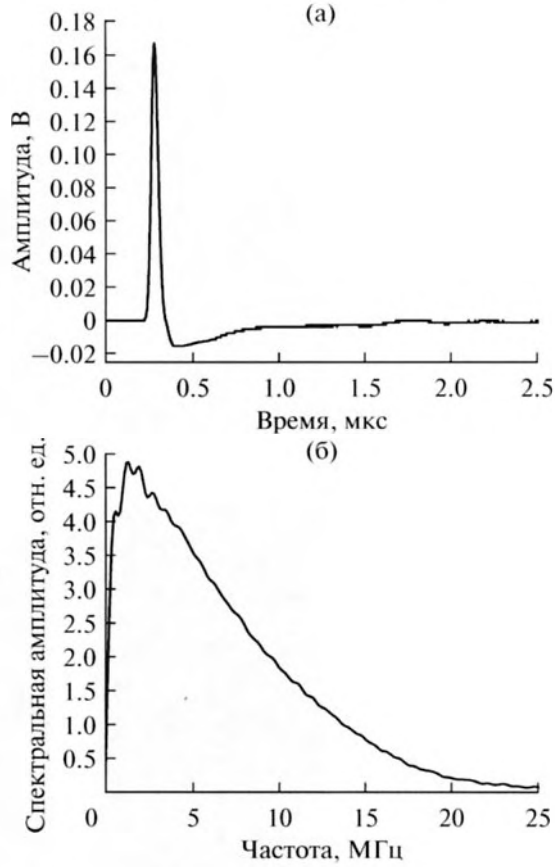

Рис. 2. Временной профиль (а) и спектр (б) опорного ультразвукового импульса в акустическом спектрометре.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ

Исследуемые образцы углепластиковых композитов представляли собой параллелепипеды с поперечными размерами 40 × 40 мм и толщиной $H = 8$ мм, которые состояли из 36 слоев графитовых волокон, уложенных по схеме $[0°/90°]_s$, средняя толщина каждого слоя 200 мкм. Три образца были исследованы методом рентгеновской компьютерной томографии, и в каждом образце были выбраны по две области с различным уровнем суммарной пористости. На рис. 3 представлены соответствующие рентгенограммы для шести выбранных областей, обозначенные как "область 1", "область 2" и т.д. Значение общей пористости P_X рассчитывалось как отношение суммарного объема пор различной формы с линейным размером более 40 мкм, V_{por}, в данной области к общему объему V этой области:

$$P_X = (V_{por}/V_0) \times 100\%. \quad (4)$$

Рассчитанные таким образом значения P_X для всех исследуемых областей указаны на рис. 3. Для областей 1–4 наблюдаются только микроскопические квазисферические поры, локализованные в слоях эпоксидной смолы. В областях 5–6 суммарная пористость определяется в основном протяженными "межслойными" расслоениями длиной до нескольких миллиметров и толщиной порядка 100–200 мкм.

При проведении акустической спектроскопии образцы располагались таким образом, что опорный ультразвуковой импульс распространялся в плоскости изотропии образца перпендикулярно слоям графитовых волокон. С точки зрения особенностей распространения ультразвука данный материал может рассматриваться как одномерная периодическая слоистая структура [14]. Поэтому в спектре прошедшего ультразвукового импульса должны наблюдаться полосы прозрачности и непрозрачности (см., например, [15, 16]). Вблизи полос непрозрачности происходит существенное "резонансное" возрастание коэффициента затухания ультразвука. Значение частоты, соответствующей центру полосы непрозрачности, и общая спектральная ширина этой полосы существенно зависят от пространственного периода слоистой структуры композита и от соотношения акустических импедансов чередующихся слоев. Эти параметры полосы непрозрачности могут быть рассчитаны с помощью широко применяе-

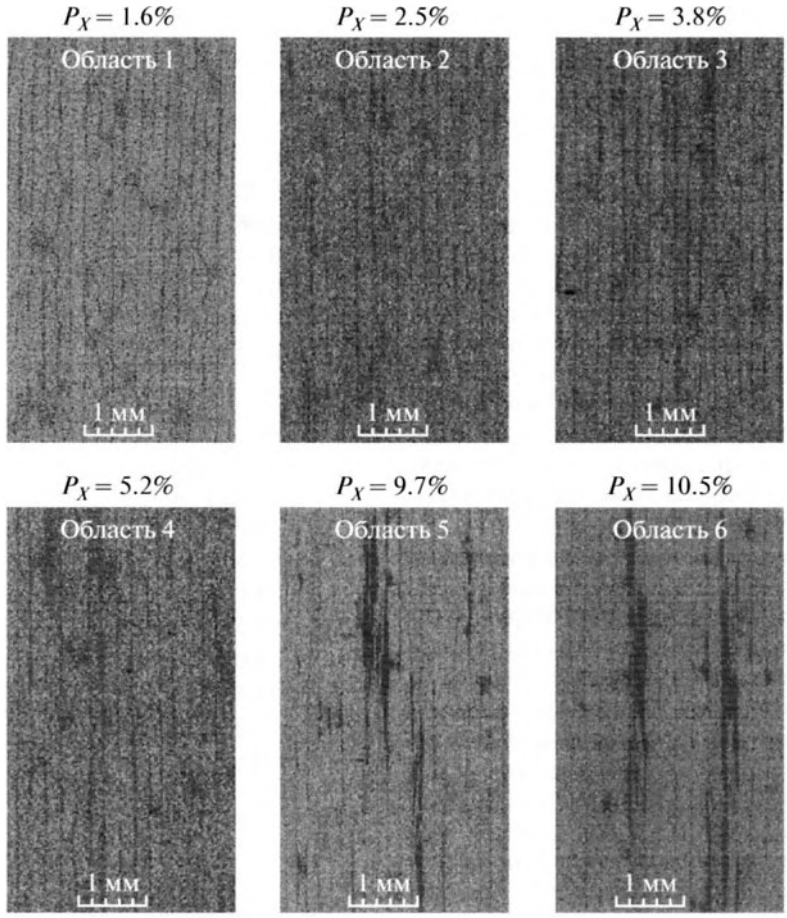

Рис. 3. Результаты рентгеновской компьютерной томографии образцов углепластиковых композитов.

мого метода передаточных матриц [15–18] (в англоязычной литературе "T-matrix approach"). Любое нарушение периодичности композита приводит к уширению полос прозрачности и непрозрачности и к появлению изрезанной "нерегулярной" структуры этих полос, например, к возникновению локальных пиков пропускания внутри полос непрозрачности [17–19]. Эти особенности могут быть использованы в методе широкополосной акустической спектроскопии для оперативного анализа типа несплошностей, возникших в периодической структуре композита, например, протяженных расслоений и их объемной концентрации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры временных профилей и спектров ультразвуковых импульсов, прошедших области композитных образцов с различным уровнем пористости, представлены на рис. 4. Видно, что увеличение пористости и присутствие расслоений приводят к увеличению длительности импульса из-за возрастающего затухания ультразвука. В спектрах прошедших импульсов через области с достаточно низким уровнем суммарной пористости ($P_X \leq 5.2\%$) отчетливо наблюдается полоса непрозрачности в окрестности центральной частоты $f_0 \approx 6.5$ МГц.

Рассчитанные по формуле (2) частотные зависимости коэффициента затухания продольных акустических волн $\alpha(f)$ во всех исследуемых областях образцов композитов представлены на рис. 5. Для частот менее 0.5 МГц коэффициент затухания не определялся из-за малости его значения и, соответственно, большой относительной погрешности, вызванной дифракцией низкочастотных гармоник сигнала в образце. В высокочастотной области спектра амплитуда прошедшего импульса достаточно мала по сравнению с уровнем шума из-за значительного затухания ультразвука в образце. Поэтому в области частот $f > 12$ МГц коэффициент затухания ультразвука α также не определялся. Относительная погрешность определения α в полосе частот 0.5–12 МГц зависит от соотношения сигнал–шум для спектральной амплитуды каждой гармоники и от стабильности

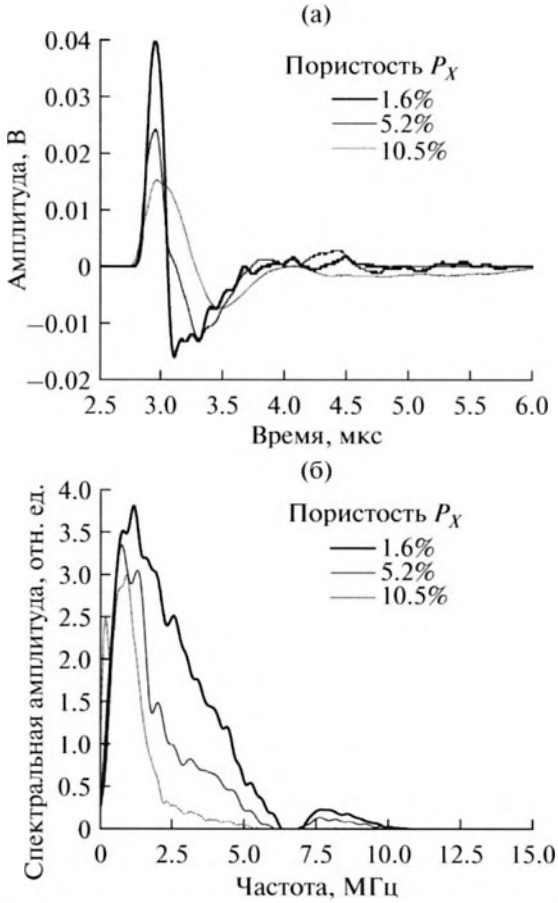

Рис. 4. Временные профили (а) и спектры (б) ультразвуковых импульсов, прошедших области образцов углепластиковых композитов с различным уровнем пористости P_X.

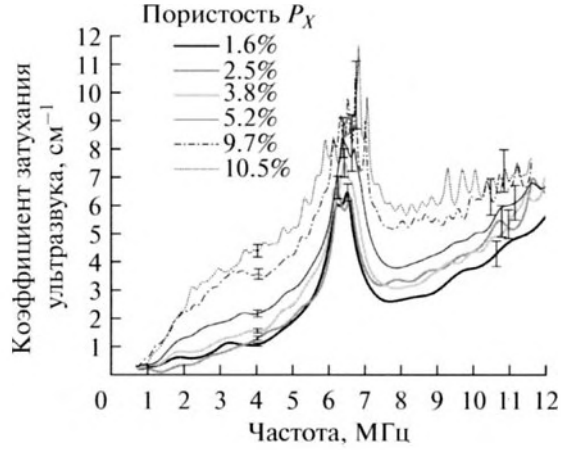

Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента затухания продольных акустических волн в областях образцов углепластиковых композитов с различным уровнем пористости P_X.

энергии лазерных импульсов. Эта погрешность меняется от 3% для максимальной спектральной амплитуды до 10% для минимальной спектральной амплитуды ультразвуковых импульсов, прошедших образец композита.

Резонансный пик затухания ультразвука, соответствующий полосе непрозрачности, отчетливо наблюдается в окрестности частоты $f_0 = 6.5$ МГц для всех исследованных областей. Практически одно и то же значение f_0 для всех областей указывает на то, что в целом периодичность структуры сохраняется даже в присутствии расслоений, величина периода может быть рассчитана [17–19] с использованием выражения:

$$d = \frac{C(f_0)}{2f_0}, \tag{5}$$

где $C(f_0)$ – значение фазовой скорости на резонансной частоте f_0, полученное из измеренной дисперсионной кривой (3) для каждой исследованной области образцов. Результаты расчета по формуле (5) для всех шести областей дают значение $d \approx 200$–220 мкм, что достаточно хорошо соответствует результатам рентгеновской томографии (рис. 3).

Абсолютное значение максимума резонансного пика затухания α_{max} и его спектральная ширина по полувысоте Δf_{FWHM} были определены по зависимостям $\alpha(f)$ для всех исследованных областей. Было обнаружено, что увеличение объемного содержания микроскопических изолированных пор (примерно до 5%) незначительно влияет на величины α_{max} и Δf_{FWHM}. Локальное нарушение периодичности структуры (протяженные расслоения в областях 5 и 6) вызывает значительное возрастание величины α_{max}, появление нерегулярностей внутри резонансного пика затухания и соответствующее увеличение его ширины Δf_{FWHM}.

Для количественного анализа влияния мелких изолированных пор и протяженных расслоений на затухание ультразвука рассматриваются зависимости величины максимума пика затухания α_{max} и его ширины Δf_{FWHM} от пористости P_X. Экспериментальные данные (точки) и их математическая аппроксимация по методу наименьших квадратов (сплошные кривые) показаны на рис. 6. Погрешность величины α_{max} определяется, в основном, соотношением сигнал–шум для спектральной гармоники сигнала на частоте f_0, поэтому она увеличивается для областей с большим затуханием ультразвука. Погрешность величины Δf_{FWHM} определяется как погрешностью α_{max}, так и возрастанием ширины резонансной кривой затухания для областей с более высоким уровнем пористости. Было обнаружено, что зависимость $\alpha_{max}(P_X)$ может быть аппроксимирована линейной функцией с корреляцией не хуже 0.993:

$$y(x) = 0.55x + 5.42. \tag{6}$$

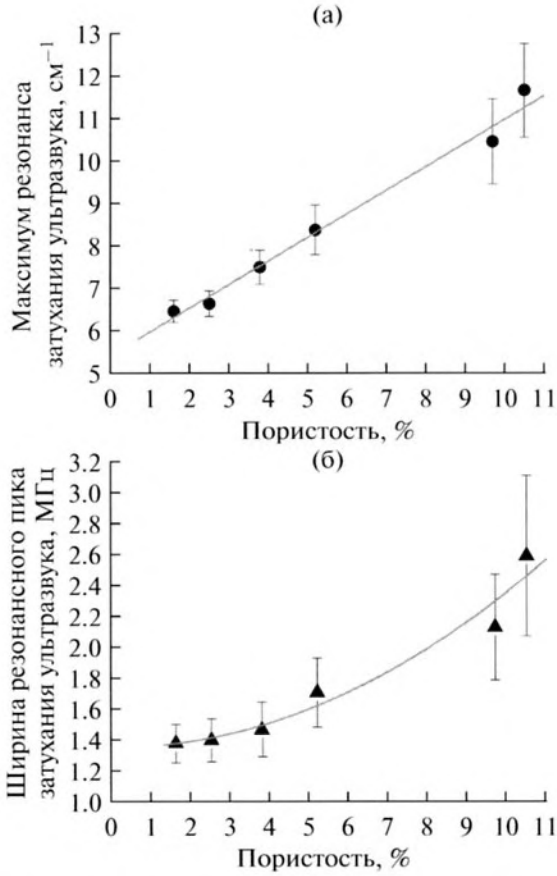

Рис. 6. Зависимости максимума пика затухания (а) и его спектральной ширины по полувысоте (б) от пористости образцов углепластиковых композитов. Точки – экспериментальные данные, сплошные кривые – аппроксимация по методу наименьших квадратов.

В выражении (6) независимая переменная x соответствует пористости P_X, выраженной в процентах, значение y вычисляется в см$^{-1}$. Для зависимости Δf_{FWHM} (P_X) была получена квадратичная аппроксимация с корреляцией не хуже 0.955:

$$Y(x) = 0.01x^2 + 1.35. \quad (7)$$

В выражении (7) независимая переменная x также соответствует пористости P_X, выраженной в процентах, значение Y вычисляется в МГц.

Из рис. 6 видно, что величины $\alpha_{\max}$ и Δf_{FWHM} значительно возрастают в присутствии протяженных расслоений в структуре образца (области 5 и 6, $P_X = 9.7$ и 10.5%). Поэтому было предположено, что должны существовать некоторые критические значения $\alpha_{\max}^{cr}$ и $\Delta f_{\mathrm{FWHM}}^{cr}$, превышение которых будет однозначно указывать на присутствие изолированных протяженных расслоений субмиллиметровых размеров в структуре образца. В наших исследованиях в качестве значений критических параметров могут быть взяты $\alpha_{\max}$ и Δf_{FWHM}, рассчитанные с использованием функций (6) и (7) для пористости $P_X = 5.2\%$. Результаты таких расчетов дают $\alpha_{\max}^{cr} = 8.28$ см$^{-1}$ и $\Delta f_{\mathrm{FWHM}}^{cr} = 1.62$ МГц. Таким образом, полученные эмпирические соотношения между параметрами резонанса частотной зависимости коэффициента затухания ультразвука и пористостью образцов могут использоваться для оперативной оценки типа несплошностей (мелкие поры или протяженные расслоения) и их объемной концентрации в структуре исследованных углепластиковых композитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе развит метод акустической спектроскопии с лазерным источником и пьезоэлектрической регистрацией широкополосных ультразвуковых импульсов для количественного анализа влияния микроскопических изолированных пор и протяженных расслоений на коэффициент затухания продольных акустических волн в углепластиковых композитных материалах. В спектрах пропускания ультразвука наблюдается полоса непрозрачности, определяемая периодичностью слоистой структуры материала. Величина периода структуры, рассчитанная по значению центральной частоты полосы непрозрачности, хорошо совпадает с результатами рентгеновской компьютерной томографии образцов. Параметры соответствующего резонансного пика затухания ультразвука – абсолютное значение максимума и спектральная ширина – зависят от наличия и локальной концентрации микроскопических изолированных пор и протяженных расслоений в структуре образцов. Полученные эмпирические соотношения между этими параметрами и типом несплошностей и их объемной концентрацией могут использоваться для оперативной оценки качества структуры углепластиковых композитов.

Дальнейшее развитие предложенного метода широкополосной акустической спектроскопии в сочетании с механическими и климатическими испытаниями углепластиковых композитных материалов является перспективным для выработки оптимальных критериев допустимого качества таких материалов, содержащих производственные дефекты структуры типа микроскопических пор или протяженных расслоений. Предложенный метод также может быть использован в системах контроля изменений структуры при усталостных испытаниях и для оценки остаточного ресурса композитных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comprehensive composite materials (eds. Kelly A., Zweben C.). Chapt. 5.10; 5.12. Amsterdam: Elsevier, 2000.

2. *Перепелкин К.Е.* Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 380 с.

3. *Muller de Almeida S.F., Nogueira Neto Z.S.* Effect of void content on the strength of composite laminates // Compos. Struct. 1994. V. 28. № 2. P. 139–148.

4. *Vary A.* Material property characterization. In: Moore P.O., ed. Nondestructive testing handbook. Ultrasonic testing. Columbus: ASTM, 2007.

5. *Марков М.Г.* Распространение упругих продольных волн в насыщенной пористой среде со сферическими неоднородностями // Акуст. журн. 2005. Т. 51. Приложение. С. 132–139.

6. *Cheeke D.* Fundamentals and applications of ultrasonic waves. CRC Press, 2002. 462 p.

7. *Fitting D.W., Adler L.* Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation. New York: Plenum Press, 1981. 354 p.

8. *Jeong H., Hsu D.K.* Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites // Ultrasonics. 1995. V. 33. № 3. P. 195–203.

9. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 302 с.

10. *Гусев В.Э., Карабутов А.А.* Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.

11. *Карабутов А.А., Матросов М.П., Подымова Н.Б., Пыж В.А.* Импульсная акустическая спектроскопия с лазерным источником звука // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 2. С. 311–323.

12. *Каксис А.О., Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Ухарский В.А.* Влияние микропластичности на затухание ультразвука в стеклопластиковых композитах // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 5. С. 812–815.

13. *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.* Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.

14. *Бреховских Л.М., Годин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 414 с.

15. *Kushwaha M.S., Halevi P., Martinez G.* Theory of acoustic band structure of periodic elastic composites // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. № 4. P. 2313–2322.

16. *Nayfeh A.H.* Wave propagation in layered anisotropic media with applications to composites. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics, 1995. 347 p.

17. *Карабутов А.А., Кожушко В.В., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б.* Исследование оптико-акустическим методом прохождения широкополосных ультразвуковых сигналов через периодические одномерные структуры // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 4. С. 509–514.

18. *Карабутов А.А. (мл.), Косевич Ю.А., Сапожников О.А.* Осцилляции Блоха акустического поля в слоистой структуре // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 158–169.

19. *Zhang V.Y., Lefebvre J.E., Gryba T.* Resonant transmission in stop bands of acoustic waves in periodic structures // Ultrasonics. 2006. V. 44. Suppl. P. e899–e904.