

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОРИСТОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА

© 2020 г. Ю.Г. Соколовская^{1,*}, Н.Б. Подымова^{1,**}, А.А. Карабутов^{2,3,4,***}

¹МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр.2

²МГУ имени М.В.Ломоносова, Международный учебно-научный лазерный центр, Россия 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр.62

³Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Россия 119991 Москва, Ленинский пр-т, 4

⁴ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Россия 117342 Москва, ул. Бутлерова, 17А

E-mail: *yu.sokolovskaya@mail.ru; **npodyмова@mail.ru; ***aak@ilc.edu.ru

Поступила в редакцию 13.01.2020; после доработки 24.01.2020

Принята к публикации 27.01.2020

Предложен и экспериментально реализован метод оценки пористости углепластиков, основанный на измерении их акустических импедансов. Акустический импеданс исследуемого образца измеряется по величине первообразной ультразвукового импульса, отраженного от границы раздела иммерсионная жидкость—образец. Исследованные образцы представляют собой однонаправленные углепластики с различным объемным содержанием матрицы и наполнителя. Обнаружено, что в исследованных образцах распределение локальной пористости является неравномерным вдоль плоскости укладки углеродных волокон. Величина пористости, усредненной по результатам оптико-акустических измерений, с учетом погрешностей измерения согласуется с данными рентгеновской томографии. Представленный в настоящей работе метод оценки величины пористости не требует определения объема и массы исследуемого объекта и может быть использован для диагностики композитных конструкций сложной формы.

Ключевые слова: пористость, углепластики, полимерные композиционные материалы, лазерный оптико-акустический метод, ультразвук.

DOI: 10.31857/S0130308220030021

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время углепластики находят все более широкое применение в промышленности в качестве конструкционных материалов [1—4]. Использование углеродных волокон в сочетании с полимерной матрицей позволяет получать материалы, удельные физико-механические характеристики которых выше аналогичных для металлических сплавов, благодаря чему они могут заменять металлы в тех случаях, когда необходимо снижение массы конструкции [2, 5, 6]. Это позволяет применять их в авиа- и ракетостроении в качестве силовых элементов конструкций (например, крыльев самолетов).

Хорошо известно, что из-за двухкомпонентной структуры углепластиков уже на этапе изготовления в них может формироваться некоторая пористость [6—10]. Величина образовавшейся пористости и механизмы ее возникновения зависят от метода формования материала [11]. 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 вызывает существенное снижение физико-механических характеристик композитов (упругих модулей, межслойной сдвиговой прочности, прочности на сжатие, растяжение и изгиб, усталостной долговечности) [6, 8]. Это связано с тем, что поры являются концентраторами напряжений и очагами зарождения трещин [8]. Кроме того, поры, возникающие на границе раздела матрица—волокно, уменьшают площадь контакта матрицы и наполнителя, что также приводит к уменьшению прочности материала при сдвиге, растяжении и сжатии. Степень снижения прочностных упругих характеристик определяется величиной пористости, характером распределения пор в материале и их размерами. Таким образом, участки конструкций с повышенной пористостью являются местами локализации процесса разрушения материала при эксплуатации углепластиковых конструкций, что приводит к существенному снижению сроков их службы. Следовательно, разработка новых методов количественной оценки пористости композитных материалов и ее распределения в материале является важной научной и практической задачей.

В настоящее время существуют различные методы обнаружения дефектов в полимерных композиционных материалах и оценки их пористости — рентгеновская томография, термография, ультразвуковые методы [3, 7, 15—18]. Ультразвуковые методы неразрушающего контроля, основанные на измерении амплитуды прошедшего через объект сигнала, затухания и скорости акустических волн, параметров рассеянного назад сигнала и т.д. получили широкое распространение благодаря своей оперативности, надежности, безопасности и относительной простоте. В данной работе для исследования пористости углепластиков предлагается использовать метод, основанный на лазерном термооптическом возбуждении широкополосных импульсов продольных акустических волн (оптико-акустический эффект) [19, 20]. Преимуществами лазерно-ультразвукового (ЛУ) метода является возможность создания коротких и мощных зондирующих ультразвуковых импульсов (с амплитудой до сотен мегапаскалей) в широком спектральном диапазоне (от долей до десятков мегагерц), что актуально для исследования сильно поглощающих и рассеивающих ультразвук материалов [19]. Подобный метод ранее успешно применялся для оценки пористости композиционных материалов по величине затухания и дисперсии фазовой скорости ультразвуковых волн в режиме прямой пьезоэлектрической регистрации акустических сигналов, проходящих через весь исследуемый образец [19]. Однако использование схемы с прямой регистрацией требует плоскопараллельности входной и выходной поверхностей исследуемых объектов, что не позволяет использовать ее для образцов с вариацией толщины и конструкций сложной формы. В [20] для исследования пористых композитов использовался ЛУ-метод с косвенной схемой регистрации акустических сигналов. При этом пористость определялась по величине скорости продольных акустических волн, измеряемой по времени двойного пробега зондирующего ультразвукового импульса по толщине образца. Это не позволяет в полной мере реализовать преимущества одностороннего доступа к объекту, т. к. требует точного измерения толщины исследуемой области. По этой причине оценка пористости с использованием данного метода в случае образцов и участков конструкций с непараллельностью входной и выходной поверхностей или переменной толщиной также является затруднительной. Кроме того, из-за особенностей технологий производства углепластиков даже для плоских изделий возможна некоторая вариация толщины от точки к точке. Поэтому с практической точки зрения представляется целесообразным разработать ЛУ-метод, позволяющий оценивать пористость материала при одностороннем доступе без измерения толщины исследуемой области.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная реализация лазерно-ультразвукового метода количественной оценки пористости углепластиков, позволяющего проводить измерения при одностороннем доступе к исследуемому объекту. Преимуществом предлагаемого метода является отсутствие необходимости измерения толщины образца, поэтому он может применяться для исследования углепластиковых конструкций и деталей. Зависимость плотности материала и скорости распространения в нем продольных акустических волн от его пористости позволяет рассчитать локальную пористость в исследуемой области образца по экспериментально измеренной величине акустического импеданса этой области. В работе исследовались образцы однонаправленных углепластиков с различным объемным содержанием матрицы и наполнителя и различной средней пористостью. Пористость образцов также определялась методом рентгеновской компьютерной томографии для последующего сравнения полученных результатов.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА

Блок-схема экспериментальной установки, используемой в настоящей работе, представлена на рис. 1а. Для генерации и регистрации ультразвуковых импульсов использовался оптико-акустический (ОА) преобразователь, схема которого показана на рис. 1б. С помощью оптоволокну в преобразователь доставлялось излучение Nd:YAG лазера с диодной накачкой и модуляцией добротности, длительность лазерного импульса 10 нс, энергия в импульсе 100 мкДж, частота следования импульсов 500 Гц. Через прозрачную призму лазерное излучение падает под углом на поверхность ОА-источника (в качестве ОА-источника использовался черный пластик). Призма находится в акустическом контакте с источником и одновременно является звукопроводом широкополосного пьезоэлектрического приемника. Тонкий слой иммерсионной жидкости (трансформаторного масла) обеспечивает акустический контакт между ОА-источником и образцом при плотном прижиме образца к источнику. Лазерный импульс поглощается в ОА-источнике, вследствие чего происходит неоднородный нестационарный нагрев приповерхностного слоя источника. Последующее тепловое расширение этого слоя приводит к возникновению двух импульсов продольных акустических волн [21]. Один из этих импульсов проходит в призму-звукопровод (1) и является зондиру-

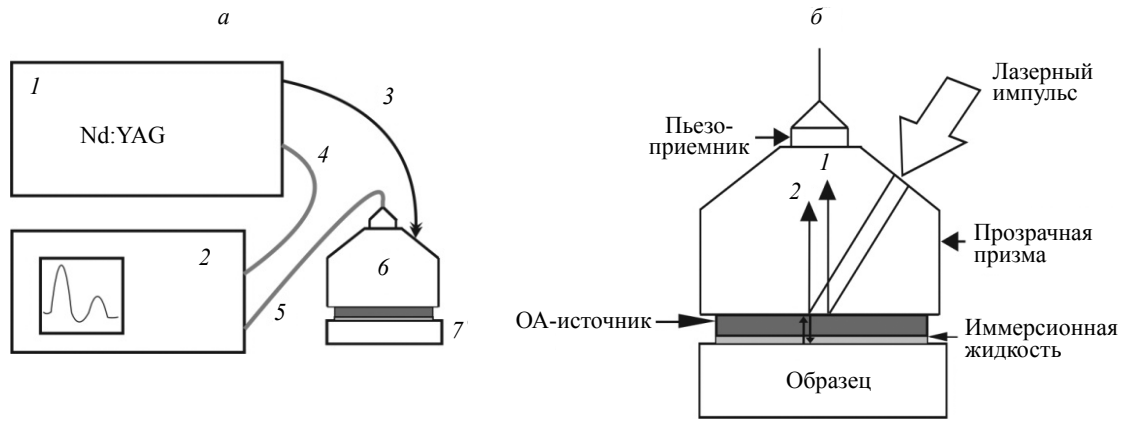


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки (а): 1 — Nd:YAG лазер, 2 — осциллограф, 3 — оптоволоконный кабель, 4, 5 — соединительные кабели для передачи сигнала с пьезоприемника и синхронизации, 6 — ОА-преобразователь, 7 — образец; схема ОА-преобразователя (б).

ющим в данной системе, а другой проходит через ОА-источник и слой иммерсионной жидкости. Рассогласование импедансов ОА-источника и исследуемого образца приводит к тому, что часть сигнала отразится от границы раздела жидкость—образец и будет зарегистрирована пьезоприемником с временной задержкой, равной двойному пробегу импульса по толщине ОА-источника и слою иммерсионной жидкости. Такая схема регистрации сигналов позволяет проводить исследования при одностороннем доступе к объекту контроля. При исследовании образцов зондирующий ультразвуковой импульс распространялся перпендикулярно плоскости укладки слоев в композите. Электрические сигналы с пьезоприемника передавались на цифровой осциллограф и затем обрабатывались на персональном компьютере, запуск осциллографа был синхронизирован с моментом излучения лазерного импульса.

Амплитуда A_0 зондирующего импульса и амплитуда A импульса, отраженного от границы иммерсионная жидкость—образец, соотносятся как $A = RA_0$, где $R = (Z_c - Z_{oil}) / (Z_c + Z_{oil})$ — коэффициент отражения продольной акустической волны от границы раздела сред ($R = (Z_c - Z_s) / (Z_c + Z_s)$ в случае плотного прижима образца к источнику), $Z_c = \rho_c C_c$, $Z_s = \rho_{oil} C_{oil}$, $Z_s = \rho_s C_s$ — акустические импедансы композитного образца, трансформаторного масла и ОА-источника соответственно [22].

Таким образом, коэффициент отражения и амплитуда отраженного сигнала соответственно будут зависеть от величины акустического импеданса исследуемого образца. Однако это выражение не учитывает наличие рассеяния ультразвука на шероховатой поверхности образца, а также затухания ультразвука в иммерсионной жидкости и ОА-источнике. Затухание в источнике и в слое трансформаторного масла может приводить к дополнительному изменению амплитуды и длительности отраженного сигнала по сравнению с зондирующим. Чтобы исключить влияние этого затухания, вместо зондирующего ультразвукового импульса предлагается использовать импульс, отраженный от опорной плоскопараллельной полированной кварцевой пластины с известными акустическими свойствами, которая помещается на место исследуемого образца. Коэффициент отражения продольных акустических волн от границы раздела ОА-источник — кварцевая пластина рассчитывается как $R_{ref} = (Z_{ref} - Z_s) / (Z_{ref} + Z_s)$, где акустические импедансы кварца и ОА-источника составляют $Z_{ref} = 13,1 \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $Z_s = 2,89 \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ соответственно [23]. Тогда амплитуда ультразвукового сигнала, отраженного от границы раздела источник—кварц $A_{ref} = R_{ref} A_1$, и, следовательно, $R = R_{ref} A / A_{ref}$. Отсюда можно получить величину акустического импеданса исследуемого образца углепластика:

$$Z_c = Z_s \frac{1+R}{1-R} = Z_s \frac{A_{ref} + AR_{ref}}{A_{ref} - AR_{ref}}. \quad (1)$$

Таким образом, по измеренным амплитудам ультразвуковых сигналов A и A_{ref} можно определить акустический импеданс композитного образца. Однако амплитуда отраженного от образца сигнала A может также уменьшаться из-за рассеяния ультразвуковых волн на шероховатой поверхности образца, а также ее некоторой кривизны, при этом одновременно будет увеличиваться его длительность. Для учета рассеяния на шероховатой поверхности углепластика вместо амплитуд

отраженных ультразвуковых сигналов предлагается использовать максимальные значения их интегралов, которые рассчитываются как

$$I(t) = \int_{-\infty}^t U(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $U(\tau)$ — временной профиль регистрируемого ультразвукового сигнала. Тогда для расчета акустического импеданса исследуемого образца вместо (1) будет использоваться выражение:

$$Z_c = Z_s \frac{I_{\max \text{ ref}} + I_{\max} R_{\text{ref}}}{I_{\max \text{ ref}} - I_{\max} R_{\text{ref}}}, \quad (3)$$

где $I_{\max \text{ ref}}$ и I_{\max} — максимальные значения интегралов от отраженных сигналов для опорной кварцевой пластины и исследуемого образца, которые будут определяться как уменьшением амплитуды, так и увеличением длительности отраженного импульса за счет рассеяния ультразвуковой волны на поверхности углепластика.

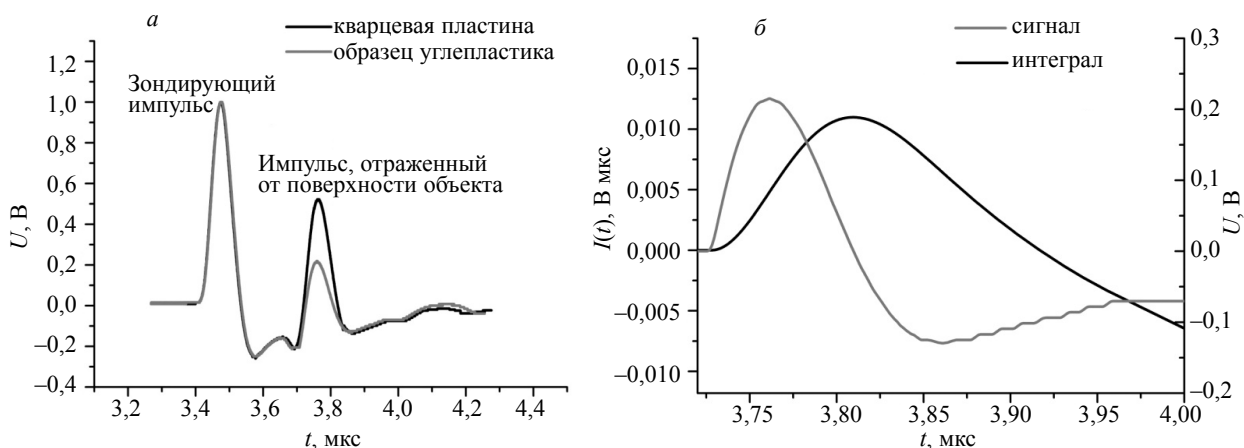


Рис. 2. Примеры временных треков ультразвуковых сигналов для опорной кварцевой пластины и углепластикового образца (а); временной профиль ультразвукового импульса, отраженного от поверхности исследуемого образца (в увеличенном масштабе), и его интеграл (б).

На рис. 2а показаны примеры временных треков ультразвуковых сигналов для опорной кварцевой пластины и углепластикового образца. Амплитуда отраженного сигнала в случае углепластикового образца будет заметно меньше, чем в случае опорной пластины, так как $Z_c < Z_{\text{ref}}$. Отрицательные фазы сигналов возникают из-за дифракции акустических волн при распространении через призму-звукопровод, отличие в отрицательных фазах обусловлено, по-видимому, небольшой кривизной поверхности исследуемого композитного образца. На рис. 2б в увеличенном масштабе приведены временной профиль ультразвукового импульса, отраженного от поверхности исследуемого образца углепластика, и его интеграл. На временном профиле сигнала момент времени, соответствующий максимуму интеграла, совпадает с моментом перехода от положительной фазы сигнала к отрицательной. Таким образом, значение I_{\max} будет соответствовать полной площади положительной фазы отраженного от образца сигнала.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОРИСТОСТИ

Пористость исследуемого образца углепластика определяется как

$$P = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где ρ — фактическая плотность пористого композита, ρ_0 — расчетная плотность твердой фазы образца (без пор). Расчетная плотность ρ_0 может быть определена по известным плотностям полимерной матрицы ρ_m и углеродного наполнителя ρ_f и их объемному содержанию в материале n_m и n_f :

$$\rho_0 = n_m \rho_m + n_f \rho_f, \quad (5)$$

где $n_m + n_f = 1$.

Объемное содержание пор в композитном образце оказывает значительное влияние на скорость распространения в нем продольных акустических волн [24, 25]. Используя зависимости модуля Юнга и модуля всестороннего сжатия от соотношения объемов всего образца и его твердой фазы, можно получить выражение, которое связывает фазовую скорость продольных акустических волн с пористостью материала [24]:

$$C_c = C_0 \sqrt{1 - P^{2/3}}, \quad (6)$$

где C_0 и C — фазовые скорости продольных акустических волн для беспористого и пористого образцов соответственно. Данная формула справедлива для случая малой пористости ($P \leq 20\%$), когда поры являются изолированными и связанных поровых кластеров не образуется. Величина C_0 для беспористого материала может быть рассчитана, исходя из модели двухкомпонентной среды, связывающей объемные концентрации компонент (матрицы и наполнителя) и фазовые скорости в отдельных компонентах с фазовой скоростью продольных акустических волн в композитном материале [26]:

$$C_0^2 = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{n_m}{\rho_m C_m^2} + \frac{n_f}{\rho_f C_f^2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где фазовые скорости в матрице и наполнителе C_m и C_f считаются заранее известными.

Используя формулы (4) и (6), можно получить выражение для акустического импеданса пористого образца углепластика:

$$Z_c = \rho C = \rho_0 C_0 (1 - P) \sqrt{1 - P^{2/3}}. \quad (8)$$

Таким образом, пористость исследованного образца может быть оценена по экспериментально измеренной величине его акустического импеданса при известных ρ_0 и C_0 , которые рассчитываются по формулам (5) и (7).

ИССЛЕДОВАННЫЕ ОБРАЗЦЫ

В настоящей работе исследовались восемь образцов однонаправленных углепластиков с различным объемным содержанием полимерной матрицы и углеродного наполнителя. Процентный состав исследованных образцов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Процентный состав исследованных углепластиковых образцов

№ образца	Объемное содержание матрицы n_m , %	Объемное содержание наполнителя n_f , %	Расчетная плотность ρ_0 , кг/м ³
1-1	32,8	67,2	1566
1-2			
2-1	44,2	55,8	1504
2-2			
2-3			
3-1	37,5	62,5	1540
3-2			
3-3			

Плотности матрицы и наполнителя составляют $\rho_m = 1200$ кг/м³ и $\rho_f = 1744$ кг/м³ соответственно. По известным плотностям компонент и их объемному содержанию с использованием формулы (4) были вычислены расчетные плотности материала без пор ρ_0 . Полученные величины также представлены в табл. 1.

Таблица 2

Средние значения акустических импедансов и пористости для исследованных образцов углепластиков

№ образца	$Z_0 \cdot 10^6$, кг/(м ² ·с)	$\langle Z \rangle_{OA} \cdot 10^6$, кг/(м ² ·с)	$\langle P \rangle_{OA}$, %	$\langle P \rangle_{X-ray}$, %
1-1	4,75	4,27±0,06	4,2±0,6	4,2
1-2	4,75	4,42±0,06	2,6±0,6	2,5
2-1	4,37	4,07±0,05	2,5±0,6	2,8
2-2	4,37	4,12±0,05	1,9±0,6	1,4
2-3	4,37	4,06±0,05	2,6±0,6	2,9
3-1	4,59	4,31±0,06	2,1±0,6	2,0
3-2	4,59	4,47±0,06	0,7±0,6	0,6
3-3	4,59	4,55±0,06	0,1±0,6	0

Практически все исследованные образцы содержали некоторую пористость. Для проверки результатов, полученных ЛУ-методом, была проведена оценка пористости исследованных образцов с помощью рентгеновской компьютерной томографии. Результаты томографии показали, что суммарная пористость в исследованных образцах варьируется от 0 до 4,2 % (см. табл. 2). Пример полученного изображения сечения одного из пористых образцов представлен на рис. 3.

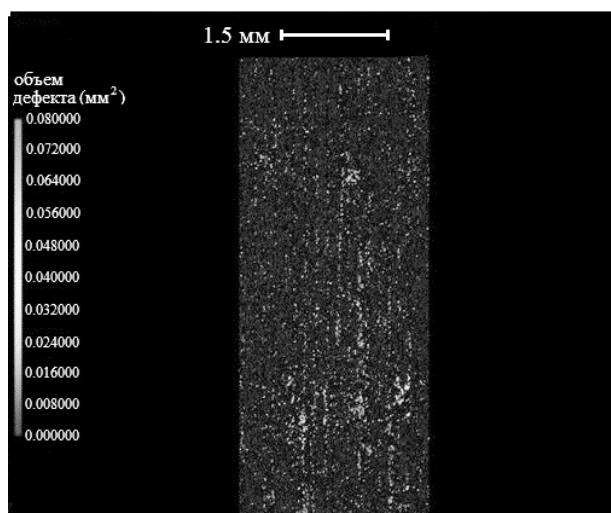


Рис. 3. Пример томографического изображения пористого образца углепластика (образец № 3-1, средняя объемная пористость 2 %).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Величины акустических импедансов исследованных образцов рассчитывались по интегралам зарегистрированных ультразвуковых импульсов, отраженных от границы раздела источник—образец, с использованием формулы (3). Примеры временных профилей отраженных ультразвуковых сигналов для углепластиков с соотношением акустических импедансов $Z_{c1} < Z_{c2} < Z_{c3}$ и их интегралы приведены на рис. 4. Относительная погрешность измерения амплитуды ультразвуковой волны и максимума величины интеграла определяется отношением сигнал/шум для системы регистрации акустических сигналов, а также нестабильностью энергии лазерных импульсов. Для используемой экспериментальной установки относительная погрешность $\Delta I/I = \Delta A/A \approx 1-1,2$ %. Это приводит к относительной погрешности измерения акустического импеданса композита $\Delta Z_c/Z_c \approx 1,3-1,4$ %.

Акустический импеданс беспористых образцов с различным объемным содержанием матрицы и наполнителя определяется с использованием формул (5) и (7), рассчитанные значения представлены в табл. 2.

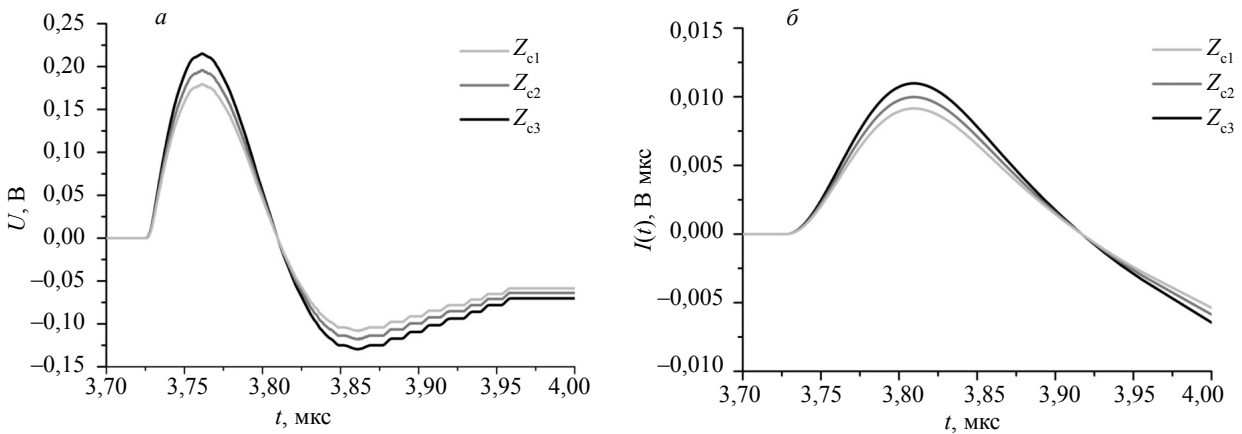


Рис. 4. Отраженные ультразвуковые сигналы для углепластиковых образцов с $Z_{c1} < Z_{c2} < Z_{c3}$ (а) и их интегралы (б).

Характерный диаметр лазерного пучка на поверхности ОА-источника и диаметр зондирующего ультразвукового пучка соответственно составляет 2-3 мм. Это позволяет проводить измерения акустических импедансов образцов в локальных участках с характерным поперечным размером 2-3 мм. Используя формулу (8), по измеренной локальной величине акустического импеданса можно рассчитать величину локальной пористости в исследуемых участках. Это позволяет проанализировать распределение пористости вдоль плоскости укладки слоев углеродной ткани и оценить его неоднородность. На рис. 5 приведены значения локальных пористостей для пяти выбранных участков каждого образца, полученные с помощью ЛУ-метода. Неравномерность распределения пористости можно количественно охарактеризовать как разность максимальной и минимальной

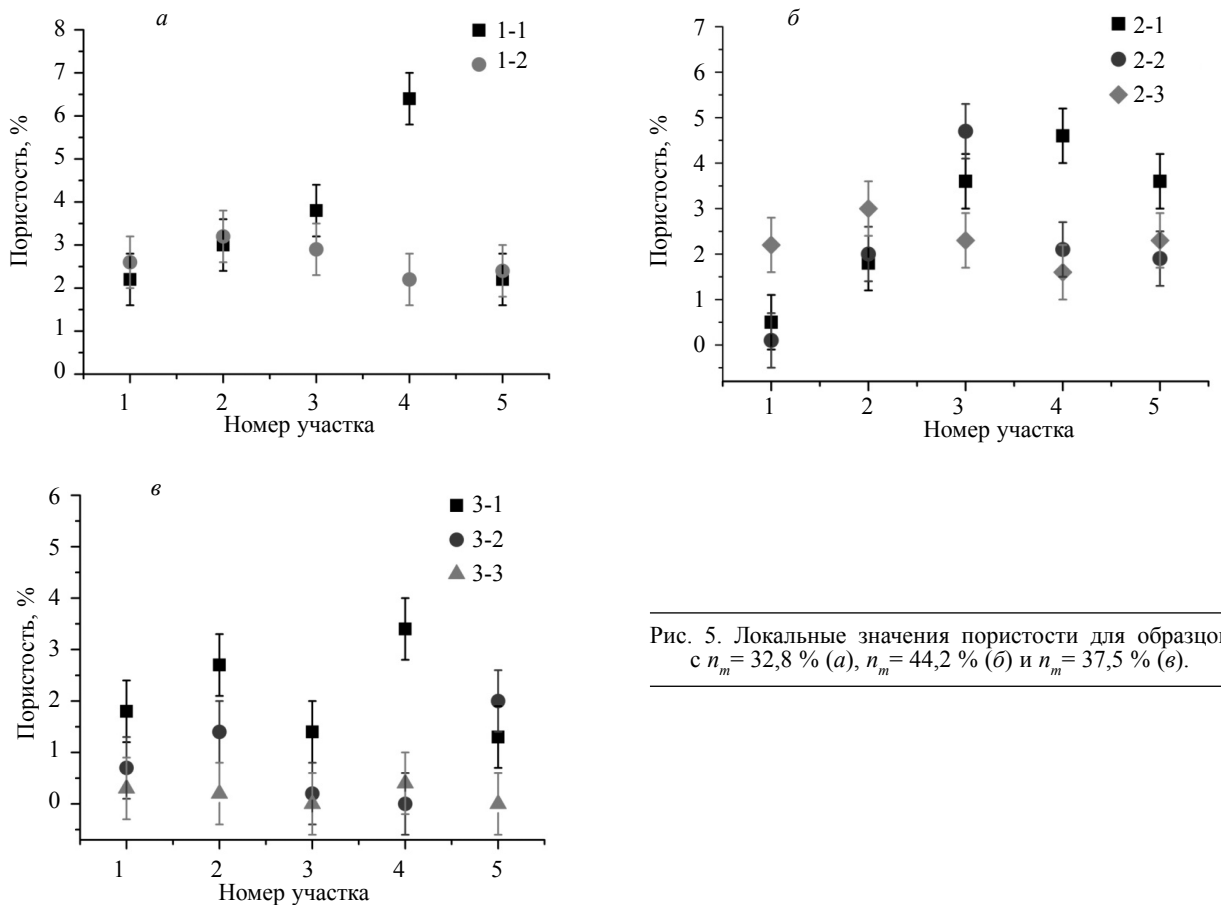


Рис. 5. Локальные значения пористости для образцов с $n_m = 32,8\%$ (а), $n_m = 44,2\%$ (б) и $n_m = 37,5\%$ (в).

ной локальных пористостей в образце $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$. Для исследуемых образцов ΔP варьируется от 0,3 для образца № 3-3 до 4,5 и 4,2 для образцов № 2-2 и 1-1 соответственно. Таким образом, для данных углепластиковых образцов характерна существенная неравномерность распределения локальной пористости вдоль плоскости укладки углеродной ткани.

Усредненная по N точкам пористость углепластика определяется как $\langle P \rangle_{LU} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_N$, где P_N — локальная пористость в N -й точке образца. Средние значения величины акустического импеданса $\langle Z_c \rangle$ для каждого из образцов и рассчитанные величины их средней объемной пористости $\langle P \rangle_{LU}$, полученные ОА-методом, приведены в табл. 2. Также в таблице приведены величины суммарной пористости $\langle P \rangle_{X\text{-ray}}$, полученные с использованием рентгеновской компьютерной томографии. Из представленных данных видно, что результаты, полученные ЛУ-методом, в пределах погрешности измерений согласуются с результатами рентгеновской томографии. Это означает, что ЛУ-метод действительно может быть использован для оперативной оценки пористости углепластика и ее распределения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в настоящей работе лазерно-ультразвуковой метод позволяет проводить количественную оценку пористости углепластика, основанную на измерении величины его акустического импеданса. Методика расчета пористости углепластика основана на зависимости скорости распространения продольных акустических волн в материале и его плотности от пористости. Разработана методика измерения акустического импеданса образца композита по величине интеграла ультразвукового сигнала, отраженного от поверхности композита на границе раздела иммерсионная жидкость—образец. Это позволяет учесть возможное рассеяние ультразвуковых волн на шероховатой поверхности композитных образцов при измерении их импедансов, что особенно актуально для углепластиков, всегда имеющих некоторую шероховатость поверхности, обусловленную структурой углеродной ткани.

Показано, что исследованные образцы однонаправленных углепластиков имеют неравномерность распределения пористости в плоскости укладки слоев. Локальная пористость в некоторых участках может значительно отличаться от средней по объему, что обусловлено особенностями технологий изготовления материала. Показано, что средняя пористость исследованных образцов варьируется от 0,1 до 4,2 %. Также проведено сравнение величины средней пористости, измеренной лазерно-ультразвуковым методом, с результатами рентгеновской томографии, полученные результаты согласуются с учетом погрешностей измерения.

Преимуществом предложенного метода является возможность оперативной диагностики пористости материала при одностороннем доступе к исследуемому объекту без измерения его габаритов и массы, что может применяться для композитных конструкций сложной формы. Измерение локальной пористости и ее распределения позволяет обнаружить потенциально уязвимые участки композитной конструкции с повышенной пористостью. Представленный метод может быть использован для контроля качества получаемых композитов при модернизации технологий и подборе оптимальных условий производства, а также для диагностики изменений структуры композитов в процессе их эксплуатации или при механических испытаниях деталей и изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction // Progress in Aerospace Sciences. 2005. V. 41. P. 143—151.
2. Chand S. Carbon fibers for composites // J. Mater. Sci. 2000. V. 35. P. 1303—1313.
3. Boichuk A.S., Dikov I.A. et al. Determining Porosity of Monolithic Zones in Aircraft Parts and Assemblies Made of PCMs Using Ultrasound Pulse Echo Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 1. P. 1—7. [Бойчук А.С., Диков И.А., Чертищев В.А., Генералов А.С. Определение пористости монолитных зон деталей и агрегатов самолета, изготавливаемых из ПКМ, с применением ультразвукового эхоимпульсного метода // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 3—9.]
4. Stepanova L.N., Petrova E.S., Chernova V.V. Strength Tests of a CFRP Spar Using Methods of Acoustic Emission and Tensometry // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 4. P. 243—248. [Степанова Л.Н., Петрова Е.С., Чернова В.В. Прочностные испытания лонжерона из углепластика с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 24—30.]

5. Любин Дж. Справочник по композиционным материалам. М.: Машиностроение, 1988. 447 с.
6. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
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. № 4. P. 208—222.
8. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981. 232 с.
9. Scott A.E., Sinclair I., Spearing S.M., Mavrogordato M.N., Hepples W. Influence of voids on damage mechanisms in carbon/epoxy composites determined via high resolution computed tomography // Compos. Sci. Technol. 2014. V. 90. P. 147—153.
10. Stamopoulos A.G., Ilio A.D. On the predictive tools for assessing the effect of manufacturing defects on the mechanical properties of composite materials // Procedia CIRP. 2019. V. 79. P. 563—567.
11. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2016. № 6.
12. Chimenti D.E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization // Ultrasonics. 2014. V. 54. P. 1804—1816.
13. Ibrahim M.E. Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich // Composites Part A. 2014. V. 64. P. 36—48.
14. Sachse W., Castagnede B., Grabec I., Kim K.Y., Weaver R.L. Recent developments in quantitative ultrasonic NDE of composites // Ultrasonics. 1990. V. 28. P. 97—104.
15. Green R.E. Jr. Non-contact ultrasonic techniques // Ultrasonics. 2004. V. 42. P. 9—16.
16. Potapov A.I., Makhov V.E. Methods for Nondestructive Testing and Diagnostics of Durability of Articles Made of Polymer Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 3. P. 151—163. [Потанов А.И., Махов В.Е. Методы неразрушающего контроля и диагностики прочности изделий из полимерных композиционных материалов // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 7—19.]
17. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // Дефектоскопия. 2017. № 10. С. 34—57.
18. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A. An Automated Practical Flaw-Identification Algorithm for Active Thermal Testing Procedures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 4. P. 278—282. [Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А. Автоматизированный практический алгоритм идентификации дефектов в процедурах активного теплового контроля // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 49—53.]
19. Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Беляев И.О. Исследование влияния пористости на затухание ультразвука в углепластиковых композитах методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 714—721.
20. Соколовская Ю.Г., Карабутов А.А. Лазерно-ультразвуковая дефектоскопия конструкций из мультиаксиальных полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2018. № 1. С. 56—60.
21. Karabutov A.A., Podymova N.B. Nondestructive porosity assessment of CFRP composites with spectral analysis of backscattered laser-induced ultrasonic pulses // J. Nondestruct. Eval. 2013. V. 32. № 2. P. 315—324.
22. Karabutov A.A. (Jr.), Karabutov A.A., Sapozhnikov O.A. Determination of the elastic properties of layered materials using laser excitation of ultrasound // Physics of Wave Phenomena. 2010. V. 18. № 4. P. 297—302.
23. Физические величины / Справочник. Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
24. Поляков В.В., Головин А.В. Влияние пористости на скорости ультразвуковых волн в металлах // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 11. С. 54—57.
25. Поляков В.В., Головин А.В. Упругие характеристики пористых материалов // ПМТФ. 1993. Т. 34. № 5. С. 32—35.
26. Карабутов А.А., Соколовская Ю.Г. Лазерный оптико-акустический метод измерения объемной концентрации эпоксидной смолы в углепластиковых композитах // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. № 6. С. 45—49.