

Лазерно-ультразвуковое исследование распределения локальной пористости в углепластиковых стрингерных панелях

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

Представлен метод количественной оценки пористости конструкций из углепластика, основанный на лазерном возбуждении зондирующих ультразвуковых импульсов. Предложен способ оценки величины пористости материала по экспериментально измеренной фазовой скорости распространяющихся в нем продольных акустических волн. На примере контрольных образцов и реальных конструкций из углепластика продемонстрирована возможность получения распределений величин локальной пористости в исследуемом участке конструкции. Показано, что в исследованных конструкциях присутствуют области с существенным разбросом величины локальной пористости. Предлагаемый метод может быть использован для контроля качества производимых композитных конструкций, а также для исследования изменений состояния структуры конструкции в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: композит с полимерной матрицей, углепластик, ультразвук, метод акустический, контроль неразрушающий, пористость.

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-7-73-83

Введение

Композитные материалы на основе полимерной матрицы и различных типов армирующих волокон находят все более широкое применение в современной промышленности [1 – 3]. Одним из примеров таких композитных материалов являются углепластики, которые используют в авиации, ракетостроении и судостроении благодаря высокой удельной прочности, жесткости и коррозионной стойкости [4]. В зависимости от геометрии будущей конструкции и предполагаемых нагрузок могут применяться разные схемы армирования материала, типы волокон и связующего, а также различные технологии формования, влияющие на прочностные характеристики материала [3, 5]. Однако в конструкциях и изделиях из углепластиков могут присутствовать дефекты и структурные нарушения, такие как пористость и расслоения [4 – 7]. Пористость в углепластике может присутствовать как в виде изолированных сферических пор с диаметром порядка десятков – сотен микрометров, так и в виде кластеров сообщающихся пор. При этом

пористость может возникать как на этапе изготовления композитных деталей и конструкций, так и в процессе их эксплуатации [6]. Наличие пористости и расслоений оказывает существенное влияние на прочностные свойства конструкции и приводит к уменьшению срока ее службы [4, 8]. Поэтому актуальной проблемой является разработка методов неразрушающего контроля, позволяющих обнаруживать участки повышенной пористости в композитных конструкциях, а также количественно оценивать уровень пористости материала.

Для диагностики структуры углепластиков могут применяться различные методы неразрушающего контроля: термография [2, 7, 9, 10], рентгеновская томография [9, 12, 13], акустическая эмиссия [7, 13, 14], различные варианты ультразвуковых методов [15 – 18]. При этом каждая группа методов имеет как свои преимущества, так и ограничения. Поры и расслоения эффективно рассеивают акустические волны и поэтому оказывают значительное влияние на скорость распространения и затухание ультразвуковых волн в исследуемом материале, что дает возможность для эффективно-

го применения ультразвуковых методов в исследовании пористых материалов. В данной работе для количественного анализа пористости предлагается использовать метод, основанный на лазерном термооптическом возбуждении широкополосных зондирующих импульсов продольных акустических волн [19 – 21]. Основными достоинствами лазерных источников ультразвука являются большая амплитуда и малая длительность ультразвуковых зондирующих сигналов. Это повышает точность измерения скорости и затухания акустических волн в сильно поглощающих и рассеивающих ультразвуком композитных материалах.

Цель данной работы — применение лазерно-ультразвукового (ЛУ) метода для количественного и качественного анализа пористости углепластиковых конструкций.

Были исследованы несколько контрольных образцов плоской формы и три углепластиковые конструкции – стрингерные панели. Влияние пористости на фазовую скорость продольных акустических волн позволяет оценить величину локальной пористости участка конструкции по измеренной скорости ультразвука. Сканирование объекта вдоль его поверхности с использованием ЛУ-преобразователя с косвенной схемой регистрации импульсов позволяет выявить местоположения областей с повышенной пористостью, а также проанализировать разброс пористости от точки к точке и построить распределения локальной пористости исследуемого участка. Преимущество предлагаемого метода заключается в его оперативности и возможности одностороннего доступа к объекту, что позволяет исследовать конструкции переменной толщины и сложной формы, а также крупногабаритные конструкции.

Метод расчета пористости углепластика

Значение пористости P для исследуемой области образца определяется как отношение суммарного объема пор и расслоений различной формы, находящихся в данной области, к общему объему этой области:

$$P = \frac{V_{por}}{V_0} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

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

Наличие пористости в углепластике оказывает существенное влияние на скорость продольных акустических волн, распространяющихся в нем. Предполагая, что при малых значениях пористости, менее 20 %, поры практически не образуют сообщающихся кластеров, будем считать, что в композитном материале присутствуют только изолированные сферические поры. Из зависимостей модуля всестороннего сжатия и модуля Юнга от отношения объема твердой фазы образца, без учета пор, к полному объему всего образца, получаем формулу, связывающую фазовую скорость продольных звуковых волн в исследуемом композитном образце и его пористость [22]:

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

где C — скорость звука в исследуемом пористом углепластике, C_0 — скорость звука в идеальном беспористом композите, P — пористость материала. Следовательно, величина пористости углепластика P может быть определена с помощью формулы (2) при наличии экспериментально измеренных величин фазовой скорости продольных акустических волн в пористом и беспористом образцах, аналогичных по объемному содержанию матрицы и волокна.

Методика эксперимента

Блок-схема используемой в работе экспериментальной установки ЛУ-дефектоскопа приведена на рис. 1. Данный дефектоскоп состоит из импульсного Nd:YAG лазера с диодной накачкой, оптико-акустического (ОА) преобразователя и системы сбора и обработки данных (персональный компьютер, цифровой осциллограф или АЦП). Доставка лазерного излучения в преобразователь осуществляется с помощью оптоволоконного кабеля. Схема использованного ОА-преобразователя представлена на рис. 1b. Данный преобразователь работает по косвенной схеме регистрации акустических волн, в которой излучатель и приемник находятся с одной и той же стороны от поверхности исследуемого объекта [23, 24]. Односторонний доступ к исследуемому образцу обеспечивается при ручном прижиме преобразователя к лицевой поверхности образца через тонкий слой иммерсионной жидкости. Лазерное излучение падает через прозрачную призму под углом на поверхность ОА-источника. Прозрачная призма находится в акустическом контакте с ОА-источником и является звукопроводом широкополосного пьезоэлек-

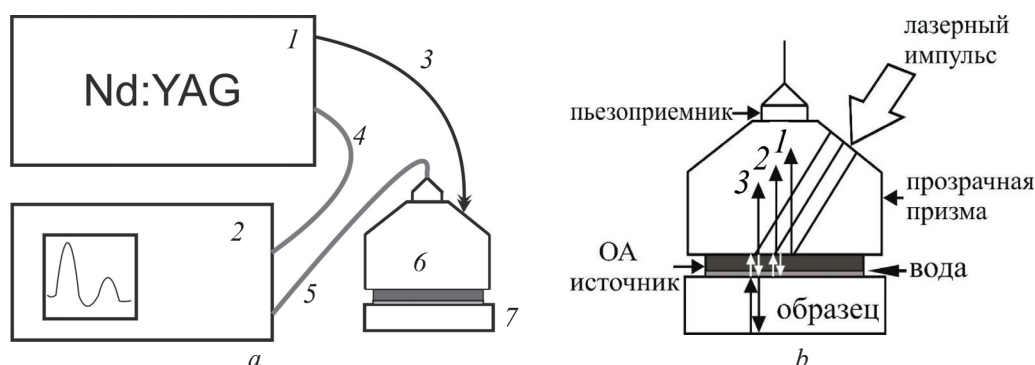


Рис. 1. *a*: блок-схема экспериментальной установки: 1 — Nd:YAG лазер, 2 — осциллограф, 3 — оптоволоконный кабель, 4, 5 — соединительные кабели для передачи сигнала с пьезоприемника и синхронизации, 6 — ОА-преобразователь, 7 — образец; *b*: схема ОА-преобразователя.

Fig. 1. *a*: Block diagram of the experimental setup: 1 — Nd:YAG laser, 2 — oscilloscope, 3 — fiber optic cable, 4, 5 — connecting cables for transmitting a signal from a piezoreceiver and synchronization, 6 — OA transducer, 7 — studied sample; *b*: the scheme of OA transducer.

трического приемника. При поглощении лазерного импульса в приповерхностном слое ОА-источника происходит термооптическое возбуждение ультразвукового широкополосного зондирующего импульса продольных акустических волн известной временной формы, которая зависит от коэффициента поглощения света в ОА-источнике и граничных условий возбуждения. Этот зондирующий импульс далее распространяется как через сам источник, и впоследствии через исследуемый объект, так и в прозрачную призму-звукопровод. На рис. 1 импульсу 1 соответствует зондирующий импульс, возбуждаемый в приповерхностном слое ОА-источника и прошедший через звукопровод в приемник. Импульс 2 возникает при проходе зондирующего импульса по толщине ОА-источника и последующем отражении части этого импульса от границы раздела источника и лицевой поверхности образца (из-за рассогласования их акустических импедансов). Этот отраженный импульс проходит в звукопровод с временной задержкой, равной времени двойного пробега импульса 1 через ОА-источник. Оставшаяся часть зондирующего импульса (обозначенная на рисунке как импульс 3) проходит через всю толщину исследуемого образца, отражается от его тыльной поверхности, и далее регистрируется пьезоприемником с временной задержкой относительно импульса 2 (“донный” сигнал).

Скорость продольных ультразвуковых волн в образце, при известной его толщине h , определяется по разности времени прихода на приемник импульса, отраженного от границы раздела ОА-источник-образец (импульс 2) и импульса, от-

раженного от тыльной поверхности образца (импульс 3):

$$C = \frac{2h}{\Delta T}, \quad (3)$$

где $\Delta T = T_3 - T_2$ — разность времён прихода на пьезоприемник импульса, отраженного от тыльной поверхности композита T_3 и импульса, отраженного от границы ОА-источника и композита T_2 . Фактически, таким образом будет определяться групповая скорость продольных ультразвуковых волн. Исследуемый углепластик является квазиизотропным материалом в плоскостях, перпендикулярных направлению укладки углеродной ткани. При данной схеме эксперимента зондирующий импульс будет распространяться перпендикулярно плоскости укладки углеродных волокон. В отсутствие заметной дисперсии скорости ультразвука можно считать, что групповая скорость совпадает с фазовой. В исследуемых образцах и панелях дисперсия скорости ультразвука незначительна, и для приблизительного расчета пористости можно использовать формулу (1), где скорость C измеряется по формуле (3).

Следует отметить, что подобный метод с лазерным источником ультразвука ранее использовали в работе [21] для исследования влияния пористости углепластика на дисперсию фазовой скорости продольных акустических волн. Однако недостатком предложенной методики являлась необходимость двустороннего доступа к исследуемой области объекта, что затрудняет оперативный анализ для крупногабаритных конструкций, особенно имеющих переменную толщину (таких, как струнгеры или

лонжероны, применяемых в авиастроении). Кроме того, использование методики [21] предполагает построение “калибровочной” кривой для зависимости дисперсии фазовой скорости от пористости для набора образцов с известными величинами пористости, что не всегда удобно на практике. Предлагаемая в данной работе методика использует только величину скорости ультразвука в беспористом контрольном образце. Она может быть, измерена как экспериментально, так и рассчитана по известному процентному содержанию матрицы и наполнителя и скоростях звука в них, что значительно удобнее для оперативной оценки локальной пористости конструкций. При обнаружении областей повышенной пористости можно также сочетать обе предложенные методики для получения более точной картины пористости.

Объекты исследования

Для исследования было взято три углепластиковые трехстрингерные панели (в дальнейшем обозначенные как панели 1, 2 и 3). Такие панели применяют в авиации в качестве силовых элементов крыльев самолетов. Панели являлись перекрестно-армированными, и имели чередующиеся слои углеродной ткани под углами 0° , 45° и 90° (по отношению к главной оси приложения напряжений). Для анализа распределения пористости в каждой панели были рассмотрены как плоскопараллельные области между стрингерами, содержащие только так называемую верхнюю полку, так и области, включающие одновременно верхнюю и нижнюю полку (рис. 2). Стрингерная панель 3 являлась “контрольной панелью” — ее средняя объемная пористость по данным производителя составляла 1,9 %. Пористость оставшихся двух панелей была неизвестна заранее.

Кроме того, были исследованы “контрольные” образцы углепластиков, имеющие прямоугольную форму, поперечные размеры всех образцов составляли 40×15 мм, толщина — ≈ 7 мм. Панели и образцы были изготовлены из одинакового связующего и наполнителя по аналогичной методике. Предварительно было проведено исследование пористости “контрольных” образцов методом рентгеновской компьютерной томографии. Один из образцов не содержал пористости, в других пористость составляла от 2,5 до 2,77 %. Пример томографического изображения структуры одного из образцов приведен на рис. 3, здесь темным цветом показаны поры (изображено стрелками на рисунке), светло-серым — сама структура композита.

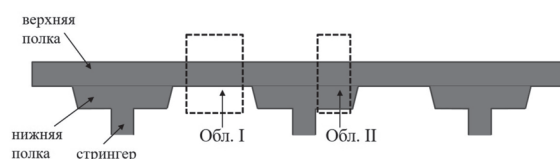


Рис. 2. Схематичное изображение углепластиковой стрингерной панели. Обл. I, обл. II — исследованные области.

Fig. 2. Schematic representation of a carbon fiber stringer panel. Region I, region II are the studied areas.

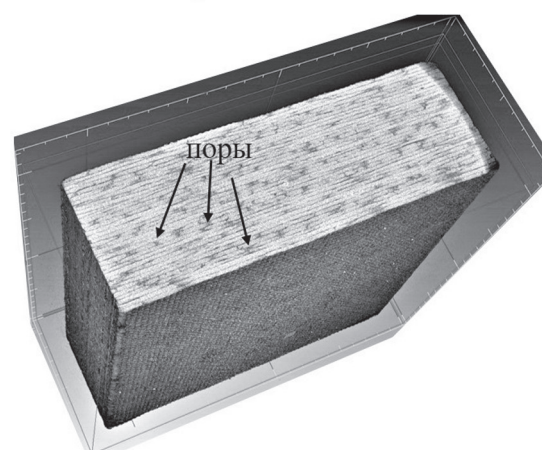
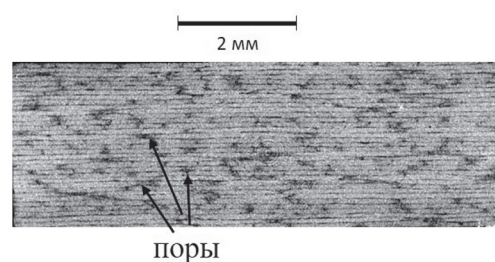


Рис. 3. Томографическое изображение пористого контрольного образца углепластика.

Fig. 3. X-ray tomographic image of a porous control sample of carbon fiber plastic composite.

Поры являются практически сферическими и расположены в слоях полимерной матрицы.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В первой серии экспериментов проводил исследование пяти контрольных плоскопараллельных образцов углепластика. Характерной особенностью углепластиков является то, что в разных участках исследуемого образца локальная пористость может существенно изменяться

Таблица 1

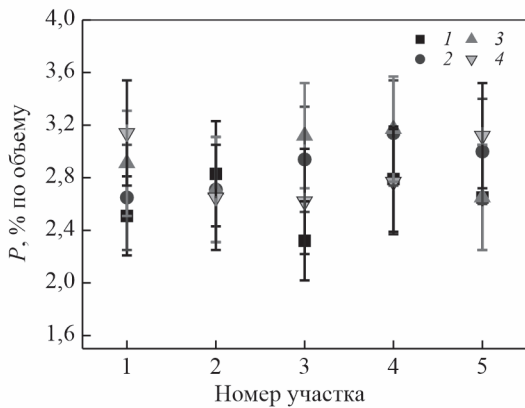


Рис. 4. Локальные пористости контрольных образцов углепластика, измеренные ЛУ-методом. 1 – 4 — номерат образцов.

Fig. 4. Local porosities of control samples of CFRP, measured by the LU method. 1 – 4 are sample numbers.

от точки к точке в силу неравномерности образования газовых пузырьков по объему материала в процессе изготовления. Для того, чтобы учесть возможную вариацию величины локальной пористости в плоскости укладки волокон, измерения проводили в нескольких точках каждого образца, а затем рассчитывали среднее значение пористости. Предварительная рентгеновская томография показала, что образец 1-0 является фактически беспористым ($P < 0,1\%$). Результаты измерений фазовой скорости ультразвука в пяти точках данного образца показали, что величина скорости практически не меняется от точки к точке, как и ожидается для материала с отсутствием пористости и вариации объемной концентрации компонентов. Измеренная величина скорости ультразвука в беспористом образце далее будет использоваться в качестве величины C_0 в формуле (2).

Для каждого из четырех пористых образцов также было проведено измерение скорости звука в пяти точках и расчет локальной пористости P_i по формуле (2). Локальность тестирования объекта в поперечном направлении (соответствующем плоскости укладки углеродных волокон в композите) практически совпадает с радиусом зондирующего ультразвукового пучка, который определяется характерным радиусом лазерного пучка на облучаемой поверхности ОА источника, и составляет ≈ 2 мм. Точность полученных значений P_i будет определяться погрешностью измерения скорости ультразвуковых волн, которая в свою очередь за-

Пористость контрольных образцов углепластика

Table 1

Porosity of control samples of carbon fiber

Исследуемый образец	Значения пористости, полученные с использованием	
	рентгеновской томографии $\langle P \rangle_{X\text{-ray}}, \%$	лазерно-ультразвуковым методом $\langle P \rangle_{LU}, \%$
1-0	$< 0,1$	—
1-1	2,58	$2,62 \pm 0,4$
1-2	2,77	$2,88 \pm 0,5$
1-3	2,51	$2,91 \pm 0,5$
1-4	2,50	$2,86 \pm 0,4$

висит от точности измерения толщины композита и точности измерения времени пробега импульса по толщине материалу ΔT . Точность измерения ΔT соответствует одному интервалу дискретизации сигналов, равному 10 нс. Результаты измерения локальной пористости для данных образцов приведены на рис. 4 (по оси абсцисс указаны номера исследуемых точек, по оси ординат — величина локальной пористости в процентах). Видно, что значения локальной пористости действительно несколько меняются от точки к точке в пределах одного и того же образца. Далее была рассчитана величина средней пористости образца $\langle P \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$ (в данной серии экспериментов $N = 5$). В табл. 1 приведено сравнение средней пористости, полученной лазерно-ультразвуковым методом $\langle P \rangle_{LU}$ с величиной средней пористости $\langle P \rangle_{X\text{-ray}}$, полученной с использованием рентгеновской томографии. Полученные данные практически совпадают с учетом погрешности измерения. Следовательно, данная методика может быть использована для дальнейшего исследования пористости реальных композитных конструкций.

Во второй серии экспериментов было исследовано три углепластиковые стрингерные панели. С помощью автоматизированного ЛУ-дефектоскопа с шаговым двигателем было проведено сканирование панелей с шагом 2 мм в XY-плоскости, соответствующей плоскости укладки углеродной ткани. Рассчитанные из полученного массива данных величины скорости ультразвука в каждом участке сканирования (2×2 мм) позволяют построить распределения локальной пористости в интересующем участке конструкции.

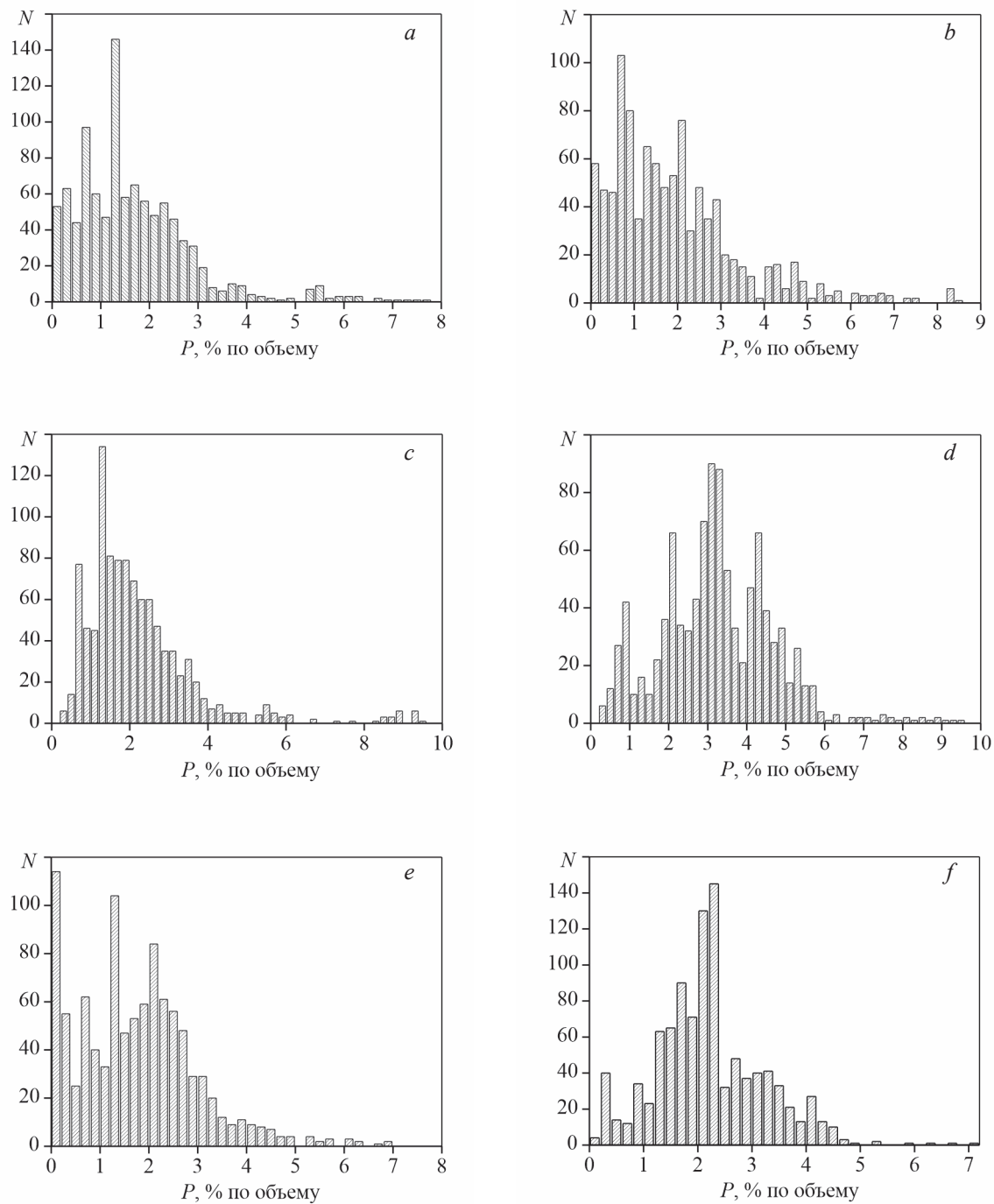


Рис. 5. Распределения локальной пористости в струнгерных панелях: *a* — панель 1, обл. I; *b* — панель 1, обл. II; *c* — панель 2, обл. I; *d* — панель 2, обл. II; *e* — панель 3, обл. I; *f* — панель 3, обл. II.

Fig. 5. Local porosity distributions in stringer panels: *a* — panel No. 1, area I; *b* — panel No. 1, area II; *c* — panel No. 2, area I; *d* — panel No. 2, area II; *e* — panel No. 3, area I; *f* — panel No. 3, area II.

Пористости исследованных областей стрингерных панелей

Table 2

Porosity of the investigated areas of stringer panels			
Исследуемая конструкция	Область I типа, $\langle P \rangle$, % по объему	Область II типа, $\langle P \rangle$, % по объему	Средняя пористость двух областей $\langle P \rangle_{total}$, % по объему
1	$1,7 \pm 0,4$	$2,0 \pm 0,5$	$1,85 \pm 0,35$
2	$2,3 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,6$	$2,75 \pm 0,55$
3	$1,7 \pm 0,4$	$2,2 \pm 0,5$	$1,95 \pm 0,40$

Для того, чтобы выявить наличие или отсутствие влияния конфигурации участка конструкции на величины локальной и средней пористости, для каждой из трех панелей были рассчитаны распределения пористости, во-первых, для областей, расположенных между стрингерами и включающих в себя только верхнюю полку (рис. 2, обл. I), и во-вторых, для областей, расположенных рядом со стрингерами и включающих в себя и верхнюю, и нижнюю полки (рис. 2, обл. II). Толщина обл. I составляла 6 мм, обл. II — 12 мм. Для построения распределения были выбраны участки 100×40 мм в обл. I и 200×20 мм в обл. II (по 1000 точек каждый). Полученные распределения величины локальной пористости представлены на рис. 5a, 5b (для панели 1), рис. 5c, 5d (для панели 2) и рис. 5e, 5f (для панели 3). По оси абсцисс здесь отложены величины пористости P в % по объему, по оси ординат — количество участков сканирования N , в которых выявлена величина пористости, соответствующая определенному диапазону. Из полученных распределений также можно рассчитать среднюю пористость исследуемого участка $\langle P \rangle$. Эти данные представлены в табл. 2.

Согласно данным, представленным производителем панелей, ожидаемая средняя пористость конструкции составляет 1,9 %. Эти данные основывались на рентгеновской томографии тестовых образцов, вырезанных из материала контрольной панели. Из табл. 2 видно, что полученные значения $\langle P \rangle_{total 1}$ и $\langle P \rangle_{total 3}$ для панелей 1 и 3 соответственно очень близки к контрольной величине 1,9 % с учетом погрешностей ЛУ-метода. В случае панели 2 наблюдается повышенная пористость по сравнению с контрольной цифрой. Это указывает на возможное нарушение условий изготовления данной конструкции.

Из полученных результатов следует, что для исследованных стрингерных панелей характерна существенная неравномерность распределения

локальной пористости в плоскости укладки углеродной ткани. Также имеет место влияние конфигурации области: области типа II характеризуются повышением средней пористости и соответствующим сдвигом максимума распределения в сторону большей пористости P по сравнению с областями типа I. В случае панелей 1 и 3 наблюдается небольшое повышение средней пористости в обл. II по сравнению с обл. I ($\Delta P \approx 0,3$ %), в то время как в случае панели 2 вариация пористости более существенна ($\Delta P \approx 0,9$ %). Во всех распределениях $N(P)$ для обл. II наблюдается соответствующий сдвиг максимума распределения $N(P)$ в сторону большей пористости P , для панели 2 этот сдвиг максимален. Вероятно, это связано с тем, что области типа I состоят только из верхней полки, а области типа II образуются путем приформовывания нижней полки к верхней, что может повлечь за собой образование дополнительной пористости при изготовлении, в том числе на границе раздела частей конструкций. Так как области повышенной пористости представляют собой места возможных потенциальных разрушений при эксплуатации конструкции, то, следовательно, для подобных конструкций важную роль играют именно локальные значения пористостей. Максимальная локальная пористость и средняя по выбранным областям отличаются более чем в два раза, что говорит о недостаточной информативности величины средней пористости при поиске “опасных” точек и участков конструкций.

По полученным данным также могут быть построены “карты” распределения величины локальной пористости исследованных областей панелей в плоскости укладки углеродной ткани. Примеры таких карт показаны на рис. 6. Представленные рисунки соответствуют участкам 40×40 мм (20×20 точек) и 20×20 мм (10×10 точек) из обл. типа I и II соответственно, по осям приведены номера точек, соответствующих относительной координате на поверхности панели. Это позволяет определить

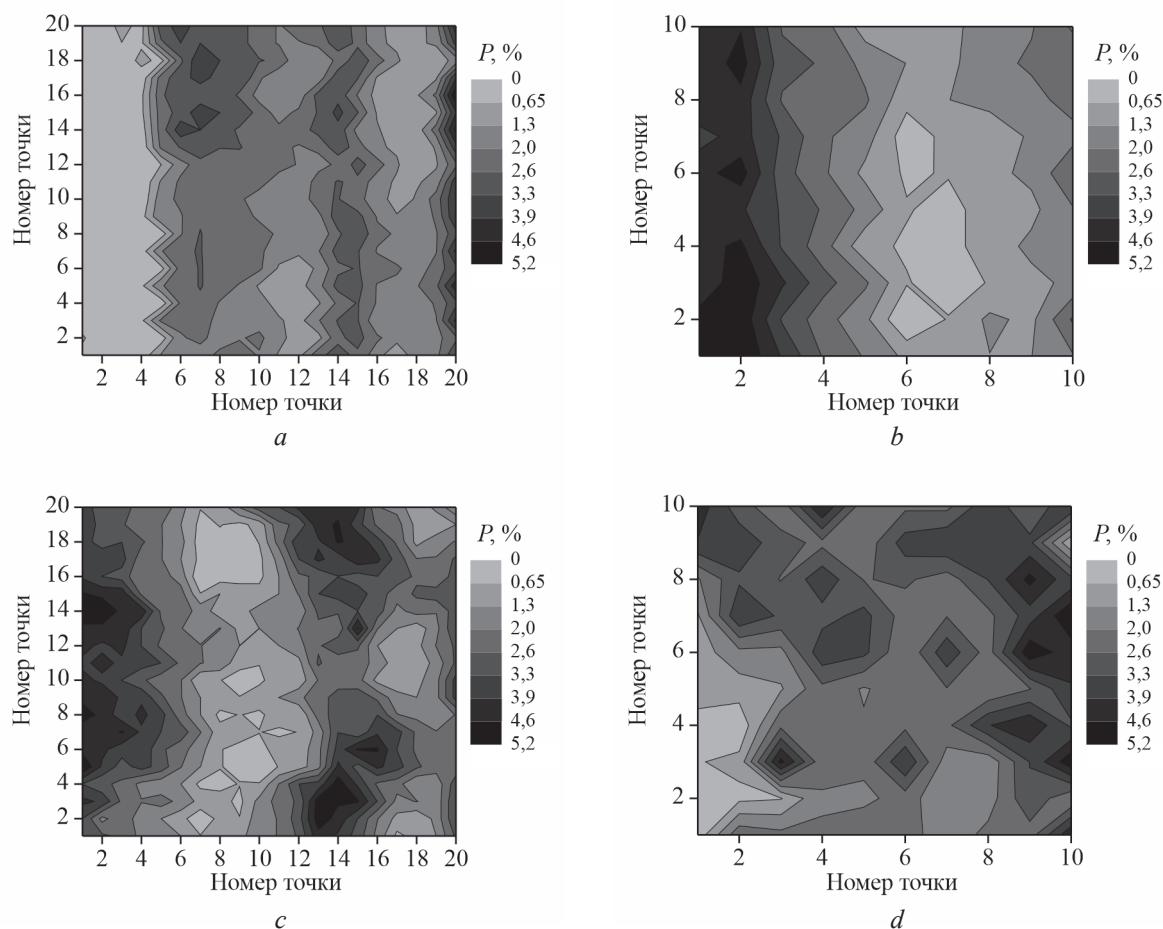


Рис. 6. Пример “карты” пористости для двух участков панели 3: *a* — обл. I, *b* — обл. II, и двух участков панели 2: *c* — обл. I, *d* — обл. II.

Fig. 6. An example of a porosity “map” for two sections of panel No. 3: *a* — Area I, *b* — Area II (*b*), and two sections of panel No. 2: *c* — Area I, *d* — Area II.

местоположение участков конструкции с повышенной локальной пористостью, что может быть полезно при анализе ее поведения под действием нагрузок или при выявлении недостатков методики производства.

Выводы

Проведено количественное исследование величины локальной пористости углепластиковых конструкций с помощью лазерно-ультразвукового метода.

Расчет пористости осуществлялся по экспериментально измеренным фазовым скоростям продольных акустических волн, распространяющихся в композите. Предлагаемый метод дает воз-

можность одностороннего доступа к объекту при проведении измерений, что позволяет исследовать конструкции переменной толщины и сложной формы.

На примере нескольких “контрольных” композитных образцов проведено измерение локальной и средней пористости углепластика, а также оценено соответствие полученных данных результатов рентгеновской томографии. С помощью аналогичной методики были исследованы три углепластиковые стрингерные панели и получены распределения величин пористости в двух типах областей различной толщины. Исследование панелей продемонстрировало, что в подобных конструкциях важную роль играет локальность значения пористости и ее изменение от точки к точке. Показано, что мак-

симальная локальная пористость данной области панели может отличаться от средней объемной пористости более чем в два раза. Такая оценка особенно важна для поиска наиболее уязвимых мест композитной конструкции при подготовке к эксплуатации. Выявлено соответствие величины средней пористости контрольной панели, полученной ЛУ-методом, с заводскими данными.

Продемонстрирована возможность получения “карты” распределения локальной пористости участка панели в плоскости укладки углеродной ткани. Соответственно, ЛУ-метод сочетает в себе возможности как качественного анализа пористости (выявление местоположения участков повышенной пористости), так и количественного (получение распределения величины и ее разброса).

Представленный в работе ЛУ-метод может быть полезен для контроля качества композитных конструкций. Данный метод является достаточно оперативным, что позволяет использовать его в рамках реального производства с целью усовершенствования условий и методик производства. Помимо этого, представленный метод может также применяться для выявления повреждений, например, расслоений и трещин, возникающих вследствие эксплуатации или контрольных испытаний композитной конструкции.

Литература/References

1. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, v. 41, pp. 143 – 151.
2. Duchene P., Chaki S., Ayadi A., Krawczak P. A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites. *J. Mater. Sci.*, 2018, v. 53, pp. 7915 – 7938.
3. Lubin G. *Handbook of composites*. Springer US, 1982, 786 p.
4. Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В., Новиков Г.В. Использование экспериментально определенных параметров когезионной зоны при численной оценке устойчивости к расслоению полимерных композитов. *Перспективные материалы*, 2019, № 3, с. 74 – 81.
- Babayevsky P.G., Salienko N.V. Novikov G.V. Ispol'zovanie eksperimental'no opredelennykh parametrov kogeziionnoy zony pri chislennoy otsenke ustojchivosti k rassloeniyu polimernykh kompozitov [Use of experimentally determined parameters of the cohesive zone in the numerical evaluation of the resistance to delamination of polymer composites materials. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2019, v. 10, pp. 1259 – 1264.
5. Тарнопольский Ю.М. Прикладная механика композитов. М.: Мир, 1989, 358 с.
- Tarnopol'skiy Yu.M. *Prikladnaya mekhanika kompozitov* [Applied mechanics of composites]. Moscow, Mir Publ., 1989, 358 p.
6. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваяев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ. *Электрон. науч. журн. “Труды ВИАМ”*, 2016, № 6, с. 68 – 78.
- 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* [VIAM works], 2016, no. 6.
7. Adams R.D., Cawle P. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joint. *NDT Int.*, 1988, m. 21, no. 4, pp. 208 – 222.
8. Stamopoulos A.G., Tserpes K.I., Dentsoras A.J. Quality assessment of porous CFRP specimens using X-ray computed tomography data and artificial neural networks. *Compos. Struct.*, 2018, v. 192, pp. 327 – 335.
9. Вавилов В.П., Billard S., Айвазян В.М. Тепловой томограф для испытаний композиционных материалов. *Дефектоскопия*, 2014, №11, с. 71 – 75.
- Vavilov V.P., Billard S. Ayvazyan V.M. Teplovoj tomograf dlya ispytaniy kompozitsionnykh materialov. [A thermal tomographic unit for testing composite materials]. *Defektoskopiya* [Russ. J. Nondestruct. Test.], 2014, v. 50, pp. 679 – 683.
10. Balageas D., Maldague X., Burleigh D., Vavilov V.P., Oswald-Tranta B., Roche J.-M., Pradere C., Carlomagno G.M. Thermal (IR) and other NDT techniques for improved material inspection. *J. Nondestruct. Eval.*, 2016, v. 35, p. 18.
11. 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, pp. 147 – 153.
12. Naresh K., Khan K.A., Umer R., Cantwell W.J. The use of X-ray computed tomography for design and process modeling of aerospace composites: A review. *Materials and Design*. 2020, v. 190, art. 108553.
13. Nsengiyumva W., Zhong Sh., Lin J., Zhang Q., Zhong J., Huang Yu. Advances limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review. *Compos. Struct.*, 2020, v. 256, art. 112951.
14. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Чернова В.В. Анализ процесса разрушения углепластика, изготовленного автоклавным формованием, по параметрам акустической эмиссии. *Конструкции из композиционных материалов*, 2020, № 3, с. 25 – 31.
- Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Chernova V.V. Analiz processa razrusheniya ugleplastika, izgotovlennogo avtoklavnim formovaniem, po parametram akusticheskoi emissii [Analysis of the autoclave-made carbon fiber reinforced plastics process of destruction by

- the acoustic emission signals parameters]. Konstrukcii iz kompozicionnykh materialov [Composite materials constructions], 2020, no 3, pp. 25 – 31.
15. Ibrahim M.E. Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: a review. Compos. Part A, Appl. Sci. Manuf., 2014, v. 64, pp. 36 – 48.
 16. Chimenti D.E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization. Ultrasonics, 2014, v. 54, pp. 1804 – 1816.
 17. Stone D.E.W., Clarke B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fiber reinforced plastics. Non-destructive testing, 1975, v. 8, pp. 137 – 145.
 18. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Исследование распространения ультразвука в слоистых композиционных материалах. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2017, т. 83, № 1-1, с. 48 – 51.
 - Samokrutov A.A., Shevaldukin V.G. Issledovanie rasprostraneniya ultrazvuka v sloistih kompozitsionnih materialah [Special features of ultrasound propagation as a basis for nondestructive testing of laminar composite materials]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials], 2017, v. 83, no. 1, pp. 48 – 51.
 19. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991, 304 с.
 - Gusev, V.E., Karabutov, A.A.: Lazernaya optoakustika [Laser Optoacoustics]. New York: American Institute of Physics, 1993.
 20. Подымова Н.Б., Карабутов А.А., Кобелева Л.И., Чернышова Т.А. Лазерный оптико-акустический метод измерения локальной пористости дисперсно-наполненных металлматричных композиционных материалов. Перспективные материалы, 2013, № 3, с. 81 – 87.
 - Podymova N.B., Karabutov A.A., Kobeleva L.I., Chernyshova T.A. Lazernyj optiko-akusticheskij metod izmereniya lokal'noj poristosti dispersno-napolnennykh metallomatrichnykh kompozitsionnykh materialov [Laser optoacoustic method of local porosity measurement of dispersed particlesreinforced metal-matrix composite materials]. Perspektivnye materialy [J. Advanced Materials (in Russ.)], 2013, no. 3, pp. 81 – 87.
 21. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Применение широкополосной лазерно-ультразвуковой спектроскопии для неразрушающего контроля пористости углепластиков с различным объемным содержанием углеродного волокна. Перспективные материалы, 2021, № 3, с. 76 – 84.
 - Sokolovskaya Yu.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Application of broadband laser-ultrasonic spectroscopy for nondestructive testing of the porosity in carbon fiber reinforced plastics with various volume contents of carbon fibers. Inorganic Materials: Applied Research, 2021, v. 12, no. 5, pp. 1428 – 1433.
 22. 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.
 - Polyakov V.V., Golovin A.V. Vliyanie poristosti na skorosti ul'trazvukovykh voln v metallah [The effect of porosity on the velocity of ultrasonic waves in metals]. Pisma v jef [Tech. Phys. Lett.] 1994, v. 20, pp. 452 – 453.
 23. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. М.: Машиностроение, 2003, 656 с.
 - Klyuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. Nerazrushayushiy kontrol [Nondestructive testing and diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 656 p.
 24. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. Т.3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 1994, 864 с.
 - Ermolov I.N., Lange Yu.V. Nerazrushayushiy kontrol [Nondestructive testing and diagnostics]. Handbook in 7 Vol. v. 3., [Ultrasonic Testing]. Moscow, Mashinostroenie, 1994, 864 p.

Статья поступила в редакцию — 10.11.2022 г.
после доработки — 23.12.2022 г.
принята к публикации — 26.12.2022 г.

Соколовская Юлия Глебовна — МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет (119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2), кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, 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.

Карabutov Александр Алексеевич — МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет (119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2), доктор физико-математических наук, профессор, специалист в области акустики и лазерной оптоакустики. E-mail: aak@optoacoustic.ru.

Laser-ultrasonic study of local porosity distribution in CFRP stringer panels

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

The paper presents a method for quantifying the porosity of carbon fiber structures based on laser excitation of probing ultrasonic pulses. A method for estimating the porosity of a material from the experimentally measured phase velocity of longitudinal acoustic waves propagating in it is proposed. Using the example of control samples and real structures made of carbon fiber, the possibility of obtaining distributions of local porosity values in the studied section of the structure is demonstrated. It is shown that in the studied structures there are regions with a significant variation in the value of local porosity. The proposed method can be used to control the quality of manufactured composite structures, as well as to study the internal changes in structure during operation.

Keywords: polymer-matrix composites, CFRP, acoustic methods, ultrasonic, non-destructive testing, porosity, voids.

Sokolovskaya Yulia — M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics (119991, Moscow Leninslie Gori, 1/2), PhD, researcher, 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 (119991, Moscow 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, Faculty of Physics (119991, Moscow Leninslie Gori, 1/2), PhD, professor, specialist in the field of acoustics and laser optoacoustics. E-mail: aak@optoacoustic.ru.