УДК 620.179.17:539.422.5: 534.2

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ФОРМОВАНИЯ НА ДЕФЕКТЫ В ОБРАЗЦАХ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА АСМ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2024 г. Л.Н. Степанова[1,*], В.А. Батаев[2], В.В. Чернова[3], С.В. Шейфер[1]

[1] ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина», Россия 630051 Новосибирск, ул. Ползунова, 21
[2] Новосибирский государственный технический университет, Россия 630064 Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20
[3] Сибирский государственный университет путей сообщения, Россия 630049 Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191
E-mail: [*]akustika2063@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.01.2024; после доработки 25.04.2024
Принята к публикации 24.05.2024

Проведены статические испытания образцов из углепластика АСМ, изготовленных методами автоклавного и вакуумного формования. Для контроля дефектов применялись акустические методы (акустико-эмиссионный и ультразвуковой), тензометрия и выполнялся микроанализ шлифов. Локация сигналов акустической эмиссии в области концентратора напряжений позволила определить, что при автоклавном формовании количество дефектов в десять раз меньше, чем при вакуумном. Ультразвуковой и акустико-эмиссионный методы, тензометрия и микроанализ позволили определять структуру углепластика АСМ, координаты дефектов и их тип. При контроле ненагруженных образцов, выполненных вакуумным формованием, обнаружены производственные дефекты, которые при статическом растяжении увеличивались в размерах и приводили к зарождению новых разрушений. В образцах, изготовленных методом автоклавного формования, производственные дефекты не обнаружены. Микроанализ образцов, произведенных вакуумным методом, выявил дефекты, связанные с разрушением волокон, растрескиванием матрицы, расслоением. Испытания образцов, выполненных автоклавным формованием, показали, что дефекты в них практически отсутствуют.

Ключевые слова: углепластик, вакуумное и автоклавное формование, акустическая эмиссия, ультразвуковой контроль, тензометрия, микроанализ структуры углепластика.

INFLUENCE OF MOLDING METHODS ON DEFECTS IN CARBON FIBER SAMPLES AFM UNDER STATIC LOADING

© 2024 L.N. Stepanova[1,*], V.A. Bataev[2], V.V. Chernova[3], S.V. Sheifer[1]

[1]FAI Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin, Russia 630051 Novosibirsk, Polzunova st., 21
[2] The Novosibirsk State Technical University, Russia 630064 Novosibirsk, K. Marx avenue, 20
[3] The Siberian Transport University, Russia 630049 Novosibirsk, D. Kovalchuk street, 191
E-mail: [*]akustika2063@yandex.ru

Samples from domestic ACM carbon fiber made by autoclave and vacuum forming under static loading were studied. To control defects, acoustic methods (acoustic emission, ultrasonic), strain metering were used and microanalysis of their thin sections was carried out. The location of acoustic emission signals in the region of the stress concentrator made it possible to determine that in autoclave molding their number is ten times less than in vacuum. The ultrasonic method and acoustic emission made it possible to determine the structure of carbon fiber, the coordinates of defects and their type. During the control of unloaded samples made by vacuum molding, manufacturing defects were found that, when stretched statically, increased in size and led to the initiation of new failures. In autoclave-formed samples, manufacturing defects were not found. Microanalysis of vacuum samples revealed defects associated with fiber failure, matrix cracking, and delamination. Autoclave tests showed that the number of defects and their dimensions were significantly reduced.

Keywords: carbon fiber, vacuum and autoclave molding, acoustic emission, ultrasonic testing, tensometry, microanalysis of carbon fiber structure.

DOI: 10.31857/S0130308224060063

ВВЕДЕНИЕ

Для авиационной промышленности в настоящее время разрабатывается большое количество новых марок углепластиков. Механические свойства композиционных материалов (КМ) под влиянием нагрузок (статических, циклических, ударных) и климатических факторов (тем-

пературы, влажности) со временем изменяются [1—3]. Задача раннего обнаружения дефектов в КМ является актуальной, а ее решение связано с их прочностными исследованиями при статическом воздействии нагрузок.

В авиационной отрасли при изготовлении деталей из КМ наиболее широко применяются методы автоклавного и вакуумного формования [4—5]. Автоклавная технология позволяет изготавливать крупногабаритные изделия с низкой пористостью пластиков и высокими требованиями к их качеству. При изготовлении слабо нагруженных изделий из КМ используется вакуумное формование. Однако из-за приложения меньшего внешнего давления при формовании они проигрывают по эксплуатационным характеристикам по сравнению с автоклавным методом. К достоинствам вакуумного метода относят простоту и минимальные затраты на подготовку и проведение процесса формования. Выявление дефектов на ранней стадии развития разрушения образцов, выполненных из композитов, изготовленных методами автоклавного и вакуумного формований, является актуальной задачей.

При прочностных испытаниях образцов из КМ часто используется метод акустической эмиссии (АЭ), так как он является наиболее чувствительным и осуществляет локацию дефектов в режиме реального времени, определяется тип разрушения, степень опасности и т.д. К основным информативным параметрам сигналов АЭ относится локация, структурный коэффициент, энергетический параметр *MARSE*, доминантные частоты [6—9].

Цель работы — определение локации и типа дефектов при статическом нагружении образцов из углепластика АСМ, изготовленных способами автоклавного и вакуумного формований, с использованием ультразвукового, акустико-эмиссионного методов, тензометрии и микроанализа структуры углепластиков.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статические испытания образцов проводили из углепластика АСМ 102-*C*130*UD* (АСМ) с укладкой монослоев [±45/0/90/0/+45/0/–45/0/+45$_2$/0/45/0/+45/0/90/0/±45] и геометрическими размерами 600 × 100 × 2,7 мм. В центре образцов выполнялось сквозное отверстие диаметром 12 мм, являющееся концентратором напряжения. Исследовались две группы образцов из данного углепластика, изготовленные методами вакуумного и автоклавного формования. В табл. 1 приведены значения максимальных статических нагрузок, прикладываемых к образцам, установленным в гидравлическую нагружающую машину MTS-50.

Нагрузка изменялась ступенчато с выдержкой на каждой ступени в течение Δt = (1,5–– 2) мин. До нагрузки, равной P = 70 кН, ее увеличение осуществлялось через интервал, равный ΔP_1 = 10 кН, а после достижения 70 кН — через интервал ΔP_2 = 5 кН. Контроль за процессом разрушения образцов осуществлялся с использованием ультразвукового (УЗ), АЭ и тензометрического методов. Кроме того, после испытаний образцов проводился микроанализ их структуры.

Для регистрации АЭ-информации на каждый образец устанавливались четыре преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) типа GT300, подключенных к микропроцессорной системе СЦАД-16.12 [8—10]. Деформация в образцах, где были наклеены проволочные тензодатчики типа ПКС-8 сопротивлением R = 120 Ом, базой L = 10 мм, коэффициентом тензочувствительности K = 2,12 (свидетельство Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.C.28.007 № 54961, регистрационный номер 57245—14), измерялась быстродействующей микропроцессорной тензометрической системой «Динамика-3» (сертификат № 66973—17).

При УЗ-контроле дефектоскоп OmniScan одновременно со сбором массива *A*-сканов проводил их томографическую обработку. Результаты контроля отображались как виды и сечения объекта контроля, а именно сканы (развертки) типа *B*, *C* и *D* по трем координатным осям: оси сканирования *S*, оси индексирования *I*, оси ультразвука (глубины залегания) *U*. По результатам исследований определено, что метод, основанный на ультразвуковых фазированных решетках, и оборудование Omniscan являются оптимальными для оценки и оформления результатов контроля. При этом контроль фазированными решетками имеет преимущества перед обычным УЗ-контролем, так как он позволяет обследовать геометрически сложные детали без необходимости перемещения объекта или датчика и получать реальные изображения положения и размеров обнаруженных дефектов [12, 13].

Локация сигналов АЭ в области отверстия начиналась при нагрузках, составляющих более 50 % от разрушающего значения. Образцы не доводились до полного разрушения, так как после нагружения они подвергались микроанализу структуры углепластика АСМ на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP с увеличением до 1 млн крат, с разрешающей способностью 2 нм, при ускоряющих напряжениях от 5 до 20 кВ.

Таблица 1

Значения максимальных нагрузок, полученных при статических испытаниях образцов из углепластика АСМ

Номер группы	Номер образца	Технология изготовления	Максимальная нагрузка, кН	Нагрузка начала локации в области отверстия, кН
1	1	Вакуумное формование	110	50
	3		115	30
2	2	Автоклавное формование	115	70
	4		125	50

На рис. 1 показана локация сигналов АЭ, зарегистрированных для образцов из углепластика АСМ [9]. В процессе увеличения статической нагрузки выявлены особенности, характерные для каждого метода формования углепластика АСМ. Локация сигналов в области отверстия образца 1, выполненного с использованием вакуумного формования, начиналась при нагрузке, равной 50 кН (рис. 1*а*). При этом активность данного источника проявлялась в процессе всего нагружения образца 1 (рис. 2*а*), изготовленного методом вакуумного формования. На его рабочей поверхности локализованы сигналы АЭ, свидетельствующие о разрушениях углепластика, а их суммарное количество равно 638.

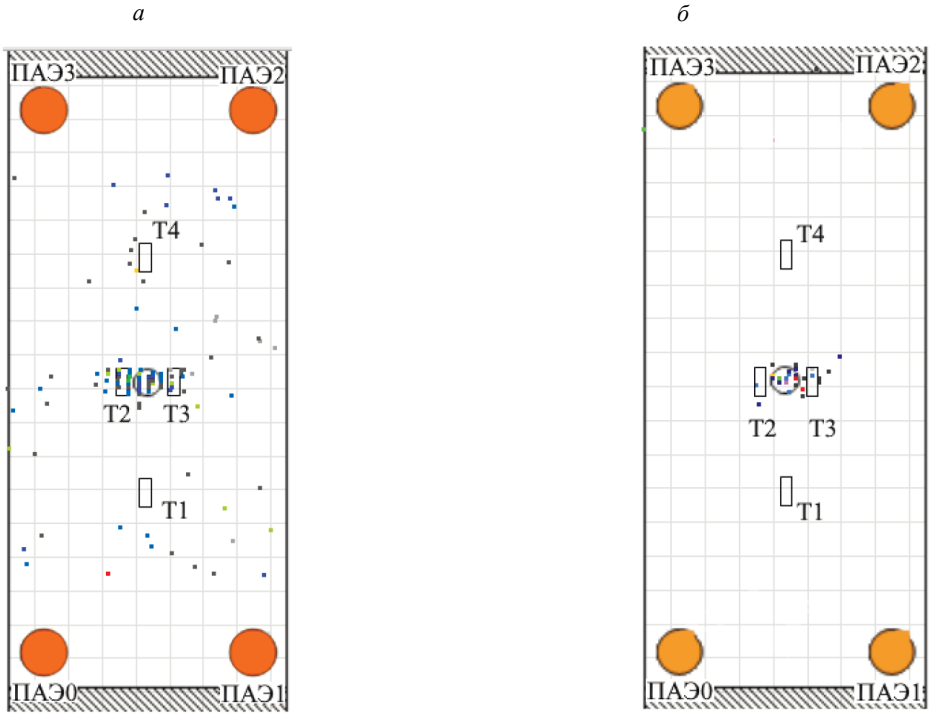

Рис. 1. Локация сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образцов 1 (*а*) и 2 (*б*).

Образец 2 выполнен методом автоклавного формования и нагружался до разрушающей нагрузки, равной 90 кН. При развитии дефектов в зоне концентратора напряжений осуществлялась локация сигналов АЭ. Источники сигналов с наибольшей суммарной амплитудой находились в горизонтальной плоскости отверстия. В образце 2 (рис. 1*б*) локация в области отверстия началась при нагрузке более 70 кН. В образце, выполненном методом автоклавного формования, количество сигналов, зарегистрированных из области отверстия, составило около 100, что значительно меньше по сравнению с образцом 1. На рис. 2*б* показаны зависимости суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени для образца 2.

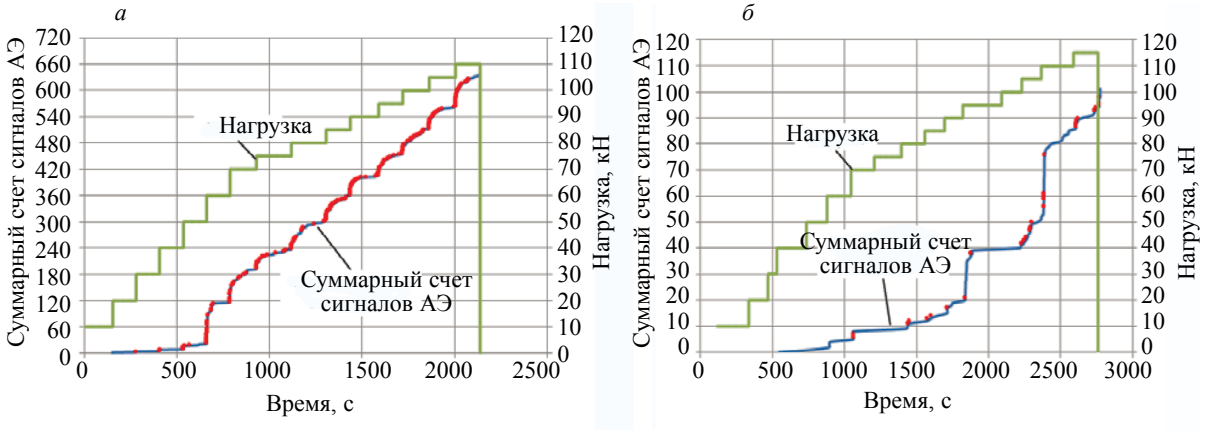

Рис. 2. Зависимости суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени, зарегистрированные при нагружении образцов 1 (*а*) и 2 (*б*). ● — сигналы АЭ, локализованные в области отверстия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе испытаний проанализированы основные информативные параметры сигналов АЭ, локализованные в образцах в области отверстия. Для испытанных образцов исследовались зависимости энергетических (амплитуда, *MARSE*) и частотных (частота, структурный коэффициент) параметров сигналов АЭ от нагрузки. Приведены зависимости основных информативных параметров сигналов АЭ от нагрузки для образцов 1 (рис. 3) и 2 (рис. 4). При нагружении образца 1 отмечалось, что увеличение нагрузки оказывает влияние на изменения амплитуды, структурного коэффициента и энергетического параметра *MARSE*, которые определялись как [10]

$$MARSE = \int_t \overline{U(t)} \cdot dt, \tag{1}$$

где $U(t)$ — огибающая сигнала АЭ, которая определялась его амплитудой и длительностью.

Структурный коэффициент сигналов АЭ находился из формулы [9, 10]:

$$P_{D42}(f) = \frac{\max D_4}{\max D_2}, \tag{2}$$

где D_2, D_4 — наборы коэффициентов вейвлет-разложения 4 и 2 уровней детализации, полученные при частоте дискретизации исходного сигнала, равной $f = 2$ МГц.

Уровень детализации 2 соответствует полосе частот от 250 до 500 кГц, уровень детализации 4 — полосе частот от 63 до 125 кГц.

У образца 1 наблюдалось увеличение энергетических параметров (рис. 3*а*, *б*) при повышении нагрузки и практически неизменяемые частотные параметры (рис. 3*в*, *г*). Наиболее значимые изменения всех параметров отмечались для сигналов АЭ, зарегистрированных датчиком ПАЭ0. Структурный коэффициент (рис. 3*г*), определяемый по формуле (2), изменялся характерным для композитов образом: сначала наблюдалось уменьшение, а затем — незначительное увеличение.

При нагружении образца 2 локация сигналов АЭ в рабочей зоне начиналась только при нагрузке $P = 70$ кН. Отмечалось, что разброс параметров сигналов АЭ, зарегистрированных ПАЭ пьезоантенны, больше, чем при нагружении образца 1.

Кроме того, максимальные значения энергетических параметров (рис. 4*а*, *б*) образца 2 были в два раза больше, чем при нагружении образца 1 (см. рис. 3*а*, *б*). Однако, также как и у образца 1, увеличение амплитуды и *MARSE* происходило до нагрузки 100 кН, а затем наблюдалось их уменьшение. Медианная частота варьировалась от 50 до 350 кГц, а структурный коэффициент — от 0,6 до 1,6 (рис. 4*в*, *г*). Следовательно, механизмы разрушения углепластика АСМ в образцах 1 и 2 были различны.

Локация сигналов АЭ при испытаниях образцов из углепластика АСМ осуществлялась с использованием модифицированного двухинтервального метода определения времени их прихода. Двухинтервальный коэффициент рассчитывался как [10]

$$K(t, \tau_1, \tau_2) = \frac{A(t, \tau_2) - A(t - \tau_1, \tau_1)}{A(t - \tau_1, \tau_1)}, \tag{3}$$

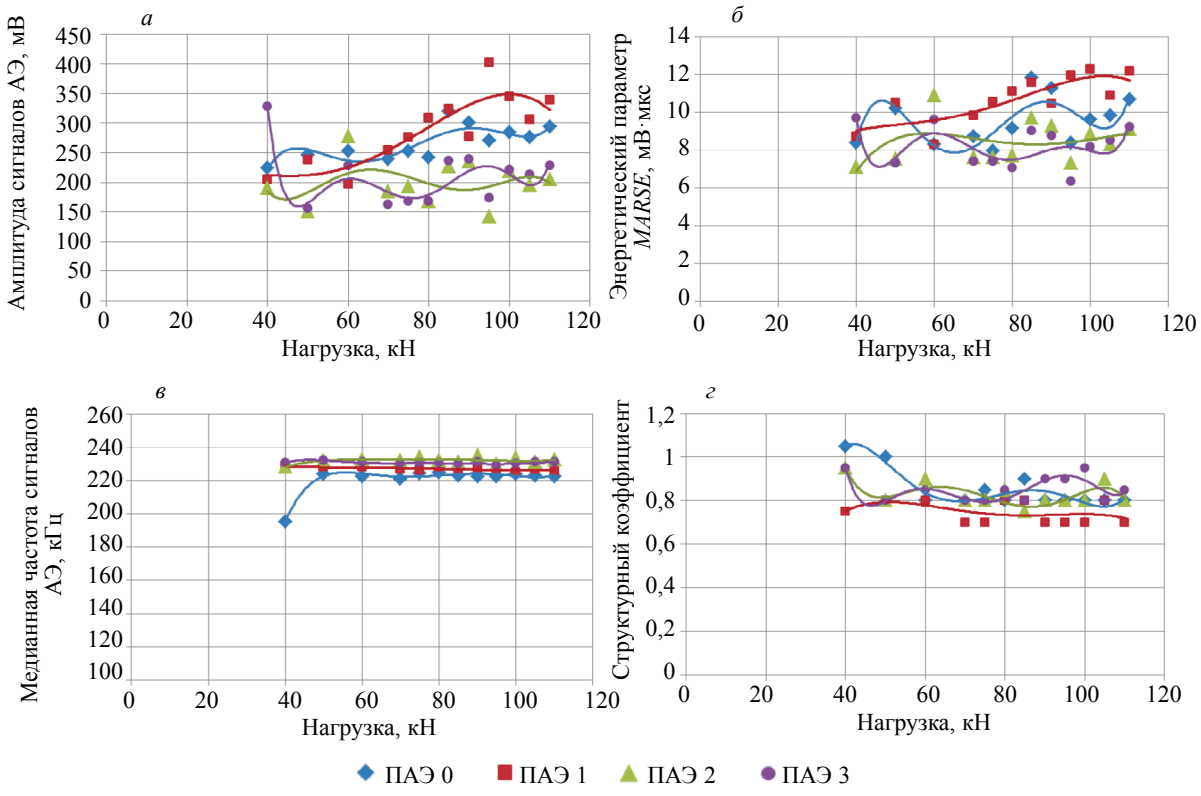

Рис. 3. Зависимость основных информативных параметров сигналов АЭ от нагрузки при нагружении образца 1: *а* — амплитуды; *б* — энергетического параметра *MARSE*; *в* — медианной частоты; *г* — структурного коэффициента.

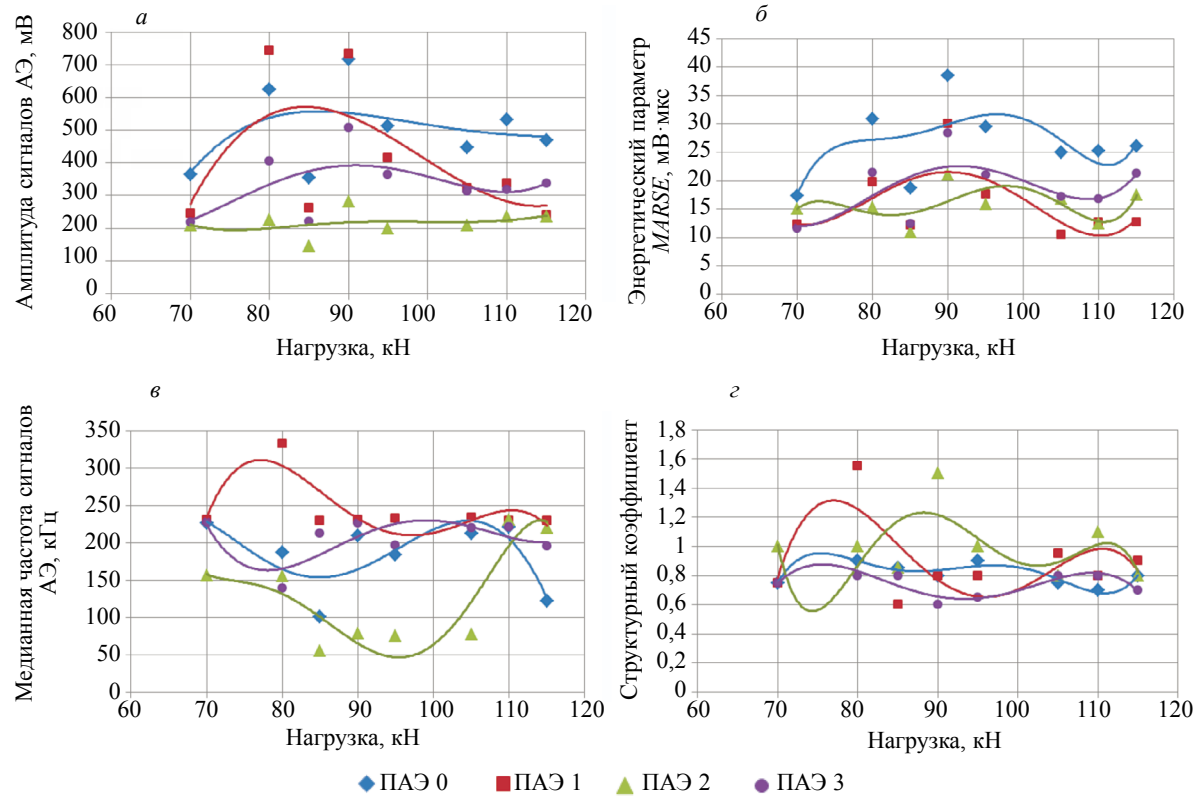

Рис. 4. Зависимость основных информативных параметров сигналов АЭ от нагрузки при нагружении образца 2: *а* — амплитуды; *б* — энергетического параметра *MARSE*; *в* — медианной частоты; *г* — структурного коэффициента.

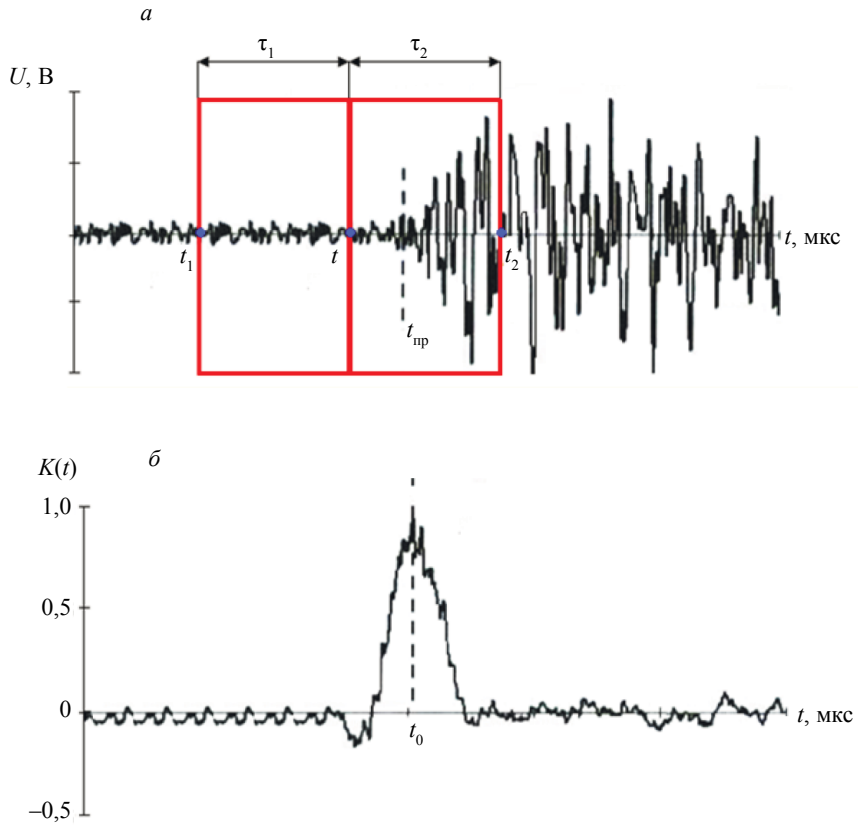

Рис. 5. Осциллограмма сигнала АЭ (*а*) и соответствующее изменение двухинтервального коэффициента $K(t)$ (*б*).

где $A(t, \tau) = \int_{t}^{t+\tau} |U(t)| \cdot dt$ — модуль амплитуды сигнала АЭ; τ_1, τ_2 — длительность первого и второго временных «окон», перемещающихся по реализации сигнала АЭ (рис. 5*а*).

Время прихода t_0 сигнала АЭ на рис. 5*б* соответствует максимуму двухинтервального коэффициента $K(t)$. Это и есть максимальная скорость перестройки структуры сигнала, т.е. момент прихода сигнала АЭ на датчик ПАЭ [8].

Анализ результатов тензометрирования показал, что изменения относительных деформаций при увеличении нагрузки происходили линейно (рис. 6). Отмечалось, что значения относительных деформаций для образцов из углепластика АСМ, изготовленных методами вакуумного и автоклавного формования, были примерно одинаковыми и достигали $6{,}5 \cdot 10^{-3}$ относительных единиц деформаций (о.е.д.).

Показания тензодатчиков Т2 и Т3, наклеенных в области отверстия, были больше показаний тензодатчитков Т1 и Т4, более удаленных от отверстия. При этом в образце 1, изготовленным методом вакуумного формования, данная разница более заметная по сравнению с образцом 2, изготовленным методом автоклавного формования. Таким образом, результаты тензометрии подтвердили, что в композиционном образце, изготовленном автоклавным методом, распределение и изменение деформаций происходило равномерно по всей площади рабочей зоны, в отличие от образца, изготовленного вакуумным методом.

При УЗ контроле, выполняемом прибором Omniscan X3, применялся преобразователь Olympus NDT 5L-64-NW1 с 64-элементной антенной фазированной решеткой [11]. Для сканирования исследуемых образцов из углепластика АСМ толщиной не более 3 мм оптимальной являлась настройка от 6 до 8 элементов фазированной решетки, одновременно работающих на прием и передачу УЗ-сигналов. При использовании большего количества элементов фазированной решетки скорость сканирования уменьшалась.

Сканирование выполнялось зондирующим импульсом без акустической задержки с частотой, равной 5 МГц, и длительностью, составляющей 50 нс. Данные параметры зондирующего импульса применяются для контроля изделий толщиной не более 10 мм. Амплитуда УЗ-сигнала

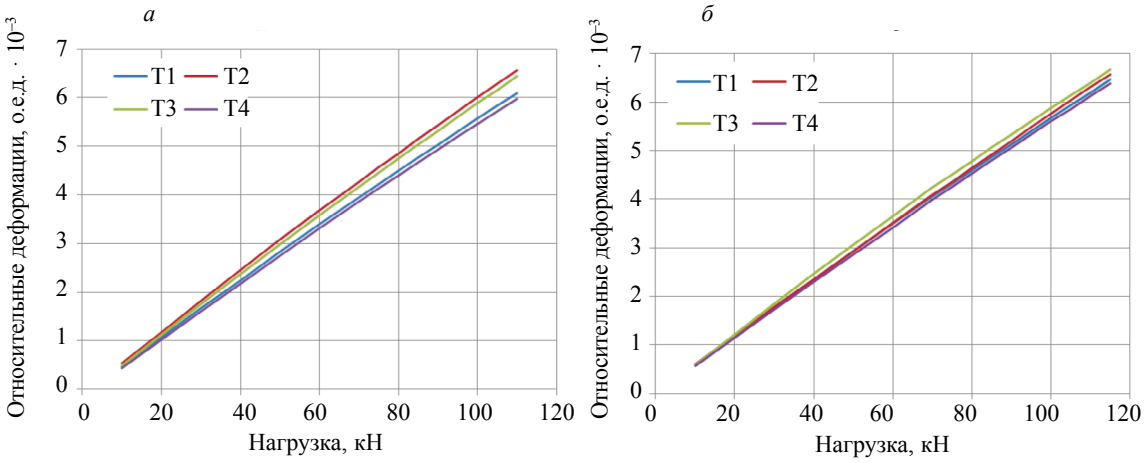

Рис. 6. Зависимости деформаций от нагрузки, зарегистрированные при нагружении образцов 1 (*а*) и 2 (*б*).

в бездефектной зоне образца составляла 85 дБ, скорость сбора импульсов приемником от генератора равна 120 Гц, угол ввода луча составлял 0^0. Фокус УЗ-пучка направлен в точку, соответствующую 0,5 от толщины образца. Шаг сканирования поверхности образца соответствовал размеру 1-2 элементов фазированной решетки.

Результатами УЗ-контроля дефектоскопом Omniscan X3 являлись *A*, *B* и *C*-сканы, которые показывали местоположение, размер и ориентацию дефектов (рис. 7 — рис. 10).

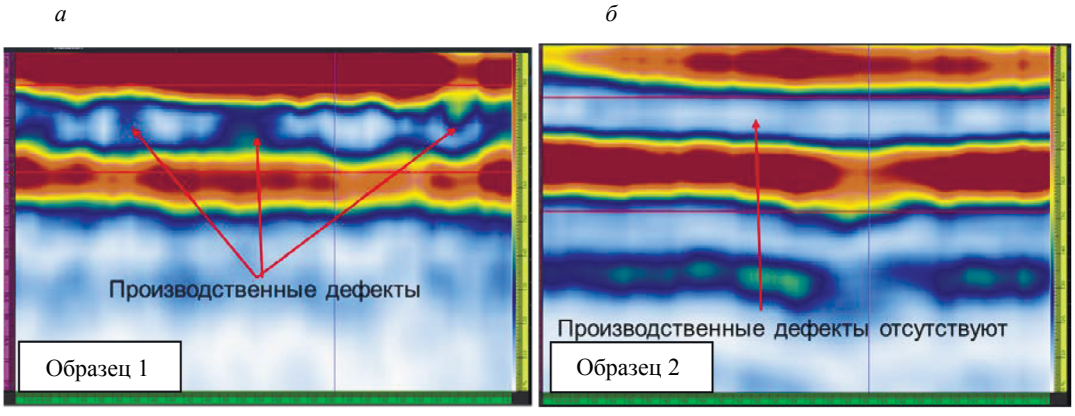

Рис. 7. Ультразвуковые *S*-сканы образцов из углепластика, изготовленные методами вакуумного (*а*) и автоклавного (*б*) формования из области наклейки тензодатчика Т1 (до нагружения).

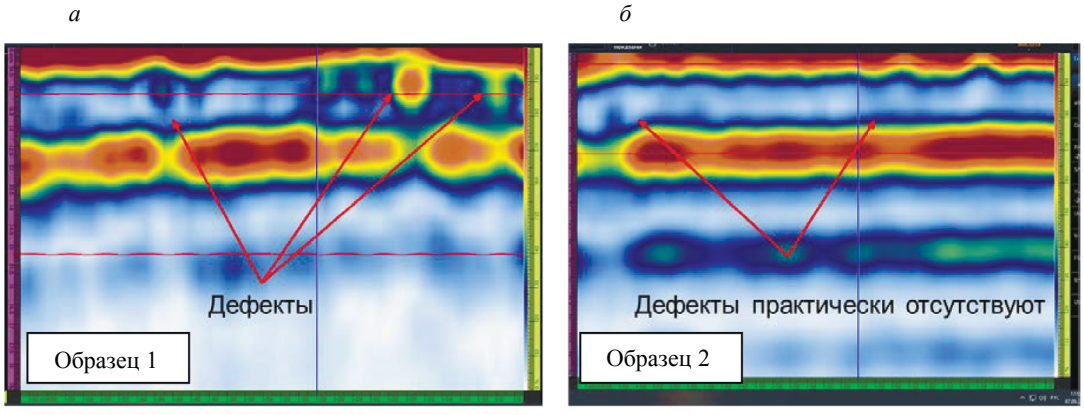

Рис. 8. Ультразвуковые *S*-сканы образцов из углепластика, изготовленные методами вакуумного (*а*) и автоклавного (*б*) формования из области наклейки тензодатчика Т1 (после нагружения).

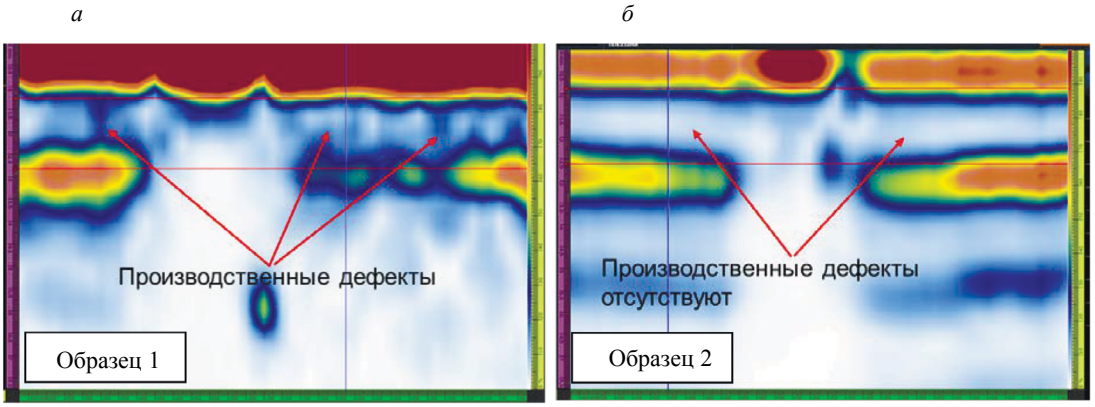

Рис. 9. Ультразвуковые *S*-сканы образцов из углепластика, изготовленные методами вакуумного (*а*) и автоклавного формования (*б*) из области отверстия (до нагружения).

При этом *B*-скан настраивался на считывание амплитуды, поэтому цветовой градиент на правой стороне изображения зависит от амплитуды принимаемого УЗ-сигнала. Например, красный цвет указывает на высокую амплитуду принимаемого сигнала, а синий — на более низкую амплитуду возвратившихся сигналов. Синий цвет виден на всем *B*-скане из-за низкого фонового шума, который всегда присутствует из-за того, что образцы выполнены из композитов, состоящих из углеродного волокна и эпоксидной смолы. Передняя и задняя стенки образца из КМ очерчены толстыми красными полосами и показывают общую толщину композита (по сравнению с измерениями в левой части изображения). Разрыв в донном сигнале (рис. 9, рис. 10) означает отсутствие отражения от материала и соответствует области расположения отверстия в образце.

На рис. 7 — рис. 10 приведены *S*-сканы областей микродефектов, расположенных на расстоянии 0,5 мм от поверхности. При этом *S*-скан настраивался на считывание толщины образца. В проводимых испытаниях толщина образцов составляла 2,7 мм, поэтому шкала градиента в правой части изображения задавалась на ожидаемой толщине в диапазоне от 0 до 5 мм.

Изображения скана преобразовывались УЗ-системой в файлы OmniPC. Данные контроля в цифровом виде переносились в компьютер. В программе устанавливаются границы с использованием опорных и измерительных курсоров (отображаются на сканах синими и красными прямыми). Они охватывают область расположения дефекта. Таким образом, по шкале осей координат можно определить его размеры, а также рассчитать площадь разрушения. Для получения *C*-скана, который отображает результаты УЗ-контроля по всей площади поверхности контролируемого образца, в программе задается пороговое значение амплитуды донного сигнала. При этом определяется контролепригодность зон сканирования объекта контроля. Если при сканировании амплитуда донного сигнала выше порогового значения, то зона сканирования является контпролепригодной, если ниже — неконтролепригодной.

При скорости звука в образце, равной 3000 м/с, минимальная глубина залегания выявленных дефектов составила 0,4 мм. Это хороший показатель по «мертвой зоне» (поверхностному

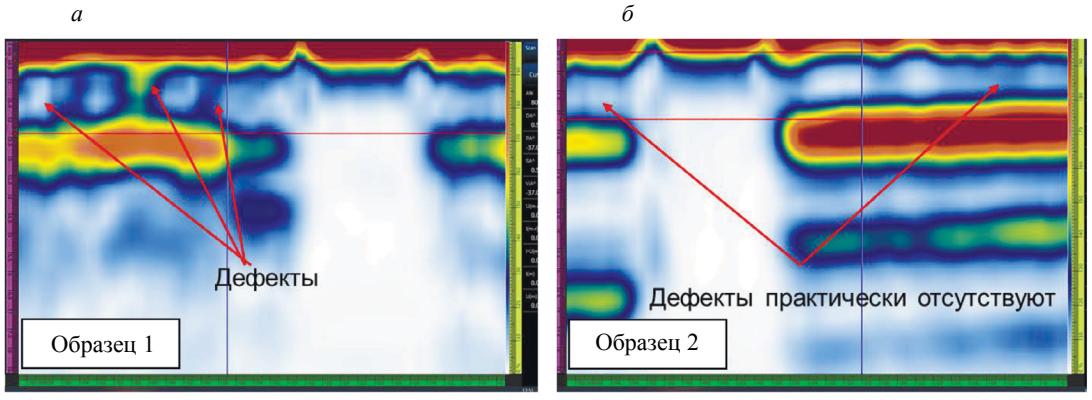

Рис. 10. Ультразвуковые *S*-сканы образцов из углепластика, изготовленные методами вакуумного (*а*) и автоклавного (*б*) формования из области отверстия (после нагружения).

разрешению), который подтверждает высокую чувствительность характеристик генератора и приемника дефектоскопа.

На рис. 7 показаны результаты УЗ-контроля образцов 1 и 2 прибором Omniscan X3 из области установки тензодатчика T1 (см. рис. 1) [11]. В ненагруженном образце 1, изготовленном методом вакуумного формования, были определены производственные дефекты, к которым относятся отражатели, которые (согласно описанной методике контроля) не являлись критическими и были допустимыми. Однако в образце 2, изготовленном в автоклаве, УЗ-сигналы не были зарегистрированы, а, следовательно, несплошности в структуре композита отсутствовали.

На рис. 8 показаны *S*-сканы из области установки тензодатчика T1 после статического нагружения образцов 1 и 2. При этом в образце 1, изготовленном вакуумным формованием, после статического нагружения появились дополнительные дефекты. В автоклавном образце 2 после статического нагружения дефекты практически отсутствовали.

На рис. 9 приведены результаты УЗ-сканирования ненагруженных образцов из области отверстия. Анализ выявил наличие производственных дефектов в ненагруженном образце, изготовленном методом вакуумного формования (рис. 9*а*), и развитие их после приложения нагрузки (рис. 10*а*). В образце, изготовленном в автоклаве как до, так и после статического нагружения, дефекты практически отсутствовали (рис. 9*б*, рис. 10*б*).

После проведения статических испытаний образцов и их последующего УЗ-контроля были вырезаны фрагменты из области отверстия и расположения тензодатчика T1 (рис. 11). Для проведения микроанализа структуры и изучения внутренних микроразрушений материала углепластика по всей толщине, исследуемая поверхность шлифа срезалась через все слои образца под углом (1—2)° перпендикулярно пучку ввода растрового микроскопа (рис. 11*а*, *б*).

На исследуемую поверхность шлифов напылялся тонкий проводящий слой для снятия заряда и экранирования падающего пучка от накопленного в объеме материала заряда. Слой меди толщиной 10—15 нм наносился на установке для ионного напыления Quorum A150TES с внутренней средой, заполненной аргоном.

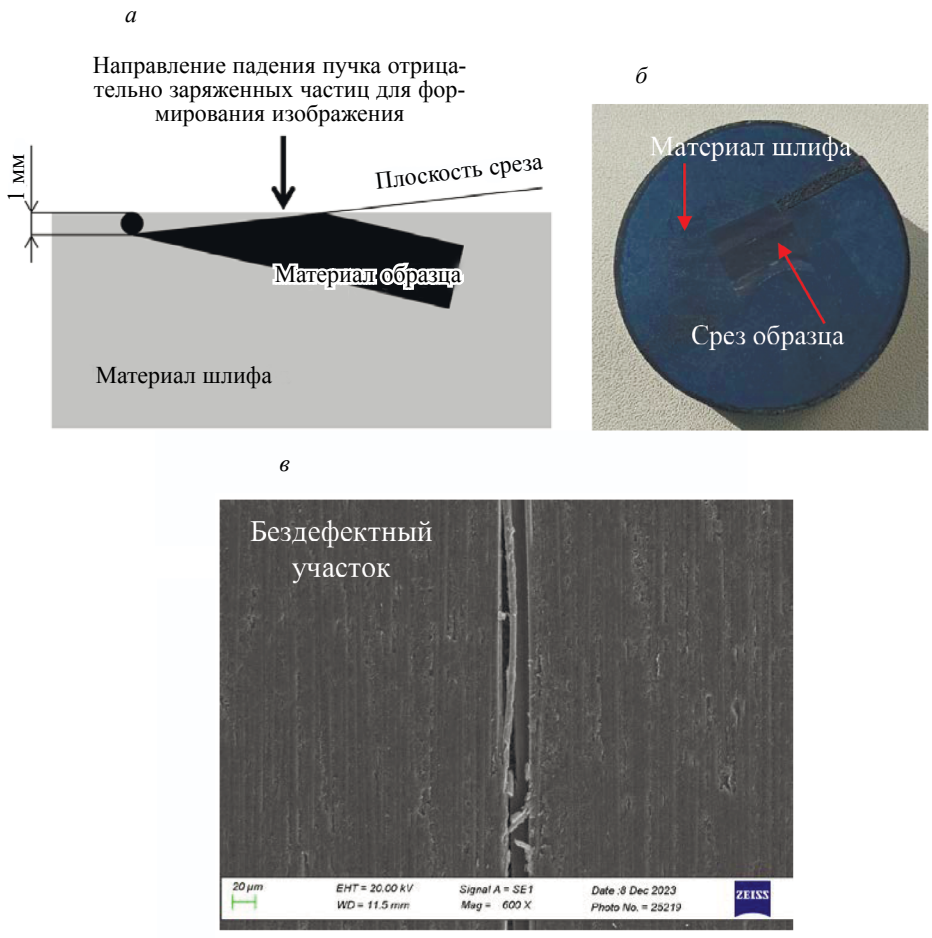

Рис. 11. Схема микроисследования материала (*а*); фотография шлифа вид сверху (*б*); изображение участка шлифа, полученное при его анализе микроскопом Carl Zeiss EVO 50 XVP (*в*).

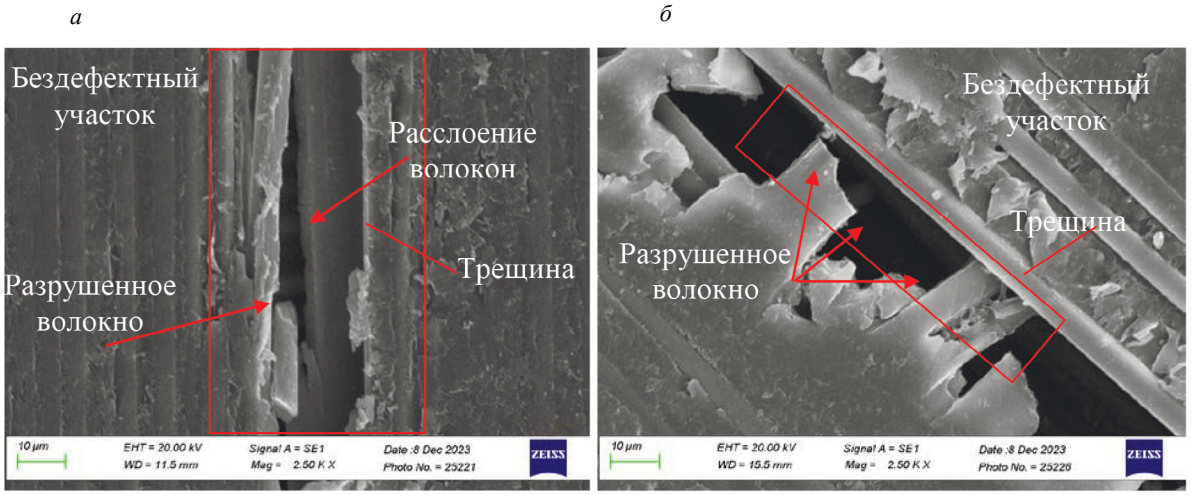

Рис. 12. Разрушения в шлифе образца 1, изготовленного методом вакуумного формования из области установки тензодатчика Т1 (*а*) и отверстия (*б*).

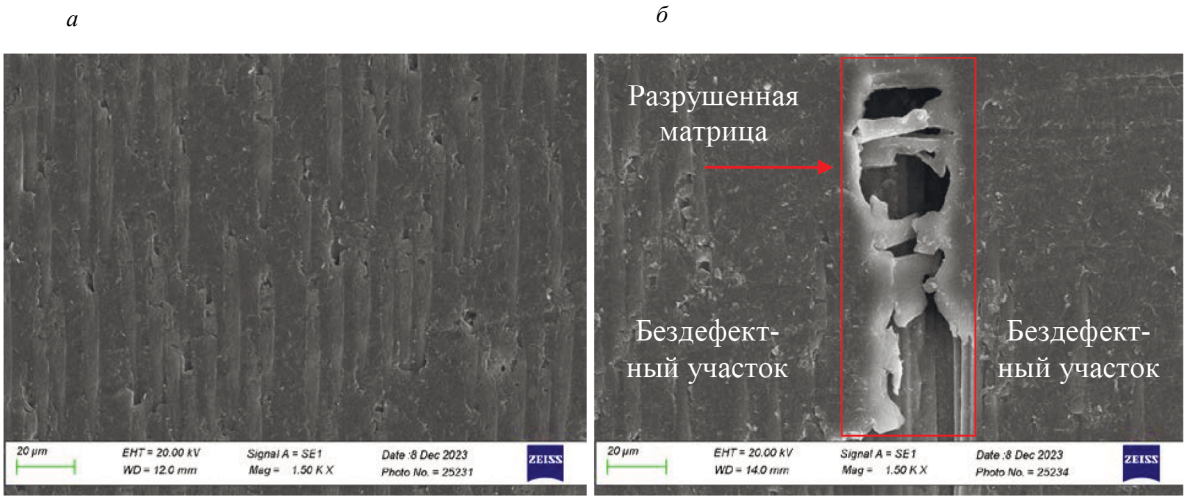

Рис. 13. Разрушения в шлифе образца 2, изготовленного методом автоклавного формования из области тензодатчика (*а*) и отверстия (*б*).

Все изготовленные шлифы подробно исследовались в растровом микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP. Наиболее выраженные дефекты в исследуемых областях были сохранены в виде изображений, которые позволяли определить бездефектные и разрушенные участки материала (рис. 11*в*). Выполнялся микроанализ структуры углепластика АСМ после испытаний несущего слоя материала образца, вырезанного из области отверстия, позволивший определить разрывы волокон, повреждения матрицы и расслоения (рис. 12, рис. 13).

Микроструктура материала бездефектных участков образцов представляла собой непрерывную термореактивную эпоксидную фазу (полимерную матрицу), в которой распределены фазовые образования, обогащенные термопластом. Данные термопластичные образования включают домены эпоксидного полимера, размер которых может достигать нескольких микрометров.

В полимерной матрице углепластика не выявлено посторонних дисперсных частиц термопластичной фазы. Распределение волокон армирующего наполнителя находились в диапазоне от 4 до 6 мкм. Максимальная величина прослоек полимерной матрицы между волокнами достигала 10 мкм. При этом на макроуровне наполнитель распределен достаточно равномерно.

Нарушение микроструктуры материала в виде расслоения и разрушения армирующих волокон заметно при сканировании поверхности срезов образцов. Отмеченные дефекты наблюдались вблизи отверстия. При этом количество сигналов АЭ существенно не снижалось.

ВЫВОДЫ

1. По данным АЭ-контроля установлено, что в образцах, изготовленных с использованием вакуумного формования, количество локализованных сигналов АЭ практически в десять раз больше по сравнению с количеством сигналов в образцах, изготовленных автоклавным методом. Тензометрия позволила определить, что деформация в образцах, изготовленных методом автоклавного формования, происходит более равномерно на всей площади рабочей зоны. В образцах, изготовленных методом вакуумного формования, в области отверстия отмечались бóльшие деформации, зарегистрированные тензодатчиками Т2, Т3, по сравнению с результатами, полученными тензодатчиками Т1 и Т4.

2. Ультразвуковой контроль образцов, изготовленных вакуумным формованием, до их статического нагружения, выявил преобразователем с фазированной решеткой производственные дефекты, к которым относятся отражатели в материале. Приложение растягивающей нагрузки к таким образцам приводило к увеличению размеров имеющихся дефектов, а также к зарождению новых. Минимальная глубина их залегания составила 0,4 мм, что является хорошим показателем по «мертвой зоне» (поверхностному разрешению), который подтверждает высокую чувствительность характеристик генератора и приемника дефектоскопа.

В образцах, изготовленных методом автоклавного формования, производственные дефекты УЗ-контролем не обнаружены. Следовательно, несплошности в структуре материала композита, выполненного автоклавным методом, не определены. Испытания данных образцов показали, что число дефектов и их размеры существенно меньше, чем при вакуумном формовании.

3. Микроанализ структуры испытанных образцов, выполненных вакуумным методом, выявил дефекты, связанные с разрушением волокон, растрескиванием матрицы, расслоением. Они были обнаружены как в области отверстия, так и в области наклейки тензодатчика Т1. В образце, изготовленном в автоклаве, как до, так и после статического нагружения, дефекты практически отсутствовали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фейгенбаум Ю.М., Миколайчук Ю.А., Метелкин Е.С., Батов Г.П.* Место и роль неразрушающего контроля в системе поддержания летной годности композитных конструкций // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 9. С. 71—82.

2. *Lehmann M., Bueter A., Schwarzaupt O*. Structural health monitoring of composite aerospace structures with acoustic emission // Journal of Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 172—193.

3. *Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В.* Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). С. 66—75.

4. *Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А.* Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (3). С. 834—839.

5. *Лещукова И.В.* Принципиальные технологии изготовления авиационных конструкций из композиционных материалов: RTM и автоклавное формование // Международный научный журнал «Инновационная наука». 2018. № 1. С. 14—16.

6. *Башков О.В., Проценко А.Е., Брянский А.А., Ромашко Р.В.* Диагностика полимерных композиционных материалов и анализ технологий их изготовления с использованием метода акустической эмиссии // Механика композиционных материалов. 2017. Т. 53. № 4. С. 765—774.

7. *Сятковский А.И., Черняева Е.В., Волков А.Е., Вьюненко Ю.Н.* Влияние полимерных слоев защитных конструкций на параметры акустической эмиссии// Деформация и разрушение материалов. 2022. № 6. С. 35—40.

8. *Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Комаров К.Л., Кареев А.Е., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Бобров А.Л., Бояркин Е.В., Муравьев М.В., Бехер С.А.* Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение / Машиностроение—Полет, 2004. 368 с.

9. *Степанова Л.Н., Серьезнов А.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С.* Использование вейвлет-преобразований для локации сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2017. № 10. С.18—25.

10. *Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Лебедев Е.Ю., Канифадин К.В., Киреенко В.В., Вонсовский А.В.* Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки. Новосибирск: Наука, 2018. 272 с.

11. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. USA, Waltham: Olympus NDT, 2007. 491 p.

12. *Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С., Чертищев В.Ю.* Ультразвуковой контроль образцов в процессе разработки и испытаний новых марок углепластика // Труды ВИАМ. 2021. № 12. С. 61—65.

13. *Базулин А.Е.*, *Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х.*, *Тихонов Д.С.*, *Смотрова С.А., Иванов В.И.* Контроль образцов из полимерных композиционных материалов с использованием ультразвуковых антенных решеток // Дефектоскопия. 2022. № 6. С. 3—16.

REFERENCES

1. *Feygenbaum Yu.M., Mikolaychuk Yu.A., Metelkin E.S., Batov G.P.* The place and role of nondestructive testing in the system of continuing airworthiness of composite designs // Scientific bulletin of GosNII GA. 2015. No. 9. P. 71—82.

2. *Lehmann M., Bueter A., Schwarzaupt O*. Structural health monitoring of composite aerospace structures with acoustic emission // Journal of Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 172—193.

3. *Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V.* Features of technology and polymer composite materials for the manufacture of wings of advanced aircraft (review) // Proceedings of VIAM. 2022. No. 1(107). P. 66—75.

4. *Veshkin E.A. Postnov V.I., Abramov P.A.* Ways to improve the quality of parts made of PCM in vacuum forming // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. V. 14. No. 4 (3). P. 834—839.

5. *Leshchukova I.V.* Fundamental technologies for manufacturing aircraft structures from composite materials: RTM and autoclave molding // International scientific journal «Innovative Science». 2018. No. 1. P. 14—16.

6. *Bashkov O.V., Protsenko A.E., Bryanskii A.A., Romashko R.V.* Diagnostics of polymer composite materials and analysis of their production technology by using the method of acoustic emission // Mechanics of Composite Materials. 2017. V. 53. No. 4. P. 533—540.

7. *Syatkovsky A.I., Chernyaeva E.V., Volkov A.E., Vyunenko Yu.N.* Influence of polymer layers of protective structures on acoustic emission parameters // Deformatsiya i Razrushenie materialov. 2022. No. 6. C. 35—40.

8. *Seryeznov A.N., Stepanova L.N., Muravyov V.V., Komarov K.L., Kareev A.E., Kabanov S.I., Lebedev E.Yu., Kozhemyakin V.L., Bobrov A.L., Boyarkin E.V., Muravyov M.V., Bekher S.A.* Diagnostics of transport objects by the acoustic emission method. M.: Mashinostroenie / Mashinostroenie—Polet, 2004. 368 p.

9. *Stepanova L.N., Seryeznov A.N., Kabanov S.I., Ramazanov I.S.* Wavelet transform application for acoustic emission signals location // Testing. Diagnostics. 2017. No. 10. P. 18—25

10. *Seryeznov A.N., Stepanova L.N., Kabanov S.I., Ramazanov I.S., Lebedev E.Yu., Kanifadin K.V., Kireenko V.V., Vonsovsky A.V.* Acoustic emission testing of welding defects. Novosibirsk: Science, 2018. 272 p.

11. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Olympus NDT, USA, Waltham, 2007. 491 p.

12. *Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S., Chertishchev V.Yu*. Ultrasonic testing of spesimens at the development and testing process of new CFRP grades // Proceedings of VIAM. 2021. No. 12. P. 61—65.

13. *Bazulin A.E., Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh., Tikhonov D.S., Smotrova S.A., Ivanov V.I.* Testing samples made of polymer composite materials using ultrasonic antenna arrays // Defectoscopiya. 2022. No. 6. C. 3—16.