

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ТЕНЗОМЕТРИИ

© 2023 г. Л.Н. Степанова^{1,*}, В.В. Чернова², С.И. Кабанов¹

¹ ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина», Россия 630051
Новосибирск, ул. Ползунова, 21

² «Сибирский государственный университет путей сообщения»,
Россия 630049 Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191
E-mail: *aergroup@ngs.ru

Поступила в редакцию 07.03.2023; после доработки 26.05.2023
Принята к публикации 02.06.2023

С образцами, изготовленными из углепластиков, были проведены статические испытания до разрушения. Контроль дефектов выполнялся с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии. На каждый образец в области отверстия наклеивались по четыре проволочных тензодатчика, а по его краям устанавливались по четыре пьезоэлектрических датчика, образующие рабочую зону контроля. Регистрация сигналов, связанных с разрушением композиционного материала образцов, и их локация осуществлялись акустико-эмиссионной системой. В процессе испытаний тензометрической системой регистрировались нагрузки и деформации, при которых начинался процесс разрушения углепластиков. По анализу микрошлифов, выполненных из зоны локации сигналов в образце, определялся тип разрушения. Основные информативные параметры сигналов акустической эмиссии связывались с типом разрушения углепластиков.

Ключевые слова: образцы, углепластики, статическое нагружение, деформация, дефекты, акустическая эмиссия, локация, тензометрия.

DOI: 10.31857/S0130308223070011, EDN: DVNDPD

ВВЕДЕНИЕ

Основные задачи, возникающие при проектировании авиационных конструкций из композиционных материалов (КМ), связаны с повышением их устойчивости к различным повреждениям, в том числе вызванным влиянием внешних факторов (град, удары от птиц, попадание самолета в «спутный след» и т.д.). Данные повреждения могут приводить к развитию дефектов (усталостное растрескивание, вдавливание, расслоение, разрушение матрицы и т.д.) в композитах [1—3]. Самолеты и беспилотные объекты, используемые в малой авиации, состоят практически на 65 % из композитов [4—6]. Углепластики, применяемые при производстве летательных аппаратов, должны обеспечивать надежную работу конструкции в эксплуатации.

Возникающие при эксплуатации конструкций дефекты могут приводить к их внезапному разрушению, что существенно ограничивает применение углепластиков в ответственных изделиях. Отечественные разработки в области создания композиционных объектов авиационной техники еще недавно выполнялись, в основном, из зарубежных материалов, таких как Torayca T700, T800 и т.д. В настоящее время российская промышленность переходит на разработку и производство новых отечественных композитов, в связи с чем становятся актуальными работы, связанные с анализом их основных технических характеристик.

Имеющиеся экспериментальные результаты показывают, что (в отличие от металлов) при развитии дефектов в КМ не наблюдаются зоны стабильного медленного контролируемого роста [5, 6]. Для оценки состояния таких конструкций необходимо разработать методики контроля, позволяющие определять координаты дефектов на ранней стадии развития, их тип, степень опасности и т.д. При прочностных испытаниях различных композиционных конструкций часто используется метод акустической эмиссии (АЭ), отвечающий таким требованиям [7—10].

Повреждения в композиционной конструкции, вызванные различными внешними воздействиями, приводят к изменению основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуды, доминантной частоты, структурного и двухинтервального коэффициентов, энергетического параметра MARSE) [11, 12].

В процессе статического нагружения образцов, выполненных из различных углепластиков, использовалась тензометрия, позволяющая измерять нагрузки и деформации в режиме реального времени [13, 14]. Методом АЭ осуществляли регистрацию сигналов АЭ и локацию дефектов [16]. Для определения типа дефектов и проведения анализа внутренней структуры КМ использовали микроанализ шлифов, изготовленных из материала углепластика, расположенного в зоне локации сигналов АЭ.

Цель работы — определение координат и типа дефектов при статическом нагружении образцов, выполненных из различных углепластиков, с использованием акустической эмиссии и ее основных информативных параметров (амплитуды, доминантной частоты, энергетического параметра MARSE, структурного коэффициента $P_{D42}(f)$), а также тензометрии, регистрирующей деформацию.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Статические испытания образцов из углепластиков Т700, Т800, АСМ проводили при температуре $T = + 20$ °С. Стандартные образцы, предназначенные для исследования авиационных материалов и конструкций, выполняли с отверстием в центральной части, которое является штатным концентратором напряжения, имитирующим место установки крепежных элементов (болтов, заклепок и т.д.). В табл. 1 приведены паспортные данные по основным прочностным характеристикам углепластиков Т700, Т800, АСМ, полученные из нормативно-технических условий.

Таблица 1

Паспортные данные монослоев исследованных углепластиков Т700, Т800, АСМ

| Наименование углепластика | Производитель | Толщина монослоя t , мм | Предел прочности на растяжение, МПа | Модуль упругости на растяжение, ГПа | Предел прочности на сдвиг, МПа |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Тогауса Т700 | Composite Italia Toray (Италия) | 0,192 | 2293 | 123 | 118 |
| Тогауса Т800 | | 0,113 | 2950 | 176 | 105 |
| АСМ102С–130UD | АО «Препрег-СКМ» (Россия) | 0,13 | 1800 | 135 | 85 |

Для исключения влияния захватов нагружающей машины МТС–50 на образцы были наклеены дюралюминиевые пластины размером $100 \times 140 \times 1$ мм, что позволило предотвращать их смятие.

При исследовании деформаций в образцах, выполненных из различных композитов, на каждый из них наклеивали по четыре проволочных тензодатчика типа ПКС–12 (свидетельство RU.C.28.007.A, регистрационный номер № 30935) сопротивлением $R = 200$ Ом, базой $L = 12$ мм, коэффициентом тензочувствительности $K = 2,12$.

Тензодатчики располагали справа и слева от отверстия (концентратора напряжений) диаметром 14 мм, а также в верхней и нижней частях образца (рис. 1а, б). Выбранная схема установки позволяла контролировать деформации как в области концентратора напряжений (где начиналось разрушение и локация сигналов АЭ), так и по линии приложения нагрузки (где также формировались активные источники сигналов АЭ). Тензодатчики подключали к микропроцессорной быстродействующей тензометрической системе «Динамика-3» (сертификат № 66973—17), которая определяла деформации материала образцов с погрешностью 0,2 %.

Каждый образец устанавливали в нагружающую электрогидравлическую машину МТС-50 (рис. 1а), после чего на нем размещали четыре преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) типа ПК02–05 с полосой пропускания (200—500) кГц, образующие зону контроля (рис. 1б). Образцы нагружали ступенчато через $\Delta P = 5$ кН до нагрузки, при которой начиналась устойчивая локация сигналов АЭ.

Для исследования типа дефектов в образцах, выполненных из различных композитов, осуществляли их нагружение до момента появления устойчивой локации сигналов АЭ. Для анализа типа дефектов в углепластиках изготавливали шлифы из области локации сигналов АЭ. С использованием растрового электронного микроскопа CarlZeissveo 50XVP выполняли анализ шлифов и определяли дефекты структуры композитов (растрескивание и выкрашивание матрицы, излом волокон) [12, 13]. Это позволяло оценить дефекты в углепластиках на ранней стадии их развития, когда визуально они не определялись.

На рис. 2 показана локация сигналов АЭ в образцах из углепластика Тогауса Т700 (а) с укладкой из двенадцати монослоев $[\pm 45/90/0_0/90/\pm 45]$ с геометрическими размерами $500 \times 100 \times 2,3$ мм, в образцах из углепластика Тогауса Т800 (б) с геометрическими размерами $600 \times 100 \times 0,9$ мм и укладкой, состоящей из девяти монослоев $[\pm 45/90/0_3/90/\pm 45]$, в образцах из угле-

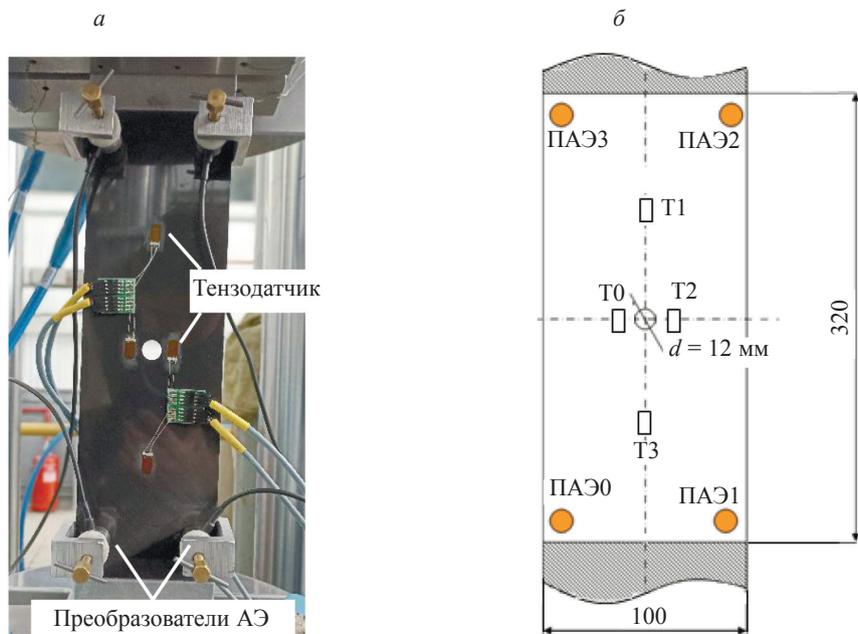


Рис. 1. Фотография образца, установленного в нагружающую машину MTS-50 (а); схема расположения пьезо- (ПАЭ) и тензодатчиков (Т) в рабочей области образца (б).

пластика АСМ102С-130UD (в) с геометрическими размерами $600 \times 100 \times 2,3$ мм и укладкой $[\pm 45/0/90/0/+45/0/-45/0/+45_2/0/-45/0/+45/0/90/0/\pm 45]$.

На рис. 2б выделено три области, соответствующие активным источникам сигналов АЭ. Если при очередном повышении нагрузки на величину $\Delta P = 5$ кН число локализованных сигналов АЭ практически не изменялось, то считалось, что локация устойчива. В области 1 локация начиналась при нагрузке $P = 10$ кН и характеризовала начало разрушения образца в зоне концентратора напряжения, была активна в процессе всего нагружения. При нагрузке $P = 55$ кН регистрация сигналов проходила в верхней (область 2) части образца. Активная регистрация сигналов АЭ в нижней (область 3) части образца проходила при нагрузке $P = 70$ кН.

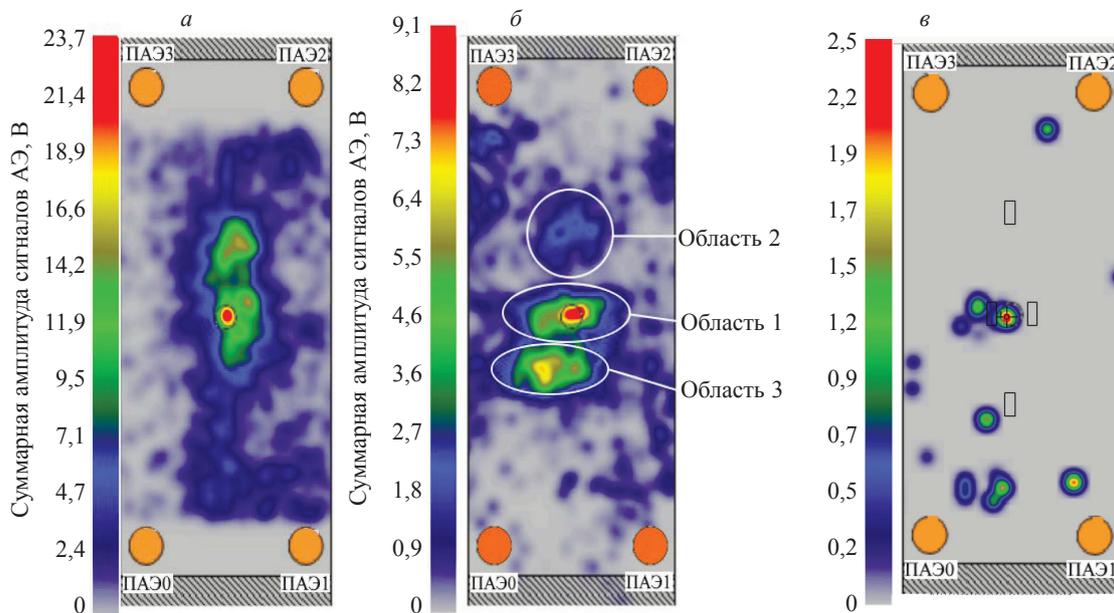


Рис. 2. Локация сигналов АЭ при нагружении образцов, выполненных из углепластиков: Т700 (а); Т800 (б); АСМ (в).

Нагружение образцов выполнялось до их разрушения. Регистрация сигналов АЭ и обработка информации выполнялась сертифицированной системой СЦАД-16.10 (свидетельство RU.C.27.007.A № 40707, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под номером 45154-10) с «плавающими» порогами селекции.

Суммарная амплитуда (см. рис. 2б) сигналов АЭ, зарегистрированных в области 1, была максимальной. Анализ изменения активности сигналов АЭ, зарегистрированных в областях 2 и 3 (см. рис. 2б), позволил установить, что они были окончательно сформированы на последней ступени нагружения при нагрузке, равной 70 кН.

Для данных областей (см. рис. 2б) были определены координаты X_c , Y_c центров масс по формулам [13]:

$$X_c = \frac{\sum_{i=0}^N x_i \cdot \text{MARSE}_i}{\sum_{i=0}^N \text{MARSE}_i}; \quad Y_c = \frac{\sum_{i=0}^N y_i \cdot \text{MARSE}_i}{\sum_{i=0}^N \text{MARSE}_i},$$

где x_i , y_i — координаты i -го сигнала АЭ, мм; i — номер сигнала, локализованного при определенной нагрузке; MARSE — энергетический параметр, мВ · мкс.

Среднеквадратическое отклонение координат характеризовало их разброс относительно центра масс (табл. 2). Получено, что наиболее растянутой как по оси X , так и по оси Y была область 1, соответствующая разрушениям образца по линии, перпендикулярной к оси растяжения и проходящей через центр и поверхность отверстия.

Таблица 2

Значения координат центров масс для областей локации, выделенных в образце из углепластика Т800

| Номер области | Координаты центров масс, мм | | Среднеквадратическое отклонение, мм | |
|---------------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
| | X_c | Y_c | X_c | Y_c |
| 1 | 45 | 125 | 16 | 16 |
| 2 | 64 | 174 | 16 | 9 |
| 3 | 33 | 93 | 16 | 7 |

При обработке информации рассчитывали основные информативные параметры сигналов АЭ, зарегистрированные при испытаниях. Расчет энергетического параметра MARSE выполняли по формуле [12]:

$$\text{MARSE} = \int \bar{U}(t) \cdot dt,$$

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

Структурный коэффициент сигналов АЭ находился как [12]

$$P_{D_{42}}(f) = \frac{\max D_4}{\max D_2}, \quad (1)$$

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для изготовления шлифов сначала рассматривались участки образцов, принятые за условно бездефектные. Для этого из нерабочей области, расположенной под дюралюминиевыми пластинами, вырезался материал, из которого изготавливались шлифы. На рис. 3 приведены фотографии поверхности шлифов для всех исследованных условно бездефектных участков углепластиков.

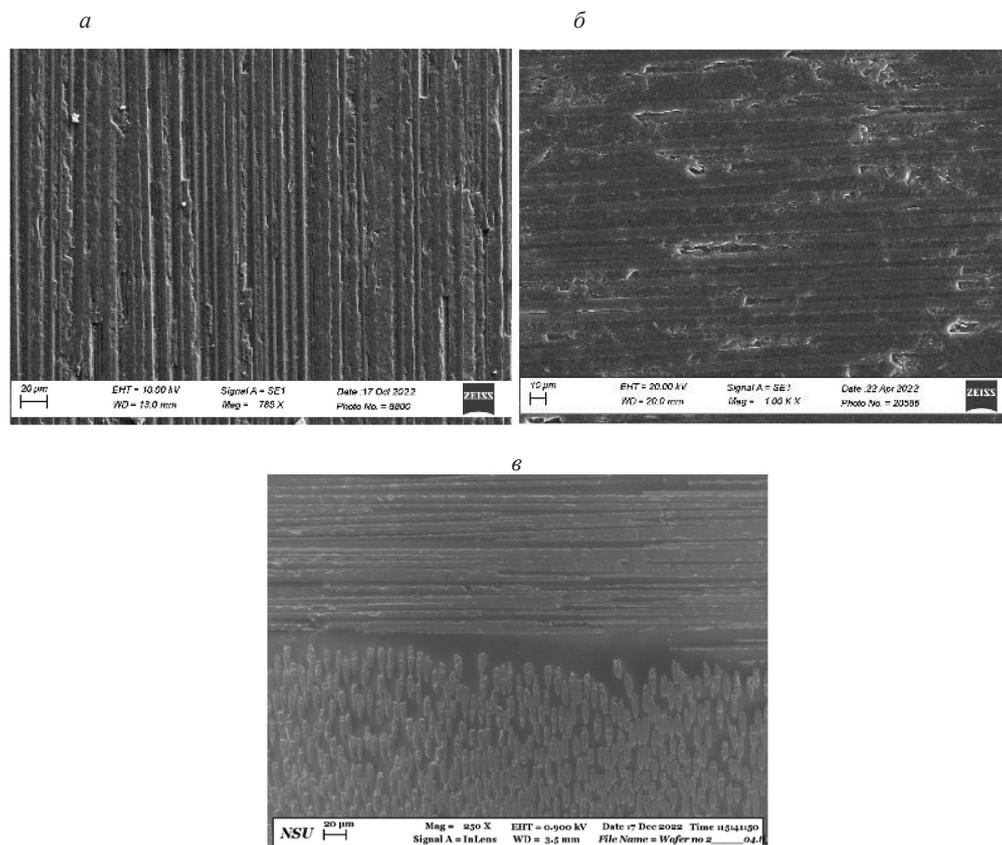


Рис. 3. Фотографии поверхности микрошлифов, изготовленных из условно бездефектных участков образцов углепластиков: T700 (а); T800 (б); ACM (в).

При нагружении образцов сигналы АЭ сначала локализовались рядом с отверстием, поэтому материал для изготовления микрошлифов был вырезан из данной зоны. На рис. 4 показаны фотографии поверхностей микрошлифов, изготовленных из зон локализации сигналов АЭ в образцах из углепластиков: T700 (а, б), T800 (в, г) и ACM (д, е). На рис. 4а, в, д приведено выкрашивание матриц в микрошлифах. Однако волокна монослоев на данных участках шлифов оставались целыми. На рис. 4б, г, е приведены разрушенные волокна в каждом микрошлифе, выполненном из рассматриваемых углепластиков.

Сравнительный анализ результатов испытаний образцов, изготовленных из углепластиков T700, T800 и ACM, и построенные гистограммы (рис. 5) позволили определить соотношения максимальной нагрузки, которую выдерживали образцы до разрушения, и нагрузки, при которой началась активная локализация сигналов АЭ.

В образцах из углепластиков T700, T800 начало устойчивой локализации сигналов АЭ наблюдалось при нагрузках, составляющих от 18 до 20 % от их максимального значения (см. рис. 5), а в образцах из углепластика ACM — при нагрузках, составляющих (40 — 57) % от максимального значения. Геометрические размеры образцов и концентраторов напряжения для углепластиков ACM и T700 практически совпадали. Однако в образцах из углепластика T700 процесс разрушения и устойчивая локализация сигналов АЭ появлялись при нагрузках, составляющих 18 % от максимальной, т.е. практически в три раза меньших по сравнению с нагрузками, составляющими 57 % для образцов из углепластика ACM. Максимальная рабочая нагрузка для отечественного углепластика ACM равна 120 кН, а для углепластика T700 она составила 220 кН.

Анализ полученных гистограмм показал, что процесс разрушения образцов, выполненных из углепластика ACM, сложно определять на его ранней стадии развития. При увеличении нагрузки в пределах (10—20) кН сигналы АЭ в образцах из этого углепластика не регистрировались, так как были низкого уровня и с использованием разработанных методик контроля не локализовались.

В начале нагружения образцов из углепластика T700 регистрировались сигналы, характеризующиеся максимальной энергией и структурными коэффициентами (табл. 3). В соответствии с фор-

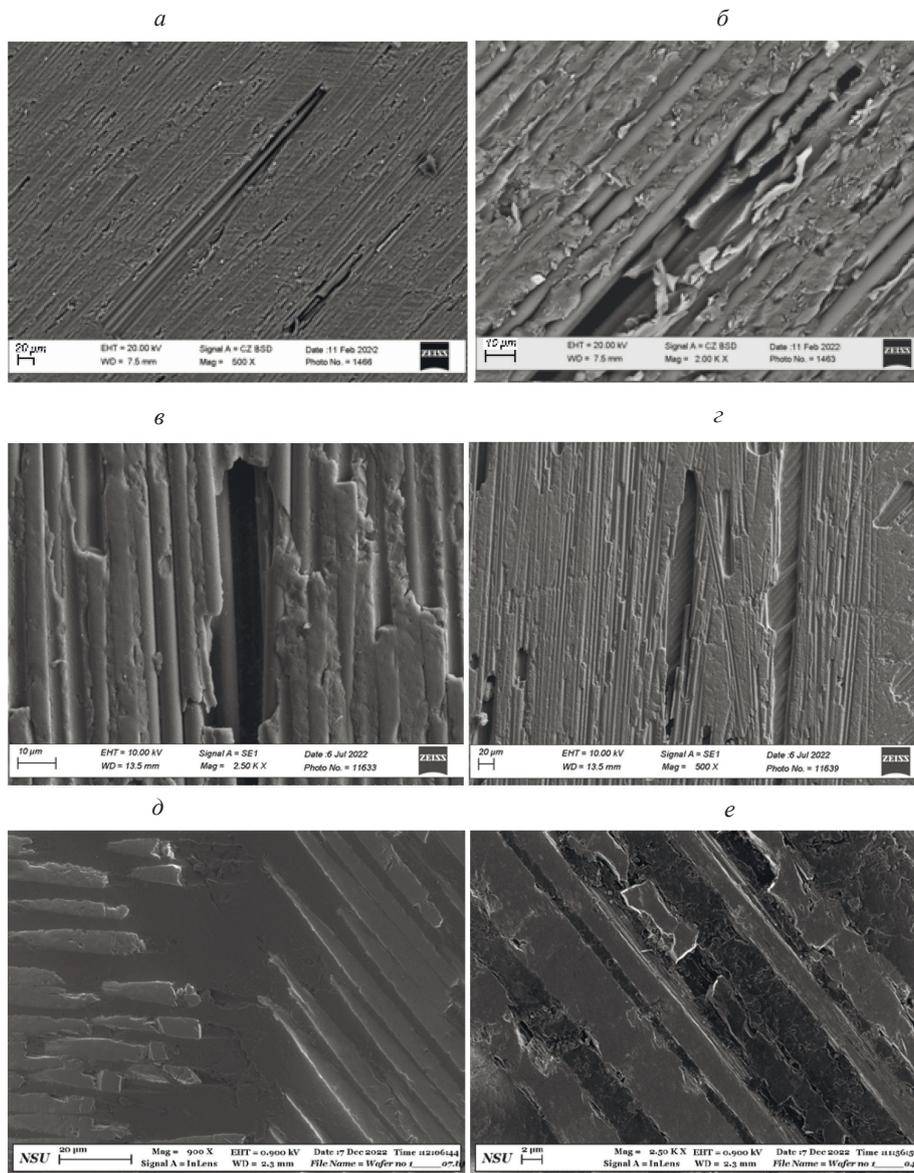


Рис. 4. Фотографии поверхности микрошлифов, изготовленных из зон углепластиков: T700 (а, б); T800 (в, г); ACM (д, е) после их статического нагружения.

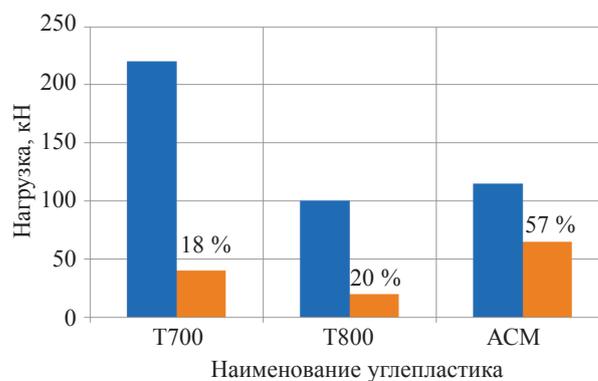


Рис. 5. Гистограммы, показывающие соотношения максимальной нагрузки, которую выдержали образцы из углепластиков: T700, T800, АСМ, и нагрузки, при которой начиналась локация сигналов АЭ в области концентратора напряжений (■ — максимальная рабочая нагрузка, кН; ■ — нагрузка начала локации в области отверстия, кН; □ — процент от максимальной рабочей нагрузки).

Таблица 3

Значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ при нагружении образца из углепластика T700

| Нагрузка, кН | MARSE, мВ·мкс | | | | Структурный коэффициент $P_{D42}(f)$ | | | |
|--------------|---------------|-------|-------|-------|--------------------------------------|------|------|------|
| | ПАЭ0 | ПАЭ1 | ПАЭ2 | ПАЭ3 | ПАЭ0 | ПАЭ1 | ПАЭ2 | ПАЭ3 |
| 10 | 44,45 | 71,05 | 23,75 | 17,2 | 1,89 | 2,29 | 3,69 | 3,05 |
| 20 | 50,6 | 22,3 | 15,3 | 10,8 | 1,05 | 2,45 | 3,26 | 1,21 |
| 30 | 32,1 | 9,7 | 4,05 | 4,35 | 1,13 | 2,19 | 2,64 | 1,48 |
| 40 | 6,7 | 6 | 14,1 | 21,5 | 1,40 | 1,45 | 1,68 | 0,95 |
| 50 | 10,2 | 13 | 21,95 | 18,8 | 1,55 | 1,25 | 1,31 | 0,95 |
| 60 | 13,6 | 12,8 | 21,1 | 19,3 | 1,16 | 1,41 | 1,39 | 0,82 |
| 70 | 18,7 | 19,75 | 27,35 | 27,65 | 1,03 | 1,14 | 1,51 | 0,70 |
| 80 | 18,25 | 19,5 | 23,1 | 27,75 | 1,02 | 1,12 | 1,62 | 0,84 |
| 90 | 23,2 | 25,65 | 27,3 | 27,25 | 1,26 | 1,18 | 1,76 | 0,87 |
| 100 | 19,6 | 21,2 | 22,5 | 22,4 | 1,33 | 1,12 | 1,61 | 0,96 |
| 110 | 15 | 21,3 | 21,2 | 18,2 | 1,42 | 1,04 | 1,62 | 1,11 |
| 120 | 14,2 | 18,2 | 21,3 | 16 | 1,41 | 1,14 | 1,50 | 1,19 |
| 130 | 22,45 | 22,35 | 29 | 27,95 | 1,66 | 1,47 | 1,75 | 1,28 |
| 140 | 25,4 | 21,4 | 21,6 | 19 | 1,56 | 1,67 | 2,03 | 1,57 |
| 150 | 30,85 | 22,1 | 25,4 | 21,3 | 1,53 | 1,90 | 2,36 | 1,65 |
| 160 | 21 | 19 | 17 | 13 | 1,50 | 1,69 | 2,47 | 1,66 |
| 170 | 20,6 | 16,1 | 15,5 | 11,9 | 1,44 | 1,43 | 2,51 | 1,59 |
| 180 | 25 | 15,1 | 23,1 | 19 | 1,52 | 1,80 | 2,48 | 1,52 |

мулой (1) это означало, что коэффициенты вейвлет-разложения 4-го уровня детализации больше, чем 2-го уровня, т.е. смещение энергии сигналов АЭ осуществлялось в область низких частот [12]. При нагрузках (40 — 50) кН параметры MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ принимали наименьшие значения, что, как показано в работе [12], соответствует разрушению матрицы. При дальнейшем повышении нагрузки наблюдалось увеличение энергетических параметров MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$, что свидетельствовало об активном процессе разрушения волокон материала углепластика T700 [12—13].

Начало процесса разрушения образцов из углепластика T800 определялось по локации сигналов АЭ в его рабочей области в районе концентратора напряжений, которое осуществлялось при нагрузках, не превышающих $P = 30$ кН (см. рис. 2б, рис. 4). В табл. 4 приведены значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образца из углепластика T800. Для этих образцов увеличение энергии сигналов АЭ происходило более монотонно по сравнению с образцами, выполненными из углепластика T700.

Образец 1 из углепластика АСМ, из которого были изготовлены шлифы, нагружался до появления устойчивой локации сигналов АЭ в области концентратора напряжения. При этом максимальная нагрузка для данного образца составила $P_{\max} = 90$ кН. При нагружении образца 2 нагрузка была увеличена на 30 % и составила $P_{\max} = 120$ кН. Однако при переходе нагрузки от 115 до 120 кН произошло его разрушение. Разрушение образца 3 произошло при изменении нагрузки от 110 до 115 кН.

В процессе испытаний было определено, что регистрация сигналов АЭ системой СЦАД-16.10 начиналась при нагрузках, равных (20 — 25) кН. Однако сигналы были низкого уровня, что не

Таблица 4

Значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ при нагружении образца из углепластика Т800

| Нагрузка кН | MARSE, мВ·мкс | | | | Структурный коэффициент $P_{D42}(f)$ | | | |
|----------------|---------------|-------|-------|-------|--------------------------------------|------|------|------|
| | ПАЭ0 | ПАЭ1 | ПАЭ2 | ПАЭ3 | ПАЭ0 | ПАЭ1 | ПАЭ2 | ПАЭ3 |
| 10 | 16,3 | 16,05 | 7,4 | 13,4 | 0,21 | 0,59 | 0,31 | 1,30 |
| 15 | 23,5 | 17,3 | 9,5 | 21,4 | 0,21 | 0,91 | 0,52 | 1,83 |
| 20 | 20,05 | 15,4 | 13,3 | 22,95 | 0,23 | 0,99 | 0,50 | 1,21 |
| 25 | 21,6 | 23,9 | 12,6 | 19,6 | 0,28 | 1,02 | 0,51 | 1,31 |
| 30 | 22,8 | 27,1 | 14,3 | 19,7 | 0,26 | 1,12 | 0,43 | 1,23 |
| 35 | 23,75 | 25 | 16,65 | 24,6 | 0,29 | 1,11 | 0,57 | 1,20 |
| 40 | 23 | 29,85 | 12,5 | 20,85 | 0,31 | 1,05 | 0,53 | 1,38 |
| 45 | 31,3 | 40,3 | 19,2 | 38,9 | 0,28 | 1,20 | 0,68 | 1,53 |
| 50 | 30,55 | 29,7 | 15,25 | 26,15 | 0,29 | 1,20 | 0,54 | 1,49 |
| 55 | 35,25 | 27,6 | 16,9 | 26,2 | 0,24 | 1,18 | 0,61 | 1,38 |
| 60 | 29,9 | 28,1 | 17,9 | 24,6 | 0,24 | 1,10 | 0,62 | 1,55 |
| 65 | 35,9 | 32,1 | 20 | 30,5 | 0,26 | 1,45 | 0,74 | 1,83 |
| 70 | 45,9 | 40,6 | 17,5 | 34,2 | 0,23 | 1,77 | 0,69 | 1,96 |

позволило проводить их локацию. Устойчивая локация сигналов АЭ наблюдалась при нагрузках, равных (45 — 65) кН. Поэтому значения основных информативных параметров сигналов АЭ начали определять при нагрузке $P = 40$ кН. В табл. 5 приведены значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ для образца из углепластика АСМ, испытанного до разрушения.

Таблица 5

Значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ при нагружении образца из углепластика АСМ

| Нагрузка, кН | MARSE, мВ·мкс | | | | Структурный коэффициент $P_{D42}(f)$ | | | |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|--------------------------------------|------|------|------|
| | ПАЭ0 | ПАЭ1 | ПАЭ2 | ПАЭ3 | ПАЭ0 | ПАЭ1 | ПАЭ2 | ПАЭ3 |
| 40 | 109 | 120,3 | 46,1 | 26 | 0,74 | 0,46 | 0,40 | 1,40 |
| 50 | 149,7 | 143 | 77 | 37,9 | 0,66 | 0,43 | 0,39 | 1,13 |
| 60 | 126,6 | 145,95 | 115,3 | 64,85 | 0,63 | 0,45 | 0,41 | 0,89 |
| 70 | 101,9 | 104,2 | 118,15 | 100,55 | 0,70 | 0,44 | 0,41 | 0,92 |
| 80 | 140,85 | 143 | 142,15 | 72,6 | 0,61 | 0,45 | 0,39 | 1,02 |
| 90 | 146,7 | 240,3 | 67,7 | 42,65 | 0,99 | 0,55 | 0,53 | 1,57 |
| 100 | 89,3 | 57,7 | 165,4 | 140,3 | 1,10 | 1,23 | 0,33 | 0,72 |
| 110 | 104,7 | 68,1 | 155,1 | 131,3 | 1,10 | 1,25 | 0,28 | 0,69 |
| 120 | 76,9 | 49,35 | 175,15 | 171,8 | 1,10 | 1,01 | 0,46 | 0,78 |

Для определения нагрузок и деформаций при испытании образцов использовалась тензометрия. На рис. 6а показано размещение проволочных тензодатчиков на образце из углепластика Т700. На графике рис. 6б приведена зависимость изменения нагрузки от времени, что позволило определять изменение деформации материала образца при выдержке нагрузки на каждой ступени

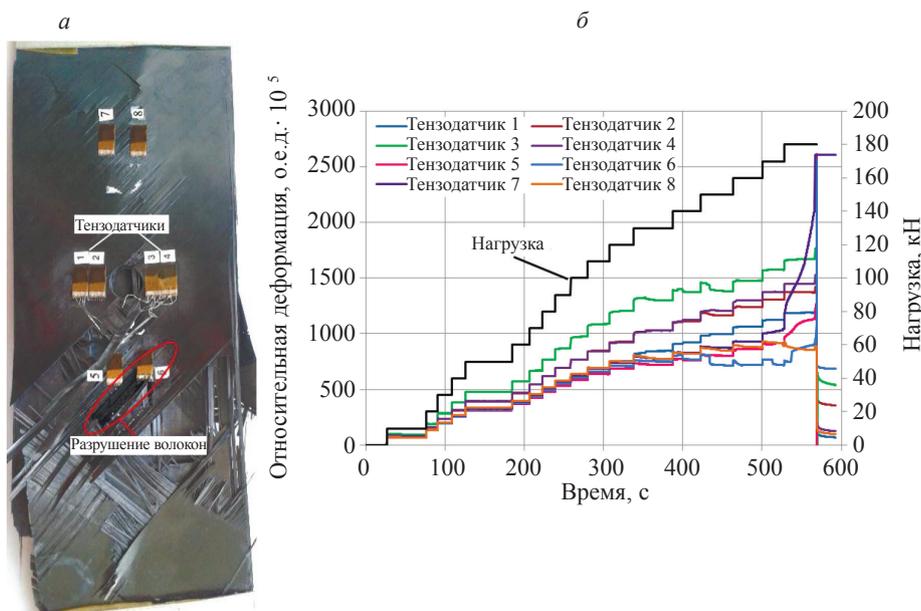


Рис. 6. Внешний вид образца из углепластика T700 (а) после испытаний; зависимости деформаций и нагрузки от времени, полученные при нагружении образца (б).

нагружения. С нагрузки $P = 130$ кН отмечалось уменьшение регистрируемой деформации (рис. 6б), что характеризовало начало процесса разрушения материала углепластика.

Как показали результаты испытаний, наибольшие деформации были зарегистрированы тензодатчиками 1—4, расположенными в области концентратора напряжений. При этом максимальные значения деформаций наблюдались у тензодатчика 3 (см. рис. 6б), а после испытаний под ним визуально были выявлены разрушения как верхних, так и нижних монослоев углепластика (см. рис. 6а).

Начиная с нагрузки $P = 50$ кН, значения деформаций, зарегистрированных тензодатчиками 5—8, расположенными в верхней и нижней частях образца, были более чем в два раза меньше по сравнению с показаниями тензодатчиков 2—4, так как располагались дальше от концентратора напряжений. После превышения нагрузки $P = 140$ кН деформации в области наклейки тензодатчика 6 снижались до 0,0072 относительных единиц деформации (о.е.д) (см. рис. 6б). Визуальный осмотр образца после испытаний показал, что волокна, на которых был наклеен тензодатчик 6, разрушились (см. рис. 6а, б). Тензодатчик 5 был расположен на неразрушенных волокнах, поэтому при нагружении образца деформации увеличивались при повышении нагрузки.

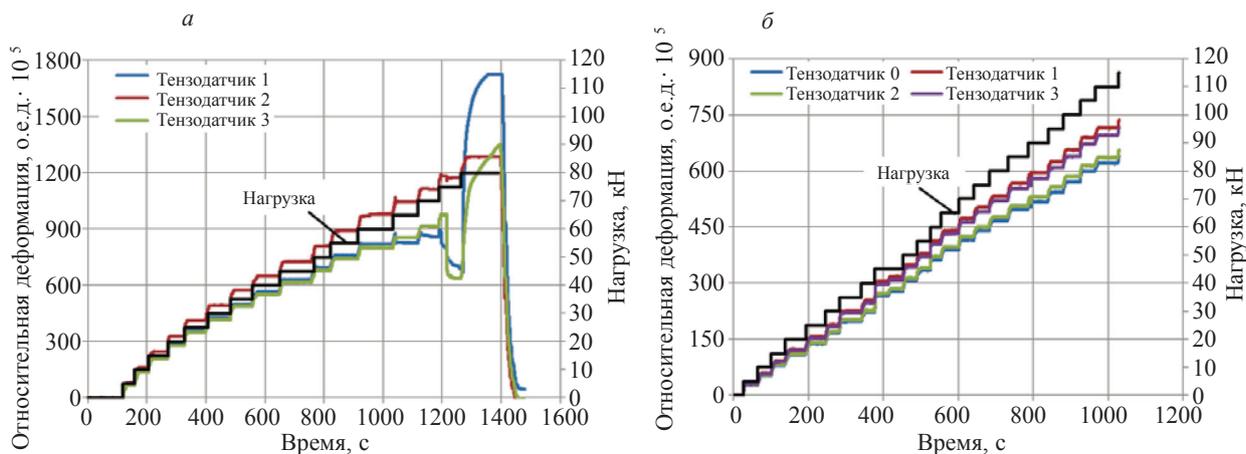


Рис. 7. Экспериментальные зависимости деформаций от времени, зарегистрированные в образцах из углепластиков: T800 (а) и АСМ (б).

Однако деформации в области наклейки тензодатчиков 7 и 8 перестали изменяться при достижении нагрузки $P = 170$ кН, что соответствовало разрушению монослоя и данных тензодатчиков (см. рис. 6б). Таким образом, при нагружении образца из углепластика Т700 происходило его разрушение не только в области концентратора напряжений, но и на отдельных участках верхних монослоев рабочей зоны.

По результатам измерения деформаций от времени в образце из углепластика Т800 установлено, что после нагрузки $P = 60$ кН в этой зависимости возникали нелинейности (рис. 7а). В зоне наклейки тензодатчиков Т1 и Т3 (см. рис. 1б) эти нелинейности наблюдались раньше, чем в зоне наклейки тензодатчика Т2, расположенного вблизи концентратора напряжений. При выдержке нагрузки происходили резкие изменения деформаций как в сторону их увеличения, так и уменьшения.

В случае появления расслоения в углепластике Т800 непосредственно под тензодатчиком, он выходил из работоспособного состояния, что характеризовалось резким изменением деформаций (см. рис. 7а). При статическом нагружении образцов из углепластика АСМ наблюдалось отсутствие нелинейного изменения деформаций от времени в области наклейки тензодатчиков (рис. 7б).

ВЫВОДЫ

1. Показано, что при использовании основных информативных параметров (энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$) определялись типы дефектов [12]. В образцах из углепластиков Т700, Т800 после приложения нагрузки, составляющей (18—20) % от максимальной, наблюдалось разрушение волокон и растрескивание матриц. Для получения таких же разрушений в образцах из углепластика АСМ была необходима нагрузка, составляющая более 50 % от максимальной.

2. Анализ шлифов, изготовленных из зон локации сигналов АЭ образцов, выполненных из углепластиков Т700, Т800, АСМ, позволил определять начало зарождения дефектов типа растрескивания матрицы и разрушения волокон на основании анализа основных информативных параметров сигналов АЭ [12]. Данный подход к определению типа разрушения углепластиков позволит по информативным параметрам сигналов АЭ осуществлять контроль дефектов композиционных конструкций ответственного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсук В.Е., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. Акустико-эмиссионный контроль дефектов при статических испытаниях конструкций композиционного самолета // Контроль. Диагностика. 2018. № 4. С. 14—19.
2. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолета семейства МС-21 // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14. № 4(2). С. 686—693.
3. Масхидов В.В., Кашарина Л.А., Смирнов О.И., Яковлев Н.О. Построение оптоэлектронной системы встроенного контроля авиационных конструкций, изготовленных с применением полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 1. С. 65—73.
4. Смотров С.А. Отработка технологии обнаружения и регистрации малозаметных ударных повреждений на конструкции летательного аппарата из полимерных композиционных материалов с помощью ударочувствительного индикаторного покрытия // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 2. С. 14—19.
5. Фейгенбаум Ю.М., Миколайчук Ю.А., Метелкин Е.С., Батов Г.П. Место и роль неразрушающего контроля в системе поддержания летной годности композиционных конструкций // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 9. С. 71—82.
6. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 187. С. 83—91.
7. Builo S.I. Statistical Models for Qualitative Evaluation of the Distortion of the Amplitude Distributions of Acoustic Emission Pulses and for Increasing the Reliability of Acoustic Emission Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1996. V. 5. P. 353—360.
8. Lehmann M., Bueter A., Schwarzaup O. Structural health monitoring of composite aerospace structures with acoustic emission // Journal of Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 172—193.
9. Madaras E. Underscore the NASA role in the development of the nondestructive testing of the composite // NASA Langley research center, scientific department of non-destructive testing of structures and materials. Gempton /VA2368 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cs.edu/~mln/ltrs/NASA-2001-ahsiss-eim.pdf>

10. *Sikdar S., Mirgl P., Bantrjee S., Ostachowicz W.* Damage-induced acoustic emission source monitoring in a honeycomb sandwich composite structure // *Composites Part B*. V. 158. 2019. P. 179—188.
11. *Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю.* Использование метода акустической эмиссии при неразрушающем контроле объектов транспортного машиностроения // *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*. 2022. № 2. С. 22—34.
12. *Степанова Л.Н., Батаев В.А., Лапердина Н.А., Чернова В.В.* Акустико-эмиссионный способ определения типа дефекта структуры образца из углепластика / Патент 2676209 РФ, МПК С. 9 G 01 N 29/14. Заявитель и патентообладатель Сибирский государственный университет путей сообщения. № 2017145888. Заявл. 25.12.2017. Оpubл. 26.12.18. Бюл. № 10.
13. *Степанова Л.Н., Батаев В.А., Чернова В.В.* Определение связи структуры образцов из углепластика с параметрами сигналов акустической эмиссии при одновременном статическом и тепловом нагружении // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 11. С. 4—13.
14. *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.
15. *Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Батаев В.А., Чернова В.В.* Анализ зависимости параметров сигналов акустической эмиссии от изменения структуры углепластика при прочностных испытаниях образцов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2019. № 2. С. 58—65.
16. *Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В.* Проблемы локации источников акустической эмиссии // *Дефектоскопия*. 2021. № 9. С. 35—44.